RAVILSON ANTONIO CHEMIN FILHO

AVALIAÇÃO DAS DEFORMAÇÕES DE CHAPAS FINAS E CURVAS CLC PARA DIFERENTES GEOMETRIAS DE PUNÇÕES

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

Orientador: Prof. Paulo Victor Prestes Marcondes.

Curitiba
Julho, 2004

Aos meus pais,
Ravilson A. Chemin e
Maria Jussara Chemin,
meus avós, meus irmãos e
Suély

AGRADECIMENTOS

- À Deus, que me possibilitou realizar este trabalho;
- À minha família, pelo apoio e incentivo;
- À CAPES pela bolsa de estudos concedida para realização do mestrado,
- Ao Professor Paulo Victor Prestes Marcondes pela orientação e auxílio prestados durante a realização deste trabalho;
- Ao aluno Erik Jackson de Camargo, pela ajuda na realização dos ensaios de laboratório;
- Ao colega Adriano Kantowich, pela colaboração e ajuda no fornecimento de materiais para o trabalho;
- À empresa Volkswagen Audi, pela colaboração, pelas amostras de chapas fornecidas para os testes laboratoriais;
- A todos os companheiros do Laboratório de Mecânica da UFPR.

RESUMO

Durante o tryout de ferramentas de estampagem, mudanças são freqüentemente necessárias, desde a escolha de um novo material com melhor conformabilidade, até ajustes na geometria de matrizes e punções a fim de se atingir o grau de satisfação esperado para o produto. Todas essas ações, no entanto, tomam tempo e dinheiro, o que mostra a necessidade de uma melhor avaliação das chapas metálicas a serem utilizadas, como uma forma de se evitar estas perdas provocadas pelo conhecimento insuficiente das reais condições de deformação a que os materiais podem ser submetidos. Desta forma, procura-se cada vez mais desenvolver ensaios de laboratório que permitam às indústrias de estampagem conhecer melhor 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 esta finalidade, foram produzidos quatro novos modelos de punções a serem utilizados no ensaio de embutimento Nakajima, a partir do qual pode-se avaliar com segurança os fenômenos de embutimento profundo e estiramento através da Curva Limite de Conformação obtida. Neste trabalho avaliou-se como as diferentes geometrias de punções utilizadas para o ensaio Nakazima afetaram a Curva Limite de Conformação original do material, levantada apenas com um punção esférico, promovendo de forma isolada ou simultânea os fenômenos de embutimento profundo e estiramento. A maior difuculdade durante a realização dos ensaios concentrou-se na obtenção da Curva Limite de Conformação no modo de deformação por estiramento, onde houve a necessidade da utilização de um filme de poliuretano como lubrificante, para se atingir níveis mais elevados de deformações nesta condição. Os punções com a forma cilíndrica e com a forma de uma elipse extra profunda atingiram níveis de deformações abaixo da CLC obtida segundo o método Nakazima, devido a maior concentração de tensões nos pontos de menor área de contato da ferramenta. Os punções com a forma de uma elipse rasa e de

uma elipse profunda atingiram o mesmo nível de deformação da CLC obtida pelos ensaios Nakazima, porém, o primeiro concentrou os pontos preferencialmente no estado plano de deformações, enquanto que o segundo gerou pontos bem definidos no embutimento profundo e no estiramento, para corpos de prova mais estreitos e mais largos respectivamente. Uma verificação relativa a posição onde ocorreu a fratura do material, de acordo com o tipo de punção utilizado no ensaio, foi realizada pela medição do perfil de distribuição das deformações desde o ombro da matriz até o topo do punção. Esta análise mostrou que porção do punção ocasionou um maior esforço sobre o material. Uma etapa final da análise de resultados foi a verificação da constância de volume do material deformado, a partir da medição da deformação no sentido da espessura, ou seja, se a redução de espessura foi compatível com as deformações planares provocadas na chapa. Como uma conclusão deste trabalho, pode-se dizer que o punção com o formato hemisférico foi a ferramento que apresentou os maiores níveis de estampabilidade e uma melhor distribuição das deformações no material, por ser esta a geometria mais uniforme. A medida que o punção assume um formato mais complexo, se afastando do modelo esférico, a tendência é a ocorrência de uma maior concentração de tensões em posições específicas do material, o que leva a um menor índice de estampabilidade do mesmo.

