

LUIZ MAURÍCIO VALENTE TIGRINHO

**INFLUÊNCIA DA LUBRIFICAÇÃO NA ESTAMPAGEM VIA
ANÁLISE DAS DEFORMAÇÕES OBTIDAS EM UMA
CHAPA DE AÇO DE ALTA ESTAMPABILIDADE**

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, PhD.

Curitiba
2005

***Aos meus pais Francisco
A. Tigrinho (in memorian) e
Maria Conceição V. Tigrinho,
minha esposa Eliza Schiavon,
meus filhos Camila e Pedro
Henrique, meus irmãos
e meus sobrinhos.***

AGRADECIMENTOS

- À Deus, que me possibilitou realizar este trabalho;
- À minha esposa Eliza que nunca deixou de me apoiar;
- Aos meus filhos Camila e Pedro Henrique, os quais foram privados de muitos momentos em nossas vidas, para que eu concluísse mais essa etapa;
- Ao meu Pai Francisco, apesar de não estar presente, mas com certeza muito feliz, e minha Mãe Maria da Conceição, que muito se esforçaram para que eu pudesse estudar;
- Aos meus irmãos João, Marcos, Consuelo e Ana que, igualmente aos meus pais, ajudaram-me a chegar até aqui;
- A Tia Maria José que muito contribuiu aos meus estudos;
- À toda minha família, pelo apoio e incentivo;
- Ao Professor Paulo Victor Prestes Marcondes, pela orientação e auxílio prestados durante a realização deste trabalho;
- Aos colegas Ravilson Antônio Chemin Filho e Ricardo Adriano dos Santos, pela ajuda na realização dos ensaios de laboratório;
- Ao colega João Carlos Boscardin (Mini), da empresa IPE Aeronaves, pelo fornecimento do poliuretano;
- Ao amigo Geraldo Schiavon pelo incentivo, confiança e valorização dos meus trabalhos.

SUMÁRIO

LISTA DE SÍMBOLOS	vi
LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xiii
RESUMO	xiv
ABSTRACT	xvi
1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 Propriedades mecânicas	20
2.1.1 Ensaio de tração	20
2.1.2 Coeficiente de encruamento	24
2.1.3 Anisotropia e R de Lankford.....	25
2.2 Testes tecnológicos.....	30
2.2.1 Introdução	30
2.2.2 Curva Limite de Conformação (CLC)	35
2.2.3 Determinação da curva limite de conformação	37
2.2.4 Análise de deformações para a determinação da CLC.....	39
2.3 Lubrificantes e lubrificação	40
2.3.1 Generalidades.....	40
2.3.2 Mecanismo lubrificante	41
2.3.2.1 Lubrificação hidrodinâmica	42
2.3.2.2 Lubrificação limite	42
2.3.2.3 Lubrificação extrema pressão (EP).....	43
2.3.3 Categorias.....	44
2.3.3.1 Óleos puros	44
2.3.3.2 Óleos emulsionáveis em água.....	47
2.3.3.3 Sintéticos	48
2.3.3.4 Filmes secos.....	49
2.3.4 Seleção do lubrificante.....	52
2.3.4.1 Projeto da ferramenta	52
2.3.4.2 Material da peça	53

2.3.4.3 Compatibilidade com o pós processo	54
2.3.4.4 Aspectos regulatórios	54
2.3.5 Quando lubrificar.....	55
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	59
3.1 Generalidades	59
3.2 Material utilizado	59
3.3 Análise química	60
3.4 Ensaio metalográfico	60
3.5 Ensaio de tração.....	61
3.6 Ensaio de estampagem Nakazima	64
3.7 Ensaio de rugosidade.....	72
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	73
4.1 Análise química	73
4.2 Ensaio metalográfico	74
4.3 Ensaio de tração.....	76
4.4 Ensaio de estampagem Nakazima sem lubrificação	80
4.5 Ensaio de estampagem Nakazima com lubrificação	84
4.6 Perfil de distribuição das deformações.....	93
4.7 Perfil de redução da espessura.....	100
4.8 sidades da chapa metálica e do punção	102
5 CONCLUSÕES	105
6 TRABALHOS FUTUROS.....	107
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	108
NORMAS TÉCNICAS	113

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da seção transversal
A_0	Área inicial
A_l	Alongamento máximo
Al	Alumínio
B	Bóro
C	Carbono
Cr	Cromo
cSt	Centistokes
Cu	Cobre
D_0	Diâmetro máximo do corpo de prova
D_{01} e D_{02}	Diâmetro inicial do círculo
D_{f1}	Diâmetro maior da elipse
D_{f2}	Diâmetro menor da elipse
D_m	Diâmetro médio do corpo de prova
$D_{\text{máximo}}$	Diâmetro máximo do corpo de prova
$D_{\text{mínimo}}$	Diâmetro mínimo do corpo de prova
d_p	Diâmetro do punção
e	Deformação convencional
E	Módulo de elasticidade ou módulo de Young
EP	Extrema Pressão
e_1	Maior deformação convencional
e_2	Menor deformação convencional
e_3	Deformação convencional no sentido da espessura
g/cm^3	Gramas por centímetro cúbico
Fe_3C	Cementita precipitada
in	Inch
K	Constante plástica de resistência
L	Comprimento após alongamento
l_0	Comprimento inicial
L_0	Comprimento antes do alongamento
LE	Limite de escoamento

l_f	Comprimento final
$\ln$	Logaritmo natural
LR	Limite de resistência à tração
mm	Milímetro
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
MoS_2	Bissulfeto de Molibdênio
n	Coeficiente de encruamento por deformação
Nb	Nióbio
Ni	Níquel
P	Fósforo
P	Carga ou força
Pb	Chumbo
P_f	Carga de ruptura
R	Coeficiente de anisotropia de Lankford
Ra	Rugosidade média
Rq	Rugosidade média quadrática
Ry	Rugosidade total
Rz	Distância média entre os cinco picos mais altos e os cinco vales mais profundos
R_{0°	Coeficiente de anisotropia a 0° da direção de laminação
R_{45°	Coeficiente de anisotropia a 45° da direção de laminação
R_{90°	Coeficiente de anisotropia a 90° da direção de laminação
$\bar{R}$	Anisotropia média
S	Enxofre
Si	Silício
Sn	Estanho
Ti	Titânio
T_o	Espessura inicial da chapa
T_f	Espessura final da chapa
V	Vanádio
w_o	Largura inicial

w_f	Largura final
ΔR	Anisotropia planar
ε	Deformação verdadeira
ε_1	Deformação verdadeira maior
ε_2	Deformação verdadeira menor
ε_3	Deformação verdadeira no sentido da espessura
ε_t	Deformação na espessura
ε_w	Deformação na largura
μ	Coeficiente de atrito
μm	Mícron metro
σ	Tensão verdadeira
σ_f	Limite de ruptura
σ_r	Limite de resistência
$^{\circ}C$	Graus Celsius
%	Por cento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASTM	American Society for Testing and Materials
CCV	“Conical Cup Value”
CLC	Curva Limite de Conformação
DIN	Deutsche Industrie Normen
DLC	Diagrama limite de conformação
IDDRG	International Deep Drawing Research Group
LDR	“Limit drawing ratio”
NBR	Norma Brasileira
PVC	Policloreto de vinila
RCD	Razão Crítica dos Diâmetros
UFPR	Universidade Federal do Paraná

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Curva Tensão x Deformação de engenharia – Dieter, 1996.....	20
Figura 2.2 – Comparação entre as curvas tensão x deformação verdadeira e convencional – Hosford et al, 1993.	22
Figura 2.3 – A curva tensão x deformação verdadeira – Keeler, 1968.....	24
Figura 2.4 – Cálculo do valor de n – Keeler, 1968	25
Figura 2.5 – Esquema mostrando o modo de medir o valor R de Lankford – Hosford, 1993.....	27
Figura 2.6 – Método de amostragem para obtenção de R médio e ΔR – Hosford, 1993	28
Figura 2.7 – Estado de deformações atuantes no copo durante o embutimento profundo – Bresciani, 1997	31
Figura 2.8 – Variação da espessura ao longo do copo embutido – Slater, 1997....	31
Figura 2.9 – Operação de embutimento profundo, mostrando a região de deformação e forma de ruptura – Keeler, 1968.....	32
Figura 2.10 – Operação de estiramento, mostrando a região de deformação e forma de ruptura – Keeler, 1968	32
Figura 2.11 – Diagrama Limite de Conformação – modos de deformação para uma malha circular – Lange, 1993	36
Figura 2.12 – Ferramental utilizado para execução do ensaio Nakazima – Richter, 2003	38
Figura 2.13 – Curva limite de conformação segundo o método Nakazima – Usiminas, 1999	38
Figura 2.14 – Esquema da barreira lubrificante isolando a superfície da ferramenta da superfície da chapa metálica – Keeler, 2001.	41
Figura 2.15 – Profundidade de conformação de chapas de alumínio para diferentes lubrificantes – Jeffery, 2003.....	50
Figura 2.16 – Resultados do teste de conformação por estiramento “Interlaken” para diferentes lubrificantes – Jeffery, 2003.....	51
Figura 2.17 – Zonas de deformação na CLC – Keeler 2001	51

Figura 2.18 – Demanda de atrito nas diferentes regiões (flange, raio da matriz e raio do punção), conforme o modo de deformação.....	55
Figura 2.19 – Ruptura no raio do punção no modo de deformação por embutimento – Keeler, 2000.	56
Figura 2.20 – Lubrificação eficiente no estiramento a ruptura ocorre próxima ao pólo – Hosford, 1993.....	57
Figura 2.21 – Lubrificação inadequada no estiramento a ruptura ocorre afastada do pólo, com picos de deformação – Keeler, 2000.	57
Figura 2.22 – Perfis de distribuição das deformações, com e sem lubrificação do punção – Keeler 1968.....	58
Figura 3.1 – Desenho do corpo de prova para o ensaio de tração.....	62
Figura 3.2 – Ferramenta utilizada no ensaio de estampagem Nakazima.....	64
Figura 3.3 – Desenho dos corpos de prova utilizados no ensaio de estampagem Nakazima para o levantamento da CLC.....	66
Figura 3.4 – Elipses e círculos formados após a deformação do material.....	69
Figura 3.5 – Gabarito com resolução de 0,1mm, para medição dos diâmetros das elipses ou círculos, formados após a estampagem.....	70
Figura 3.6 – Corpo de prova ilustrando os pontos de medição das deformações maior e menor, para levantamento da CLC	71
Figura 3.7 – Corpo de prova ilustrando os pontos de medição das deformações, desde o raio da matriz até o pólo do punção	71
Figura 4.1 – Metalografia da secção longitudinal da chapa, aumento de 200x	74
Figura 4.2 – Metalografia da secção longitudinal da chapa, aumento de 500x, mostrando a espessura do revestimento	75
Figura 4.3 – Gráfico Tensão x Deformação do aço DC 06.....	80
Figura 4.4 – Curva Limite de Conformação do aço DC 06 sem lubrificação do punção.	81
Figura 4.5 – Corpos de prova estampados com punção hemisférico (raio de 50mm) sem lubrificação do punção, para a obtenção da CLC do aço DC 06.....	82
Figura 4.6 – Corpos de prova com dimensões de 200x200mm, estampados com punção hemisférico (raio de 50mm) com diferentes lubrificantes,	

para comparação com a CLC do aço DC 06 sem lubrificação do punção. CP01 - óleo mineral e óleo vegetal com aditivos EP, CP02 - fluido sintético emulsionável, CP03 - fluido sintético “prelube”, CP04 - filme de PVC e CP05 - filme de poliuretano.....	85
Figura 4.7 – Diagrama limite de conformação – comparação entre a CLC obtida sem lubrificação do punção e os pontos de máxima deformação atingidos com óleo mineral + óleo vegetal com aditivos de extrema pressão.	86
Figura 4.8 – Diagrama limite de conformação – comparação entre a CLC obtida sem lubrificação do punção e os pontos de máxima deformação atingidos com um fluido sintético emulsionável (1:2) como lubrificante.....	87
Figura 4.9 – Diagrama limite de conformação – comparação entre a CLC obtida sem lubrificação do punção e os pontos de máxima deformação atingidos com um fluido sintético “prelube” biodegradável como lubrificante.....	88
Figura 4.10 – Diagrama limite de conformação – comparação entre a CLC obtida sem lubrificação do punção e os pontos de máxima deformação atingidos com um filme de PVC utilizado como lubrificante	89
Figura 4.11 – Diagrama limite de conformação – comparação entre a CLC obtida sem lubrificação do punção e os pontos de máxima deformação atingidos com poliuretano utilizado como lubrificante	90
Figura 4.12 – Filme de poliuretano contínuo (sem rupturas), mesmo após a estampagem da chapa de aço DC 06.....	91
Figura 4.13 – Curva Limite Conformação final da chapa de aço DC 06, obtida sem lubrificante e com poliuretano.	92
Figura 4.14 – Distribuição das deformações desde o raio da matriz até o pólo do punção, no corpo de prova de 200x200mm, estampado sem lubrificação do punção	94
Figura 4.15 – Distribuição das deformações desde o raio da matriz até o pólo do punção, no corpo de prova de 200x200mm, estampado com uma	

combinação de óleos mineral e vegetal com aditivos de extrema pressão	95
Figura 4.16 – Distribuição das deformações desde o raio da matriz até o pólo do punção, no corpo de prova de 200x200mm, estampado com fluido sintético emulsionável	95
Figura 4.17 – Distribuição das deformações desde o raio da matriz até o pólo do punção, no corpo de prova de 200x200mm, estampado com fluido sintético “prelube”	96
Figura 4.18 – Distribuição das deformações desde o raio da matriz até o pólo do punção, no corpo de prova de 200x200mm, estampado com filme de PVC.....	96
Figura 4.19 – Ruptura afastada do pólo, no corpo de prova de 200x200mm, quando utilizou os lubrificantes: óleo mineral e óleo vegetal com aditivos de extrema pressão, fluido sintético emulsionável, fluido sintético “prelube” e filme de PVC.....	97
Figura 4.20 – Distribuição das deformações desde o raio da matriz até o pólo do punção, no corpo de prova de 200x200mm, estampado com filme de poliuretano	98
Figura 4.21 – Ruptura próxima ao pólo com o uso de um filme de poliuretano no corpo de prova de 200x200mm.....	99
Figura 4.22 – Perfil de redução da espessura desde o raio da matriz até o pólo do punção, no corpo de prova de 200x200mm, estampado sem lubrificação	101
Figura 4.23 – Perfil de redução da espessura desde o raio da matriz até o pólo do punção, no corpo de prova de 200x200mm, estampado com poliuretano	101

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Quantidade de corpos de prova necessários para o ensaio de tração	63
Tabela 3.2 – Quantidade de corpos de prova necessários para o ensaio de estampagem	67
Tabela 4.1 – Composição química em %, segundo a norma DIN EN 10152 e resultante do ensaio de análise química do material	73
Tabela 4.2 – Comparativo das propriedades mecânicas LR, LE e AI, do aço DC 06, segundo a norma DIN EN 10152 e através dos ensaios de tração	76
Tabela 4.3 – Parâmetros de estampagem R , n , $\bar{R}$ e ΔR , do aço DC 06, segundo a norma DIN EN 10152 e através dos ensaios de tração.	77
Tabela 4.4 – Valores de rugosidades medidos em μm , na chapa metálica DC 06 e no punção hemisférico	103

RESUMO

Para se obter êxito na estampagem de chapas metálicas, deve-se levar em consideração algumas variáveis, tais como: propriedades do material, coeficientes de encruamento e anisotropia, geometria da ferramenta, lubrificação na interface punção – chapa metálica, velocidade de conformação, entre outras. Sendo que todas estas variáveis estão inter-relacionadas. Neste trabalho estudou-se a influência de vários lubrificantes no processo de estampagem, que é muito difícil de prognosticar, por isso a avaliação é feita através de tentativa e erro, pois um lubrificante excelente em uma operação de estampagem pode não ser bom para outra. Inicialmente, para se conhecer melhor o material da chapa metálica com o qual se estava trabalhando, o aço DC 06, foram determinadas algumas propriedades, como coeficientes de encruamento e anisotropia através do ensaio de tração, microconstituintes presentes no aço pelo ensaio de análise química, direção de laminação e estrutura através do ensaio de metalografia. Na seqüência foram realizados os ensaios de estampagem Nakazima com os propósitos de caracterizar por completo o material e gerar uma base comparativa para os testes subseqüentes, através da CLC (Curva Limite de Conformação) obtida inicialmente sem lubrificação do punção e posteriormente com o uso de lubrificação, visando isolar as superfícies da chapa metálica e do punção, para elevar os níveis de deformação do material no modo de deformação por estiramento. Os lubrificantes utilizados foram desde os líquidos, como óleo mineral e vegetal com aditivos de extrema pressão e fluidos sintéticos, até os filmes sólidos de PVC (policloreto de vinila) e poliuretano. Em seguida foi obtido o perfil de distribuição das deformações e o perfil de redução da espessura, desde o raio da matriz até o pólo do punção, além da análise da posição da fratura, que juntamente com a CLC obtida são indícios de que se a lubrificação foi eficiente, principalmente no modo de deformação por estiramento onde ela é desejável. Como principais resultados obtidos, pode-se dizer que o aço DC 06 é realmente um aço de alta estampabilidade, demonstrado através dos coeficientes de encruamento ($n=0,2641$) e anisotropia ($R=2,6766$) e dos altos níveis de deformação no embutimento profundo ($\epsilon_1=0,81$ e $\epsilon_2=-0,48$), estado plano de deformação ($\epsilon_1=0,44$ e $\epsilon_2=0$) e estiramento ($\epsilon_1=0,53$ e $\epsilon_2=0,48$). Quanto aos lubrificantes, pode-se afirmar

que o filme sólido de poliuretano teve o melhor desempenho, entre os cinco lubrificantes avaliados, pois promoveu um aumento de 37% na deformação máxima menor (ϵ_2) na chapa metálica, além de apresentar um perfil homogêneo da distribuição das deformações ϵ_1 , ϵ_2 e ϵ_3 (deformação na espessura), que mostrou-se crescente desde o raio da matriz até o pólo do punção, inclusive onde ocorreu a ruptura da chapa metálica, com valores da deformação menor ($\epsilon_2=0,48$) muito próximos da deformação maior ($\epsilon_1=0,53$).

ABSTRACT

Successful in the steel sheets stamping, have to consider some variables: the forming characteristics of the material, strain hardening exponent (n) and anisotropy (R), punch and die design, lubrication of the punch and steel sheet, stamping velocity and many other factors. The present work, evaluated the influence of various lubricants in the DC 06 steel formability. Thus, it must be evaluated on a trial and error basis. An excellent lubricant for one stamping may turn out to be a poor lubricant for another stamping. The first step, was to determine the properties of the steel DC 06: strain hardening exponent and anisotropy through of the tensile tests, chemical composition of the material (in wt. %) was analyzed by an emission spectrometer, and grain size for optical microscopy procedures of standard metallographic practice. Was made the FLD (Forming Limit Diagram), through of the Nakazima's procedure test without lubrication. The tests were repeated applying different lubricants, in order to increase the minor strain (ϵ_2). The effect of each lubricant were evaluated by comparison to the Forming Limit Diagram without lubricant. The lubricants utilized were oil mineral and vegetable with additives of extreme pressure, synthetic prelube, synthetic water emulsifiable, dry film of polyvinyl chloride (PVC) and dry film of poly-urethane. Was obtained the perfile distribution strain, since the rim until the pole of the punch, and the location of the failure, what together with the Forming Limit Diagram, demonstrated if the lubrication was effective. The main results obtained, the steel DC 06 it is a high conformability steel, demonstrated through of the strain hardening exponent ($n=0,2641$) and anisotropy ($R=2,6766$), and high strain in the deep drawing ($\epsilon_1=0,81$ and $\epsilon_2=-0,48$), plain strain ($\epsilon_1=0,44$ and $\epsilon_2=0$) and biaxial stretching ($\epsilon_1=0,53$ and $\epsilon_2=0,48$). The best performance amongst the five lubricants evaluated, was of the dry film of poli-urethane, because advanced a increase of 37% in the minor strain (ϵ_2) in the steel sheet, beyond of to advance a perfile of the distribution strain uniform, wath increased since the rim until the pole of the punch, where failed o the steel sheet, with values of the minor strain ($\epsilon_2=0,48$) next of the major strain ($\epsilon_1=0,53$).

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

A estampagem tem por finalidade a fabricação de peças a partir de chapas planas. Este processo tem como um dos seus maiores usuários a indústria automobilística, de eletrodomésticos, entre outras, em que a competitividade existente faz com que se procure a redução de tempos e custos durante este processo de fabricação.

Para otimização do processo, uma compreensão da conformabilidade de chapas metálicas é essencial para a produção de estampados de qualidade. Planejadores de processo e projetistas de ferramentas devem determinar o nível de conformabilidade requerido para cada peça a ser estampada, para que então possam ter certeza de conhecer o nível de conformação do material que utilizam.

A conformabilidade de chapas metálicas é difícil de ser prognosticada, uma vez que não existe um único parâmetro que permite sua avaliação para um dado material, de forma que estas condições sejam asseguradas para as diversas condições de produção e diferentes estampos que utilizam a mesma matéria-prima. Um material pode ser facilmente conformável em uma determinada ferramenta, com um certo lubrificante, sob certas condições de trabalho, ao passo que pode romper quando utilizado em outra ferramenta com diferente configuração.

Durante o “tryout” (teste) de ferramentas de estampagem, mudanças são freqüentemente necessárias, desde ajustes no “design” (projeto) de matrizes e punções, troca de lubrificantes e até a escolha de um novo material com melhor estampabilidade, a fim de se atingir o grau de satisfação esperado para o produto.

Todas essas ações, no entanto, elevam os custos, o que mostra a necessidade de uma melhor avaliação das chapas metálicas juntamente com os parâmetros em questão a serem utilizados, como uma forma de se evitar perdas provocadas pelo conhecimento insuficiente das reais condições de deformação a que os materiais podem ser submetidos.

Quando uma peça rompe ou apresenta uma redução excessiva em sua espessura, durante um processo de estampagem, muitos na tentativa de solucionar

este problema, adicionam mais lubrificante. Porém esta solução nem sempre é a mais correta. Isto ocorre porque a lubrificação ainda é estudada e entendida por poucos.

Desta forma, procura-se cada vez mais pesquisar a influência da lubrificação, permitindo as indústrias conhecer melhor esta variável e entender a estampabilidade das chapas utilizadas que, em parte, pode garantir que as peças produzidas serão estampadas sem maiores problemas. A identificação, por exemplo, se ocorrerá estiramento e/ou embutimento profundo em determinada região da peça durante o processo de conformação pode garantir a otimização do processo de estampagem através da melhoria da geometria das ferramentas, com ou sem o uso de lubrificantes, evitando até a substituição de um material por outro de melhor estampabilidade.

A curva limite de conformação do material, obtida a partir do ensaio de estampagem de Nakazima, corresponde ao lugar geométrico dos pontos de máxima deformação de uma chapa submetida a processos de conformação por embutimento, estado plano de deformação e estiramento. Esta prevê a máxima deformação que o material sofre até o instante em que ocorre a ruptura, de forma que o seu conhecimento é de fundamental importância para que o processo de estampagem em escala industrial não exceda um percentual de deformação seguro e, assim, garanta a qualidade da peça final sem que ocorra falha.

Com esta finalidade, o trabalho em questão tem por objetivos avaliar e analisar a influência de lubrificantes sólidos e líquidos no processo de estampagem, utilizando a Curva Limite de Conformação (CLC) de chapas metálicas do aço DC 06, bem como avaliar o perfil de distribuição das deformações atingidos com a utilização desses lubrificantes. Caracterizar o DC06 como um aço de alta estampabilidade, através dos ensaios de análise química, metalográfico, tração e estampagem.

Pela análise comparativa entre a CLC levantada segundo o método originalmente proposto por Nakazima, com punção hemisférico, e as deformações atingidas através dos ensaios com os diferentes lubrificantes, observa-se de que forma cada lubrificante empregado nos ensaios influencia a estampabilidade do material em questão. Visando-se aumentar a deformação máxima menor, devido a uma deformação mais homogênea, suavizando ou até mesmo eliminando os picos

de deformação, verificando com isso, quais lubrificantes oferecem a possibilidade de deslocar os pontos à direita da curva limite de conformação, no modo de deformação por estiramento.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Propriedades Mecânicas

2.1.1 Ensaio de tração

Schaeffer (1999) define o ensaio de tração como sendo um teste uniaxial e sem atrito, efetuado em máquinas de ensaios que possuem uma garra fixa e outra móvel, a fim de pegar e esticar o corpo de prova. Estas máquinas são equipadas com sensores para registrar a força e o alongamento do corpo de prova.

Segundo Dieter (1996), o teste de tração de engenharia é amplamente usado para obtenção de informações básicas sobre a resistência de materiais, e como um teste de controle de especificações. O resultado deste ensaio de tração é o diagrama Tensão x Deformação, figura 2.1, que corresponde a uma curva de engenharia construída a partir das medidas de carga e da elongação da amostra submetida ao ensaio. A tensão usada na curva é a tensão longitudinal média do corpo de prova, obtida pela divisão da carga pela área inicial da seção do corpo de prova, e a deformação usada para a curva de engenharia é a deformação linear média, obtida pela divisão da elongação do comprimento útil do corpo de prova, pelo comprimento original.

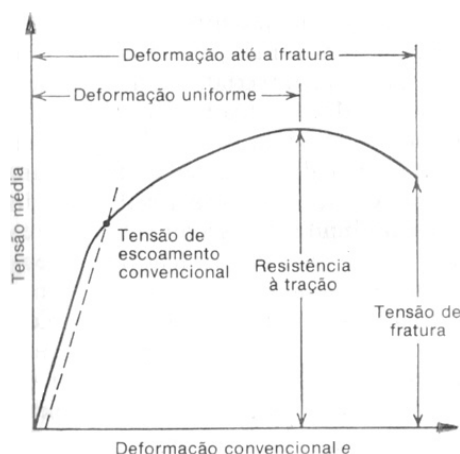


Figura 2.1 – Curva Tensão x Deformação de engenharia - Dieter, 1996.

Através do ensaio de tração, segundo Lorenz et al (1998), é possível determinar as propriedades mecânicas de chapas metálicas, como a obtenção do limite de resistência, limite de escoamento, alongamento percentual uniforme, grau de encruamento e índice de anisotropia, que são parâmetros influentes no desempenho de materiais durante as operações de conformação.

Kuzman (2000) no desenvolvimento do seu trabalho, fez a caracterização dos materiais das chapas metálicas através do ensaio de tração com corpos de prova no formato “gravata”. Determinou a tensão de escoamento, tensão máxima, coeficientes de encruamento e anisotropia e deformação de engenharia.

Dieter (1996) descreve o comportamento do material quando este ultrapassa o valor correspondente ao limite de escoamento. A partir deste ponto, o material está permanentemente deformado se a carga for reduzida a zero, de forma que a tensão para produzir cada vez mais deformação plástica cresce com o aumento desta última, devido ao encruamento do material. O volume do corpo de prova permanece constante durante a deformação plástica e, conforme se alonga, a área da seção reta transversal decresce uniformemente ao longo do comprimento útil do corpo de prova. Inicialmente o encruamento compensa a diminuição da área da seção reta transversal, e a tensão de engenharia continua a aumentar com o aumento da deformação. Eventualmente, atinge-se um ponto onde a diminuição da área da seção reta do corpo de prova é maior que o aumento da carga de deformação proveniente do encruamento, começará a formar um pescoço e a se afinar localizadamente. Devido ao fato da área da seção reta diminuir agora mais rapidamente do que o aumento da carga de deformação pelo encruamento, a carga necessária para deformar o corpo de prova diminuirá e a tensão de engenharia igualmente continuará a cair até atingir a fratura.

A curva tensão x deformação convencional (ou de engenharia) 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 estricção. Isto ocorre porque a tensão convencional reflete somente a mudança de carga e não a mudança que ocorre na área da secção transversal.

Após o início da estrição, toda deformação fica restrita a uma porção muito pequena do comprimento útil – a área de estrição. Para a estrição 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 estrição começa, a carga requerida para manter a deformação decresce, portanto a curva tensão x deformação começa a descer. Se medidas pudessem ser feitas para elementos independentes do material dentro da região de estrição, a tensão requerida para continuar a deformação aumentaria, figura 2.2.