ABSTRACT

Changes are often required during the tryout of drawing tools. These changes may range from adjustments in die and punch designs to the selection of a new material with enhanced formability characteristics. All these actions, however, require time and money, thus augmenting the need for improved initial evaluations of thin sheet metal. Increasing interest is therefore being evinced in the development of laboratory tests that allow stamping manufacturers to become more familiar with the stamping ability of the thin sheet metal they utilize, thereby ensuring, at least in part, that the pieces produced are stamped without major problems. The identification of regions in the piece where deformation by stretching, deep drawing and/or uniaxial plane strain will occur during the forming process can allow the process to work smoothly through optimization of the tools' geometry. In this work, four punch models with varying geometries were prepared and used, in addition to the traditional Nakazima drawing test tool. Thus, an evaluation was made of how the different tool geometries affected the material's Forming Limit Diagram obtained through the traditional test. The first punch model, cylinder-shaped, was dubbed P1 and the second model, having a shallow elliptical shape, was identified as P2. The tool's traditional hemispherical punch was called P3. Punch P4 was designed in a deep elliptical shape. The last punch model designed for these tests, dubbed P5, was shaped as an extra deep ellipse. The four proposed punch models were designed according to the 100 mm diameter proposed by Nakazima for this test. An important factor in the development of the geometry of each punch fabricated here was the specification of the R1 and R2 radiuses, the first one corresponding to the tip of the punch and the second responsible for the congruence of R1 with the tool's rectilinear portion. The congruence between these radiuses was the determining factor in establishing the aforementioned shapes for each punch. The results discussed herein demonstrate that the smaller the tool's radius, the greater the concentration of stresses in the material, regardless of whether this reduction in the radius is at the outer edge or at the tip of the tool. It should be noted that a slight variation in the radiuses of the geometry of Nakazima's original tool affects only the material's

deformation characteristics, such as deep-drawing and stretching. A marked reduction in the tool's radiuses, however, exerts an influence at the level of sheet formability. In other words, it reduces the potential for deformation of the material. This reduction in formability was determined by the decrease in the height of the points obtained at the ε_1 axis of the FLD.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS 18
PROPRIEDADES MECÂNICAS FUNDAMENTAIS 21
2.1 O ensaio de tração 21
2.2 A tensão de escoamento 26
2.3 Coeficiente de encruamento 29
2.4 A anisotropia e o R de Lankford 31
TESTES SIMULATIVOS PRÁTICOS E CURVAS LIMITE DE CONFORMAÇÃO 37
3.1 Introdução 37
3.2 Teste de estiramento 42
3.3 Testes de estampagem 43
3.4 Testes combinados 44
3.5 – Curvas limite de conformação 45
3.5.1 – Determinação da curva limite de conformação 47
3.5.2 – Análise de deformações para a determinação da CLC 51
3.5.3 – Novas geometrias de punções propostas para os ensaios de estampagem 54
PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL 56
4.1 Generalidades 56
4.2 Material utilizado 56
4.3 Ensaios metalográficos 57
4.4 Realização do ensaio de tração para determinação das propriedades fundamentais 58
4.4.1 Preparação dos corpos de prova 58
4.4.2 Preparação da máquina de tração 60
4.4.3 Ensaios de tração 61
4.5 Análise química 62
4.6 Ensaios de estampagem Nakajima 63
4.6.1 Preparação da ferramenta para os ensaios de estampagem 63
4.6.2 Preparação dos corpos de prova 68

4.6.3 Preparação da prensa de ensaio 71
4.6.4 Ensaios de estampagem 72
4.6.5 Medição dos corpos de prova estampados 73
RESULTADOS E DISCUSSÕES 76
5.1 Ensaios metalográficos 76
5.2 Análise química 78
5.3 Ensaios de tração 79
5.4 Ensaios Nakazima com punção hemisférico 84
5.5 Ensaios Nakazima com punções de geometria variada 89
5.6 Perfil de distribuição das deformações desde o ombro da matriz até a ponta do punção 100
5.7 Análise da redução de espessura sofrida pelo material 111
CONCLUSÕES 119
6.1 Conclusões 119
6.2 Trabalhos futuros 122
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 124
NORMAS TÉCNICAS: 127

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área da seção transversal
A_0	Área inicial
Al	Alongamento máximo
D_0	Diâmetro inicial do corpo de prova
D_0	Diâmetro inicial do círculo
D_1	Diâmetro maior final da elipse
D_2	Diâmetro menor final da elipse
D_{1F} e D_{2F}	Comprimentos entre a fratura e as pontas da elipse na direção de maior deformação
D_m	Diâmetro médio do corpo de prova
$D_{máximo}$	Diâmetro máximo do corpo de prova
$D_{mínimo}$	Diâmetro mínimo do corpo de prova
d_p	Diâmetro do punção
e	Deformação convencional
E	Módulo de elasticidade ou módulo de Young
e_1	Maior deformção convencional
e_2	Menor deformção convencional
e_{1F} e e_{2F}	Deformação convencional entre as fraturas e os pontos da elipse na
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
n	Coeficiente de encruamento por deformação
P	Carga ou força

P1	Punção cilíndrico
P2	Punção na forma de uma elipse rasa
P3	Punção hemisférico
P4	Punção na forma de uma elipse profunda
P5	Punção na forma de uma elipse extra profunda
P_f	Carga de ruptura
R	Coeficiente de anisotropia de Lankford
R_0	Coeficiente de anisotropia a 0º da direção de laminação
R_{45}	Coeficiente de anisotropia a 45º da direção de laminação
R_{90}	Coeficiente de anisotropia a 90º da direção de laminação
R1	Raio da cabeça do punção
R2	Raio de concordância entre a cabeça do punção e a porção cilíndrica da ferramenta
$\overline{R}$	Anisotropia normal
ΔR	Anisotropia planar
t_0	Espessura inicial
t_f	Espessura final
w_0	Largura inicial
w_f	Largura final
α	Fratura do tipo α
β	Fratura do tipo β
γ	Fratura do tipo γ
δ	Fratura do tipo δ
σ	Tensão verdadeira
σ_f	Limite de ruptura
σ_r	Limite de resistência
ε	Deformação verdadeira
ε_1	Maior deformação verdadeira
ε_2	Menor deformação verdadeira
direção de maior deformação	
$\varepsilon_{3\ calc}$	Deformação na espessura calculado pelas deformações verdadeiras

$\varepsilon_{3\ med}$	Deformação na espessura obtido pela medição do afinamento da chapa
$\Delta\varepsilon_3$	Diferença entre $\varepsilon_{3\ calc}$ e $\varepsilon_{3\ med}$.
ε_t	Deformação na espessura
ε_w	Deformação na largura
CCV	“Conical Cup Value”
CLC	Curva Limite de Conformação
DLC	Diagram limite de conformação
LDR	“Limit drawing ratio”
RCD	Razão Crítica dos Diâmetros

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Curva Tensão – Deformação de engenharia - Dieter, 1981. 22
Figura 2.2 – Gráfico tensão x deformação de um metal ou liga metálica – Souza, 1974. 25
Figura 2.3 – Curva teórica mostrando os limites de escoamento superior e inferior - Souza, 1974. 27
Figura 2.4 - A curva tensão x deformação verdadeira – Keeler, 1968. 30
Figura 2.5 - Cáculo do valor de *n*. 30
Figura 2.6 – Esquema do modo de medir o valor *R* de Lankford – Usiminas, 1999..32
Figura 2.7 – Método de amostragem para obtenção de *R* médio e ∆R - Usiminas, 1999. 33
Figura 2.8 – Deformação na espessura versus deformação na largura – Usiminas, 1999. 34
Figura 2.9 – Anisotropia normal para vários materiais versus RCD (Razão Crítica dos Diâmetros).....35
Figura 3.1 – Operação de estiramento por tração – Dieter (1981). 38
Figura 3.2 – Estampagem profunda de um copo cilíndrico. (a) Antes da estampagem; (b) após a estampagem – Dieter (1981).....38
Figura 3.3 - Tensões e deformação presentes em uma seção de um copo embutido – Dieter (1981). 39
Figura 3.4 – Operação de embutimento profundo – Keeler (1968). 40
Figura 3.5 – Operação de estiramento – Keeler (1968). 40
Figura 3.6 – Classificação dos testes de acordo com o modo de deformação – Usiminas (1999). 41
Figura 3.7 – Dispositivo para execução do ensaio de Erichsen. Punção de cabeça esférica e matriz de seção circular. Cotas em mm – Usiminas, 1999. 42
Figura 3.8 – Corte do dispositivo para execução do Ensaio de Swift. Punção de cabeça chata, matriz circular – Usiminas, 1999. 44
Figura 3.9 – Ferramentas para o Teste CCV (acima) e forma da peça rompida após o Teste (abaixo) – Usiminas, 1999.....45

Figura 3.10 – Deformações no embutimento profundo e no estiramento para uma malha circular – Lange (1993).....47
Figura 3.11 – Curva limite de conformação de acordo com o método IRSID – Usiminas (1999). 48
Figura 3.12 – Ferramental utilizado para execução do teste Marciniak – Richter (2003).....49
Figura 3.13 – Ferramental utilizado para execução do teste Nakazima – Richter (2003).....50
Figura 3.14 – Curva limite de conformação segundo o método Nakazima – Usiminas (1999).....51
Figura 3.15 – Medida da rede de círculos para obtenção das deformações principais - Usiminas, 1999. 53
Figura 3.16 – Punções de geometria variada utilizados em ensaios de estampagem – Borsoi *et al* (2000 e 2001). 54
Figura 4.1 – Corpo de prova para o ensaio de tração. 59
Figura 4.2 – Ferramenta utilizada no ensaio de Nakajima. 64
Figura 4.3 – Desenho dos punções mostrando os raios de concordância de cada ferramenta. 66
Figura 4.4 – Punção cilíndrico P1.....66
Figura 4.5 – Punção na forma de uma elipse rasa P2. 67
Figura 4.6 – Punção na forma de uma elipse profunda P4. 67
Figura 4.7 – Punção na forma de uma elipse extra profunda P5. 68
Figura 4.8 – Desenho dos corpos de prova utilizados para o levantamento da CLC do aço DC 06. 69
Figura 4.9 - Elipses formadas após a deformação do material. 72
Figura 4.10 – Corpos de prova ensaiados com o punção hemisférico P3 para obtenção da CLC do aço DC 06. 73
Figura 4.11 – Corpos de prova ensaiados com os punções P1, P2, P4 e P5. 73
Figura 4.12 – Corpo de prova cortado para medição da redução de espessura.....75
Figura 4.13 – Linha de corte tangente á elipse indicada para medição. 75
Figura 5.1 – Metalografia da secção longitudinal da chapa. 76