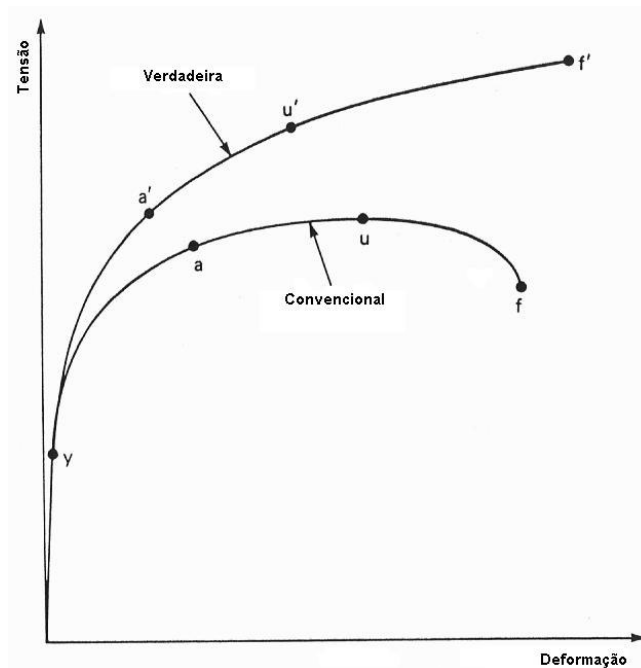


Figura 2.2 – Comparação entre as curvas tensão x deformação verdadeira e convencional – Hosford et al, 1993.

Um modo mais realista de descrever o comportamento do material é compilar a tensão verdadeira (σ) 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:

$$\sigma = P / A \quad (2.1)$$

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

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.

Quando um corpo metálico é submetido a um ensaio de tração, verifica-se inicialmente que o diagrama é linear, sendo representado pela equação:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2.3)$$

que corresponde à lei de Hooke (proposta em 1678 por Robert Hooke), sendo a constante de proporcionalidade E , conhecida por módulo de elasticidade ou módulo de Young. Esta porção linear da curva corresponde a região de deformação elástica do material, onde a tensão é linearmente proporcional à deformação.

De acordo com o manual da Usiminas (1999), a equação de Holloman, equação 2.4, que representa a curva tensão x deformação do material para a região de deformação plástica é considerada satisfatória para aços ao carbono (especialmente baixo carbono) e adotada por quase todos os 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 (que correspondem a constante plástica de resistência e ao coeficiente de encruamento por deformação, respectivamente). A equação de Holloman, 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).

$$\sigma = K \varepsilon^n \quad (2.4)$$

De uma maneira geral, pode-se dizer que o ensaio de tração é o principal procedimento de ensaio para o levantamento das propriedades mecânicas fundamentais e parâmetros de estampabilidade de chapas metálicas.

2.1.2 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. A primeira é o coeficiente de encruamento mais conhecido como n . O valor de n determina a habilidade do material de ser estriccionado. A segunda propriedade é o coeficiente de anisotropia, ou R de Lankford. Esta propriedade controla fortemente a habilidade do material de ser embutido dentro de um copo com fundo plano.

Segundo Keeler (1968), um método de observação do valor de encruamento é compilar 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 compilados na figura 2.3 são mostrados na figura 2.4. 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 de Holloman. Desta equação, n é definido como coeficiente de encruamento, sendo que ele determina o aumento de tensão para cada incremento de deformação. Quanto maior o valor de n , mais duro será o material e maior a resistência à estricção.

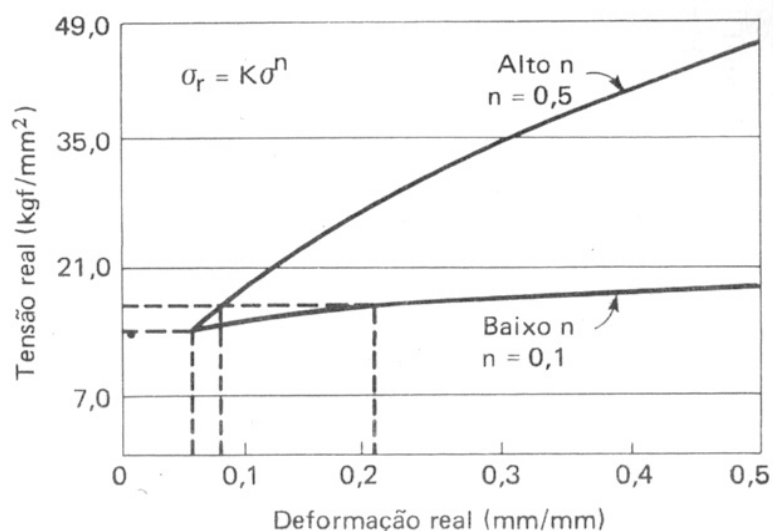


Figura 2.3 - A curva tensão x deformação verdadeira – Keeler, 1968.

Para determinar o valor de n , deve-se reescrever a equação da lei de conservação de energia como:

$$\log \sigma = \log K + n \log \varepsilon \quad (2.5)$$

que representa uma linha reta tendo a equação $y = a + nx$ quando compilado 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.

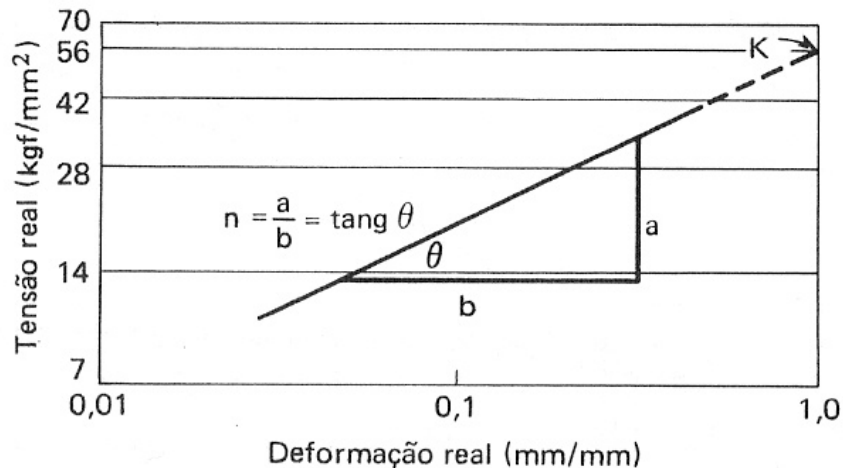


Figura 2.4 - Cálculo do valor de n – Keeler, 1968.

2.1.3 Anisotropia e R de Lankford

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 o ensaio de tração. Esse fenômeno, chamado de 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, também devido ao trabalho mecânico. Um valor útil para se avaliar a anisotropia plástica é o índice de anisotropia R .

De acordo com Keeler (1968), independentemente da sua medida de ductilidade, assume-se comumente que o material é isotrópico, ou seja,

independente da direção em que se realizou a medição dentro da chapa. A transformação do metal de um lingote em uma chapa, e sua subsequente fabricação, agregam a este material vários tipos de direcionalidade, as quais originam a anisotropia de propriedades em quase todos os metais.

Em um material completamente isotrópico, todas as orientações estão presentes em uma base igual, ou seja, não há variação das propriedades mecânicas quando estas são medidas em diferentes direções. 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 a anisotropia plástica, em que as propriedades na direção de laminação são diferentes das direções transversais, de forma que a curva tensão x 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, figura 2.5. Um método de obter R é compilar a deformação na largura (ϵ_w) versus a deformação na espessura (ϵ_t) para várias amostras tracionadas até a estrição. Para a maioria dos materiais comuns de conformação o resultado será uma linha reta. O valor de R é constante e corresponde simplesmente a inclinação da curva.

De acordo com Lorenz et al (1998), 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 o alongamento na direção do comprimento, normalmente na faixa de 15 à 20%. Após conformação, o valor de R é calculado pela expressão:

$$R = \frac{\ln(w_f/w_0)}{\ln(T_f/T_0)} \quad (2.6)$$

onde w_0 e T_0 são a largura e espessura iniciais, e w_f e T_f são a largura e espessuras finais, respectivamente.

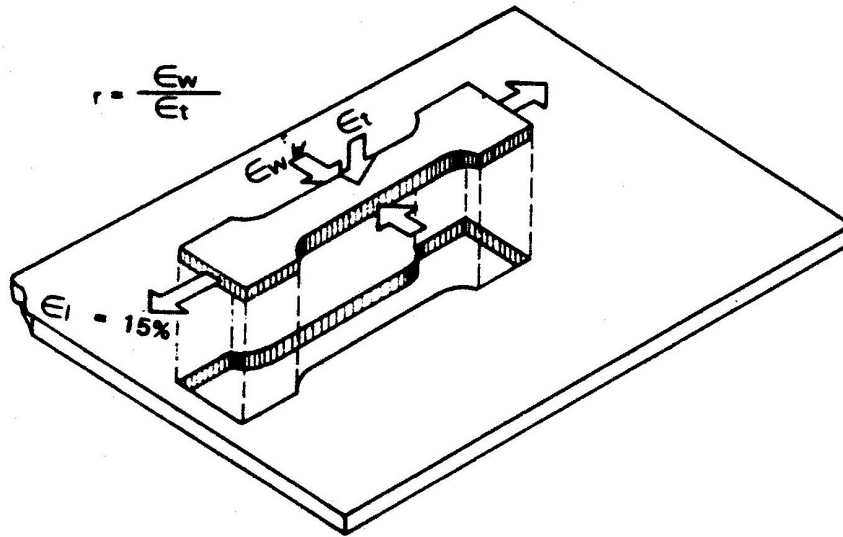


Figura 2.5 – Esquema mostrando o modo de medir o valor R de Lankford – Hosford, 1993.

Muitos erros ocorrem, no entanto, na medição final da espessura das chapas ensaiadas. Considerando-se, porém, o fato de que o volume de material permanece constante durante a deformação plástica, a expressão pode ser reescrita em termos da deformação na largura e no comprimento da amostra, como mostra a equação 2.8, de forma a se eliminar possíveis erros de medidas da deformação na espessura:

$$R = \frac{\ln(w_f/w_0)}{\ln(l_f w_f / l_0 w_0)} \quad (2.7)$$

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

O parâmetro de anisotropia R pode ser obtido para diferentes direções na chapa. Normalmente, amostras são removidas de chapas a 0, 45 e 90 graus 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 2.6, é chamada de anisotropia planar.

A equação matemática da anisotropia planar é:

$$\Delta R = \frac{R_{0^\circ} + R_{90^\circ} - 2R_{45^\circ}}{2} \quad (2.8)$$

Os valores de R podem ser compilados com função do ângulo. Então ΔR é a diferença entre R_{45° e a média dos valores de R_{0° e R_{90° .

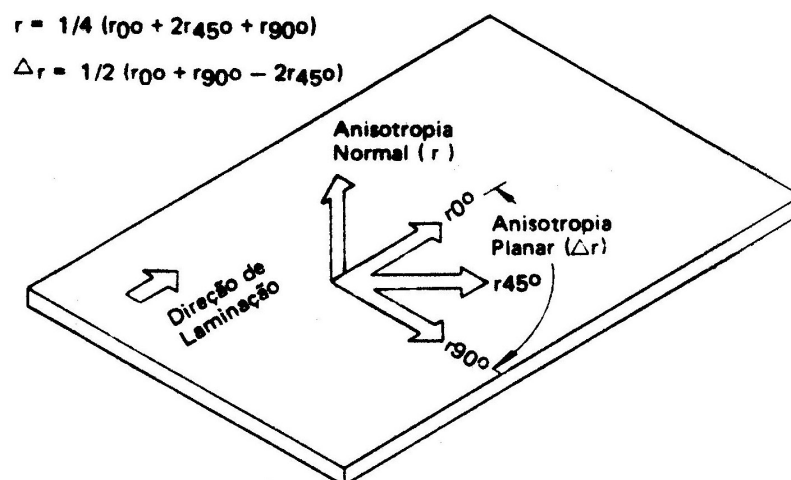


Figura 2.6 – Método de amostragem para obtenção de R médio e ΔR - Hosford, 1993.

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 2.5 e 2.6.

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 através do valor de $\bar{R}$, denominado anisotropia média, sendo dado pela expressão:

$$\bar{R} = \frac{R_{0^\circ} + R_{90^\circ} + 2R_{45^\circ}}{4} \quad (2.9)$$

Infelizmente, um material com uma anisotropia média 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 ΔR com valor zero.

Se 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.

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

Segundo Keeler (1968), um valor alto de $\bar{R}$ indica boa conformabilidade, desde que ΔR seja igual a zero.

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 quantidade desta redução e ajudará a reter a dimensão de espessura mais próxima da original.

Na conformação por estiramento, a influência da anisotropia na capacidade de estiramento é ilustrada por descobertas contraditórias, embora qualquer influência seja pequena comparada ao embutimento. Melhores estudos serão necessários para delinear os efeitos da anisotropia na instabilidade, fratura e distribuição de deformação, no modo de deformação por estiramento, todas as quais contribuem à quantidade total de deformação possível.

2.2 Testes tecnológicos

2.2.1 Introdução

Segundo o fascículo de informações técnicas da Usiminas (1999), essa categoria de teste visa simular, em escala de laboratório, o tipo de conformação que a chapa vai sofrer em escala industrial, podendo ser classificado de acordo com o modo de deformação que visam simular testes com predomínio de estiramento, testes com predomínio de embutimento, testes combinados (estiramento + embutimento), testes que simulam o flangeamento e testes de dobramento.

O estiramento, segundo Dieter (1996), é o processo de conformação que consiste na aplicação de forças de tração de maneira a esticar o material sobre uma ferramenta ou bloco-modelo. Este processo é muito utilizado para a produção de peças com grandes raios de curvatura. Como neste modo de deformação predominam tensões trativas, apenas em materiais muito dúcteis podem ser obtidas grandes deformações. O estiramento constitui uma etapa de várias operações de conformação de chapas finas, como, por exemplo, na conformação de um copo de fundo hemisférico, onde a chapa é estirada sobre a face de um punção. De acordo com o autor, a maioria das estampagens complexas presentes na indústria automobilística envolvem um componente de estiramento.

O embutimento, por sua vez, corresponde ao processo de fabricação utilizado para modelar chapas planas em produtos com forma de copo. É realizado colocando-se uma amostra de tamanho adequado sobre uma matriz de forma definida e comprimindo o metal com um punção para o interior desta matriz. De acordo com Dieter (1996), a maior parte dos estudos experimentais e teóricos têm sido realizados no embutimento de um copo cilíndrico de fundo plano (teste de *Swift*) a partir de um disco plano (*blank*).

Segundo Bresciani et al (1997), o processo de embutimento submete a chapa plana a um estado de tensões e deformações que alteram sua espessura durante o processo. O estado típico de tensão varia conforme a posição da retirada do elemento de análise na peça que está sendo conformada. Para peças cilíndricas

existem três diferentes estados de tensão: um no flange, um na lateral e um no fundo do copo, como pode ser visto na figura 2.7.

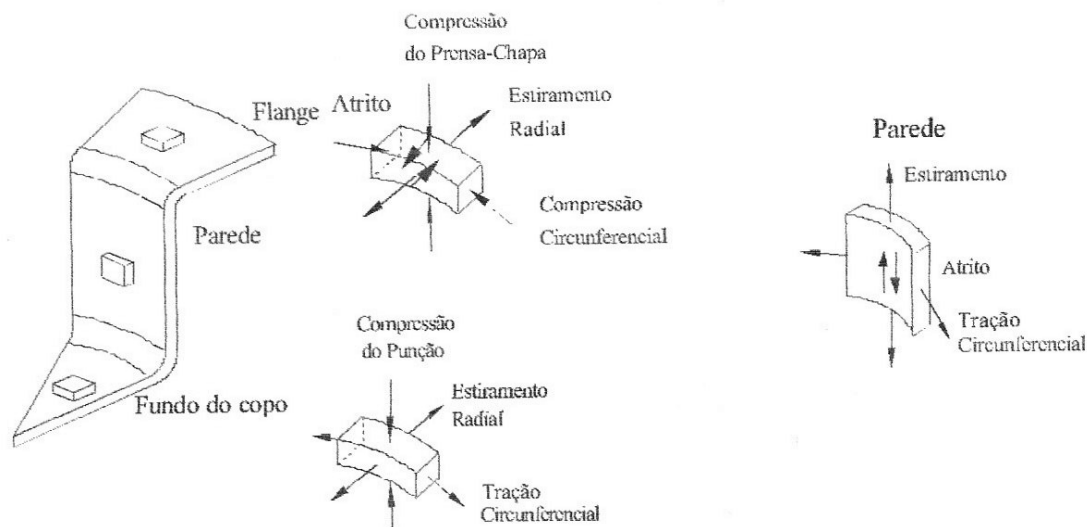


Figura 2.7 – Estado de deformações atuantes no copo durante o embutimento profundo – Bresciani, 1997.

As variações de espessura devida a estes estados de tensão fazem com que a parede do copo fique com o aspecto mostrado na figura 2.8.

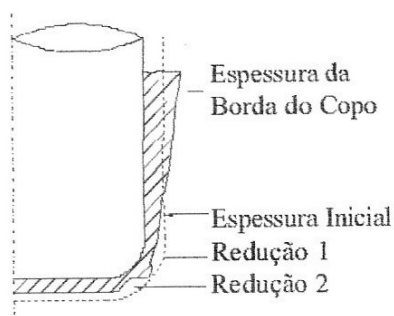


Figura 2.8 – Variação da espessura ao longo do copo embutido – Slater, 1997.

Quando as variações de espessura na redução 1 são muito intensas, de acordo com Bresciani et al (1997), ocorre a ruptura do fundo do copo, que é a principal causa de falha de processo no embutimento profundo.

Schaeffer (1999) e Keeler (1968), fazem uma representação dos testes de embutimento profundo e estiramento, como mostram as figuras 2.9 e 2.10

respectivamente, indicando não apenas a região de deformação da chapa, mas também a forma de ruptura do material em cada caso.

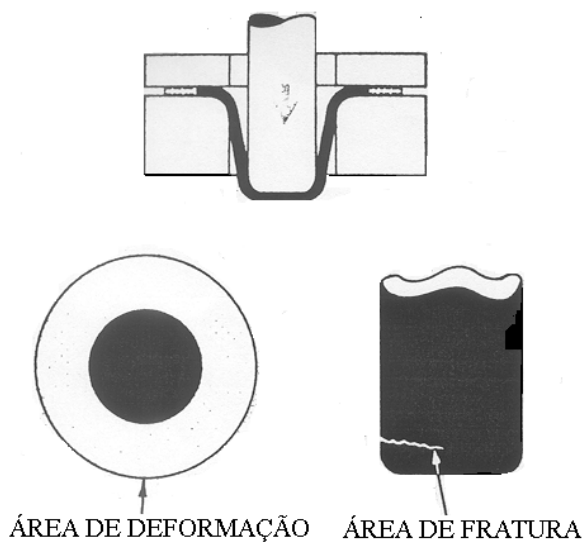


Figura 2.9 – Operação de embutimento profundo, mostrando a região de deformação e forma de ruptura – Keeler, 1968.

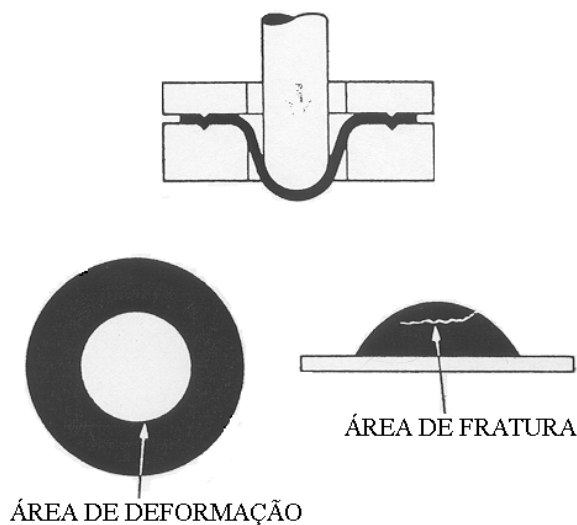


Figura 2.10 – Operação de estiramento, mostrando a região de deformação e forma de ruptura – Keeler, 1968.

De acordo com Sampaio et al (1998), uma maneira tradicional de se avaliar a aptidão dos materiais à conformação, é através de ensaios simulativos como o ensaio Swift, Erichsen, Olsen, Bulge, Fukui, entre outros.

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

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, desde o início da estampagem até a ruptura da chapa (em mm). A pressão no anti-ruga é elevada, mas a ausência do “draw bed” (cordões esticadores) para impedir que a chapa deslize 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 ao embutimento. 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.

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 cordão esticador que se encaixa no entalhe da matriz, evitando que o flange escoe 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.

Nos testes de embutimento 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 puro embutimento, pois o material se deforma até certo ponto por embutimento, passando a seguir para estiramento. Portanto quando se refere ao teste de embutimento, 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. O ensaio consiste em realizar 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).

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. O valor medido é uma grandeza adimensional e praticamente independe da espessura do corpo de prova.

O teste Swift simula preferencialmente o fenômeno de embutimento profundo, o qual está diretamente relacionado ao valor R de Lankford, de forma que o índice n , que está ligado a operações de estiramento, não tem uma relação direta com este ensaio.

Nos testes denominados combinados, procura-se simular operações em que haja embutimento 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 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. O valor medido (D_m) através de dispositivo especial, é a média dos diâmetros máximo e mínimo (na direção circunferencial da parte mais larga do corpo de prova). As variações de diâmetros ocorrem por causa de anisotropia planar ΔR da chapa. Então, tem-se que:

$$\text{Valor CCV} = D_m = \frac{D_{\text{máximo}} + D_{\text{mínimo}}}{2} \quad (2.10)$$

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 coeficiente de encruamento n , sendo esta uma de suas vantagens.

2.2.2 Curva Limite de Conformação (CLC)

Segundo Sampaio et al (1998), uma boa ferramenta que tem sido utilizada para relacionar o limite de conformação do material, determinado em escala laboratorial, com as deformações em escala industrial é a curva limite de conformação (CLC). Essa relação permite concluir se o material e o processo estão adequados à manufatura da peça em questão. A utilização da CLC é uma importante ferramenta para o desenvolvimento da aplicação de um determinado produto, como por exemplo no “tryout” da indústria automobilística.

De acordo com Moreira et al (2003), a quantidade de deformação plástica que a chapa metálica pode suportar antes da ocorrência da estricção localizada é assunto de grande importância na conformação de chapas. Com base em medidas experimentais, o conceito de Diagrama Limite de Conformação (DLC) foi inicialmente introduzido por Keeler (1965) para os valores positivos da menor deformação principal no plano da chapa. Este conceito foi então estendido por Goodwin (1968) e Woodthorpe et al (1969) ao domínio de deformações compreendido entre os estados de tração uniaxial e estiramento biaxial. Desde então inúmeras pesquisas foram dedicadas a determinação experimental e ao modelamento teórico das deformações limite em chapas.

O DLC é definido nos eixos das menores e das maiores deformações principais obtidas no plano da chapa, segundo Moreira et al (2003). A curva estabelecida através de trajetórias lineares de deformação permanece constante durante o processo de deformação, sendo conhecida como curva limite de conformação.

Richter (2003), define a curva limite de conformação como sendo uma representação do comportamento de uma chapa metálica que é deformada em um processo de conformação mecânica e traçada em um diagrama deformação

verdadeira maior x deformação verdadeira menor. É comum considerar que as deformações limites independam do tipo de ensaio empregado nas suas determinações e representem, portanto, uma propriedade intrínseca do material. Em outras palavras, assume-se que os efeitos estruturais, devido as condições de contorno do processo de deformação, não exerçam nenhuma influência nas deformações limites, sendo esta a razão pela qual a maioria dos modelos teóricos se baseiam em uma análise local, onde somente as propriedades dos materiais devem ser definidas para se determinar as deformações limites sob condições prescritas de carregamento.

Para Keeler (1968) e Kuzman (2000), a avaliação 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.

Lange (1993), faz uma representação do Diagrama Limite de Conformação, mostrando o tipo de deformações sofridas pelo material para uma malha circular impressa na chapa, tanto no estiramento quanto no embutimento profundo. Este diagrama está apresentado na figura 2.11.

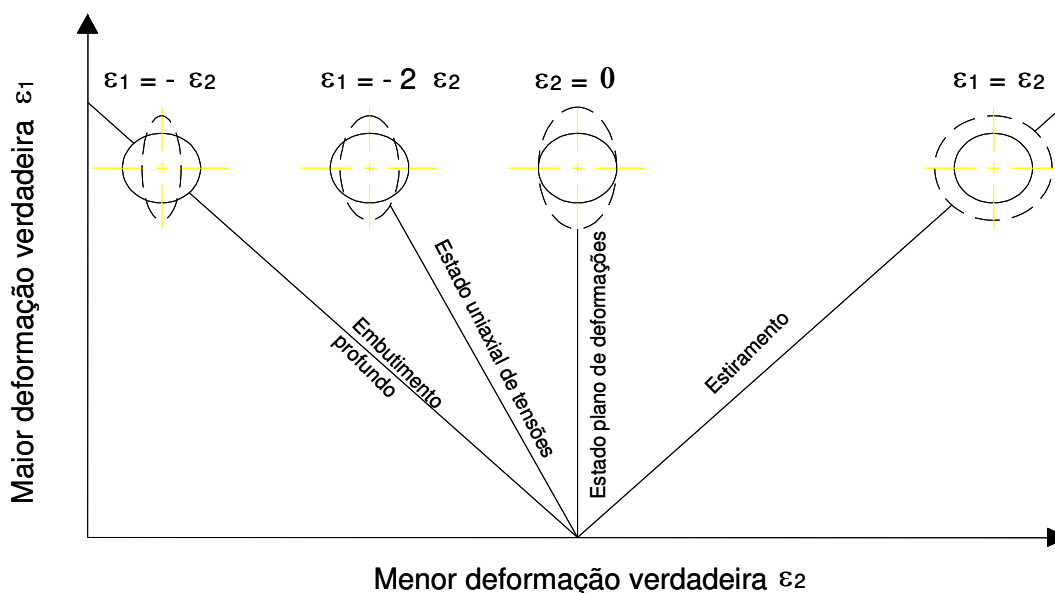


Figura 2.11 – Diagrama Limite de Conformação - modos de deformação para uma malha circular – Lange, 1993.

2.2.3 Determinação da curva limite de conformação

Um dos métodos utilizados para a determinação da curva limite de conformação é o ensaio IRSID, o qual, segundo o fascículo de informações técnicas da Usiminas (1999), realiza-se por meio de ensaios de tração, com corpos de prova com entalhes variados, e ensaios de embutimento Erichsen e Swift.

Segundo Moreira et al (2003), existem na literatura muitos ensaios experimentais destinados a determinação da CLC, como os testes uniaxiais (tração) e os testes propostos por Swift, Fukui e Erichsen, que possibilitam o levantamento da CLC. Atualmente, no entanto, a CLC é geralmente determinada com o auxílio de um ferramental simples empregando corpos de prova de diferentes larguras, adotado nos ensaios propostos por Nakazima (1968) e Marciniak (1967), nos quais a chapa é bloqueada em sua periferia e deformada por um punção hemisférico (Nakazima) ou de fundo plano (Marciniak).

De acordo com Sampaio et al (1998), as duas técnicas mais comuns para se traçar a CLC são as desenvolvidas pelo IRSID e por Nakazima. O autor destaca também que o método de Nakazima por utilizar uma única ferramenta, é mais simples se comparado ao de IRSID.

Richter (2003), destaca também que os experimentos mais utilizados para a determinação da curva limite de conformação são os métodos segundo Nakazima e Marciniak. O autor descreve o ensaio de Nakazima como sendo executado com um ferramental composto por um punção hemisférico, uma matriz e um prendedor de chapas. Segundo ele, a força aplicada no prensa chapas evita qualquer escorregamento do material do flange para a parte central do corpo de prova que está sendo deformado durante o ensaio. A geometria dos corpos de prova é baseada em tiras retangulares de diferentes larguras, com uma parte paralela de pelo menos 50% do diâmetro do punção. Isto porque os corpos de prova mais estreitos mostram um comportamento não desejado de ruptura prematura perto do raio da matriz. A lubrificação no ensaio é feita por meio de um filme lubrificante, colocado com o objetivo de melhorar a distribuição das deformações. As figuras 2.12 e 2.13 mostram o ferramental de ensaio Nakazima e a curva limite de conformação obtida segundo este método, respectivamente.

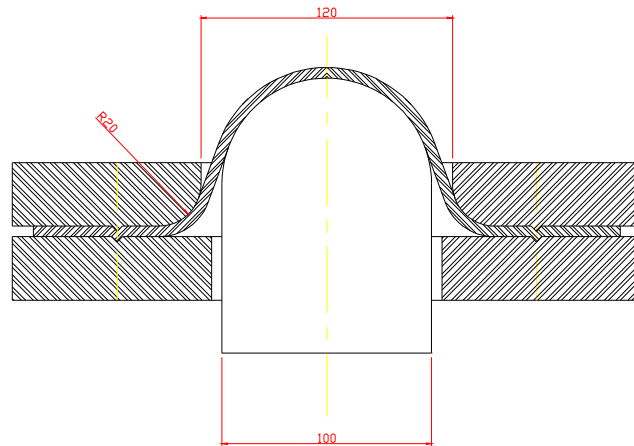


Figura 2.12 – Ferramental utilizado para execução do ensaio Nakazima – Richter, 2003.