Figura 5.2 – Metalografia da secção longitudinal da chapa mostrando a espessura do revestimento. 77
Figura 5.3 – Enrugamento ocorrido na região fora do prensa chapa. 82
Figura 5.4 – Gráfico Tesão vs. Deformação. 84
Figura 5.5 – Curva limite de conformação sem lubrificante. 85
Figura 5.6 – Pontos de máxima deformação atingidos com o filme de poliuretano... 87
Figura 5.7 – Modelo final curva limite de conformação do aço DC 06. 88
Figura 5.8 – Distribuição dos pontos para o punção hemisférico (P3). 90
Figura 5.9 – Comparação entre a CLC segundo Nakajima e o punção cilíndrico (P1). 91
Figura 5.10 – Comparação entre a CLC segundo Nakajima e o punção na forma de uma elipse rasa (P2). 93
Figura 5.11 – Comparação entre a CLC segundo Nakajima e o punção na forma de uma elipse profunda (P4). 95
Figura 5.12 – Comparação entre a CLC segundo Nakajima e o punção na forma de uma elipse extra profunda (P5). 98
Figura 5.13 - CP mostrando os pontos de medida do perfil de distribuição das deformações. 100
Figura 5.14 – Distribuição das deformações no corpo de prova de 200 x 200 mm para o punção cilíndrico (P1). 101
Figura 5.15 – Distribuição das deformações no corpo de prova de 200 x 200 mm para o punção na forma de uma elipse rasa (P2). 102
Figura 5.16 – Distribuição das deformações no corpo de prova de 200 x 200 mm para o punção hemisférico (P3). 103
Figura 5.17 – Distribuição das deformações no corpo de prova de 200 x 200 mm para o punção na forma de uma elipse profunda (P4). 104
Figura 5.18 – Distribuição das deformações no corpo de prova de 200 x 200 mm para o punção na forma de uma elipse extra profunda (P5). 105
Figura 5.19 – Distribuição das deformações no corpo de prova de 125 x 200 mm para o punção cilíndrico (P1). 106
Figura 5.20 – Distribuição das deformações no corpo de prova de 125 x 200 mm para o punção na forma de uma elipse rasa (P2). 108

Figura 5.21 – Distribuição das deformações no corpo de prova de 125 x 200 mm para o punção hemisférico (P3). 108
Figura 5.22 – Distribuição das deformações no corpo de prova de 125 x 200 mm para o punção na forma de uma elipse profunda (P4). 109
Figura 5.23 – Distribuição das deformações no corpo de prova de 125 x 200 mm para o punção na forma de uma elipse extra profunda (P5). 109

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Tabela 4.1 – Dimensões em mm para o corpo de prova de tração. 59
Tabela 5.1 – Composição química máxima em % segundo a norma DIN 10152.....78
Tabela 5.2 – Composição química em % resultante da análise química do material. 78
Tabela 5.3 – Comparativo das propriedades LR, LE e A. 80
Tabela 5.4 – Parâmetros de estampagem R e n. 81
Tabela 5.5 – Deformações verdadeiras obtidas nos ensaios com o punção P3. 113
Tabela 5.6 – Deformações verdadeiras obtidas nos ensaios com o punção P1. 115
Tabela 5.7 – Deformações verdadeiras obtidas nos ensaios com o punção P2. 115
Tabela 5.8 – Deformações verdadeiras obtidas nos ensaios com o punção P4. 117
Tabela 5.9 – Deformações verdadeiras obtidas nos ensaios com o punção P5. 117

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

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, devendo ainda medir a conformabilidade de cada lote de peças a ser utilizado na produção para que então possam ter certeza de conhecer o nível de conformação do material que utilizam. Produtores e fornecedores por sua vez, também devem medir e controlar a conformabilidade de seus produtos para que possam certificar-se que seus fregueses estão recebendo chapas que serão conformadas dentro de suas reais condições de estampabilidade.

A conformabilidade é uma qualidade difícil de ser medida, uma vez que não existe um único parâmetro que permite sua avaliação para um material específico, 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, sob certas condições de trabalho, ao passo que pode romper quando utilizado em outra ferramenta com diferente configuração.

No tryout de ferramentas de estampagem, mudanças são freqüentemente necessárias, desde a escolha de um novo material com melhor conformabilidade, até ajustes no design de matrizes e punções a fim de se atingir o grau de satisfação esperado para o produto. Todas essas ações, no entanto, tomam tempo e dinheiro, o que mostra a necessidade de uma melhor avaliação das chapas metálicas a serem utilizadas, como uma forma de se evitar estas perdas provocadas pelo conhecimento insuficiente das reais condições deformação a que os materiais podem ser submetidos.

Desta forma, procura-se cada vez mais desenvolver ensaios de laboratório que permitam às indústrias de estampagem conhecer melhor 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.

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 estampagem e estiramento. Esta prevê a máxima deformação que o material sofre até o instante em que ocorre 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, é necessário um melhor desenvolvimento do ferramental de ensaio de Nakazima para que se obtenha resultados mais próximos a realidade, caracterizando da melhor forma possível os fenômenos de estiramento e estampagem profunda no material. Para tanto, estudar-se-á diferentes geometrias do punção visando produzir, de forma isolada e simultânea, tais fenômenos nas chapas estampadas e, consequentemente, avaliar com segurança o potencial de cada material de acordo com o grau de estampagem a que será submetido na prática.

O trabalho consistirá na otimização da matriz de embutimento Nakazima, já existente no Laboratório de Conformação Mecânica da UFPR (projetada e construída no período que estive trabalhando como bolsista PIBIC/UFPR), no estudo, projeto e confecção dos diferentes formatos de punções e, finalmente, na realização de ensaios práticos, afim de se levantar as curvas CLC para o aço DC 06, analisando a influência dos diferentes formatos de punções para a plotagem da curva.

Pela análise comparativa entre a CLC levantada segundo o método originalmente proposto por Nakazima, e as deformações atingidas através dos ensaios com as diferentes geometrias de punções, observar-se-á de que forma cada uma das novas geometrias empregadas nos ensaios afeta a estampabilidade do material, tendendo a provocar uma possível redução no nível da CLC, devido a

concentração de tensões, ou, gerando ainda, deformações preferencialmente nos modos de deformação por embutimento profundo ou estiramento.

CAPÍTULO 2

PROPRIEDADES MECÂNICAS FUNDAMENTAIS

2.1 O ensaio de tração

Segundo Dieter (1981), 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. Autores como Schaeffer (1999) e Souza (1974) dizem ser o ensaio de tração o método mais utilizado para determinação das propriedades mecânicas de chapas metálicas. Sendo possível a obtenção do limite de resistência, do limite de escoamento, do grau de encruamento e do índice de anisotropia do material.

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, afim de pegar e esticar o corpo de prova. Ainda segundo o autor, as máquinas são equipadas com sensores para registrar a força e o alongamento do corpo de prova, os quais são confeccionados com diferentes comprimentos, larguras e formatos, definidos pelas normas ABNT NBR 6673, ASTM E 646 e DIN EN 10 002-1. O resultado do ensaio de tração é o diagrama tensão vs. Deformação (figura 2.1) que, segundo Dieter (1981), 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 deformação linear média, obtida pela divisão da elongação do comprimento útil do corpo de prova, pelo comprimento original.

Figura 2.1 – Curva Tensão – Deformação de engenharia - Dieter, 1981.

A forma e a magnitude de uma curva tensão vs. Deformação de um metal dependerá de sua composição, tratamento térmico, história anterior da deformação plástica e da taxa de deformação, temperatura e estado de tensões impostas durante o teste. Ainda segundo Dieter (1981), os parâmetros que são usados para descrever a curva tensão vs. deformação de um metal são: resistência à tração, tensão limite de escoamento, elongação percentual e redução de área. Os dois primeiros sendo parâmetros de resistência e os dois últimos relativos à ductilidade do material.

Dieter (1981) faz ainda uma descrição do comportamento do material quando este ultrapassa o valor correspondente ao limite de escoamento. Segundo ele, 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. Ainda segundo o autor, 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 do transversal, e a tensão de engenharia continua a aumentar com o aumento da deformação. Eventualmente, atinge-se uma 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. Essa condição será atingida primeiramente em algum ponto do corpo de prova que é ligeiramente mais fraco que o resto, de forma que toda a deformação plástica posterior será concentrada nessa região, onde o corpo de prova 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, conforme descreve Dieter (1981).

A curva tensão x deformação convencional não retrata verdadeiramente o comportamento de cada elemento na amostra. Observando-se a curva, a tensão requerida para continuar a deformação da amostra tensionada parece estar decrescendo após 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 estricção, toda deformação fica restrita a uma porção muito pequena do comprimento útil – a área de estricção. Para a estricção iniciar, a redução de carga devido à redução da área da secção transversal precisa ser maior do que o aumento de carga requerido para sustentar cada incremento adicional de alongamento (encruamento do material).

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

Um modo mais realista de descrever o comportamento do material é plotar a tensão verdadeira (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 conforme Keeler, (1968):

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

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

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.