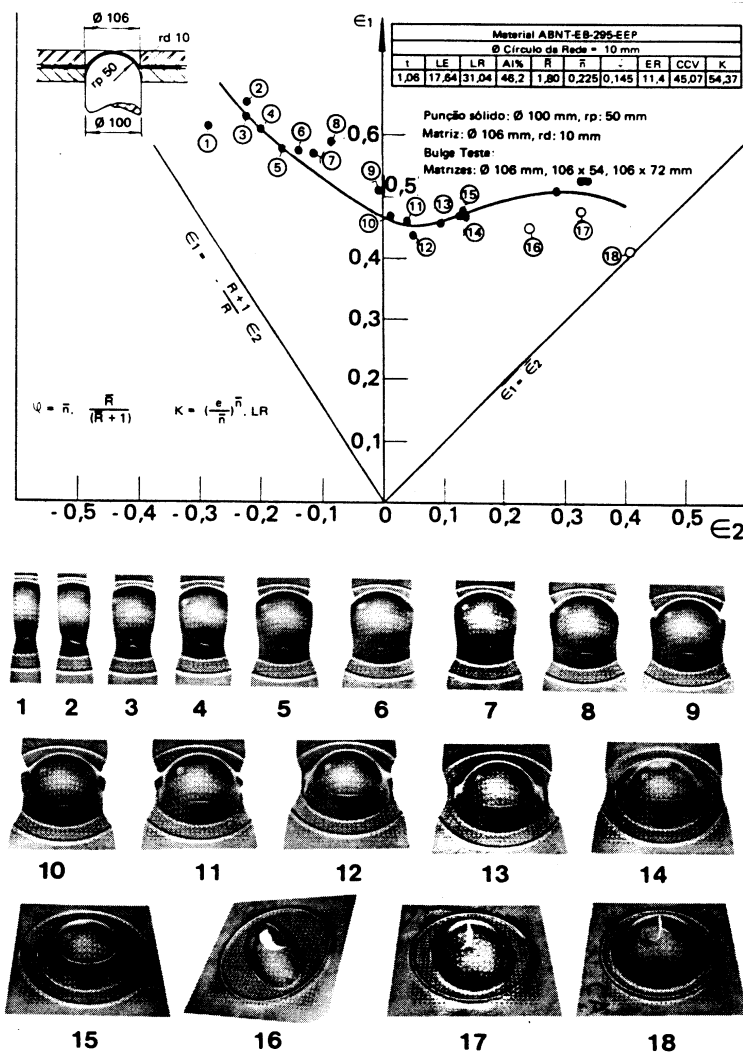


Figura 2.13 – Curva limite de conformação segundo o método Nakazima – Usiminas, 1999.

2.2.4 Análise de deformações para a determinação da CLC

De acordo com Moreira et al (2003), as deformações limites são geralmente determinadas realizando-se o ensaio até a aparição de uma fratura dúctil e, em seguida, analisando a distribuição de deformações obtida na vizinhança da zona fraturada. As deformações são usualmente obtidas através de medidas efetuadas na malha de círculos impressa na superfície da chapa ensaiada. A metodologia proposta por Hecker (1972), define as deformações limites como valores limites entre as deformações principais das elipses que apresentam uma estricção, uma fratura e de elipses em zonas adjacentes isentas da estricção ou da fratura. Uma outra metodologia, introduzida por Veerman (1972), é baseada na determinação de uma mudança abrupta na evolução da maior deformação principal de uma elipse que irá sofrer uma fratura. Esta metodologia requer o levantamento do histórico completo de deformação durante o ensaio, isto é, a aquisição via análise de imagens de deslocamentos impostos a malha de círculos.

Os cálculos das deformações convencionais e verdadeiras da chapa estampada, seguindo Hosford et al (1993), são dados pelas seguintes equações:

$$e_1 = \frac{(Df_1 - Do_1)}{Do_1} \quad (2.11)$$

$$e_2 = \frac{(Df_2 - Do_2)}{Do_2} \quad (2.12)$$

$$e_3 = \frac{(Tf - To)}{To} \quad (2.13)$$

$$\varepsilon_1 = \ln(e_1 + 1) \quad (2.14)$$

$$\varepsilon_2 = \ln(e_2 + 1) \quad (2.15)$$

$$\varepsilon_3 = \ln(e_3 + 1) \quad (2.16)$$

Onde:

e_1 : Maior deformação convencional

e_2 : Menor deformação convencional

e_3 : Deformação convencional no sentido da espessura da chapa;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$: Deformações verdadeiras;

$D_{o1}=D_{o2}$: Diâmetro inicial do círculo;

D_{f1} : Diâmetro maior da elipse;

D_{f2} : Diâmetro menor da elipse;

T_o : Espessura inicial da chapa;

T_f : Espessura final da chapa.

Para medir os diâmetros e calcular as deformações, são utilizados escalas graduadas, projetor de perfil ou paquímetros.

Keeler (2002), realizou estudos de caso para os quais foram realizados cálculos envolvendo a constância de volume do material deformado, tanto para as deformações de engenharia (convencionais) quanto para as deformações verdadeiras da chapa estampada, como mostram as equações 2.17 e 2.18:

$$(e_1 + 1) \times (e_2 + 1) \times (e_3 + 1) = 1 \quad (2.17)$$

$$(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3) = 0 \quad (2.18)$$

onde e_1, e_2 e e_3 são as deformações convencionais no sentido do comprimento, largura e espessura da chapa, respectivamente, enquanto que $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ e ε_3 representam as deformações verdadeiras no sentido do comprimento, largura e espessura, respectivamente. Chemin (2004) calculou a deformação ε_3 , considerando a constância de volume, a qual concordou com a deformação ε_3 medida.

2.3 Lubrificantes e lubrificação

2.3.1 Generalidades

Lubrificante é todo ou qualquer material sólido ou líquido de baixa resistência ao cisalhamento, cuja função é a de manter separadas as superfícies da ferramenta (punção e matriz) do material a conformar, reduzindo o atrito.

O desempenho dos lubrificantes na estampagem de peças pode ter um impacto significativo no processo, como em algumas aplicações de embutimento e estiramento.

Dieter (1996) afirma que os lubrificantes reduzem o atrito ao introduzirem uma interface que seja facilmente cisalhada.

Keeler (2001) define uma barreira lubrificante como sendo um filme que isola completamente a superfície da chapa metálica da superfície da matriz, figura 2.14.

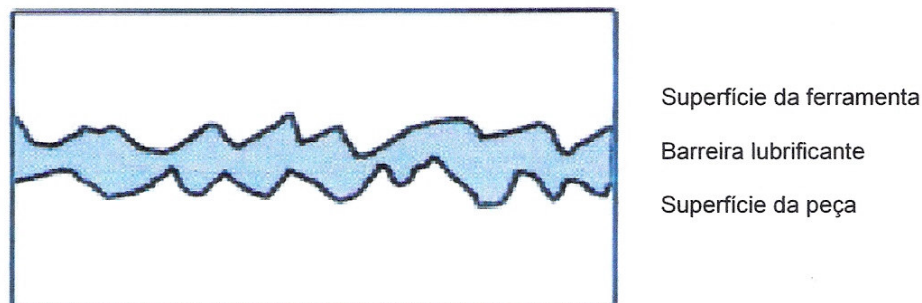


Figura 2.14 – Esquema da barreira lubrificante isolando a superfície da ferramenta da superfície da chapa metálica – Keeler, 2001.

Parâmetros tais como viscosidade, molhabilidade, aditivos de extrema pressão e refrigeração eficiente podem afetar significativamente a vida da ferramenta, qualidade da peça, limite de conformação e em geral a produtividade.

Segundo Kren (2004), projeto e material da ferramenta, material da peça, equipamento, método de aplicação e operações de pré e pós-processo, afetam o desempenho do lubrificante.

2.3.2 Mecanismo lubrificante

Segundo Altan et al (1983) e Kobayashi et al (1989), nos processos de conformação, o escoamento de material é causado pela pressão transmitida pela matriz para a peça conformada. Portanto, as condições de atrito na interface matriz-material têm influência no escoamento do metal, formação de defeitos superficiais e internos, tensões e forças atuantes no processo. Tais condições dependem basicamente do tipo de lubrificação adotada.

Para otimizar a performance da ferramenta, segundo Altan et al (2005), deve-se avaliar o desempenho das funções básicas dos lubrificantes: controlar o atrito e consequentemente reduzir o desgaste da ferramenta, prevenir contra “galling”

(aderência progressiva do material da peça na ferramenta), reduzir os esforços necessários à conformação, diminuir as etapas de estampagem, aumentar os limites de deformação, proteger contra corrosão e dissipar o calor. Os primeiros são realizados utilizando mecanismos de lubrificação. O calor é dissipado através do veículo usado para transporte do lubrificante.

Sob condições a seco nenhum lubrificante é utilizado na interface e somente as camadas de óxido presentes na matriz e na matéria prima estão presentes. Neste caso, o atrito é alto, situação desejável em pequeno número de operações de conformação.

Os três mecanismos de lubrificação, segundo Trivett et al (2004), são:

- Lubrificação hidrodinâmica
- Lubrificação limite
- Lubrificação EP (Extrema Pressão)

2.3.2.1 Lubrificação hidrodinâmica

Condições hidrodinâmica, segundo Klann (2000), existem quando uma espessa camada de lubrificante está presente entre as matrizes e a peça. Embora funcione como lubrificação no motor automotivo, contribui pouco na estampagem. A eficácia da lubrificação hidrodinâmica diminui com o aumento da força e a temperatura entre as superfícies. Tipicamente, a temperatura e a pressão existente na interface da peça com a ferramenta nas operações de estampagem ultrapassam o limite de resistência da lubrificação hidrodinâmica, então lubrificação limite, lubrificação EP ou uma combinação destas é requerida.

Segundo Trivett et al (2004), a lubrificação hidrodinâmica age como um filme que separa as superfícies da peça da ferramenta em condições de baixa pressão.

2.3.2.2 Lubrificação limite

Segundo Trivett et al (2004), é realizada usando aditivos polares ou surfactants, que tenham atração com a superfície do metal. Esta afinidade promove uma barreira que protege a ferramenta e a peça.

Lubrificação limite pode ter derivados gordurosos, como banha de porco, álcool gorduroso, entre outros e surfactants que são superfícies ativas no material. Aditivos polares, adicionados para agirem como um mecanismo lubrificante acentuam também a característica de molhabilidade do lubrificante, assegurando uma camada contínua na superfície do metal.

Lubrificação limite, segundo Klann (2000), representa uma importante função na estampagem com lubrificante, mas gorduras e sabões são ineficientes principalmente acima dos 100°C, então eles são usados em combinação com os lubrificantes EP.

2.3.2.3 Lubrificação extrema pressão (EP)

São dois tipos: mecânica e química. Ambas podem separar eficientemente a ferramenta da peça controlando o atrito, reduzindo o desgaste da ferramenta, prevenindo “galling” e aumentando os limites de conformação.

Aditivos típicos EP são carbonato de cálcio e bissulfeto de molibdênio. Infelizmente filmes mecânicos tendem a desenvolver sujeira no equipamento e são incompatíveis com o pós-processo. Evidentemente, estarão presentes, impregnados, em ferramentas com geometria mais complexa.

Segundo Godwin (2004), aditivos EP químicos tal como enxofre, cloro ou fósforo são utilizados mais freqüentemente. Eles reagem na interface ferramenta-peça, formando sais metálicos agindo como superfície de sacrifício.

Cloro é adicionado no lubrificante para estampagem para formar hidrocarbonetos de cloro. Durante a estampagem o calor gerado na interface da ferramenta-peça libera o cloro que reage com o ferro formando um filme de cloreto de ferro, um excelente lubrificante EP.

Similarmente, enxofre é adicionado para sulfurizar o óleo mineral ou ésteres gordurosos, inclusive banha de porco. Neste caso, a reação química durante a estampagem resulta em um filme de sulfeto de ferro.

Cada aditivo tem uma faixa de temperatura, com um limite, onde é mais efetivo. Existem algumas operações de estampagem mais severas que requerem uma combinação de vários lubrificantes para ser mais efetivo.

Os requisitos EP, segundo Klann (2000), para uma variedade de metais para conformação e operações de estampagem, podem ser completamente diferentes. Por exemplo, embora uma simples operação de furação pode ser realizada sem aditivos químicos EP, o uso de cloro, fósforo, ou enxofre pode aumentar significativamente a vida da ferramenta. O filme químico protege o punção principalmente durante o retorno, onde ocorre o maior desgaste devido ao retorno elástico da peça.

Ainda segundo Klann (2000), na estampagem a alta velocidade pode-se gerar uma quantidade muito grande de calor localizada. Um efetivo conjunto EP, qualquer que seja mecânico ou químico, é requerido não somente para conformar a peça sem romper, mas também para prevenir “galling” e desgaste da ferramenta.

Muitas vezes, as peças são geradas através de operações severas de estampagem, então uma combinação de lubrificação limite e EP são desejáveis. Além de garantir que as áreas mais críticas receberão a lubrificação requerida, especialmente em matrizes de multi-estágios, para não ameaçar e inibir a velocidade ou a vida da ferramenta, e, por conseguinte a produtividade.

2.3.3 Categorias

Lubrificantes para estampagem, de acordo com Klann (2000), são classificados como:

- Óleos puros
- Óleos emulsionáveis em água
- Sintéticos
- Filmes sólidos

2.3.3.1 Óleos puros

São assim chamados por não serem “misturados” com água para uso na estampagem. Muitas vezes recorre-se a óleos puros, usando como base óleo mineral com aditivos polares e EP. Óleos naftênicos são preferidos aos parafínicos, pois os aditivos são mais solúveis na base naftênica.

Segundo a afinidade química ou habilidades em reagir com a superfície metálica, nos pontos de alta temperatura e pressão, para protegê-la, os óleos puros podem ser classificados em ativos e inativos.

A diferença entre o inativo e o ativo é que neste é acrescentado cerca de 2% de enxofre com a finalidade de, durante a estampagem, liberar parte do enxofre para reagir com a superfície da peça, devido à alta temperatura e pressão, como visto anteriormente. Este óleo é chamado sulfurado ativo. Por outro lado o óleo inativo não permite esta reação porque o elemento enxofre contido no óleo é apenas o que está ligado às cadeias dos hidrocarbonetos e quimicamente não reagem durante o processo. São incluídos na classe dos óleos inativos os óleos graxos, compostos de óleos minerais e óleos graxos e compostos sulfurados destes óleos.

O cloro e o fósforo também podem ser usados como aditivos tornando o óleo ativo, no sentido de, como visto anteriormente, formar uma película na interface peça-ferramenta.

Produtos de óleos puros podem ser eficientes como lubrificantes para estampagem e proporcionar excelente proteção contra corrosão após o processo de conformação. Todavia, eles não dissipam eficientemente ao calor e podem exigir que operações a alta velocidade tornem-se relativamente lentas. Óleos de baixa viscosidade e solventes podem ser usados para reduzir esta qualidade isolante dos óleos puros.

Adicionalmente, segundo Klann (2000), eles não são compatíveis com o processo de pós conformação tal como soldagem, revestimentos ou pintura e geralmente requerem remoção por limpeza. Entretanto, ainda existem muitas aplicações, particularmente nos aços inoxidáveis e materiais não ferrosos, onde óleos puros proporcionaram um melhor desempenho da ferramenta.

Os óleos inativos apresentam-se nos seguintes tipos:

- **Óleos minerais puros:** devido a sua baixa viscosidade, geralmente de 8 à 48 cSt (Centistokes) a 38 °C, estes óleos têm a capacidade de molhar e infiltrar mais rapidamente nas regiões necessárias. Atualmente o maior emprego destes óleos é na composição de vários compostos de lubrificantes, com funções específicas para cada operação. Nestes compostos são introduzidos óleos com concentrações determinadas de agentes anti-soldantes e/ou de oleosidade.

- **Óleos graxos:** são óleos de origem animal e vegetal, como banha de porco e de baleia, sebo, óleo de algodão, colza e amendoim. Possuem boa capacidade de molhabilidade, mas suas propriedades anti-soldantes são baixas. Em virtude de se tornarem viscosos e de se deteriorarem com o tempo, além de alto custo, tem sua utilização restrita. Atualmente são empregados em compostos de óleos graxos e óleos minerais com desempenho semelhante aos óleos graxos puros.

- **Compostos de óleo mineral e óleo graxo:** estes óleos são uma combinação de um ou mais óleos graxos com óleos minerais puros. A porcentagem de óleos graxos nestes compostos varia de 10 a 40%. As gorduras conferem ao óleo mineral propriedades de melhor molhabilidade.

- **Compostos de óleo mineral e óleo graxo sulfurado:** são óleos obtidos pela combinação química do enxofre com óleos graxos em condições bem controladas e em seguida são dosados com óleos minerais de viscosidade selecionada, para resultar em um produto com concentrações controlada de gordura e enxofre. Tais óleos são inativos às mais baixas temperaturas, mas são ativos acima de 370°C e sob as condições de pressão na interface.

- **Compostos de óleo mineral e óleo graxo sulfurado clorado:** diferem do tipo anterior pelo acréscimo do cloro na sua composição. O aditivo do cloro confere qualidade de EP ao óleo melhorando o desempenho contra “galling”.

Os óleos ativos apresentam-se nos seguintes tipos:

- **Óleos minerais sulfurado:** são óleos minerais com enxofre como aditivo. O enxofre confere ao óleo mineral propriedades de prevenir “galling” e melhor poder lubrificante. O tipo mais usado destes óleos contém de 0,5 à 0,8% de enxofre.

- **Óleos minerais clorado sulfurado:** são óleos minerais contendo até 3% de enxofre e até 1% de cloro. Podem ser obtidos adicionando-se cera clorada a um óleo mineral sulfurado ou combinando com cloreto de enxofre com óleo mineral. Estes óleos têm superior qualidade de prevenir “galling” em relação ao tipo anterior. O aditivo cloro estende os benefícios de prevenção a “galling” e EP, com isto, este tipo de óleo apresenta uma faixa maior de utilização.

- **Compostos de óleo graxo sulfurado ou clorado-sulfurado:** devido à presença de gorduras, estes óleos contém mais enxofre do que os compostos já citados.

2.3.3.2 Óleos emulsionáveis em água

Compõem-se de pequena porcentagem de um concentrado de óleo emulsionável, usualmente composto por emulsificadores de óleo mineral e outros ingredientes, dispersos em pequenas gotículas na água.

Nenhum óleo, nem seus compostos, estão entre os melhores lubrificantes, pois não são os mais efetivos para a remoção do calor gerado no processo.

A água é um dos meios mais efetivos para a refrigeração. Entretanto, em seu estado natural, apresenta três desvantagens: promove oxidação, apresenta baixo poder de lubrificação e baixa molhabilidade nos metais.

Os emulsificadores são substâncias que reduzem a tensão superficial da água e com isso, facilitam a dispersão do óleo e o mantém finamente disperso como uma emulsão estável.

Portanto, não são uma solução de óleo em água, óleo e água não se misturam, mas sim, água com pequenas gotículas de óleo dispersas em seu interior. Portanto, a designação de óleo solúvel normalmente dada a este produto não é correta.

Segundo Klann (2000), atualmente este tipo de lubrificante para estampagem é mais utilizado, combinando os benefícios do óleo puro, em termo de performance, em uma forma que dissipa eficientemente calor. A proteção contra corrosão usualmente é aceitável, embora não tão boa quanto os óleos puros, e a remoção de resíduos é muito mais compatível com o pós processo. A limpeza ainda assim pode ser necessária, mas neste caso, os resíduos são prontamente removidos usando métodos de limpeza aquosa.

Embora concentrados de emulsões em água são geralmente mais caros que óleos puros, quando acrescentado água eles apresentam, para a conformação dos metais uma melhor opção de custo.

Os óleos emulsionáveis são divididos em:

- **Óleos minerais emulsionáveis:** são compostos de óleo mineral leve, viscosidade 22cSt a uma temperatura de 38°C, com aditivos para torná-los emulsionáveis na água. Tais aditivos são, entre outros, sulfonatos de petróleo, ácidos aminograxos, condensados de resina, agentes aglomerantes (como glicol). Este tipo de óleo é o

mais usado devido ao seu baixo custo. A proporção na sua preparação é usualmente de uma parte de óleo para vinte partes de água (1:20).

- **Óleos emulsionáveis supergraxos:** são óleos similares aos do tipo anterior, apenas mais oleosos devido a adição de óleos graxos na sua constituição. Os óleos graxos utilizados para este fim são: banha de porco, banha de baleia e óleo de semente de colza. As proporções de mistura com água são mais ricas, variam de uma parte de óleo para oito partes de água (1:8) até uma parte de óleo para quinze partes de água (1:15).

- **Óleos emulsionáveis EP:** são óleos emulsionáveis que contêm aditivos EP, tais como: enxofre, cloro, fósforo e também gorduras. Resulta disto um óleo com características próprias para estampagem severa, alta pressão, para as quais os óleos emulsionáveis anteriores não poderiam satisfazer. A proporção varia de cinco (1:5) a vinte (1:20) partes de água para uma parte de óleo.

2.3.3.3 Sintéticos

Também chamados fluidos químicos constituem os mais novos membros da família dos lubrificantes líquidos. Trivett et al (2004) relata que este tipo de lubrificante é constituído de agentes químicos em água, isentos de óleo mineral em sua composição. Apresentam-se sob a forma de soluções verdadeiras ou então soluções coloidais extremamente finas.

Os agentes químicos que entram na composição destes fluidos são, entre outros:

- Aminas e nitritos - para impedir a corrosão.
- Nitratos - para a estabilização dos nitritos.
- Fosfatos e boratos - para abaixar a dureza da água.
- Sabões e agentes de molhabilidade - para lubrificação e diminuição da tensão superficial.
- Compostos de enxofre, cloro e fósforo - para lubrificação química.
- Glicóis - para agente aglomerante e umidificante.
- Germicidas - para controlar a proliferação de bactérias.

Os lubrificantes sintéticos mais completos, contém cerca de 30 ingredientes.

Segundo Klann (2000), usualmente a base de água, estes lubrificantes dissipam bem o calor e mantêm-se contínuos mesmo em operações severas de estampagem. Eles também são mais compatíveis com o pós processo. Na proteção contra corrosão eles são limitados, especialmente se diluídos.

Embora algumas pessoas se referirem a este produto como biodegradável, isto não é sempre verdadeiro, especialmente após o uso. Alguns aditivos usados nas fórmulas dos lubrificantes sintéticos podem deixar resíduos não biodegradáveis e até mesmo os produtos utilizados para a limpeza.

Existem, segundo Klann (2000), lubrificantes sintéticos fabricados para deixar um filme suave até mesmo depois da água ter evaporado e são compatíveis até mesmo com o mais complexo projeto de ferramenta.

2.3.3.4 Filmes secos

Estes lubrificantes podem ser aplicados nos “blanks” ou tiras de aço. No passado, este produto era basicamente sabão derretido. Novos tipos, tais como ésteres sintéticos e polímeros acrílicos, tem sido usados com resultados positivos.

Visam apenas a lubrificação no processo de estampagem, sendo ineficientes na refrigeração e na proteção contra corrosão. É o caso do grafite e do bissulfeto de molibdênio (MoS_2), e dos poliméricos como poliuretano e filme de PVC (policloreto de vinila), que são aplicados sobre a superfície de contato antes do início do processo de conformação.

O MoS_2 é reduzido a um pó de finíssimas partículas. Este pó usa como veículo um óleo ou uma pasta em forma de bastão que é esfregada nas superfícies de contato.

O filme de PVC é cortado de acordo com o tamanho do “blank” e aplicado sobre a superfície superior e inferior da chapa metálica.

Já o poliuretano é catalisado e espalhado sobre a chapa metálica, então após a cura, que pode levar, dependendo da temperatura, desde alguns minutos até algumas horas, a chapa é conformada.

Todos eles evitam sem se romper o contato metal-metal (punção-chapa-matriz) reduzindo o coeficiente de atrito na interface.

Segundo Klann (2000), eles oferecem benefícios em termos de desempenho, manuseio e limpeza, mas são razoavelmente caros para aplicar e, portanto seu custo benefício torna-se relativo.

De acordo com Jeffery (2003), os lubrificantes poliméricos de alta solidez podem custar até duas vezes mais que os lubrificantes convencionais, entretanto este aumento pode ser uma fração da economia na redução de peças não conformes.

Ainda segundo Jeffery (2003), testes em campo, usando lubrificante polimérico na estampagem de 5000 tampas traseira da Dodge Dakota, reduziu a quantidade de peças não conforme que era de 40% utilizando lubrificante a base de óleo para menos de 1% com “blanks” revestidos de lubrificante polimérico de alta solidez.

Como eles podem ser aplicados somente uma vez, antes da estampagem, a conformação de metais em vários estágios fica comprometida.

Jeffery (2003) relatou que um fabricante de alumínio estudou os efeitos dos lubrificantes na conformação de uma chapa de alumínio usada em aplicações de embutimento profundo. O centro técnico mediu o limite de profundidade de conformação utilizando óleos puros tradicionais e lubrificantes poliméricos, usando uma matriz de 2,75in por 5,75in. O teste consistiu embutir uma chapa de alumínio de 0,031in de espessura até a ruptura. Os resultados variaram de 0,47 à 0,73in na profundidade, figura 2.15, com lubrificante polimérico de alta solidez promovendo de 40 à 55% a mais na capacidade de profundidade se comparados com os óleos.

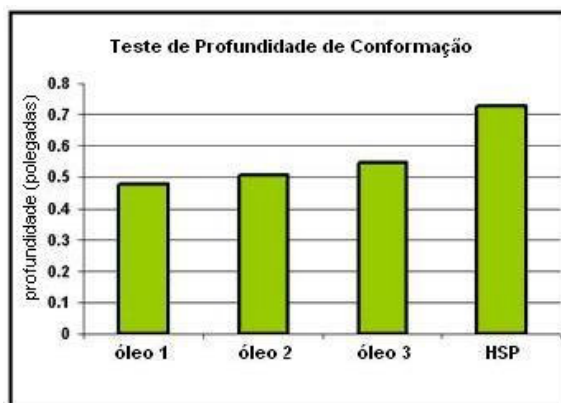


Figura 2.15 – Profundidade de conformação de chapas de alumínio para diferentes lubrificantes – Jeffery, 2003.

Jeffery (2003) ainda relatou que o laboratório de Greenheaf Technologies comparou recentemente os efeitos na conformação do aço DP 780 AHSS com lubrificantes poliméricos, óleo emulsionável e fluido sintético aprovados pela indústria automotiva dos Estados Unidos. A universidade do estado de Ohio desenvolveu o teste de conformação por estiramento “Interlaken”. Este método demonstrou a correlação com o resultado real do produto. Os resultados mostraram, conforme a figura 2.16, que o lubrificante polimérico de alta solidez com um valor de 145 permitiu que o material fosse estirado de 26 a 32% a mais que os óleos aprovados pela indústria automotiva e o lubrificante sintético com valores de 115 a 110 respectivamente. Quanto maior o valor do lubrificante melhor a conformabilidade.

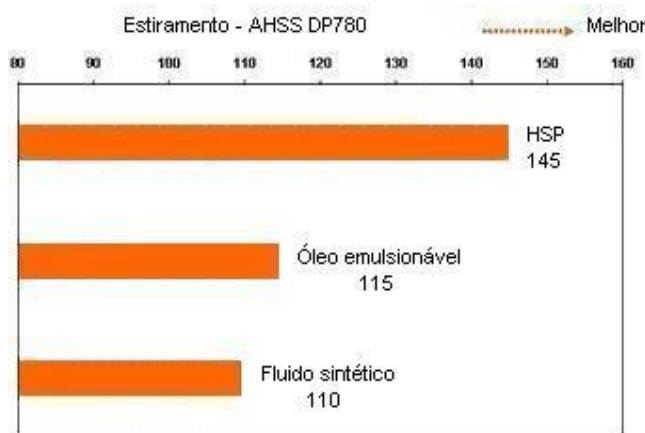


Figura 2.16 – Resultados do teste de conformação por estiramento “Interlaken” para diferentes lubrificantes – Jeffery, 2003.

Keeler (2001), relata que em experimentos utilizando lubrificantes sólidos, as deformações passaram da zona vermelha para a zona verde na CLC, figura 2.17.

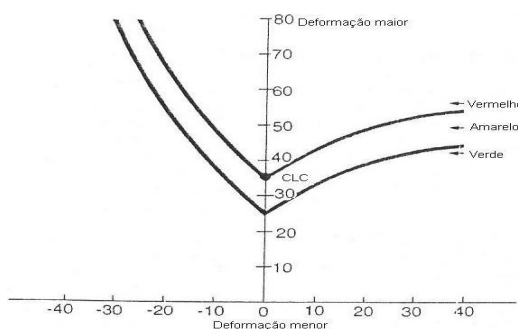


Figura 2.17 – Zonas de deformação na CLC – Keeler 2001.

2.3.4 Seleção do lubrificante

Kren (2003), refere-se a lubrificação no processo de conformação dos metais, como uma arte bem como uma ciência. Sutis diferenças no processo de estampagem, projeto da matriz e metalurgia da peça pode afetar extremamente o desempenho do lubrificante.

Selecionar os melhores produtos para uma operação específica requer que sejam considerados vários aspectos:

- projeto de ferramenta
- material da peça
- compatibilidade com o pós processo
- aspectos regulatórios

2.3.4.1 Projeto da ferramenta

A severidade da operação de conformação de metal pode variar significativamente o projeto da ferramenta. Em aplicações de embutimento, menos que 10% no diâmetro, a redução é considerada baixa conformação, aproximadamente 20% é moderada e 30% ou mais constitui conformação severa.

Adicionalmente a razão do raio da matriz pela espessura do material pode afetar na robustez do processo.

Obviamente, dissipação de calor é de suma importância em aplicações de estampagem de alta velocidade para minimizar o desgaste da ferramenta e prevenir “galling”. Óleos puros de baixa viscosidade bem como óleos emulsionáveis podem melhorar o processo de refrigeração.

Materiais para ferramenta também são uma consideração importante. Liga de cobalto com carboneto de tungstênio é susceptível a ataque químico. Revestindo a ferramenta pode reduzir a quantidade de lubrificante requerida.

Chemin (2004), relata que quanto mais uniforme a geometria da ferramenta, melhor a estampabilidade possível de ser atingida para o material, de forma que quanto mais complexa a geometria da ferramenta, a tendência é que o material sofra inicialmente influência na sua característica de estampabilidade, tendendo a um

modo ou outro de deformação e, posteriormente, tenha o seu nível máximo de estampabilidade reduzido, a medida que os raios que determinam a forma do ferramental sejam reduzidos.

Projeto de ferramentas em combinação com lubrificantes de qualidade, segundo Klann (2000), determina a aplicação ótima no sistema. Ferramentas de multi-estágios podem requerer, durante a conformação do metal, que seja reaplicado o lubrificante em áreas críticas, especialmente quando se fizer o uso de um produto diluído em água para ajudar no controle do calor gerado. Para maximizar a performance do lubrificante e, portanto o desempenho da ferramenta.

2.3.4.2 Material da peça

A composição do material base, bem como algum revestimento, pode ter efeito significativo na preparação do lubrificante, dependendo da qualidade do próprio material. Segundo Klann (2000) e Keeler (1968), análise da malha de círculos pode ser uma ferramenta útil para avaliar a deformação e determinar se está próximo da zona limite.

De acordo com Wiklund (2005), existe uma inter-relação definida entre projeto de ferramenta, material e lubrificante, principalmente no que diz respeito a acabamento superficial.

Segundo Jeffery (2003), a tendência na estampagem de metais é usar mais e mais alumínio e outros metais leves, como o aço de elevada resistência. A necessidade tecnológica de melhorar o fluxo destes materiais em aplicações de estampagem também está aumentando. Em muitos casos, uma estampagem com ferramenta original projetada e construída para produzir peças de aço de média resistência.

De acordo com Jeffery (2003), uma mudança para um material mais macio como o alumínio ou um material mais duro como o aço de elevada resistência, causa um aumento significativo para que as peças não se encontrem dentro das especificações. Idealmente, as ferramentas devem ser modificadas para acomodar as características de conformação de novos materiais, mas esta despesa nem sempre está no orçamento.

Segundo Jeffery (2003), estiramento do alumínio requer o uso de lubrificantes que forneçam um filme com película resistente e reduzam o atrito. Ainda segundo Jeffery (2004a), material de alta resistência exige um lubrificante que forneça uma película resistente a alta pressão e ao calor gerado pelo atrito.

Muitos materiais, usados na indústria são de difícil lubrificação, como cobre-berílio, bronze-fósforo, alumínio e outros são razoavelmente não reativos com aditivos EP, ficando suscetíveis a “galling” e desgaste da ferramenta. Enquanto aditivos como enxofre pode causar manchas no cobre e suas ligas, então uma combinação de cloro e materiais gordurosos freqüentemente é o melhor produto indicado, dependendo das exigências do pós processo.

2.3.4.3 Compatibilidade com o pós processo

Nos dias de hoje o ambiente competitivo, o impacto dos lubrificantes no pós processo pode ser uma influência significativa para o processo de manufatura.

Segundo Jeffery (2004b), um produto que trabalha bem a alta pressão mas demonstra dificuldade e alto custo para remoção, dificuldade no processo de soldagem ou afeta negativamente a pintura não pode ser tolerado. Produzir e selecionar o melhor produto não significa apenas compreender o quanto é o seu desempenho a alta pressão mas também a sua retirada e limpeza da peça.

2.3.4.4 Aspectos regulatórios

Como compatibilidade com o pós processo, aspectos regulatórios podem afetar significativamente o sucesso econômico na seleção do lubrificante para conformação metálica.

Produtos que requerem especial controle para cada uso ou remoção podem ter impacto negativo na operação global. Sempre levar em conta produtos recicláveis, especialmente se eles acentuarem o processo de conformação bem como a redução global de custos. A legislação alerta, se não pela eliminação total de produtos químicos pelo menos utilizá-los aos menores níveis possíveis.

Segundo Bosler (2003), ingredientes que promovem alto desempenho nos lubrificantes a base de óleo, como os aditivos EP, também podem afetar negativamente a sua limpeza e conseqüentemente o pós processamento.

Segundo Jeffery (2004b), alguns filmes secos, como os poliméricos são removidos simplesmente, ainda quando necessário, com ar a alta pressão.

2.3.5 Quando lubrificar

Segundo Keeler (2000), quando uma peça rompe ou apresenta afinamento excessivo, muitos na tentativa de solucionar este problema, adicionam mais lubrificante. Mas esta solução nem sempre é a mais correta. Ainda segundo Keeler (2001), isto ocorre porque a lubrificação é estudada e entendida por poucos.

Keeler (1968) relata que a lubrificação do punção não tem grande influência no embutimento profundo, ao passo que no estiramento o punção deve ser muito bem lubrificado, para que a CLC possa ser prolongada a um maior nível de deformação neste modo de deformação.

A figura 2.18 mostra que nem sempre a lubrificação é desejável, dependendo do modo de deformação e da região, difere a demanda do coeficiente de atrito (μ).

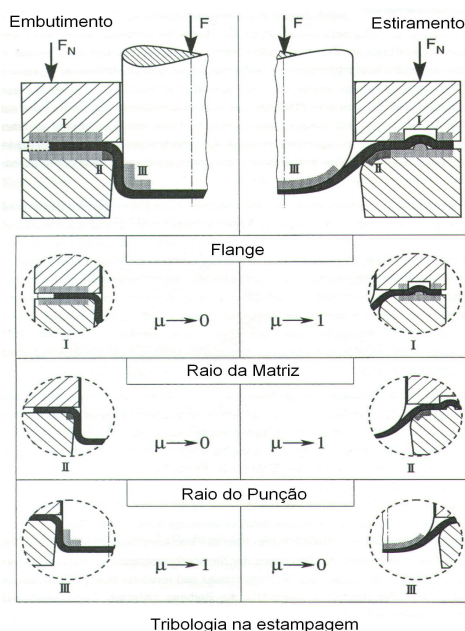


Figura 2.18 – Demanda de atrito nas diferentes regiões (flange, raio da matriz e raio do punção), conforme o modo de deformação.

No estiramento, na região do flange, ou mais precisamente no “draw bead”, o atrito deve ser o maior possível para que o escoamento da chapa para dentro da matriz seja dificultado, ficando presa, facilitando a ação do “draw bead”. O mesmo vale para o raio da matriz. Porém no raio do punção o atrito tem que ser o menor possível, já que haverá movimento relativo entre as superfícies do punção e da chapa metálica, que está sendo conformada pela redução de sua espessura.

No embutimento o que se verifica é o contrário. Neste modo de deformação o material é deformado pelo escoamento do “blank” para dentro da matriz. Por isso, nas regiões do flange e raio da matriz o atrito deve ser o menor possível para que o material possa escoar livremente. O mesmo não deve acontecer no raio de punção, nesta região o atrito deve ser máximo, para que não haja movimento relativo entre as superfícies e o material não rompa prematuramente, atingindo um alto nível de deformação.

Para evitar a ruptura da chapa metálica na região do raio do punção, no modo de deformação por embutimento, como mostra a figura 2.19, Keeler (2000) sugere remover por completo a lubrificação, aumentar a rugosidade no raio do punção e/ou aumentar o raio do punção.

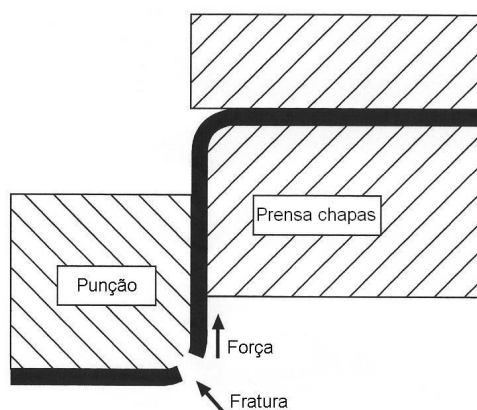


Figura 2.19 – Ruptura no raio do punção no modo de deformação por embutimento – Keeler, 2000.

De acordo com Hosford (1993), com uma boa lubrificação, no modo de deformação por estiramento, a ruptura tende a ocorrer próxima do pólo, figura 2.20, com altos valores da deformação menor (ϵ_2), muitas vezes próximas da deformação maior (ϵ_1).

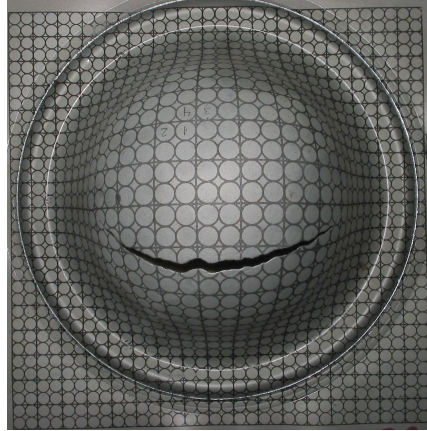


Figura 2.20 – Lubrificação eficiente no estiramento a ruptura ocorre próxima ao pólo – Hosford, 1993.

Keeler (2000) demonstra através de um gráfico, figura 2.21, que a ruptura ocorrerá longe do pólo, com picos de deformação quando se utilizar de uma lubrificação inadequada, no modo de deformação por estiramento.

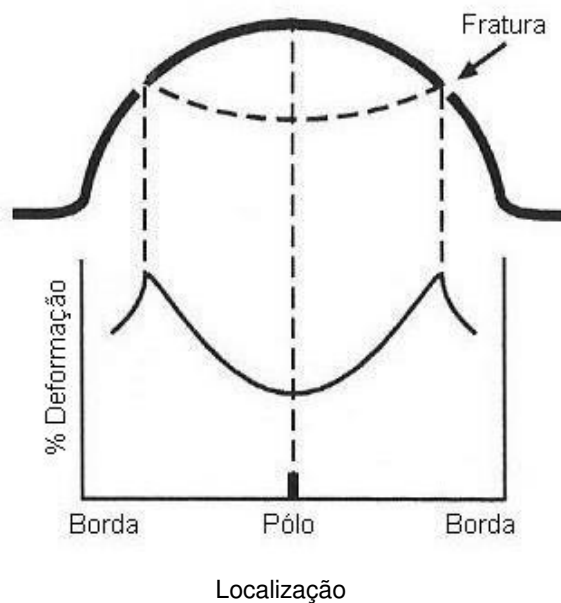


Figura 2.21 – Lubrificação inadequada no estiramento a ruptura ocorre afastada do pólo, com picos de deformação – Keeler, 2000.

Segundo Keeler (1968), utilizando-se de uma lubrificação adequada, a deformação será mais homogênea e os picos de deformação serão minorados ou até mesmo eliminados, como mostra a figura 2.22.

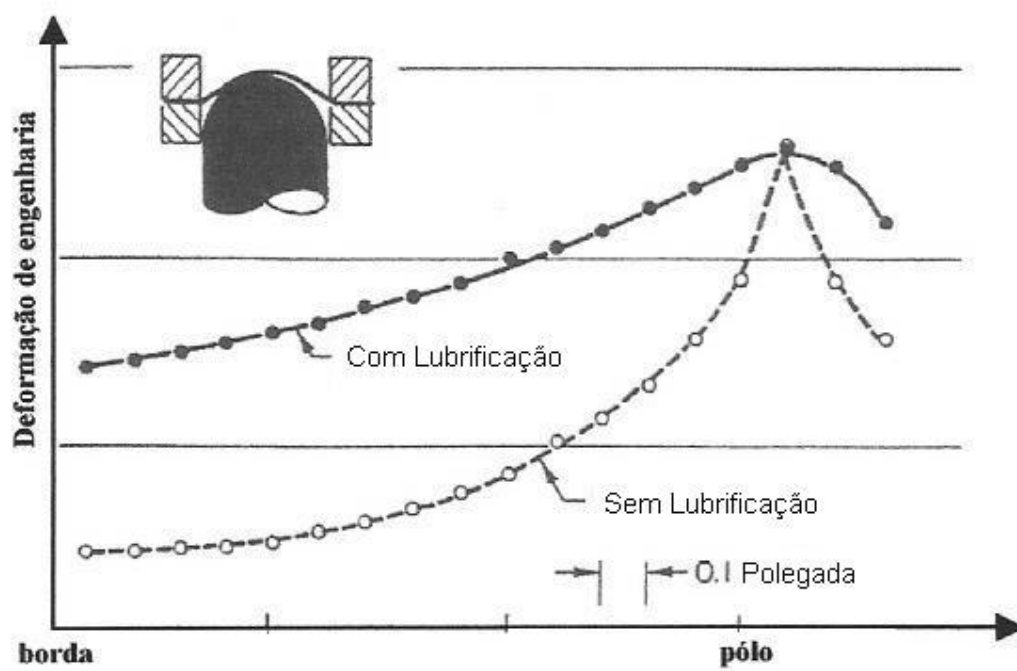


Figura 2.22 – Perfis de distribuição das deformações, com e sem lubrificação do punção – Keeler, 1968.

CAPÍTULO 3

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Generalidades

Como já discutido anteriormente, o objetivo deste estudo foi avaliar a influência de diferentes lubrificantes na estampagem. Foi utilizado o ensaio de estampagem proposto por Nakazima, para o qual, foi necessária uma análise prévia do material a ser utilizado nos ensaios. Esta análise partiu de um ensaio metalográfico, para verificação da direção de laminação e textura metalográfica do material, além de uma análise química, para verificação da composição química da chapa a ser utilizada, e de ensaios de tração, para caracterização das propriedades mecânicas e parâmetros de estampabilidade do material. Conhecido o material base de estudo, partiu-se para os ensaios de estampagem Nakazima, realizados inicialmente pelo método tradicional, sem lubrificação, para obtenção da curva limite de conformação da chapa metálica e posteriormente variando apenas os lubrificantes, a fim de verificar a sua influência nas deformações causadas na CLC obtida segundo o método tradicional de ensaio. Verificou-se ainda o perfil de distribuição das deformações, desde o ombro da matriz até o centro do punção, e a redução de espessura causada para cada lubrificante utilizado nos ensaios, visando uma análise da influência da lubrificação não apenas em termos das deformações causadas na superfície da chapa, mas também em termos da distribuição das deformações e do afinamento da chapa na espessura.

3.2 Material utilizado

Trata-se de um aço liga acalmado, laminado a frio produzido pela Thyssen Krupp segundo a especificação DC 06, de acordo com a norma DIN EN 10152. Este material, tomado como base para a realização dos ensaios de laboratório, foi especificamente selecionado por se tratar de uma chapa fina (0,7mm de espessura) de alta estampabilidade.

Através da norma, podem ser obtidas informações como composição química e propriedades mecânicas, que determinam a produção deste material conforme sua especificação. A norma, porém, estabelece uma faixa ampla de valores para cada propriedade do material, ou seja, um limite mínimo e um 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 da chapa, o que gera a necessidade de realizar-se testes adicionais para se levantar com maior detalhamento as características do aço e, desta forma, avaliar as suas reais condições de estampabilidade.

3.3 Análise química

Com o objetivo de verificar se a composição química do material de estudo estava dentro da especificação da norma, realizou-se um ensaio de análise química na Volkswagen-Audi do Paraná. O instrumento utilizado foi um espectômetro de emissão óptica, da marca ARL - Metal Analyser.

Esse equipamento utiliza como fonte de excitação uma centelha de alta energia, que é criada numa fenda entre um eletrodo e a amostra do material a ser analisado. A centelha gerou uma emissão da radiação provinda da excitação superficial da amostra, com ondas características da composição elementar. O espectro da radiação foi então separado por um conjunto de prismas e lentes, em linhas distintas, de forma que a intensidade de cada linha foi medida. Estas medidas foram precisamente convertidas em valores de concentração, sendo estes os resultados percentuais de cada elemento presente na amostra.

3.4 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 ensaio, partindo do embutimento da amostra da chapa em baquelite, sob condições controladas de pressão e temperatura; lixamento, utilizando-se quatro tipos de lixa

com diferentes granulações; polimento e 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 a sua microestrutura.

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

Para que fosse possível a identificação do 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. Como esperado, a amostra apresentou o alongamento dos grãos no sentido do eixo longitudinal da chapa, sentido este correspondente a sua direção de laminação (0°), uma vez que no sentido transversal da chapa, os grãos apresentaram-se alongados para dentro do plano da seção de corte, de forma a impedir a visualização do alongamento dos grãos causado pela deformação do material durante a laminação.

3.5 Ensaios de tração

O dimensionamento e o formato adotados para os corpos de prova foram tomados a partir das normas ABNT NBR 6673, ASTM E 646 e DIN EN 10 002-1 que descrevem o ensaio. Desta forma convencionou-se a utilização dos corpos de prova com formato “gravata”, figura 3.1, 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.

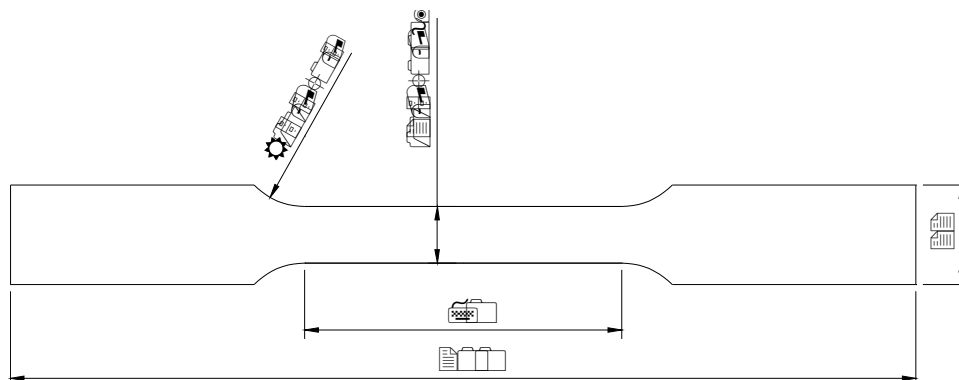


Figura 3.1 – Desenho do corpo de prova para o ensaio de tração.

Os corpos de prova foram estampados (recortados) no Laboratório de Conformação Mecânica da UFPR, em uma matriz desenvolvida especialmente para confecção destas amostras, passando em seguida por uma operação de fresamento da seção lateral (na região útil), 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. Os corpos de prova foram extraídos formando ângulos de 0° , 45° e 90° em relação à direção de laminação.

Ao todo foram quatro corpos de prova para cada direção de laminação da chapa de aço DC 06, conforme a tabela 3.1, (três para se levantar o fator de anisotropia e o coeficiente de encruamento e um para a obtenção do limite de resistência). Desta forma, foi preparado um total de doze corpos de prova da chapa adotada para os testes de laboratório. O número de corpos de prova depende do número de ensaios, podendo variar de três a cinco para cada direção de laminação, conforme previsto pelas normas técnicas citadas anteriormente para o ensaio de tração.

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.

Direção de laminação	Quantidade de corpos de prova para determinar n e R	Quantidade de corpos de prova para determinar LR, LE e A_l	Total de corpos de prova para cada direção de laminação
0°	3	1	4
45°	3	1	4
90°	3	1	4
Total de corpos de prova			12

Tabela 3.1 – Quantidade de corpos de prova necessários para o ensaio de tração.

Para realização dos testes, selecionou-se inicialmente no microcomputador, instalado na máquina, o programa para determinação do fator de anisotropia e encruamento. Em seguida tomou-se um dos corpos de prova do aço DC 06 recortado a 0° da direção de laminação, no qual medimos os valores da espessura e da largura da região útil, acoplamos o extensômetro, entramos com os dados pedidos pelo programa (espessura inicial, largura inicial, comprimento útil e direção de laminação). Para determinar os coeficientes de anisotropia e encruamento o corpo de prova foi deformado até um percentual de 18% do seu comprimento útil.

Foram determinados os valores do fator de anisotropia R (equação 2.7) e coeficiente de encruamento n (equação 2.5), além do limite de resistência, alongamento e tensão de escoamento do material. Estes dados nos auxiliam na avaliação das características de estampabilidade da chapa, servindo de parâmetro para analisarmos as condições do material em relação ao grau de conformabilidade ao qual será submetido durante o processo de fabricação do componente.

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. Entramos com estes dados 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 dois testes com corpos de prova a 0° da direção de laminação. Realizou-se ainda mais três testes para os corpos de prova a 45° e outros três ensaios para os corpos de prova a 90° da direção de laminação, totalizando nove ensaios.

Com o resultado, 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 $\bar{R}$ (equação 2.9) e da tendência ao orelhamento ΔR (equação 2.8).

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.

A seguir realizou-se os testes para obtenção do limite de resistência e alongamento do aço DC 06. Utilizamos três corpos de prova (um para cada direção) do material base utilizado nos testes, os quais foram tracionados até sua ruptura, donde obtivemos o seu limite de resistência e alongamento.

3.6 Ensaio de estampagem Nakazima

A ferramenta de ensaio, mostrada na figura 3.2, pertence ao Laboratório de Conformação Mecânica da UFPR, projetada e construída de forma a ser utilizada em diversos trabalhos de pesquisa, como o de Srour (2002) e Chemin (2004).

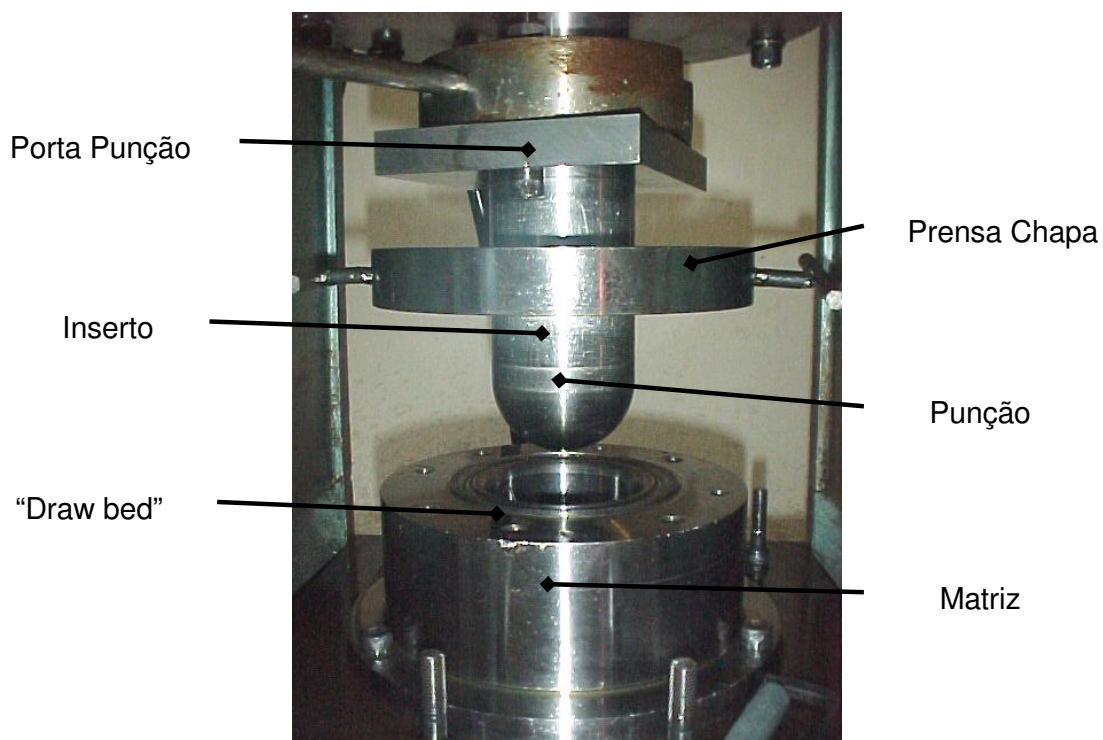


Figura 3.2 – Ferramenta utilizada no ensaio de estampagem Nakazima.

A ferramenta de ensaio Nakazima tem a seguinte configuração:

- Porta punção: Tem a função única e exclusiva de fixar o inserto e o punção ao êmbolo da prensa;
- Punção: Hemisférico com raio de 50mm, 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 estampar o material até sua ruptura;
- Matriz: Diâmetro interno de 106mm e raio da matriz de 10mm, 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: 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;
- “Draw bed”: Também conhecido como cordão esticador, responsável pela fixação da chapa, para que a mesma não deslize para dentro da matriz.

O ensaio Nakazima prevê originalmente um total de dezoito corpos de prova, todos com 200mm de comprimento, porém, com a largura variando de 40mm à 200mm. Esta variação na largura dos corpos de prova é o fator determinante para a simulação desde os modos de deformação por estiramento, quando a largura da amostra for suficiente para a plena atuação do “draw bed” em todo o contorno do copo estampado, passando pela deformação plana, até embutimento profundo, quando a chapa é mais estreita, de forma que uma porção lateral do corpo de prova não fica presa pelo “draw bed”.

As chapas foram preparadas para duas baterias de testes, sendo a primeira destinada apenas para o levantamento da CLC do aço base de estudo, sem lubrificação. Já, na segunda bateria de testes, destinou-se aos ensaios com a utilização de lubrificantes, com os quais foi avaliada a sua influência, tomando-se como base comparativa a curva CLC levantada sem lubrificação.

Para o levantamento da CLC, segundo o método tradicional de ensaio, foram utilizados oito corpos de prova, quantidade esta considerada suficiente para o propósito esperado. Os corpos de prova com entalhe foram cortados a laser, (estes corpos de provas mais estreitos tendem a romper próximos ao raio da matriz, pela ação do “draw bed”, por isso foram preparados com entalhe), enquanto que os demais foram cortados na guilhotina. A figura 3.3 mostra o desenho destas amostras.

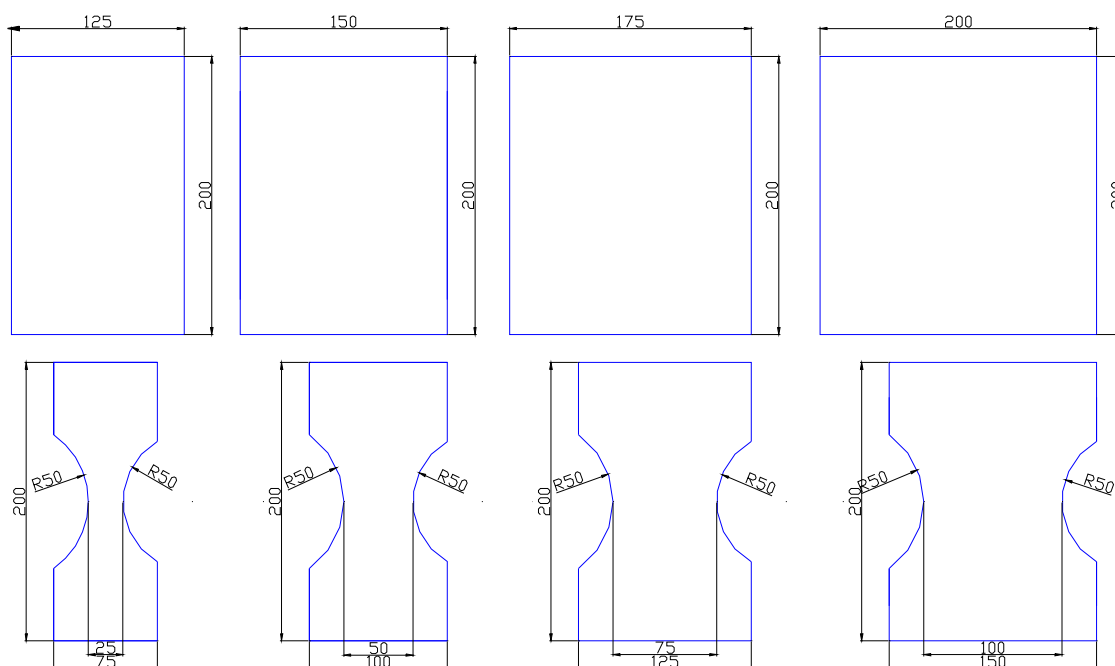


Figura 3.3 – Desenho dos corpos de prova utilizados no ensaio de estampagem Nakazima para o levantamento da CLC.