Segundo Souza (1974), quando um corpo metálico é submetido a um ensaio de tração, verifica-se inicialmente que o diagrama é linear, sendo representado pela equação:

$$\sigma = E.\varepsilon \qquad (2.3)$$

que corresponde à lei de Hooke (proposta em 1678 por Sir 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. A linearidade do diagrama termina num ponto denominado limite elástico, definido pelo autor como a maior tensão que o material pode suportar, sem deixar qualquer deformação permanente quando o material é descarregado.

Ainda de acordo com Souza (1974), verifica-se pela figura 2.2 que, na parte OA da curva o material está dentro de sua zona elástica, isto é, além de obedecer à lei de Hooke, se, em qualquer ponto dentro da linha OA, a carga for aliviada, o descarregamento seguirá também a mesma reta OA e, para um descarregamento total, o metal volta à origem (ponto O), sem apresentar qualquer deformação residual ou permanente. Segundo o autor, a estrutura de um metal no estado sólido é constituída de átomos dispostos segundo um arranjo cristalino uniforme nas três dimensões. Quando o metal é solicitado com um esforço de intensidade tal que a deformação fique no intervalo da linha OA, os átomos são deslocados de sua posição inicial de uma distância muito pequena e, assim que o esforço é retirado, os átomos voltam à sua posição inicial, devido às forças de ligação entre os mesmos, desaparecendo a deformação.

Ao ser atingida uma tensão em que a deformação não é proporcional à tensão, chega-se ao ponto A' denominado limite de proporcionalidade. A posição relativa entre A e A' é muito discutível e alguns autores colocam A' abaixo de A. Na verdade, esses dois pontos muitas vezes se confundem e torna-se muito difícil determiná-los com precisão, devido ao fato de que o desvio da linearidade é sempre gradual e não há precisamente um ponto bem determinado para cada um desses limites mencionados. O limite elástico pode mesmo estar na parte curva do gráfico. Terminada a zona elástica, atinge-se a zona plástica, onde a tensão e a deformação não são mais relacionadas por uma simples constante de proporcionalidade e em qualquer ponto do diagrama, havendo descarregamento do material até tensão igual a zero, o metal fica com uma deformação permanente ou residual. A Fig. 2.2 mostra um descarregamento do ponto B na zona plástica até a linha das abscissas. Nota-se que a linha BC é paralela à linha OA, pois o que se perde é a deformação causada na zona plástica, restando a deformação ocorrida na zona elástica.

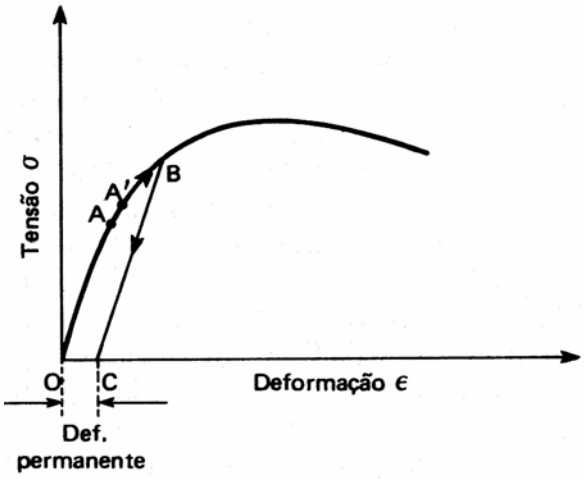

Figura 2.2 – Gráfico tensão x deformação de um metal ou liga metálica – Souza, 1974.

O fascículo de informação técnica nr. 6 da Usiminas, (1999), também traz uma descrição relativa ao ensaio de tração, dizendo ser este realizado tomando-se um corpo de prova que tenha uma parte paralela, de área inicial constante e ensaiando-o em uma máquina, sob estado uniaxial de tração. De acordo com o manual da Usiminas, (1999), a equação de Holloman, eq. (2.4), que representa a curva Tensão vs. Deformação do material para a região de deformação plástica, é

considerada satisfatória para aços ao carbono (especialmente baixo carbono) e adotada por quase todos autores e entidades de vários países, inclusive o IDDRG (International Deep Drawing Research Group) pela simplicidade e facilidade de determinação dos parâmetros *K* e *n* (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).

$$\sigma = K\varepsilon^{n} \tag{2.4}$$

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, sendo apreciado não apenas em trabalhos da década de 60 e 70, como os de Keeler (1968) e Souza (1974), mas também em trabalhos recentes, como o de Kumar, (2002), que utiliza o ensaio de tração para avaliação de chapas de aço para estampagem extra profunda.

2.2 A tensão de escoamento

Conforme Souza, (1974), uma propriedade mecânica comum usada para avaliar a conformabilidade é a tensão de escoamento. Como regra geral, a conformabilidade decresce com o aumento da tensão de escoamento. Apesar desta informação poder ser verdadeira para uma variedade de lotes de aços similares processados de uma maneira similar, é uma generalização muito fraca. A tensão de escoamento meramente indica a tensão onde se inicia a deformação plástica e não indica a quantidade de deformação plástica permissível antes da estricção. Uma comparação de aço baixo carbono e aço inoxidável é um excelente exemplo. A tensão de escoamento do aço inoxidável pode ser o dobro do aço baixo carbono, mas a conformabilidade é geralmente melhor.