Para a segunda bateria de testes, no entanto, foram preparados apenas os corpos de prova de 200 x 200mm, os quais foram utilizados com lubrificantes, para simular apenas a condição de estiramento, já que a lubrificação não tem grande influência no embutimento.

Ao todo foram confeccionados trinta e nove corpos de prova, conforme a tabela 3.2. Vinte e quatro, conforme a figura 3.3, para levantamento da CLC (cada amostra foi ensaiada três vezes) e os outros quinze corpos de prova, de 200 x 200mm, para avaliação dos lubrificantes (também três amostras para cada lubrificante).

Dimensões dos corpos de prova (mm)	Quantidade de corpos de prova	Finalidade dos corpos de prova
25 x 200	3	Determinação da CLC
50 x 200	3	Determinação da CLC
75 x 200	3	Determinação da CLC
100 x 200	3	Determinação da CLC
125 x 200	3	Determinação da CLC
150 x 200	3	Determinação da CLC
175 x 200	3	Determinação da CLC
200 x 200	3	Determinação da CLC
200 x 200	3	Avaliação do lubrificante - óleo EP
200 x 200	3	Avaliação do lubrificante - fluido sintético emulsionável
200 x 200	3	Avaliação do lubrificante - fluido sintético "prelube"
200 x 200	3	Avaliação do lubrificante - filme sólido de PVC
200 x 200	3	Avaliação do lubrificante - filme sólido de poliuretano
Total de corpos de prova	39	

Tabela 3.2 – Quantidade de corpos de prova necessários para o ensaio de estampagem.

Os corpos de prova, passaram ainda pela impressão da malha de círculos na sua superfície, no laboratório de Conformação Mecânica na UFPR. Malha esta destinada à medição da deformação sofrida pelo material após a estampagem. Ao contrário dos processos convencionais utilizados (marcação eletrolítica, por resina foto-sensível ou a laser), o processo de marcação utilizado foi por serigrafia, através de uma máscara 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, composta por círculos tangentes entre si, 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. A secagem da tinta dá-se totalmente somente após 48 horas.

Apesar de Keeler (1968) e Hosford et al (1993) proporem uma malha de diâmetro 1/10 de polegada (2,54mm), a impressão da malha de círculos foi feita com diâmetro de 4,2mm. Para tanto, Marcondes (2002) realizou ensaios nas mesmas circunstâncias deste trabalho e obteve as deformações de um aço que concordou com a CLC fornecida pelo fabricante deste material. Isto demonstra que os

diâmetros da malha utilizados neste trabalho não interferiram de forma significativa nos resultados, além de validar o ensaio aqui proposto.

Os lubrificantes aplicados na chapa metálica foram desde os sólidos até os líquidos. Ao todo foram 5 lubrificantes:

- Poliuretano → lubrificante sólido, espessura da camada de 0,50mm;
- Filme de PVC (policloreto de vinila) → lubrificante sólido, espessura da camada de 0,05mm;
- Óleo mineral + óleo vegetal → emulsionável (1:2), com aditivos de extrema pressão (EP), viscosidade a 40°C de 30cSt e densidade a 20°C de 0,880g/cm³;
- Fluido sintético → “prelube” (usado como anticorrosivo após laminação), biodegradável, de fácil remoção, viscosidade a 40°C de 35cSt e densidade a 20°C de 0,880g/cm³;
- Fluido sintético → emulsionável (1:2), de fácil remoção, viscosidade a 40°C de 17cSt e densidade a 20°C de 0,890 g/cm³.

Quando da aplicação do poliuretano sobre a superfície da chapa, deve-se prever 3 horas para cura, pois a resina é misturada ao seu catalisador e somente após este intervalo de tempo realiza-se o ensaio.

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 a ferramenta em perfeita condição de uso, realizou-se então a montagem e regulação 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 permitiu o controle da velocidade de acionamento do punção (80mm/min), de forma que a ruptura do corpo de prova não excedesse um patamar que comprometesse os resultados dos ensaios. Ou seja, a válvula permitiu que, com esta 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 aumentar 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 estricção.

Foi utilizada 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 percurso do punção, que 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 monitor permitia ainda a visualização de todo o processo de estampagem até o surgimento da trinca, sendo este mais um importante mecanismo de monitoramento dos ensaios.

Após o processo de estampagem, os corpos de prova, que possuíam uma malha de círculos uniforme, todos com 4,2mm 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, como mostra a figura 3.4.

Os círculos, inicialmente com 4,2mm de diâmetro, tomaram o formato de círculos e/ou elipses após a deformação, sendo que o alongamento foi maior nos pontos de maior deformação do material.

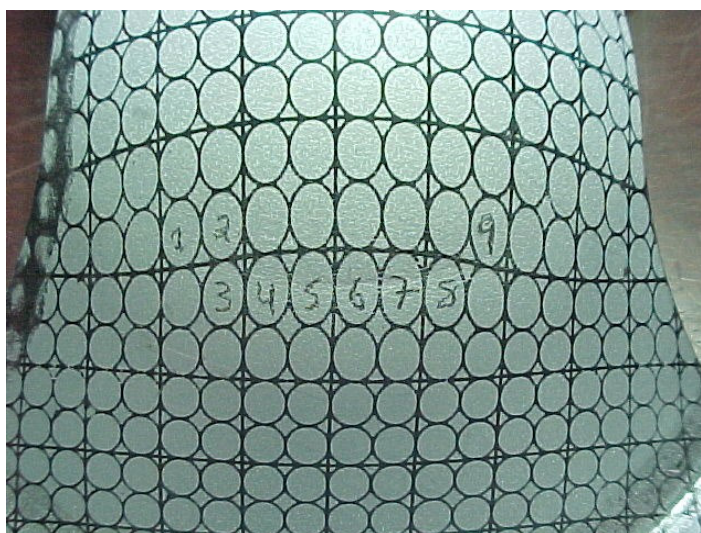


Figura 3.4 - Elipses e círculos formados após a deformação do material.

Após deformados, os corpos de prova foram medidos em um gabarito plástico flexível e transparente, com resolução de 0,1mm, figura 3.5, onde foram tomados os valores do eixo maior e menor das elipses formadas pela deformação do material.

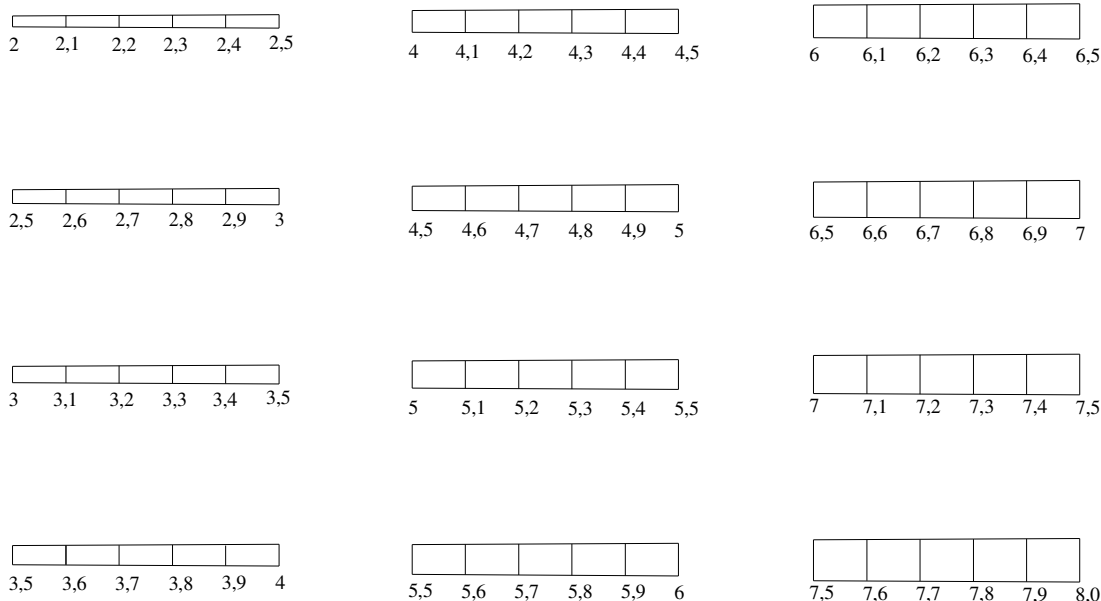


Figura 3.5 – Gabarito com resolução de 0,1mm, para medição dos diâmetros das elipses ou círculos, formados após a estampagem.

Todo o processo de medição das deformações sempre foi realizado no lado oposto à trinca e dividiu-se em três etapas, da seguinte maneira:

- Medição das deformações maior e menor na mesma latitude e nas faixas imediatamente superior e inferior à linha fraturada, figura 3.6;
- Medição da deformação menor nos pontos seguindo uma linha reta desde o ombro da matriz até o topo do copo estampado, figura 3.7;
- Medição das deformações maior e menor nos pontos seguindo uma linha reta desde o ombro da matriz até o topo do copo estampado, figura 3.7.

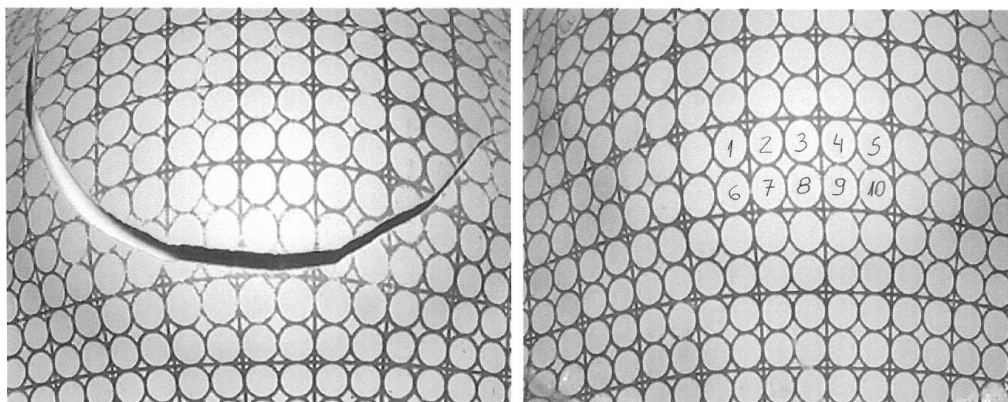


Figura 3.6 – Corpo de prova ilustrando os pontos de medição das deformações maior e menor, para levantamento da CLC.

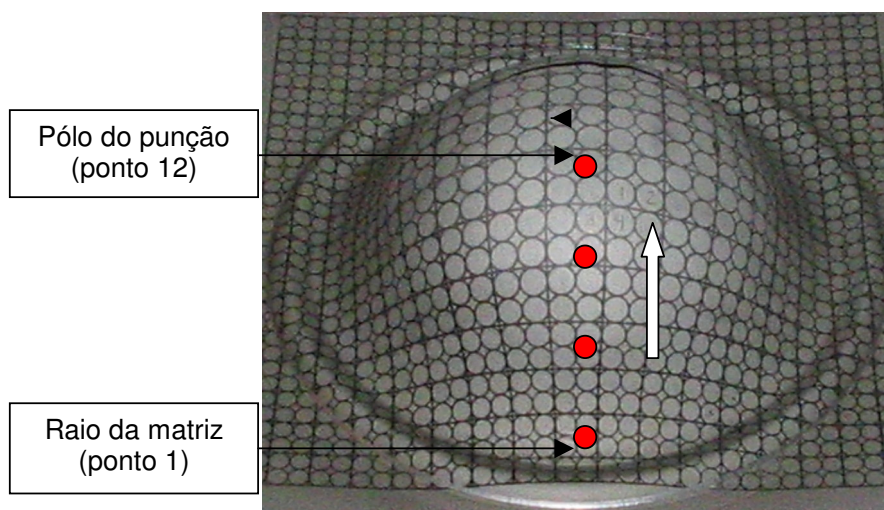


Figura 3.7 – Corpo de prova ilustrando os pontos de medição das deformações, desde o raio da matriz até o pólo do punção.

A primeira etapa de medição serviu para o levantamento da CLC do material, a partir dos corpos de prova mostrados na figura 3.3, e para avaliação do efeito dos diferentes lubrificantes, neste caso os corpos de prova de 200 x 200mm.

Já a segunda e terceira etapas de medições visaram a análise do perfil de distribuição das deformações, desde o ombro da matriz até o centro do punção, nos corpos de prova de 200x200mm. Isto com o propósito de se verificar em que ponto da chapa metálica concentraram-se os maiores níveis de deformação e avaliar a redução de espessura.

A partir dos valores do eixo maior e menor de cada elipse medida, foram então calculadas as deformações convencionais e_1 , e_2 e e_3 , de acordo com as equações vistas no capítulo 2 (equações 2.11 à 2.18). Com os valores das deformações de engenharia, calcula-se os valores das deformações verdadeiras ε_1 , ε_2 e ε_3 .

3.7 Ensaios de rugosidade

Com o objetivo de verificar as condições do acabamento superficial, tanto do punção quanto da chapa de aço DC 06, realizou-se a medição da rugosidade.

Para tanto foi utilizado um rugosímetro digital portátil, modelo SJ-201, fabricado pela Mitutoyo. Este equipamento encontra-se no laboratório de Aspersão Térmica, no Departamento de Engenharia Mecânica da UFPR, inclusive onde foram realizadas as medições.

Ao todo foram realizadas seis leituras para cada superfície, com comprimento de amostragem de 5mm, onde foram fornecidos os valores dos parâmetros R_a (rugosidade média), R_y (rugosidade total), R_z (distância média entre os cinco picos mais altos e os cinco vales mais profundos) e R_q (rugosidade média quadrática).

Os valores encontrados foram comparados com a norma DIN 4766, uma vez que a norma DIN EN 10152, não determina um valor para R_a , deixando claro que quando da encomenda, podem ser combinadas faixas para os valores da rugosidade superficial (R_a) para finalidades especiais de utilização final. A norma DIN 4766 relaciona o acabamento superficial de acordo com o processo de fabricação pelo qual foi submetido o material. Nesse caso a chapa de aço DC 06 foi obtida através do processo de laminação, enquanto que o punção foi torneado.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Análise química

A análise química do material possibilitou a verificação da real composição química da amostra fornecida para os ensaios, bem como sua comparação com a especificação da norma técnica DIN EN 10152.

A tabela 4.1 mostra tanto a composição química mássica percentual prevista para o material segundo a norma, sendo que os valores mostrados correspondem aos percentuais máximos permitidos para o aço DC 06, quanto o resultado do ensaio de análise química realizado em uma amostra do material utilizado neste trabalho.

Composição química do Aço DC 06 (partes da massa em %)																
Elementos químicos	C	Ti	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	Si	V	Nb	Sn	B	Pb
DIN EN 10152 (máximo)	0,02	0,3	0,25	0,02	0,02	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Ensaio de análise química	0,01	0,03	0,1	0,012	0,006	0,01	0,007	0,001	0,025	0,006	0,008	0,008	0,002	0	0,0001	0,0004

Tabela 4.1 – Composição química em %, segundo a norma DIN EN 10152 e resultante do ensaio de análise química do material.

Pela comparação entre os valores máximos permitidos pela norma para o carbono (C), fósforo (P), enxofre (S), manganês (Mn) e titânio (Ti), os resultados obtidos do ensaio de análise química mostram que o material utilizado para os testes encontra-se perfeitamente dentro das limitações estabelecidas para sua fabricação segundo norma, ou seja, todos os valores se encontram abaixo do percentual máximo permitido.

Uma característica importante do aço, mostrada tanto na composição química prevista pela norma quanto no resultado da análise química é o baixo percentual de carbono e a existência de titânio (Ti), vanádio (Va), nióbio (Nb) e molibdênio (Mo) como elementos de liga do material. Este fato caracteriza o DC 06 como um aço típico para operações que exigem alta estampabilidade, uma vez que o baixíssimo percentual de carbono, na faixa de 0,01%, praticamente define o material como sendo um aço de elevada estampabilidade, sendo a redução da resistência

mecânica do material, ocasionada pela pequena quantidade de carbono, compensada pelo acréscimo dos elementos de liga, conforme previsto por Van Vlack (1984) e Smith (1996). Desta forma o aço adquire propriedades finais que lhe conferem um elevado índice de conformabilidade sem que ocorra uma perda acentuada em termos de resistência mecânica, o que não seria viável para o produto final a ser estampado e resistência ao envelhecimento natural.

4.2 Ensaios metalográficos

Os ensaios metalográficos realizados inicialmente permitiram identificar a direção de laminação do material. A partir desta identificação tornou-se possível a preparação dos corpos de prova para os ensaios de tração, para o qual foram retiradas amostras formando ângulos de 0° , 45° e 90° com relação a direção de laminação da chapa metálica.

As figuras 4.1 e 4.2, mostram as micrografias da secção longitudinal da chapa submetida ao ensaio metalográfico com aumento de 200x e 500x respectivamente.

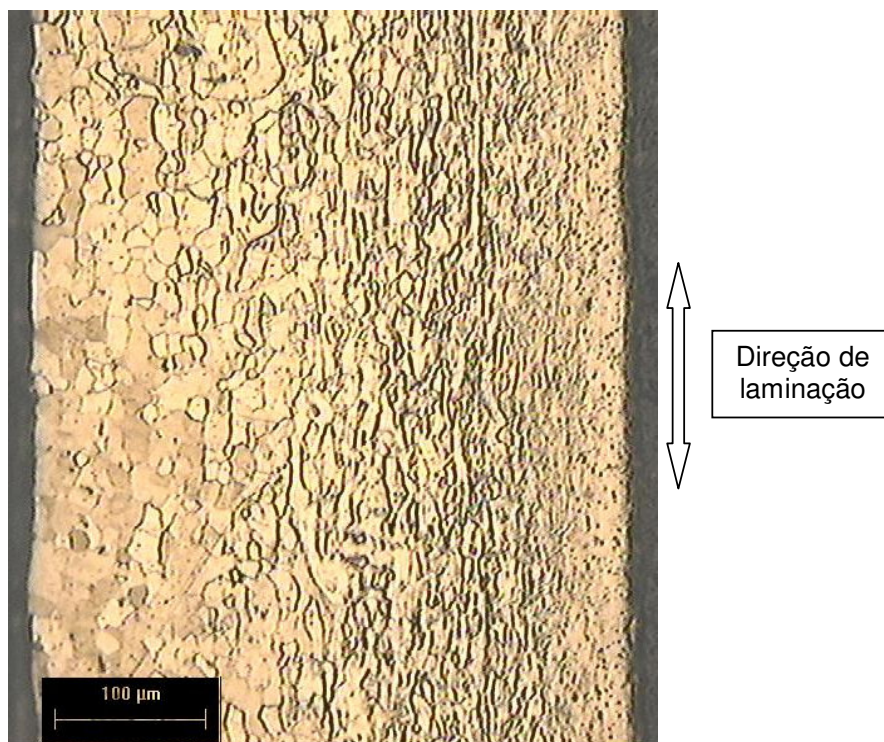


Figura 4.1 – Metalografia da secção longitudinal da chapa, aumento de 200x.

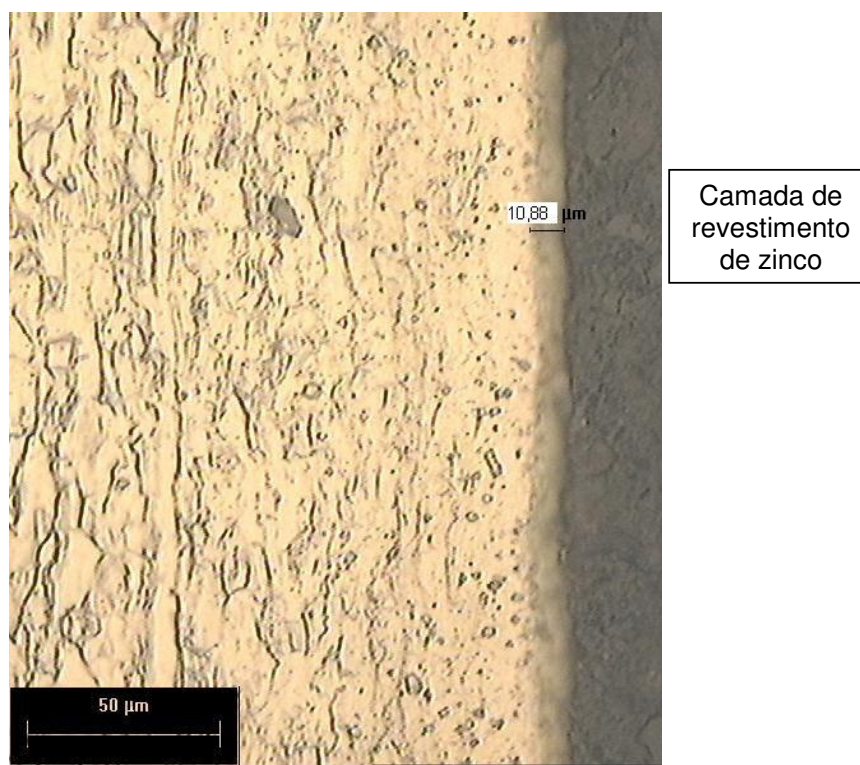


Figura 4.2 – Metalografia da secção longitudinal da chapa, aumento de 500x, mostrando a espessura do revestimento.

As micrografias mostradas nas figuras 4.1 e 4.2 mostram claramente um alongamento dos grãos do material na direção da seta vertical colocada ao lado da figura 4.1. Isto caracteriza o material estudado como sendo laminado a frio, conforme norma DIN EN 10152, uma vez que os grãos permaneceram alongados após o encruamento, sem sofrer um processo de recristalização, muito comum no processo de laminação a quente, segundo Kumar (2002).

Este alongamento preferencial dos grãos na direção de laminação do material tornou possível, ainda nesta primeira etapa de testes, caracterizar o aço como sendo anisotrópico, uma vez que, devido a esta morfologia dos grãos, segundo Kumar (2002), o material não deve apresentar as mesmas propriedades mecânicas quando submetido a esforços formando diferentes ângulos em relação a sua direção de laminação. A comprovação e quantificação desta característica do material deu-se por meio de ensaios de tração.

Nota-se ainda na figura 4.2 a medida de $10,88\mu\text{m}$ para a espessura do revestimento de zinco da chapa metálica, característica que comprova o processo de zincagem, também previsto pela norma DIN EN 10152.

4.3 Ensaio de tração

Os ensaios de tração, realizados com os corpos de prova retirados formando ângulos de 0° , 45° e 90° em relação à direção de laminação da chapa, forneceram informações relativas às propriedades mecânicas do material, como o limite de resistência (LR), tensão de escoamento (LE) e alongamento (AI). Estas propriedades caracterizam o material quanto aos seus valores limite em termos de resistência (LR), a tensão máxima atingida ao final da deformação elástica e conseqüente início de deformação plástica (LE) e finalmente o alongamento máximo (AI) do material até o instante da fratura.

Outros dados calculados ao final dos ensaios de tração foram o fator de anisotropia (“*R*” de Lankford) e coeficiente de encruamento (expoente “*n*”) do material. Estes dois parâmetros caracterizam o material quanto a sua estampabilidade.

Além das propriedades mecânicas e dos parâmetros de estampabilidade do material, o ensaio de tração permitiu ainda uma avaliação do material quanto ao perfil da curva Tensão x Deformação da chapa metálica.

A tabela 4.2 mostra os resultados referentes às propriedades mecânicas do material obtidas através dos ensaios de tração, em comparação aos valores determinados pela norma técnica do aço DC 06.

Propriedades Mecânicas do aço DC 06			
Propriedades	LR (MPa)	LE máx.(MPa)	AI min. (%)
Norma DIN EN 10152	270 - 350	190	37
Média dos ensaios de tração	277,9	145,4	52,6

Tabela 4.2 – Comparativo das propriedades mecânicas LR, LE e AI, do aço DC 06, segundo a norma DIN EN 10152 e através dos ensaios de tração.

Os resultados apresentados na tabela 4.2 mostraram que tanto os valores do LR quanto do LE e do AI, obtidos pelos ensaios de tração, enquadram-se perfeitamente dentro dos valores pré-estabelecidos pela norma, sem exceder ou mesmo se aproximar da margem limite determinada. Isto garante que, em termos de propriedades mecânicas, a amostra de aço a ser utilizada nos testes subsequentes não apresenta nenhuma restrição que possa influenciar nos resultados dos próximos ensaios laboratoriais.

Os parâmetros de estampabilidade R e n da chapa, obtidos pelos ensaios de tração, estão apresentados na tabela 4.3. Os valores foram obtidos a partir da realização de um mínimo de três ensaios para cada direção de corpo de prova, através dos quais foi calculada uma média para cada direção, conforme prevê a norma NBR 8164. A tabela 4.3 apresenta, além dos valores médios de R e n para as direções de 0° , 45° e 90° , o valor da anisotropia média ($\bar{R}$) e da anisotropia planar (ΔR).

Parâmetros de Estampabilidade do aço DC 06								
Parâmetros	n_{0°	n_{45°	$n_{90^\circ} \text{ (min.)}$	R_{0°	R_{45°	$R_{90^\circ} \text{ (min.)}$	$\bar{R}$	ΔR
Norma DIN EN 10152	x	x	0,2	x	x	1,8	x	x
Média dos ensaios de tração	0,2702	0,2624	0,2641	1,9637	2,1162	2,6766	2,2182	0,204

Tabela 4.3 – Parâmetros de estampagem R , n , $\bar{R}$ e ΔR , do aço DC 06, segundo a norma DIN EN 10152 e através dos ensaios de tração.

Os resultados da tabela 4.3 reforçam que o aço DC 06 é um material destinado a operações que exigem um alto grau de estampagem, uma vez que tanto o fator R quanto o coeficiente n apresentaram valores suficientemente elevados (o valor $\Delta R = 0,204$ ficou extremamente baixo, discrepante em relação aos demais valores encontrados), próximos ou acima de 2,0 para o R e acima de 0,2 para o n , a ponto de garantir esta característica do material. De acordo com Kumar (2002), um aço que apresenta valores para $\bar{R}$ maior que 1,6, n maior que 0,2 e ΔR próximo a zero, é considerado um material de alta conformabilidade. Um fator importante a ser observado é a variação dos resultados do fator R para cada uma das três direções (0° , 45° e 90°), representados por R_{0° , R_{45° e R_{90° respectivamente. Neste caso, o maior valor de R foi atingido para a direção de 90° , em torno de 2,7, o que implica

dizer que o material apresenta melhor estampabilidade nesta direção, ou seja, apresenta uma tendência de se deformar mais eficientemente aos esforços perpendiculares a direção de laminação da chapa, atingindo um nível de conformação maior e sem ruptura nesta direção. Para as direções de 0° e 45° , os valores de R apresentaram-se na faixa de 2,1 e 2,0 respectivamente. Estes valores se encontram dentro de uma faixa típica para materiais com boa conformabilidade, apesar de serem inferiores aos valores atingidos para a direção de 90° .

Esta tendência do material apresentar propriedades diferentes para cada uma das três direções ensaiadas já fora prevista anteriormente pelos ensaios metalográficos, que mostraram o alongamento dos grãos na direção de laminação do material. Devido a esta característica já se esperava resultados diferentes para R_{0° , R_{45° e R_{90° nos ensaios de tração, visto que este alongamento preferencial dos grãos em uma direção acarretaria numa característica anisotrópica da chapa, influenciando os resultados dos ensaios de tração.

Desta forma podemos classificar o material ensaiado como sendo um aço anisotrópico planar, uma vez que apresentou valores diferentes para R_{0° , R_{45° e R_{90° ($R_{0^\circ} \neq R_{45^\circ} \neq R_{90^\circ}$). Este fato indica que o material apresenta diferentes propriedades mecânicas no plano da chapa, ou seja, a reação do material é diferente conforme a direção de aplicação dos esforços no plano do material. Os diferentes valores para cada uma das direções consideradas nos ensaios, implica dizer que o material apresenta uma tendência a sofrer um fenômeno conhecido como orelhamento. A tendência do material sofrer o orelhamento é quantificado pelo ΔR , apresentado na tabela 4.3 com valor de 0,204 para o DC 06. Quanto maior o valor do ΔR , segundo Schaeffer (1999) e Keeler (1968), maior a tendência do material sofrer orelhamento, ao passo que, se este valor fosse nulo ($\Delta R = 0$), este fenômeno não aconteceria com o material.

Além da anisotropia planar, o DC 06 apresentou ainda anisotropia média, apresentado na tabela 4.3 pelo parâmetro $\bar{R}$. O valor obtido para o $\bar{R}$ foi de 2,22, o que faz com que este material tenda a apresentar uma deformação maior no plano da chapa do que na direção da espessura (afinamento do material). Esta desproporção entre as deformações no plano e na espessura da chapa é o que caracteriza o material em questão como sendo anisotrópico normal. O fato da chapa

se deformar muito mais no plano do que na espessura ($\bar{R} > 1$) atribui ao DC 06 uma excelente estampabilidade, daí a explicação de que quanto maior o valor do fator R , melhor a estampabilidade do material. Essas deformações seriam iguais se o valor do fator $\bar{R}$ fosse igual a 1, o que classificaria a chapa como sendo isotrópica normal.