O início da deformação plástica é verificado em vários metais e ligas dúcteis, principalmente no caso dos aços de baixo carbono, pelo fenômeno do escoamento.

Segundo Souza, (1974), o escoamento é um tipo de transição heterogênea e localizada, caracterizado por um aumento relativamente grande da deformação com variação pequena da tensão durante a sua maior parte. Depois do escoamento, o metal está encruado.

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

Na figura 2.3 observa-se a caracterização do patamar de escoamento. A tensão A é chamada de limite de escoamento superior, que é a tensão máxima atingida antes da queda repentina da carga (começo da deformação plástica no escoamento). Após a estabilização da carga ou da tensão, o material sofre uma deformação relativamente grande sem aumento da tensão, que é o patamar de escoamento. A tensão B constante estabelecida é o limite de escoamento inferior do material e durante o fenômeno, o alongamento que o metal sofre é chamado alongamento durante o escoamento. Alguns autores, porém, consideram o limite de escoamento inferior como a menor tensão, designada por C na figura 2.3, atingida durante o escoamento, que pode vir a ser inferior à tensão do patamar.

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

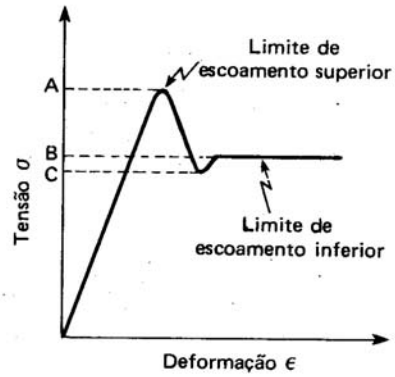

Figura 2.3 – Curva teórica mostrando os limites de escoamento superior e inferior - Souza, 1974.

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

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

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

$$\sigma_f = P_f / A_0 \qquad (2.5)$$

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

2.3 Coeficiente de encruamento

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

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

A curva tensão x deformação verdadeira equivalente para os valores de *n* plotados na figura 2.4 são mostrados na figura 2.5. Como pode ser visto, a tensão continua a subir sem um máximo para o aumento da deformação.

As curvas tensão x deformação para muitos metais, especialmente aço, podem ser aproximadas pela equação da conservação de energia (equação de Holloman - $\sigma = K\,\varepsilon^n$). Da equação de conservação de energia, *n* é definido como o expoente da relação tensão deformação. Também chamado de 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. Quanto maior o valor de *n*, maior a resistência à estricção.

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

$$\log \sigma = \log K + n \log \varepsilon \qquad (2.6)$$

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

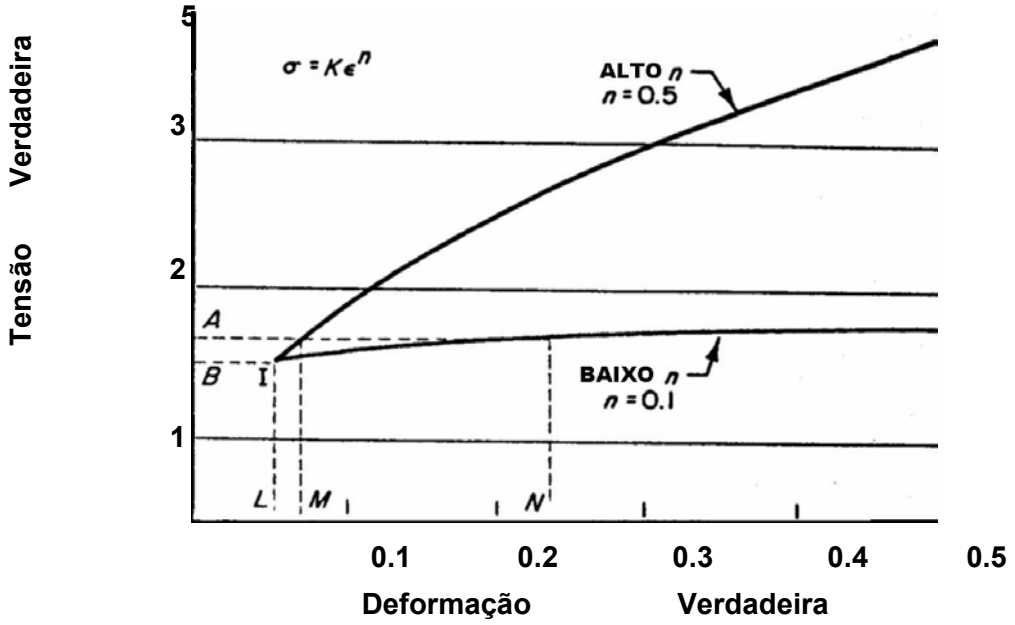

Figura 2.4 - A curva tensão x deformação verdadeira – Keeler, 1968.