O coeficiente de encruamento resultante dos ensaios foi de aproximadamente 0,26 para cada uma das três direções em que o material foi ensaiado, representados por n_{0° , n_{45° e n_{90° para os ângulos de 0° , 45° e 90° respectivamente. A partir deste valor pode-se dizer que o DC 06 apresenta uma boa estampabilidade. Assim como o valor do fator R , quanto maior o valor do coeficiente de encruamento n , melhor será a estampabilidade do material, Kumar (2002). Desta forma, o resultado obtido para o expoente n nos ensaios mostra que o material em estudo tende a apresentar um elevado limite de instabilidade plástica, o que confere boa estampabilidade por estiramento, uma vez que, quanto maior o limite de instabilidade do material, o material quando submetido a estampagem, tende a distribuir a deformação para as regiões vizinhas ao local mais deformado, resultando em um afinamento (redução de espessura) mais homogêneo da chapa. Isso evita que ocorra uma redução da espessura localizada numa porção do material, onde fatalmente ocorreria a ruptura da chapa.

A figura 4.3 mostra a curva Tensão x Deformação para cada um dos 9 corpos de prova ensaiados, três para cada ângulo em relação a direção de laminação do material, representados por CP1 (corpo de prova número 1) à CP9 (corpo de prova número 9), nesta ordem:

- CP1, CP2 e CP3 → 0° em relação a direção de laminação.
- CP4, CP5 e CP6 → 45° em relação a direção de laminação.
- CP7, CP8 e CP9 → 90° em relação a direção de laminação.

As curvas mostram a deformação do material até um percentual de 18%, quando os ensaios foram interrompidos para medição dos corpos de prova.

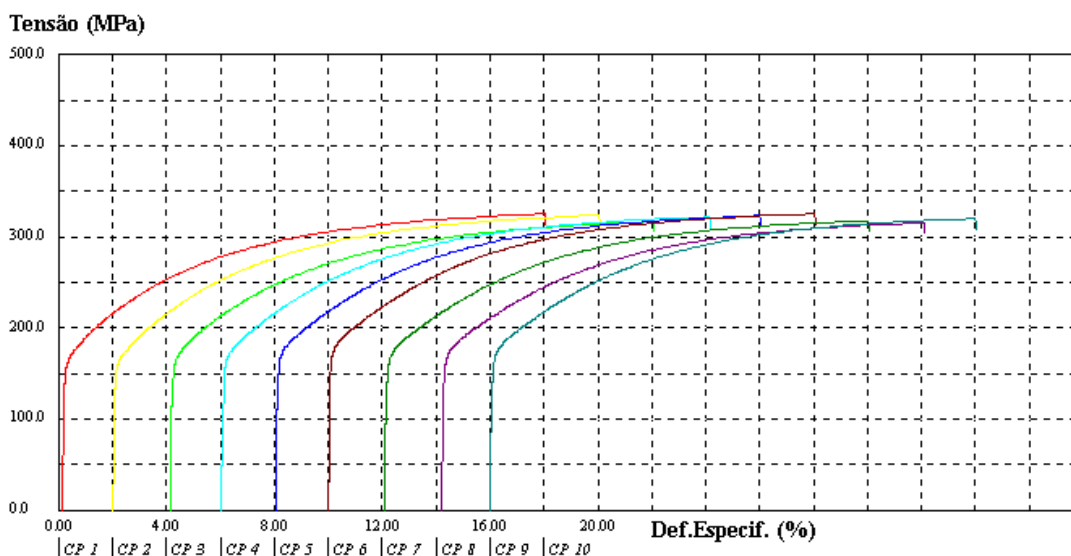


Figura 4.3 – Gráfico Tensão x Deformação do aço DC 06.

Analisando a figura 4.3, nota-se que as curvas mostraram-se idênticas em todos os ensaios, independente da direção 0° , 45° ou 90° . Fato este inesperado, já que trata-se de um material anisotrópico e propriedades como tensão de escoamento e limite de resistência deveriam ser afetadas devido a anisotropia ($R_{0^\circ} \neq R_{45^\circ} \neq R_{90^\circ}$), segundo Kumar (2002). Outro detalhe importante observado nas curvas foi a inexistência do ponto de escoamento definido no final da região elástica. Este é um dado importante para operações de estampagem, uma vez que neste processo de fabricação este ponto poderia acarretar defeitos no produto final, como as linhas de Lüders, conforme Smith (1996), quando a deformação em alguns pontos da peça atingem uma deformação plástica porém próxima da região elástica, ocasionando esta falha. Este defeito ainda sim pode ocorrer, caso o material esteja envelhecido, o que seria evidenciado por uma conseqüente elevação na posição do ponto de escoamento na curva.

4.4 Ensaios de estampagem Nakazima sem lubrificação

Os ensaios de estampagem sem lubrificação realizados nesta etapa segundo o método tradicional proposto por Nakazima, tiveram dois focos importante no estudo. O primeiro visando finalizar a caracterização da chapa de aço DC 06 quanto

a sua estampabilidade, e o segundo com o objetivo de gerar uma base comparativa para os testes subseqüentes, ou seja, os resultados dos ensaios Nakazima realizados com diferentes lubrificantes foram comparados aos resultados dos ensaios pelo método tradicional sem lubrificação do punção, para verificação dos efeitos produzidos pelos lubrificantes.

O ensaio originalmente proposto por Nakazima utiliza um único formato de punção, hemisférico com raio de 50mm e diâmetro de 100mm, e um total de 18 corpos de prova com largura variando de 40 à 200mm, todos com 200mm de comprimento. A partir desta configuração de ensaio, tomando-se, porém, um número reduzido de corpos de prova (ver item 3.6 do procedimento experimental), foi obtida a curva limite de conformação do aço DC 06, figura 4.4, sem lubrificação, simulando a condição mais crítica de ensaio em termos de atrito.

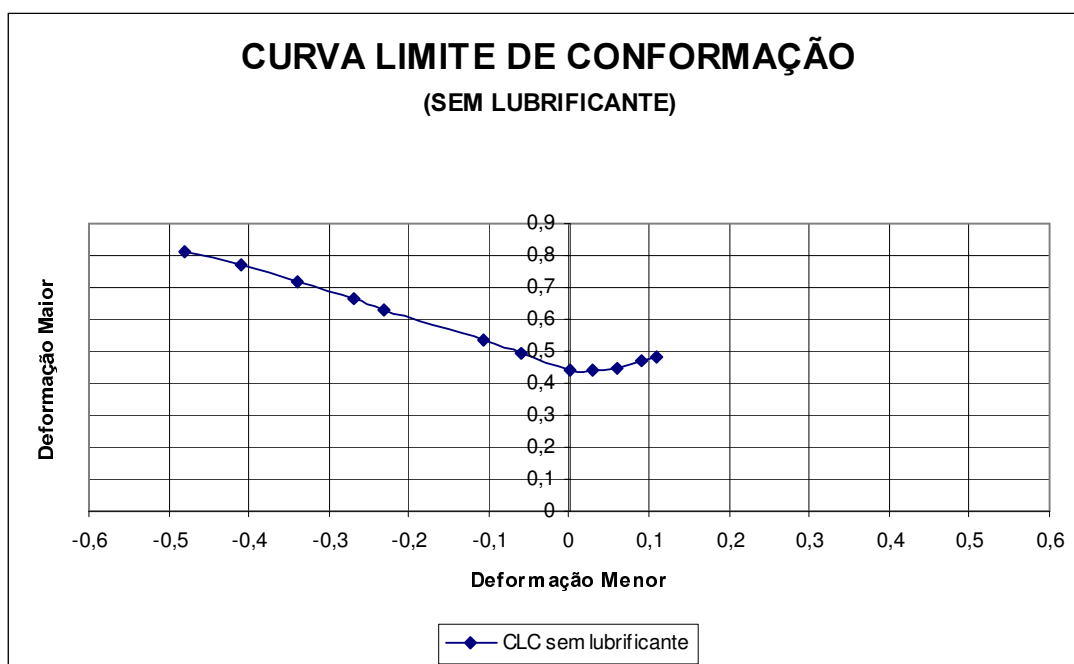


Figura 4.4 – Curva Limite de Conformação do aço DC 06 sem lubrificação do punção.

A figura 4.5 mostra os corpos de prova estampados sem lubrificação do punção, em uma das três baterias de testes para levantamento da curva limite de conformação.

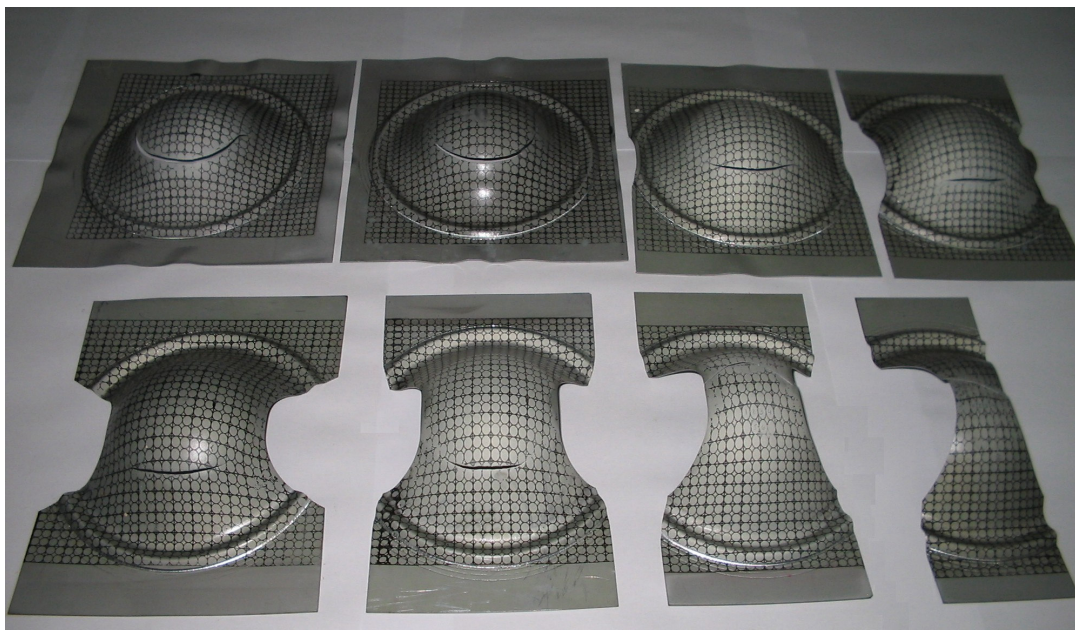


Figura 4.5 – Corpos de prova estampados com punção hemisférico (raio de 50mm) sem lubrificação do punção, para a obtenção da CLC do aço DC 06.

Os ensaios realizados sem lubrificação do punção apresentaram uma CLC com um alto nível de deformação para as condições de embutimento profundo, lado esquerdo da curva (segundo quadrante), onde a deformação maior (ϵ_1) chegou a 0,81 enquanto a deformação menor (ϵ_2) foi de 0,48. Já o estado plano de deformação, atingiu uma deformação maior de 0,44 e a deformação menor foi nula. Em contrapartida, para o lado direito da curva, que representa a condição de estiramento, o nível máximo de deformação atingido, ϵ_1 foi de 0,48 e ϵ_2 de 0,11 que não foram tão elevados. Este fato apontou uma dificuldade característica deste tipo de ensaio em se atingir um perfil completo da CLC para o estiramento, possibilitando somente pequenos níveis de deformação ϵ_2 .

A diferença nos níveis de deformação atingidos nos modos de deformação por embutimento profundo e estiramento encontra-se na variação da largura dos corpos de prova. Como o embutimento profundo é um modo de deformação que permite certo escorregamento da chapa durante a estampagem, à medida que se reduzia a largura dos corpos de prova diminuía-se conseqüentemente a ação do “draw bed”, que prende o material circunferencialmente em torno da matriz, com a finalidade de impedir o escorregamento da chapa. Desta forma, uma porção lateral

dos corpos de prova mais estreitos que o diâmetro do “draw bed” oferecia certa liberdade para o material deformar-se, tendendo a promover um esforço uniaxial de tração, gerando assim um maior alongamento do corpo de prova no sentido do comprimento e uma redução na largura do corpo de prova. Isto gerou elipses mais alongadas (maior deformação ϵ_1) e estreitas (deformação negativa ϵ_2). Assim sendo, quanto menor a largura dos corpos de prova utilizados menores eram as deformações ϵ_2 obtidas, fato este que permitiu a extensão do perfil da CLC para o embutimento profundo, lado esquerdo da curva.

Ao contrário do embutimento profundo, para o qual era possível a utilização de corpos de prova cada vez mais estreitos para se obter deformações ϵ_2 cada vez menores (aumentando assim o perfil da CLC), o modo de deformação por estiramento era limitado em termos do número de corpos de prova possíveis de serem utilizados. Isto porque a partir de certa largura, acima de 125mm, o “draw bed” já atuava em todo o contorno do corpo de prova, o que mantinha a chapa presa em todos os sentidos de deformação, gerando um estado biaxial de tensão. Nestas condições, a malha impressa no material gerou círculos de diâmetros maiores, resultando em deformações positivas tanto para ϵ_1 quanto para ϵ_2 . A restrição do ensaio, porém, em se obter pontos com maiores níveis de deformações para ϵ_2 , concentrou-se no fato de que a utilização de corpos de prova maiores não resultaria em maiores deformações, ao passo que estando o “draw bed” atuando em todo o contorno do punção, a condição necessária para promover o estiramento já estava atendida, de forma que a porção excedente de material em nada influenciaria.

Ficou evidenciado também a dependência da lubrificação nos modos de deformação. No embutimento profundo e estado plano de deformação a CLC apresentou altos níveis de deformação ($\epsilon_1=0,81$ e $\epsilon_2=0,48$, $\epsilon_1=0,44$ e $\epsilon_2=0$, respectivamente), demonstrando com isso que estes modos de deformação não tendem a ser dependentes da lubrificação, segundo Keeler (2000).

No modo de deformação por estiramento a CLC não ficou totalmente representada, com baixos níveis de deformação, $\epsilon_1=0,45$ e principalmente $\epsilon_2=0,11$, o que demonstra a dependência deste modo de deformação com a lubrificação, para que se tenha redução do atrito na interface punção – chapa metálica e, conseqüentemente maiores níveis de deformação ϵ_2 . A lubrificação do punção não

tem grande influência no embutimento profundo, ao passo que no estiramento, o punção deve ser muito bem lubrificado, para que a CLC possa ser prolongada a um maior nível de deformação no estiramento, conforme relatou Keeler (1968).

É na interface punção – chapa metálica que ocorre um movimento relativo, durante a estampagem, pois o material é conformado através da redução de sua espessura. Então a utilização de um material lubrificante com a função de isolar estas superfícies deve ser utilizado para diminuir o atrito, facilitando esta movimentação, para que se aumente ϵ_2 e a CLC seja prolongada à sua direita.

Pela figura 4.5 pode-se observar que a ruptura dos corpos de prova ocorreu em uma região intermediária entre o raio da matriz e o pólo do punção, estando conforme a figura 2.13, segundo fascículo de informações técnicas da Usiminas (1999). Portanto, nenhuma ruptura ocorreu próxima ao raio da matriz, ocasionada pelo seu raio ou pela ação do “draw bed”, o que inutilizaria a amostra, devido a fratura precoce do material.

Procurou-se desenvolver de forma bastante minuciosa todo o perfil da CLC mostrada na figura 4.4, por ser esta curva o padrão de comparação para avaliação dos lubrificantes utilizados neste trabalho. Todos os resultados obtidos, para cada um dos lubrificantes nos ensaios subseqüentes, foram comparados a esta CLC, que foi obtida com o punção hemisférico e sem lubrificação.

4.5 Ensaios de estampagem Nakazima com lubrificação

Nos ensaios de estampagem Nakazima com lubrificação foram utilizados os mesmos procedimentos dos testes pelo método tradicional, sendo que a única variável em relação aos ensaios anteriores foi a utilização de um filme lubrificante, com a função de isolar as superfícies da chapa metálica e do punção, reduzindo o atrito na interface e, por conseguinte, visando aumentar as deformações ϵ_1 e principalmente ϵ_2 no modo de deformação por estiramento, para estender a CLC.

Ao todo foram avaliados cinco lubrificantes, desde os líquidos: uma combinação de óleo mineral e óleo vegetal com aditivos de extrema pressão, um fluido sintético biodegradável e um fluido sintético emulsionável; até os sólidos: um filme de PVC e um filme de poliuretano.

Nesta etapa do trabalho foram utilizados apenas corpos de prova de 200x200mm (para simular o modo de deformação por estiramento) por dois motivos. Primeiro, procurou-se minimizar o número de ensaios para cada um dos lubrificantes adotados e segundo, considerando que a lubrificação na estampagem é desejável no modo de deformação por estiramento, não tendo muita influência nos modos de deformação por embutimento profundo e estado plano de deformação, Keeler (1968), o que justificaria corpos de prova com menores larguras.

Desta forma foram estampados os corpos de prova de 200x200mm para cada um dos cinco lubrificantes, figura 4.6, representados por CP01 (corpo de prova número 1) à CP05 (corpo de prova número 5), nesta ordem:

- CP01 → combinação de óleos mineral e vegetal com aditivos EP.
- CP02 → fluido sintético emulsionável.
- CP03 → fluido sintético “prelube”.
- CP04 → filme sólido de PVC.
- CP05 → filme sólido de poliuretano.

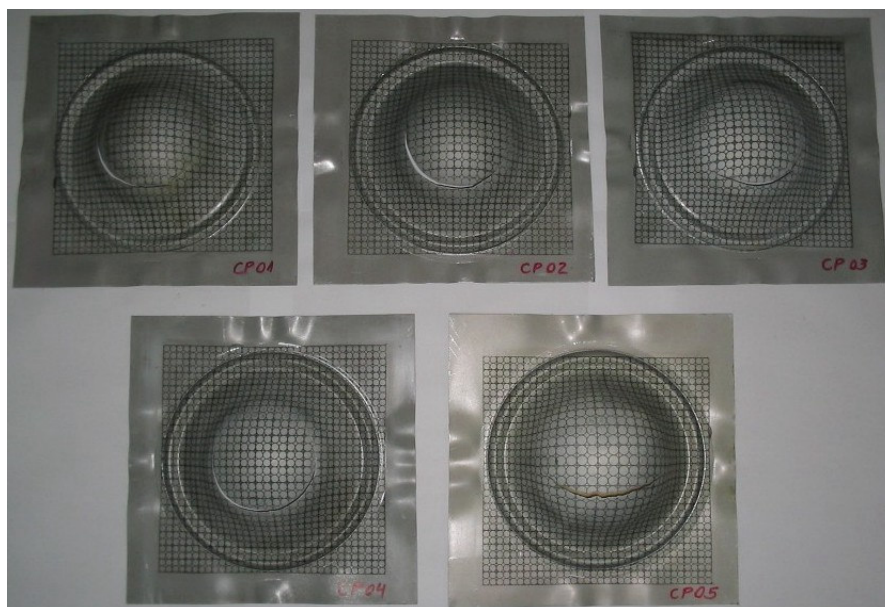


Figura 4.6 – Corpos de prova com dimensões de 200x200mm, estampados com punção hemisférico (raio de 50mm) com diferentes lubrificantes, para comparação com a CLC do aço DC 06 sem lubrificação do punção. CP01 - óleo mineral e óleo vegetal com aditivos EP, CP02 - fluido sintético emulsionável, CP03 - fluido sintético “prelube”, CP04 - filme de PVC e CP05 - filme de poliuretano.

O desempenho do primeiro lubrificante utilizado, uma combinação de óleos mineral e vegetal, emulsionável e com aditivos de extrema pressão, é mostrado na figura 4.7.

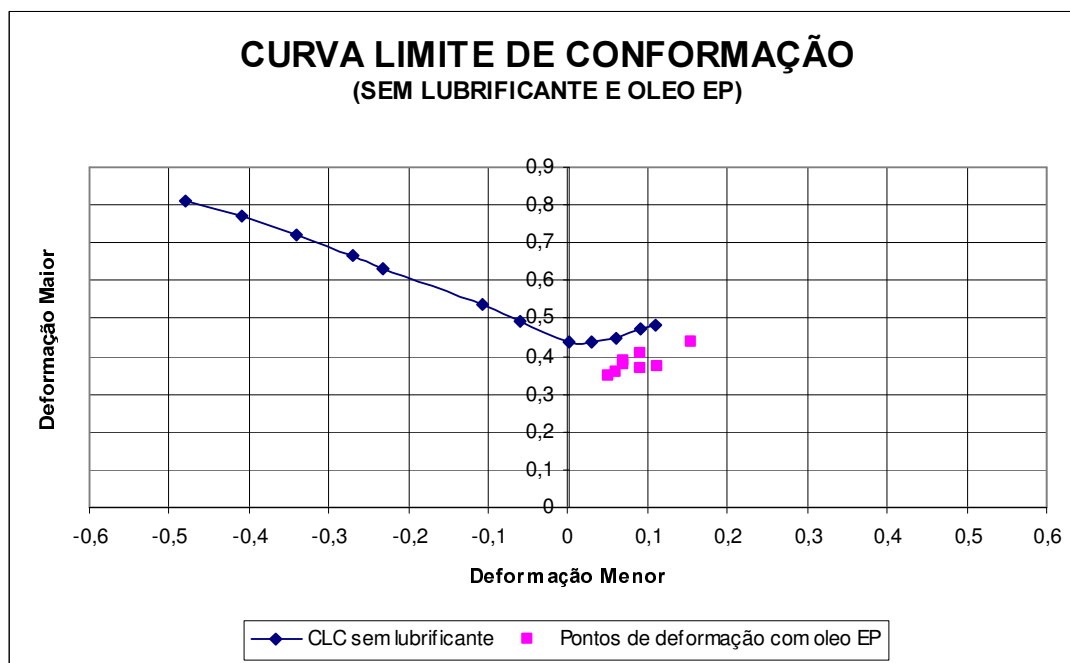


Figura 4.7 – Diagrama limite de conformação – comparação entre a CLC obtida sem lubrificação do punção e os pontos de máxima deformação atingidos com óleo mineral + óleo vegetal com aditivos de extrema pressão utilizado como lubrificante.

Pelos resultados mostrados na figura 4.7, nota-se que a dispersão dos pontos, levantados com os corpos de prova de 200x200mm utilizando como lubrificação uma mistura de óleo mineral e óleo vegetal com aditivos EP, ficaram próximos da CLC obtida segundo o método Nakazima original sem lubrificação.

Com uma deformação maior de 0,44 e menor de 0,15, esta última ligeiramente acima da deformação atingida sem lubrificante que foi de 0,11, pode-se observar que com este lubrificante foi possível um pequeno aumento na deformação menor. Ao contrário do que se esperava, este resultado não foi muito expressivo já que trata-se de um lubrificante que contém aditivos EP, ou seja, na sua composição segundo Godwin (2004), estão presentes os elementos cloro, enxofre e/ou fósforo que têm como principal característica reagir, com o aumento da pressão, na

interface ferramenta – corpo de prova, formando um filme para isolar as superfícies, evitando que as mesmas entrem em contato, com isso diminuindo o atrito e aumentando os níveis de deformação.

Provavelmente a pressão exercida na interface do punção com o corpo de prova, durante a conformação, excedeu a valores que este filme não suportou e acabou rompendo, deixando expostas as superfícies, que entraram em contato, gerando atrito e comprometendo um ganho ainda maior na deformação ϵ_2 .

Na seqüência dos ensaios foi utilizado como lubrificante um fluido sintético emulsionável na proporção de uma parte de fluido para duas partes de água e seu desempenho é mostrado na figura 4.8.

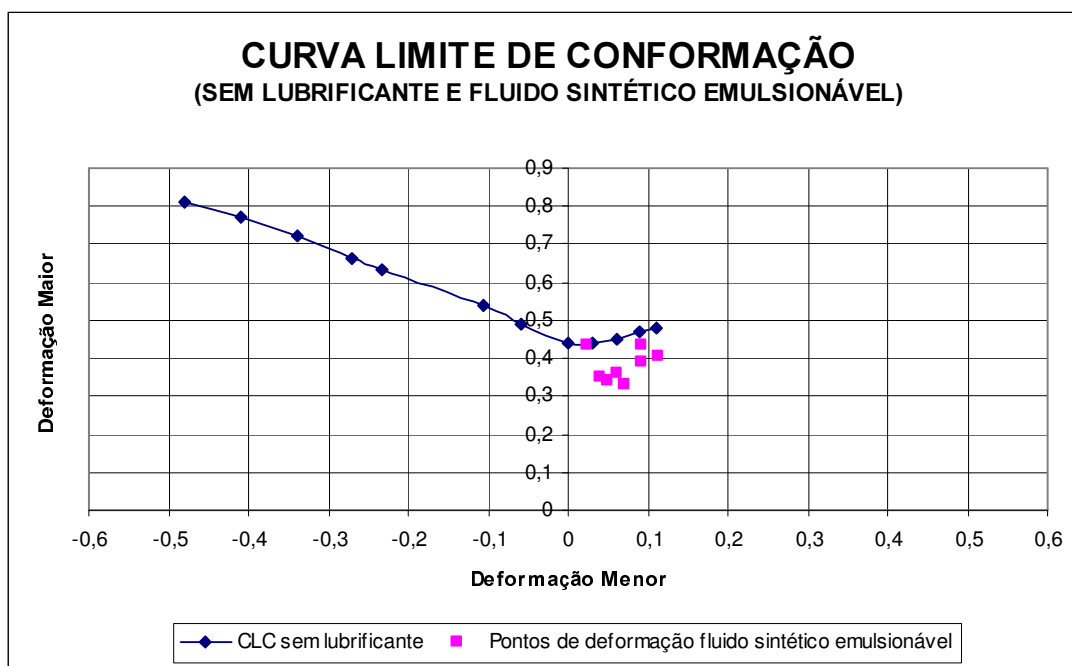


Figura 4.8 – Diagrama limite de conformação – comparação entre a CLC obtida sem lubrificação do punção e os pontos de máxima deformação atingidos com um fluido sintético emulsionável (1:2) como lubrificante.

Pela distribuição dos pontos, mostrados na figura 4.8, nota-se que estes pontos obtidos com a utilização de um fluido sintético emulsionável ficaram muito próximos, mas ainda abaixo, da CLC obtida sem lubrificação do punção. As deformações, maior e menor, foram de 0,45 e 0,11, respectivamente.

Considerando tratar-se de um lubrificante sintético, com vários agentes químicos na sua formulação (característica destes fluidos) de acordo com Trivett et al (2004), e que o mesmo dissipa bem o calor e mantém-se contínuo mesmo em operações severas de estampagem segundo Klann (2000), o resultado ficou abaixo da expectativa, e novamente, assim como o lubrificante com aditivos EP, o filme proporcionado pelo lubrificante deve ter rompido, frente as altas pressões, durante a estampagem, gerando praticamente o mesmo nível de deformações como se não fizesse o uso de lubrificação.

O terceiro lubrificante avaliado também foi um fluido sintético, porém com características diferentes do anterior. Trata-se de um “prelube”, que de acordo com Carcel et al (2005), é a denominação dada a lubrificantes que são aplicados após a laminação, que além de proteger a chapa metálica contra corrosão, dispensam a aplicação adicional de outro lubrificante antes do processo de estampagem. Outra característica deste fluido é de ser biodegradável.

A figura 4.9 mostra os pontos de máxima deformação atingidos com o uso deste lubrificante.

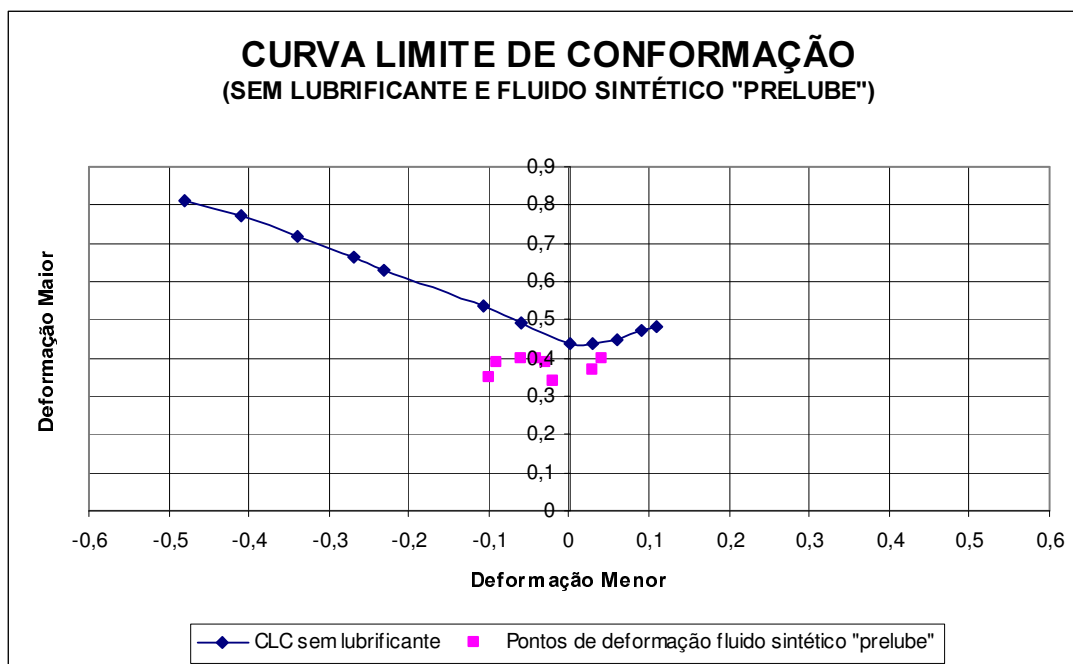


Figura 4.9 – Diagrama limite de conformação – comparação entre a CLC obtida sem lubrificação do punção e os pontos de máxima deformação atingidos com um fluido sintético “prelube” biodegradável utilizado como lubrificante.

Analisando a figura 4.9, observa-se que, mais uma vez, a distribuição dos pontos, utilizando um fluido sintético, ficou abaixo da CLC obtida sem lubrificação do punção. Com deformação maior de 0,40 e menor de 0,04, com um agravante de que muitos pontos nem sequer atingiram o lado direito da CLC, ou seja, o modo de deformação por estiramento, demonstrando que o filme proporcionado por este lubrificante não se manteve contínuo com o aumento da pressão gerada no decorrer do processo de conformação.

A seguir, foi utilizado o primeiro lubrificante sólido, um filme de PVC (policloreto de vinila) com espessura de 0,05mm. O seu desempenho como lubrificante pode ser avaliado na figura 4.10.

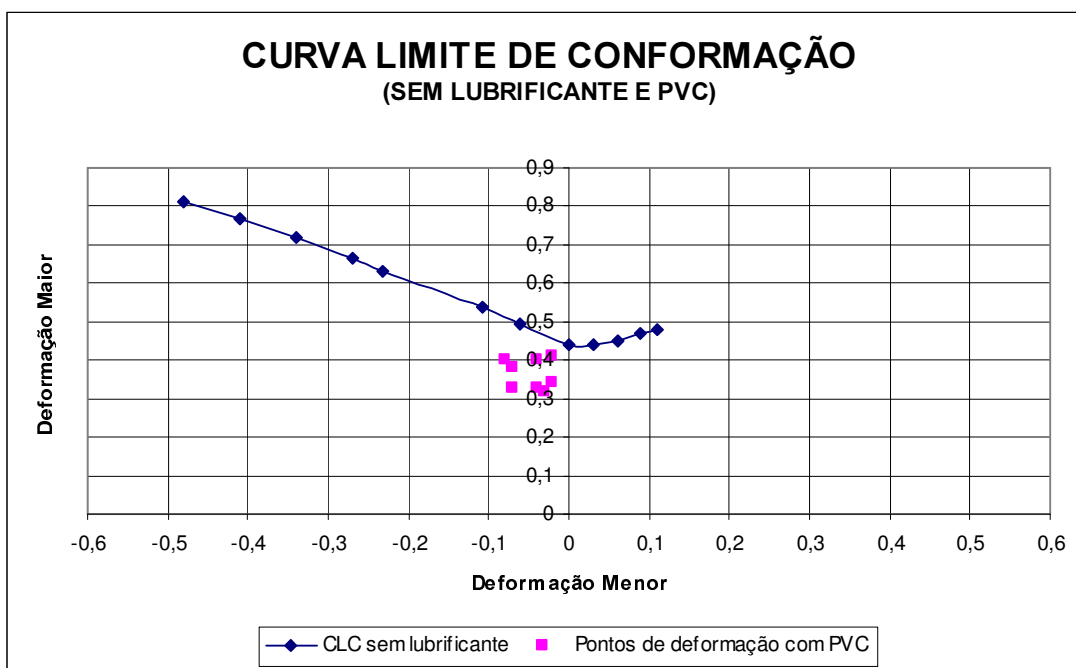


Figura 4.10 – Diagrama limite de conformação – comparação entre a CLC obtida sem lubrificação do punção e os pontos de máxima deformação atingidos com um filme de PVC utilizado como lubrificante.

Pelos pontos de máxima deformação medidos nas amostras estampadas de 200x200mm, fazendo-se uso de um filme de PVC, mostrados na figura 4.10, observa-se que os pontos ficaram muito aquém da CLC obtida sem lubrificação do punção. Nenhum ponto atingiu o lado direito da CLC, todos concentraram-se a

esquerda da curva, próximos ao estado plano de deformação, demonstrando com isso que a utilização deste filme em nada contribuiu para diminuição do atrito e por conseguinte não aumentou a deformação máxima menor.

O último lubrificante testado foi um filme sólido de poliuretano com 0,5mm de espessura. A figura 4.11 mostra a CLC do aço DC 06 obtida sem lubrificante e sobrepostos a curva, os pontos de maior deformação obtidos nos ensaios com este filme aplicado à amostra de 200x200mm.

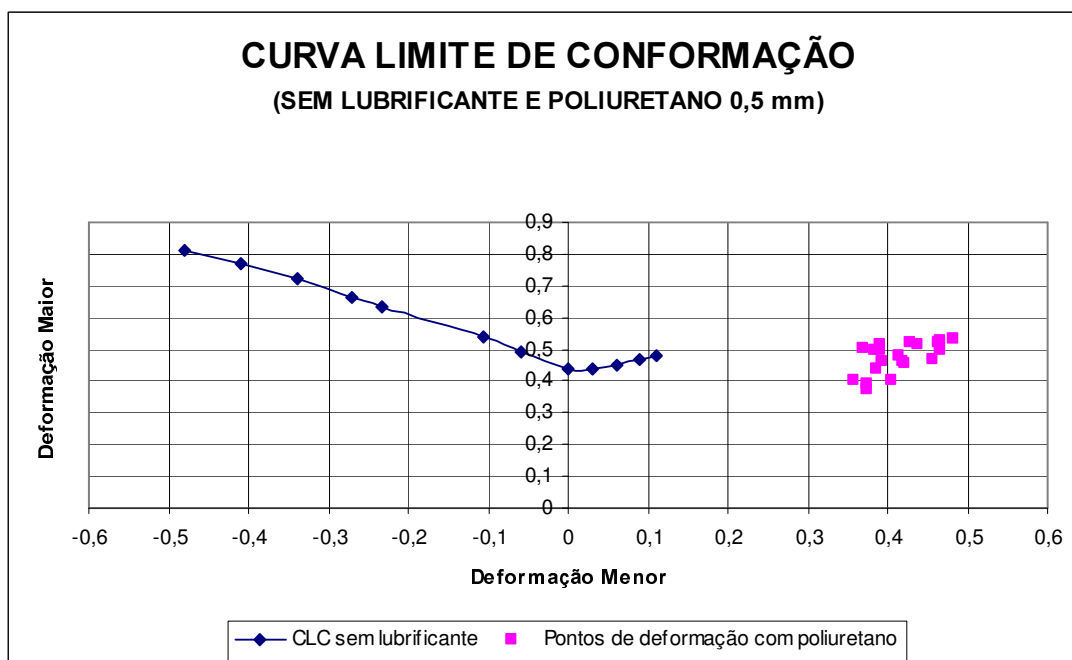


Figura 4.11 – Diagrama limite de conformação – comparação entre a CLC obtida sem lubrificação do punção e os pontos de máxima deformação atingidos com poliuretano utilizado como lubrificante.

Pelos pontos mostrados na figura 4.11, que representam a máxima deformação atingida com o filme de poliuretano, nota-se que com este agente lubrificante gerou-se pontos com uma maior deformação ϵ_2 , com valores em torno de 0,48, ao passo que sem lubrificante este nível chegou a 0,11. Estes resultados mostram o ganho real de 37% em termos de estampabilidade do material, no modo de deformação por estiramento, com este lubrificante. Se comparados aos lubrificantes líquidos, este ganho passa a ser de 33 à 44%.

Desempenho semelhante aos obtidos por Jeffery (2003), no embutimento de alumínio (40 à 55%) e no estiramento de um aço de alta resistência (26 à 32%), utilizando-se lubrificante sólido polimérico comparados aos óleos.

Observa-se também que com uma boa lubrificação, a deformação menor (ϵ_2) aproxima-se da deformação maior (ϵ_1), de acordo com Hosford (1993), com valores de 0,48 e 0,53 respectivamente, caracterizando um estado biaxial de tensão, característica do modo de deformação por estiramento.

Um fato importante a ser considerado, foi que o filme de poliuretano permaneceu contínuo, não se rompeu, mesmo após a estampagem, figura 4.12. Corroborando com a figura 2.14, onde Keeler (2001) define uma barreira lubrificante como sendo um filme que isola completamente a superfície da chapa metálica da superfície da matriz.

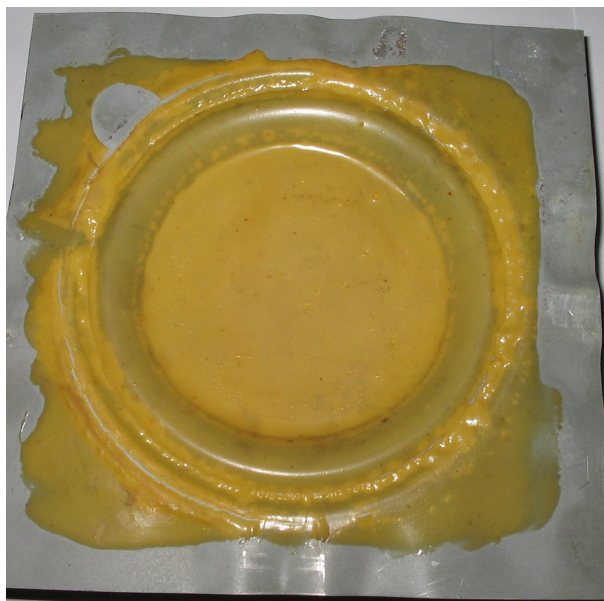


Figura 4.12 – Filme de poliuretano contínuo (sem rupturas), mesmo após a estampagem da chapa de aço DC 06.

Os altos níveis de deformação ϵ_2 atingidos na chapa de aço DC 06 com o filme de poliuretano, devem-se ao fato deste filme separar eficientemente a superfície da chapa metálica da superfície do punção evitando que as mesmas entrassem em contato, diminuindo o atrito e proporcionando uma deformação mais homogênea. Neste caso, não necessita cisalhar a superfície entre a chapa metálica

e o punção. O poliuretano permite que a medida que a chapa metálica vai sendo deformada pelo punção o poliuretano vai se deformando e permitindo o movimento relativo entre as superfícies, sem a necessidade de cisalhamento. Isto torna a deformação mais homogênea.

Acrescentando-se à CLC sem lubrificação do punção, figura 4.4, os resultados do lubrificante que se obteve o melhor desempenho, ou seja, o lubrificante que efetivamente produziu um maior aumento na deformação máxima menor, neste caso o poliuretano. A CLC passa a apresentar um perfil por completo, tanto para embutimento profundo e estado plano de deformação quanto para estiramento, com pode ser visualizado na figura 4.13.

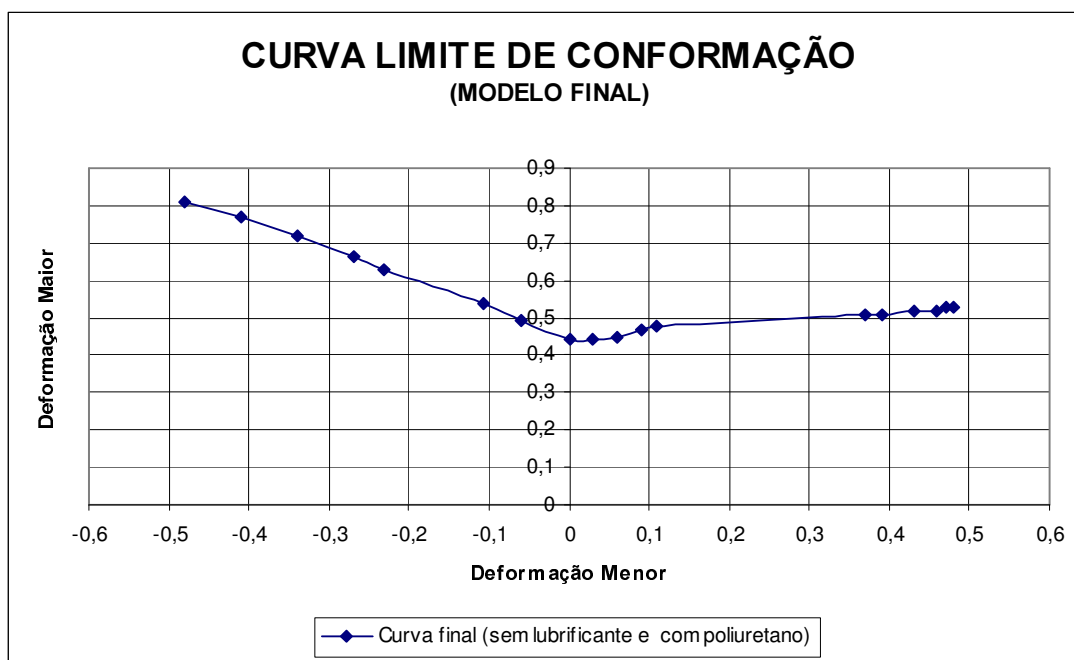


Figura 4.13 – Curva Limite Conformação final da chapa de aço DC 06, obtida sem lubrificante e com poliuretano.

Analisando a figura 4.13, observou-se que com a utilização do lubrificante sólido a base de poliuretano realmente aumentou-se o perfil da CLC gerada para o modo de deformação por estiramento, uma vez que, com este lubrificante atingiu-se uma deformação de 0,48 para ϵ_2 , enquanto que sem o filme lubrificante este valor limitou-se a 0,11. Apesar da melhora na deformação máxima menor no estiramento,

a curva manteve o perfil normal esperado, de acordo com a curva sem lubrificante gerada no estiramento, ou seja, pela figura 4.13, nota-se que os pontos obtidos com poliuretano não gerou uma maior deformação ε_1 , de forma que o que se conseguiu foi apenas aumentar o perfil da curva para um nível de deformação ε_2 , seguindo a mesma curvatura da CLC sem lubrificação do punção, figura 4.4. Com base nestes resultados, pode-se dizer que o lubrificante gerou uma distribuição mais uniforme das deformações na chapa, atingindo, conseqüentemente, maiores níveis de deformação para o modo de deformação por estiramento, prolongando a curva à direita.

4.6 Perfil de distribuição das deformações

Observou-se que nos ensaios de estampagem Nakazima realizados com os cinco lubrificantes mais o ensaio sem lubrificação do punção com o corpo de prova de 200x200mm, a ruptura do corpo de prova sempre se localizou entre o raio da matriz até o pólo do punção. A localização da fratura determina se a deformação foi homogênea ou se gerou picos de deformação, sendo um indício de que se a lubrificação foi adequada ou ineficiente para o modo de deformação por estiramento.

Para verificação da posição da ruptura foram realizadas medições da deformação maior para uma seqüência linear de pontos, desde a posição relativa ao raio da matriz até o pólo do punção ou topo do corpo de prova. As medidas foram tomadas no lado do corpo de prova oposto a fratura, afim de se evitar ter que medir pontos sobre a trinca do material.

Os resultados foram compilados em um gráfico que mostra a variação da deformação maior a cada ponto medido, desde o ponto 1, referente ao raio da matriz, até o ponto 12, correspondente ao pólo do punção, bem como a localização do ponto de máxima deformação.

Com base na configuração do diagrama, pode-se observar o perfil de distribuição das deformações ao longo do corpo de prova estampado, observando-se o nível máximo de deformação atingido com ou sem o uso de lubrificação do punção, além da posição do ponto de máxima deformação ao longo do corpo de

prova ensaiado. A posição deste ponto permite concluir se a lubrificação foi eficiente para o modo de deformação por estiramento.

A figura 4.14 mostra o perfil de distribuição das deformações do corpo de prova de 200x200mm, ensaiado sem lubrificação do punção.

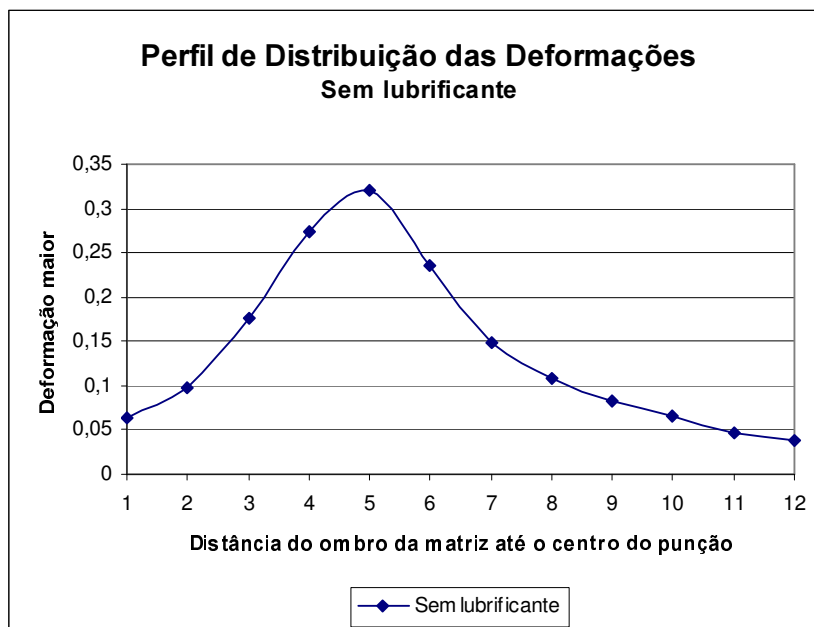


Figura 4.14 – Distribuição das deformações desde o raio da matriz até o pólo do punção, no corpo de prova de 200x200mm, estampado sem lubrificação do punção.

A curva apresentada na figura 4.14, sem lubrificação do punção, possui um pico de máxima deformação ε_1 no ponto 5, com um valor de 0,32, ou seja, tanto a ruptura quanto o pico de deformação ocorreram afastados do pólo, caracterizando com isso, uma deformação não homogênea, característica de uma lubrificação inexistente, condição inadequada para o modo de deformação por estiramento, onde deve existir uma boa lubrificação, para que o atrito seja o mínimo possível na interface punção – chapa metálica, gerando um perfil de deformação mais homogêneo.

As figuras 4.15, 4.16, 4.17 e 4.18 mostram o perfil de distribuição das deformações do corpo de prova de 200x200mm, estampados com os lubrificantes: uma combinação de óleos mineral e vegetal com aditivos EP, fluido sintético emulsionável, fluido sintético “prelube” e filme sólido de PVC, respectivamente.

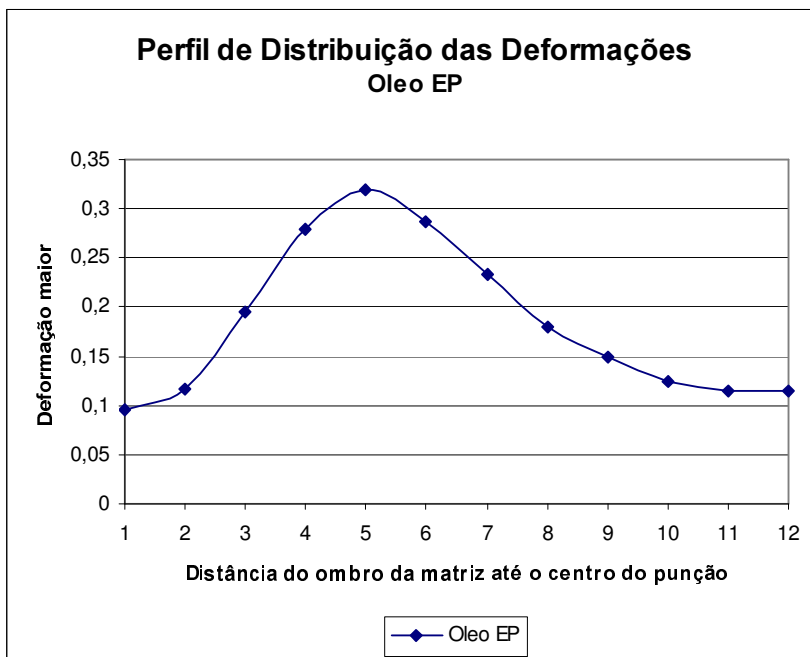


Figura 4.15 – Distribuição das deformações desde o raio da matriz até o pólo do punção, no corpo de prova de 200x200mm, estampado com uma combinação de óleos mineral e vegetal com aditivos de extrema pressão.

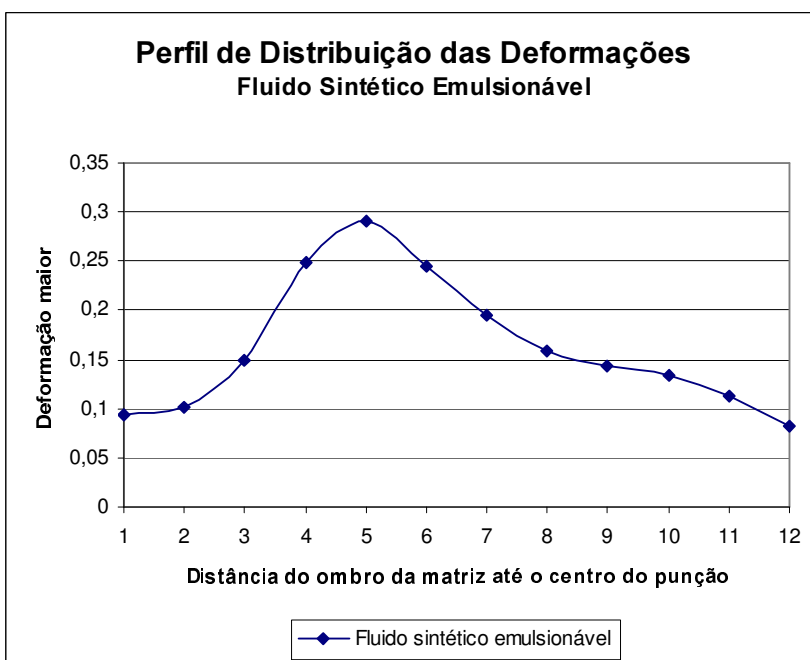


Figura 4.16 – Distribuição das deformações desde o raio da matriz até o pólo do punção, no corpo de prova de 200x200mm, estampado com fluido sintético emulsionável.

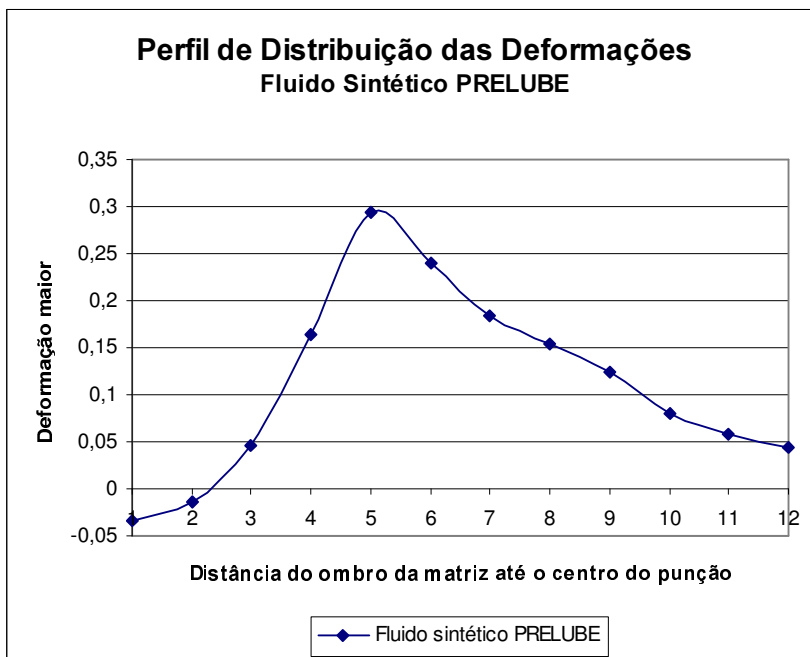


Figura 4.17 – Distribuição das deformações desde o raio da matriz até o pólo do punção, no corpo de prova de 200x200mm, estampado com fluido sintético “prelube”.

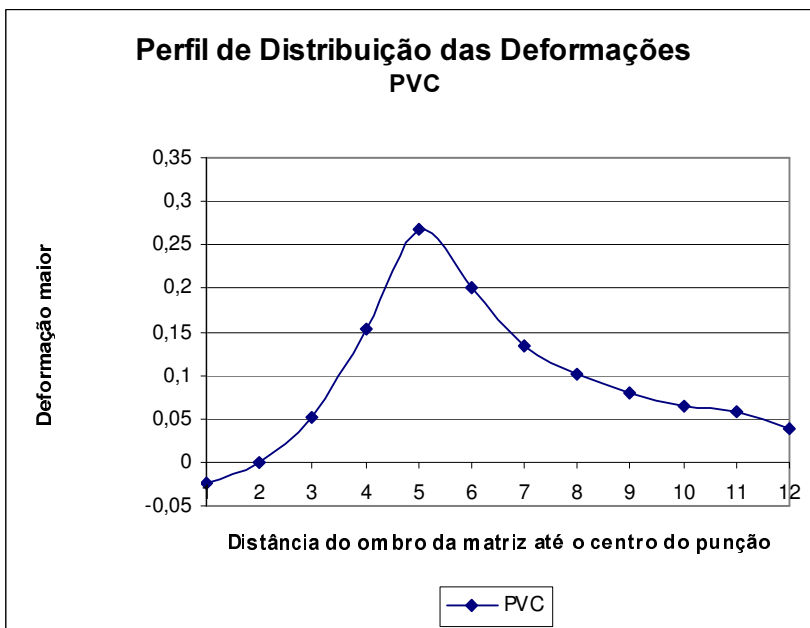


Figura 4.18 – Distribuição das deformações desde o raio da matriz até o pólo do punção, no corpo de prova de 200x200mm, estampado com filme de PVC.

Os perfis de distribuição das deformações apresentados nas figuras 4.15, 4.16, 4.17 e 4.18 possuem um pico de deformação máxima ε_1 sempre no ponto 5, semelhante quando não se fez o uso de lubrificação, figura 4.14, demonstrando que tanto a ruptura quanto o pico de deformação ocorreram afastados do pólo, característica de uma deformação não homogênea. Concordando com Keeler (2000), que demonstra através de um gráfico, figura 2.21, a ruptura ocorrendo longe do pólo, com picos de deformação quando se utilizar de uma lubrificação inadequada, no modo de deformação por estiramento.

Utilizando óleo mineral e vegetal EP e fluido sintético emulsionável, figuras 4.15 e 4.16 respectivamente, observa-se que apesar dos picos de deformação concentrarem-se no ponto 5, estes não foram tão acentuados se comparados com o fluido sintético “prelube” e filme de PVC, figuras 4.17 e 4.18 respectivamente, que apresentaram um perfil de deformação muito mais acentuado no seu ponto de máxima deformação ε_1 . Demonstrando que, apesar de apresentarem seus picos de deformação no mesmo ponto, o óleo mineral e vegetal EP e fluido sintético emulsionável foram mais efetivos se comparados ao fluido sintético “prelube” e filme de PVC, para o modo de deformação por estiramento.

A posição da ruptura dos corpos de prova utilizando estes lubrificantes também pode ser avaliada pela figura 4.19.

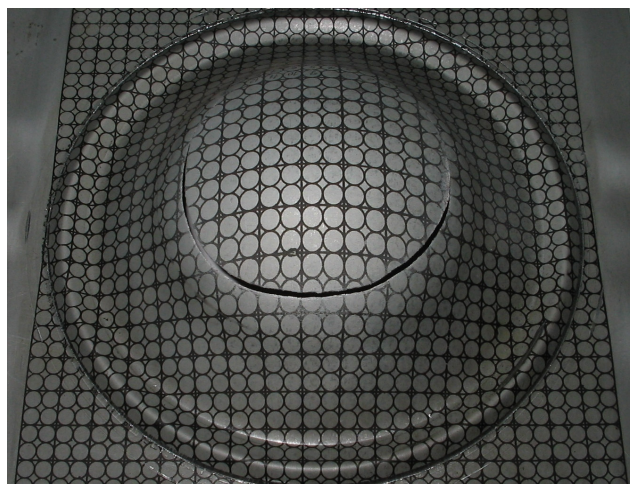


Figura 4.19 – Ruptura afastada do pólo, no corpo de prova de 200x200mm, quando utilizou os lubrificantes: óleo mineral e óleo vegetal com aditivos de extrema pressão, fluido sintético emulsionável, fluido sintético “prelube” e filme de PVC.

Novamente pode-se constatar que realmente a ruptura ocorreu afastada do pólo, figura 4.19, para as condições: sem lubrificação, os três lubrificantes líquidos e o filme sólido de PVC. Demonstrando a ineficiência destes lubrificantes pela análise da posição da fratura do corpo de prova.

O perfil de distribuição de deformação do corpo de prova de 200x200mm estampado com o filme de poliuretano é mostrado na figura 4.20.

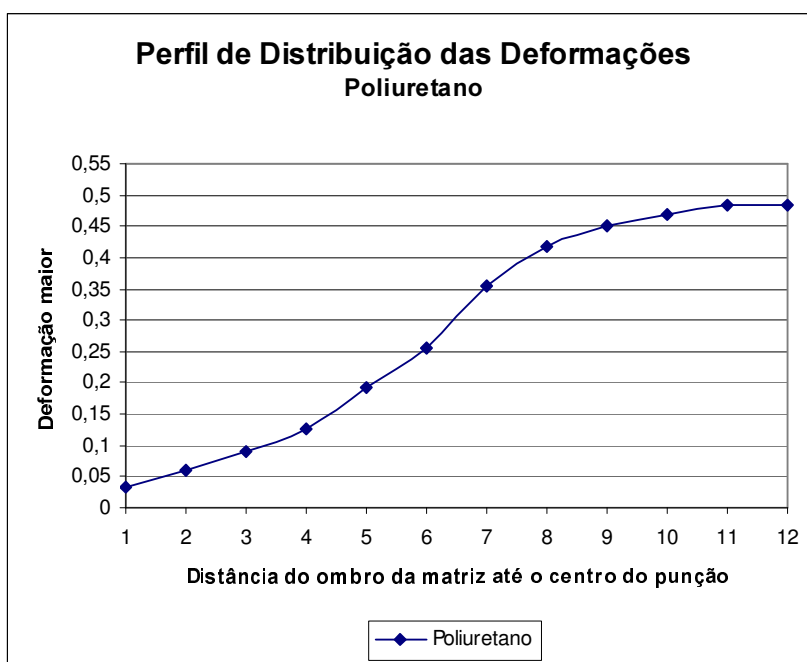


Figura 4.20 – Distribuição das deformações desde o raio da matriz até o pólo do punção, no corpo de prova de 200x200mm, estampado com filme de poliuretano.

A curva apresentada na figura 4.20, obtida com o uso de um filme de poliuretano, apresenta uma deformação ε_1 crescente desde o raio da matriz igual a 0,03 até uma deformação máxima de 0,48 no pólo do punção, inclusive onde ocorreu a ruptura do corpo de prova. Caracterizando uma deformação mais homogênea sem a presença de picos de deformação afastados do pólo do punção, demonstrando que a lubrificação foi eficiente para o modo de deformação por estiramento, contribuindo para que se atingisse este perfil mais uniforme de deformação. Corroborando exatamente com a figura 2.22, segundo Keeler (1968).

Esta deformação mais homogênea resultará em produtos estampados por estiramento com tensões residuais menores e portanto utilizando a conformabilidade plena do material.

Outra constatação importante a ser considerada foi a posição da ruptura do corpo de prova, figura 4.21, que com o uso do filme de poliuretano, localizou-se muito próxima ao pólo do punção. Concordando com a figura 2.20, conforme Hosford (1993).

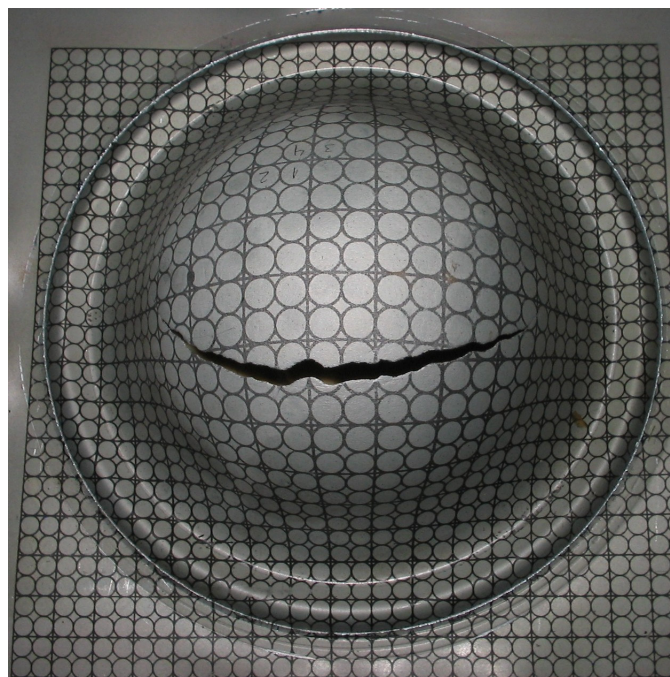


Figura 4.21 – Ruptura próxima ao pólo com o uso de um filme de poliuretano no corpo de prova de 200x200mm.

Analisando a figura 4.21, constatou-se que realmente a lubrificação do punção com um filme sólido de poliuretano foi adequada para o modo de deformação por estiramento, pois a ruptura do corpo de prova ocorreu praticamente no pólo do punção, com altos níveis de deformação tanto para ϵ_1 quanto para ϵ_2 , figura 4.13.

4.7 Perfil de redução da espessura

Toda análise de deformações sofridas por uma chapa metálica durante um processo de estampagem, baseada na curva limite de conformação, leva em consideração apenas a deformação ocorrida na superfície da chapa, através dos eixos maior (ε_1) e menor (ε_2) das elipses ou círculos formados pela deformação da malha impressa no material ensaiado.

Para um estudo completo das reais condições de deformação da chapa, deve-se considerar ainda a deformação em termos da espessura do corpo de prova (ε_3). Pela constância de volume, segundo Chemin (2004), é possível verificar se uma maior ou menor deformação em um dos eixos do plano da chapa (ε_1 ou ε_2) se refletiu em uma menor ou maior redução de espessura (deformação ε_3) da amostra.

Com o objetivo de avaliar os efeitos da lubrificação na redução da espessura da chapa metálica, que inicialmente tinha uma espessura de 0,70mm, foram adotados os corpos de prova de 200x200mm estampados sem lubrificação e com o filme a base de poliuretano, pois foi o lubrificante que efetivamente aumentou as deformações ε_1 e ε_2 .

Para verificação do perfil de redução da espessura foram realizadas medições das deformações maior e menor para uma seqüência linear de pontos, desde a posição relativa ao raio da matriz até o pólo do punção, no lado do corpo de prova oposto a fratura.

Os resultados foram compilados em um gráfico que mostra a variação de redução na espessura a cada ponto medido, desde o ponto 1, referente ao raio da matriz, até o ponto 12, correspondente ao pólo do punção.

As figuras 4.22 e 4.23 mostram o perfil de redução da espessura dos corpos de prova de 200x200mm, ensaiados sem lubrificação do punção e com poliuretano, respectivamente.

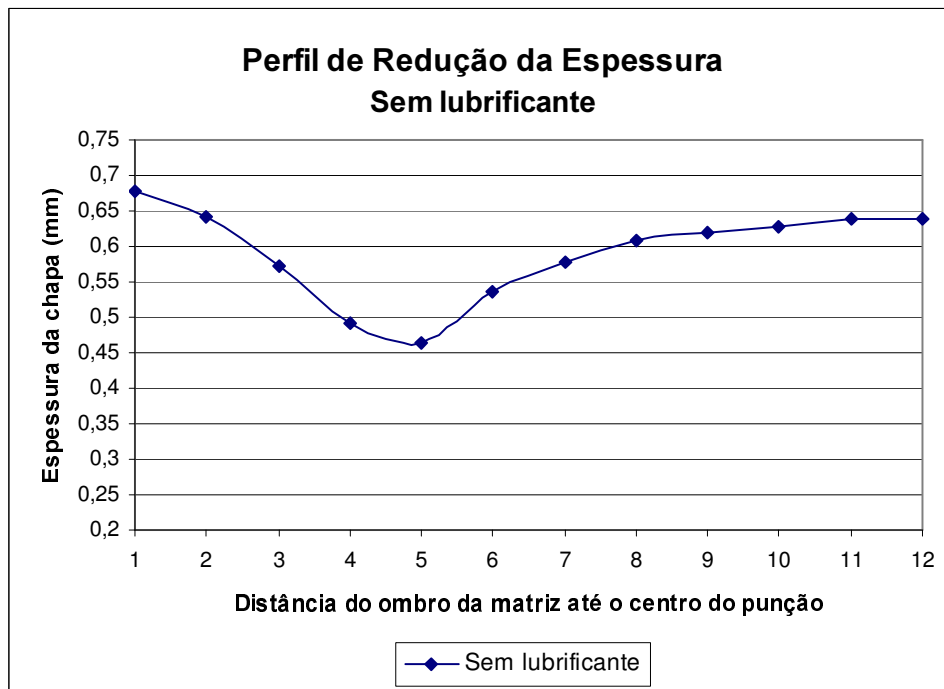


Figura 4.22 – Perfil de redução da espessura desde o raio da matriz até o pólo do punção, no corpo de prova de 200x200mm, estampado sem lubrificação.

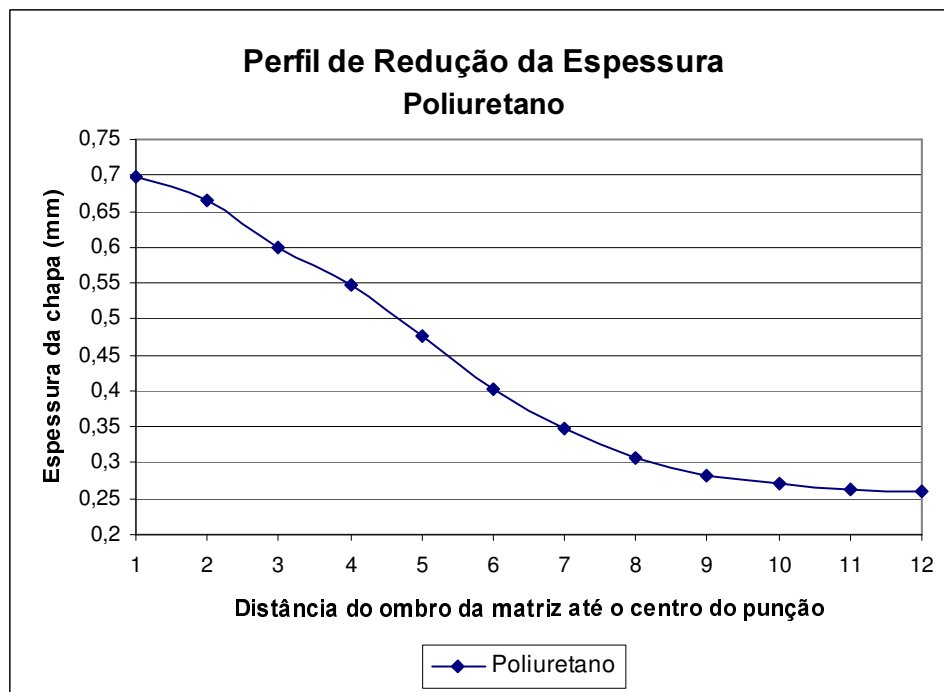


Figura 4.23 – Perfil de redução da espessura desde o raio da matriz até o pólo do punção, no corpo de prova de 200x200mm, estampado com poliuretano.

Analisando o perfil de redução da espessura na chapa metálica, obtida sem lubrificação, figura 4.22, nota-se que próximo ao raio da matriz a espessura da chapa metálica é de 0,68mm, chegando a um valor mínimo de 0,46mm no ponto 5 e voltando a aumentar até um valor de 0,64mm no pólo do punção. Demonstrando que a partir do ponto 5 as deformações na espessura (ε_3) e também as deformações ε_1 e ε_2 limitaram-se a baixos níveis. Muitas vezes, peças são rejeitadas por apresentarem uma redução excessiva na espessura, que ocorrem em áreas de alta deformação, como no caso do ponto 5.

A curva apresentada na figura 4.23, obtida com o uso do poliuretano, apresentou uma redução na espessura praticamente nula próxima ao raio da matriz, com um valor de 0,699mm, que foi diminuindo homogeneamente conforme se aproximava do pólo do punção, chegando à 0,26mm. Quanto menor a espessura final maior será ε_3 . Demonstrando que a deformação na espessura (ε_3), assim como as deformações ε_1 e ε_2 (vistas anteriormente), foram maiores no topo do corpo de prova.

Com base nos resultados, é normal que no estiramento a chapa tenha uma maior redução na espessura, se comparados aos modos de deformação por embutimento e estado plano de deformação, isto porque nesta condição de ensaio o corpo de prova é preso pelo “draw bed” em todo o contorno do punção, de forma que a estampabilidade atingida pelo material deve-se principalmente a deformação da chapa no sentido de sua espessura (afinamento do material).

4.8 Rugosidades da chapa metálica e do punção

As rugosidades encontradas tanto da chapa de aço DC 06 quanto do punção hemisférico podem ser visualizadas na tabela 4.4. Os valores encontrados foram comparados com a norma DIN 4766, que fixa uma faixa de valores para a rugosidade conforme o processo de fabricação.

Rugosidades (μm)	Ra	Ry	Rz	Rq
Torneamento DIN 4766	0,8 à 12,5	x	x	x
Punção hemisférico	0,23	2,92	2,92	0,37
Laminação plana DIN 4766	0,05 à 0,4	x	x	x
Chapa de aço DC 06	1,1	6,6	6,6	1,36

Tabela 4.4 – Valores de rugosidades medidos em μm , na chapa de aço DC 06 e no punção hemisférico.

Analisando a tabela 4.4, nota-se que tanto a rugosidade do punção ($R_a=0,23\mu\text{m}$), quanto a rugosidade da chapa de aço DC 06 ($R_a=1,10\mu\text{m}$), comparadas com os valores previstos pela norma DIN 4766, ficaram fora da especificação, que para chapas laminadas devem estar compreendidos entre 0,05 à $0,4\mu\text{m}$ e para peças torneadas (no caso do punção) entre 0,8 à $12,5\mu\text{m}$.

O punção apresentou um acabamento superficial abaixo do especificado pela norma, enquanto a chapa de aço DC 06 apresentou um valor acima.

Wiklund (2004), avaliou o acabamento superficial de dezessete chapas de aço com 0,8mm de espessura e encontrou valores para a rugosidade média (R_a) que variaram de 0,8 à $2,0\mu\text{m}$. Kuzman (2000), mediu o acabamento superficial de três chapas metálicas, encontrando valores para R_a entre 1,09 à $1,45\mu\text{m}$ e para R_z entre 6,85 à $8,69\mu\text{m}$. Demonstrando que as rugosidades da chapa de aço DC 06 estão na faixa de valores encontrados por Wiklund (2004) e Kuzman (2000).

Apesar de estar analisando a influência da lubrificação na estampagem no presente trabalho, as rugosidades da chapa de aço e do punção não tiveram influência determinante, pelo fato de que a única variável analisada neste trabalho foi a lubrificação e não a rugosidade da ferramenta e da chapa metálica, que sempre permaneceram constante no decorrer dos ensaios de estampagem Nakazima com ou sem o uso de lubrificação.

Uma justificativa para a baixa eficiência, dos lubrificantes líquidos se comparados ao desempenho do filme sólido de poliuretano, no modo de deformação por estiramento está no fato de que com uma baixa rugosidade, tanto da chapa metálica (apesar de estar acima da especificação da norma) quanto do punção, os lubrificantes líquidos não tiveram como aderir adequadamente em nenhuma das superfícies, sendo facilmente espelidos da região de contato com o aumento progressivo da pressão no decorrer da conformação da chapa. Deixando expostas

ambas as superfícies, que entraram em contato e conseqüentemente aumentaram o atrito a níveis muito elevados, o que levou a ruptura antecipada dos corpos de prova, gerando baixos níveis de deformação, ou na melhor das hipóteses um pequeno aumento de 4% na deformação ε_2 quando se utilizou um óleo justamente com aditivos de extrema pressão, passando de 0,11 sem lubrificação do punção para 0,15 com o uso deste lubrificante, que tem a função, segundo Klann (2000), de formar um filme isolante na interface mesmo a altas pressões.

Estas mesmas rugosidades que podem ter prejudicado os resultados dos lubrificantes líquidos em nada interferiram no desempenho do filme sólido de poliuretano, pois quando se fez o uso deste lubrificante, a CLC apresentou altos níveis de deformação ε_2 , o perfil de deformação apresentou uma deformação homogênea, a ruptura ocorreu próxima ao pólo do punção, inclusive com ε_2 muito próximo a ε_1 .

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Pelos resultados dos ensaios metalográfico, de tração e análise química realizados no material da chapa, pode-se concluir que o aço DC 06 encontra-se perfeitamente de acordo com sua especificação de norma (DIN EN 10152), caracterizando-se como um aço de alta estampabilidade.

O baixo percentual de carbono, assim como dos demais constituintes do aço, obtidos apartir do ensaio de análise química, evidenciaram o material como um aço típico para operações que exigem um elevado grau de estampabilidade, confirmado nos ensaios de tração.

Os ensaios de tração apresentaram valores altos para os coeficientes de anisotropia e encruamento, características típicas de chapas de alta estampabilidade utilizadas na indústria, como é o caso do DC 06.

Pelos testes simulativos práticos, método de estampagem Nakazima, avaliou-se como a lubrificação do punção influenciou na estampabilidade da chapa do aço DC 06. Nos ensaios iniciais, sem a lubrificação do punção, apenas para obtenção da curva, conclui-se que, a CLC ficou bem representada nos modos de deformação por embutimento e deformação plana, com altos níveis de deformação. Já para o modo de deformação por estiramento apresentou baixos valores de deformação, principalmente ε_2 . Visando-se aumentar a deformação ε_2 , e conseqüentemente prolongar a curva para o lado direito, no modo de deformação por estiramento, tornou-se necessário a utilização de um filme lubrificante para isolar eficientemente a superfície da chapa metálica e do punção, reduzindo a tensão de cisalhamento local.

Os ensaios com os diferentes lubrificantes, mostraram que o filme sólido de poliuretano é o lubrificante com o qual se obteve a melhor condição de estampabilidade do material.

O uso do filme sólido de poliuretano proporcionou um aumento considerável na deformação ε_2 , prolongando a curva para o lado direito, caracterizando melhor o modo de deformação por estiramento e por conseguinte a curva limite de conformação por completo. Além disso, o perfil de distribuição das deformações ε_1 ,

ε_2 e ε_3 , quando se utilizou deste lubrificante mostrou-se mais homogêneo, desde um baixo nível de deformação próximo ao raio da matriz, até um valor crescente máximo exatamente no pólo do punção, onde ocorreu a ruptura. A análise da localização da fratura, no pólo do punção, também confirmou que a lubrificação foi eficiente. Analisando o filme de poliuretano, observou-se também que este permaneceu contínuo e não se rompeu, mesmo após a estampagem, demonstrando que o mesmo separou eficientemente as superfícies do punção e da chapa metálica.

Uma deformação mais homogênea resultará em produtos estampados por estiramento com tensões residuais menores e portanto utilizando a conformabilidade plena do material.

Quanto aos lubrificantes líquidos e o filme sólido de PVC, estes não tiveram o mesmo desempenho do filme de poliuretano, pois apresentaram baixos níveis de deformação ε_2 . O melhor resultado entre estes lubrificantes foi do fluido sintético emulsionável e do óleo com aditivos de extrema pressão, que apresentaram o mesmo nível de deformação e um ligeiro aumento, respectivamente, se comparados a deformação atingida sem lubrificação do punção. Ainda, todos apresentaram pico de deformação máxima, semelhante quando não se fez o uso de lubrificação, demonstrando que tanto a ruptura quanto o pico de deformação ocorreram afastados do pólo, característica de uma deformação não homogênea, caracterizando uma lubrificação inadequada para o modo de deformação por estiramento. Neste caso, aparentemente, o filme lubrificante deve ter rompido com o aumento da pressão no decorrer da estampagem, deixando expostas as superfícies do punção e da chapa metálica, resultando em uma ruptura prematura da chapa metálica.

A ineficiência dos lubrificantes líquidos na condição de estiramento pode também ser atribuída a relativamente baixa rugosidade da chapa metálica e principalmente do punção, que por serem muito lisas não permitiram uma adequada aderência dos lubrificantes em nenhuma das superfícies, sendo facilmente espelidos da região de contato com o aumento progressivo da pressão no decorrer do processo de estampagem.

CAPÍTULO 6

TRABALHOS FUTUROS

Considerando que o processo de estampagem de chapas metálicas envolve certas variáveis, tais como: material, lubrificação, velocidade de conformação, geometria da ferramenta, ficam abertas novas possibilidades para realização de pesquisas futuras nesta área:

- Realizar ensaios de estampagem, segundo outros métodos (Marciniak, IRSID), para análise comparativa com o método de ensaio Nakazima;
- Estudar a influência da velocidade no processo de estampagem, verificando como esta variável afeta a estampabilidade do material;
- Avaliar diferentes materiais para estampagem, buscando identificar similares;
- Através de análise numérica, relacionar todas as variáveis envolvidas no processo de estampagem, já que todas estão inter-relacionadas.

CAPÍTULO 7

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALTAN, T.; CHANDRASEKHARAN, S.; PALANISWAMY, H.; JAIN, N.; NGAILE, G. Evaluation of stamping lubricants at various temperature levels using the ironing test. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 45, issues 4-5, p. 379-388, April 2005.
- ALTAN, T.; OH, S. I.; GEGEL, H. L. Metal forming: fundamentals and applications. Ohio, American Society for Metals – ASM, 1983, 353p.
- BOSLER JR, P. Synthetic Lubes for Forming and Post Processing. **Magazine Metal Forming**, p. 48-54, August 2003.
- BRESCIANI FILHO, E.; BUTTON, S.T.; GOMES, E.; NERY, F.A.C.; ZAVAGLIA, C.A.C. **Conformação Plástica dos Metais**. São Paulo: UNICAMP, 1997.
- BUTTON, S.T.; BORTOLUSSI, R. Estudo do Processo de Embutimento Profundo de Copo pelo Método de Elementos Finitos. RBCM – J. of the Braz. Soc. Mechanical Engineers, 1999, p. 353-363.
- CARCEL, A. C.; PALOMARES, D.; RODILLA, E.; PUIG, M.A. Evaluation of vegetable oils as prelube oils for stamping. **Materials & Design**, v. 26, issue 7, p. 587-593, 2005.
- CHEMIN FILHO, R. A. **Avaliação das Deformações de Chapas Finas e Curvas CLC para Diferentes Geometrias de Punções**. Curitiba, 2004, 127f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.
- DIETER, G. E. **Metalurgia Mecânica**. 4. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1996.

GODWIN, D. Lubricant Selection e Aplication. **Magazine Metal Forming**, p. 32-34, January 2004.

HECKER, S. S.A simple limit curve technique and results on aluminium alloys. 7th Biennal IDDRG Congress, Amsterdam, Holanda, 1972.

HOSFORD, W. F.; CADDELL, R. M. **Metal Forming – Mechanics and Metallurgy**. 2nd. ed. N. J.: Prentice Hall, 1993.

JEFFERY, B. Stretching Metal's Forming Limits with HSP Lubricants. **Magazine The Fabricator**. June 2003.

JEFFERY, B. Advanced Lubricant Technology for High-Strength Steel. **Magazine The Fabricator**. June 2004a.

JEFFERY, B. Stretching Chemical-free Cleaning of HSP Lubricants. **Magazine The Fabricator**. September 2004b.

KEELER, S. P. Understanding Sheet Metal Formability. Machinery, 1968.

KEELER, S. P. The Barrier Lubricants Are Coming. **Magazine Metal Forming**, p 72-73, August 2001.

KEELER, S. P. To Lube or Not to Lube. **Magazine Metal Forming**, p. 68-69, April 2000.

KEELER, S. P. The Auto/Steel Partnership Enhanced Forming Limit Diagram Project Team. Southfield: December 2002.

KLANN, R. Lubricants for high-Speed Stamping. **Magazine Metal Forming**, p. 30-33, December 2000.

KOBAYASHI, S.; OH, S. I.; ALTAN, T. Metal Forming and the Finite Element Method. Oxford University Press. 1989.

KREN, L. A. The Pursuit of Proper Lube Strategies. **Magazine Metal Forming**, p. 28-31, January 2003.

KREN, L. A. Give More Thought to Lube. **Magazine Metal Forming**, p. 50-53, August 2004.

KUMAR, D. R. Formability analysis of extra-deep drawing steel. **Journal of Materials Processing Technology**, 130-131, p. 31-41, 2002.

KUZMAN, K. Enviromental Friendly Lubricants in Deep Drawing of Steel Sheet Metal. Enform Project. Slovenia, TECOS Celje, 2000.

LANGE, K. **Forming Handbook**. New York: Mcgraw Hill and SME, 1993.

LORENZ, R.; GILAPA, G. M. Avaliação da Conformabilidade de Chapas de Aço Plano. In: CONFERÊNCIA NACIONAL DE CONFORMAÇÃO DE CHAPAS, 1., 1998, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: UFRGS – Centro de Tecnologia, 1998. p. 141-150.

MARCINIAK, Z.; KUCZYNSKI, K. Limit Strains in the Process of Stretch-Forming Sheet Metals. **International Journal of Mechanical Sciences**, p. 609-620, 1967.

MARCONDES, P. V. P. **Avaliação da deformação da lateral do Clio (Renault) via curva limite de conformação**. Curitiba: UFPR, 2002. Relatório Técnico.

MOREIRA, L. P.; SAMPAIO, A. P.; FERRON, G.; LACERDA, A. C. Análise numérica e experimentação da influência da espessura inicial das deformações limites em chapas. In: CONFERÊNCIA NACIONAL DE CONFORMAÇÃO DE CHAPAS, 6.,

- 2003, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: UFRGS – Centro de Tecnologia, 2003. p. 39-49.
- NAKAZIMA, K.; KIKUMA, T.; HASUKA, K. Study on Formability of Steel Sheets. Yawata Tech. Rep. 1968, p. 141.
- RICHTER, A. Comparação dos Resultados de Diferentes Testes para a Determinação da Curva Limite de Conformação. In: CONFERÊNCIA NACIONAL DE CONFORMAÇÃO DE CHAPAS, 6., 2003, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: UFRGS – Centro de Tecnologia, 2003. p. 24-29.
- 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. In: CONFERÊNCIA NACIONAL DE CONFORMAÇÃO DE CHAPAS, 1., 1998, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: UFRGS – Centro de Tecnologia, 1998. p. 89-100.
- SCHAEFFER, L. **Conformação Mecânica**. Porto Alegre: Imprensa Livre, 1999.
- SLATER, R. A. C. **Engineering Plasticity**. The Macmillian Press, 1997.
- SOUZA, S. A. **Ensaaios Mecânicos de Materiais Metálicos – Fundamentos teóricos e práticos**. 5. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2004.
- SROUR, E. H. **Determinação do Grau de Conformabilidade de Chapa de Aço para Suporte de Coluna de Direção e Identificação de Similar Nacional**. Curitiba, 2002, 128f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.
- SMITH, W. F. **Princípio de Ciência e Engenharia dos Materiais**. 3. ed. Rio de Janeiro: McGraw-Hill, 1996.

TRIVETT, B.; ELENTENY, D.; MANFREDA, J. Next Generation Synthetic Forming Fluids. **Magazine The Fabricator**. April 2004.

USIMINAS. **Conformação na Prensa**. n. 6. Usiminas: 1999.

VAN VLACK, L. **Princípio de Ciência e Tecnologia dos Materiais**. 7. ed. Rio de Janeiro: Campus, 1984.

VEERMAN, C.C. The determination and application of the FLC - onset of localized necking. 7th Biennial IDDRG Congress, Amsterdam, Holanda, 1972.

WIKLUND, D.; WIHLBORG, A.; ROSÉN, B. G. Evaluation of surface topography parameters for friction prediction in stamping. **Wear**, v. 257, issue 12, p. 1296-1300, December 2004.

NORMAS TÉCNICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E 517**: Standard Test Method for Plastic Strain Ratio for Sheet Metal.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E 646 – 78**: Standard Test Method for Tensile Strain-Hardening Expoents (n-values) of Metallic Sheet Metals. 1984.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **E 8M**: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6673**: Produtos Planos de Aço – Determinação das Propriedades Mecânicas a Tração. 1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8164**: Folhas e Chapas de Aço Baixo Carbono – Determinação da Anisotropia Plástica e do Expoente de Encruamento. 1983.

DEUTSCHE INDUSTRIE NORMEN. **4766**: Surface Roughness Associated with Types of Manufacturing Methods. 1981.

DEUTSCHE INDUSTRIE NORMEN. **EN 10002-1**: Ensaio de tração.

DEUTSCHE INDUSTRIE NORMEN. **EN 10152**: Produtos Planos de Aço, Eletroliticamente Zincados e Laminados a Frio. 1993.