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

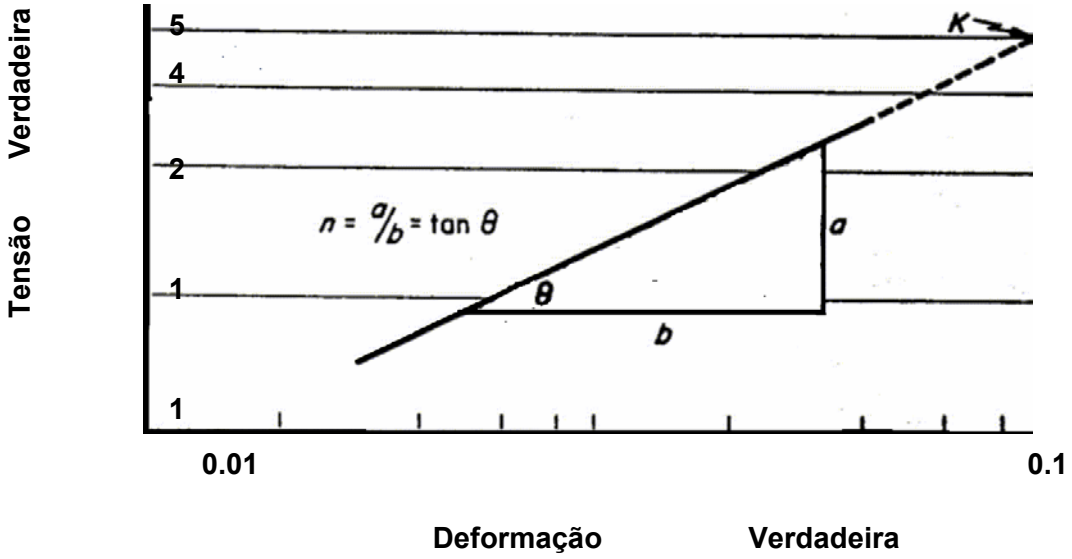

Figura 2.5 - Cáculo do valor de *n*.

2.4 A anisotropia e o 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 ensaio. 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,* que será visto a seguir.

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 subseqüente 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-deformação, e propriedades como tensão de escoamento, força de tração e taxa de encruamento, são afetadas por esta orientação cristalográfica.

O índice de anisotropia plástica *R,* é definido como a razão da deformação verdadeira na largura e a deformação verdadeira na espessura no teste de um corpo de prova padrão, de comprimento útil de 50 mm, figura 2.6. Um método de obter *R* é plotar a deformação na largura (ε_w) versus a deformação na espessura (ε_t) para

várias amostras tracionadas até a estricção. Para a maioria dos materiais comuns de conformação o resultado será uma linha reta. O valor de *R* é constante e corresponde simplesmente a inclinação da curva.

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

$$R = \frac{\ln(w_f/w_0)}{\ln(t_f/t_0)} \tag{2.7}$$

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

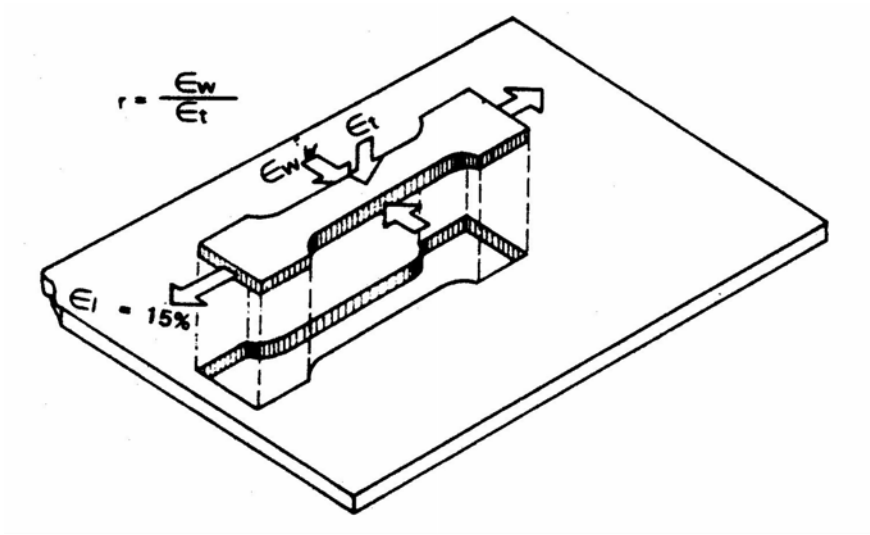

Figura 2.6 – Esquema do modo de medir o valor *R* de Lankford – Usiminas, 1999.

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 eq. (2.8), de forma a se eliminar possíveis erros de medidas da deformação na espessura:

$$R = \frac{\ln(w_f/w_0)}{\ln(l_f\, w_f/l_0 w_0)} \tag{2.8}$$

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 2.7, é chamada de anisotropia planar.

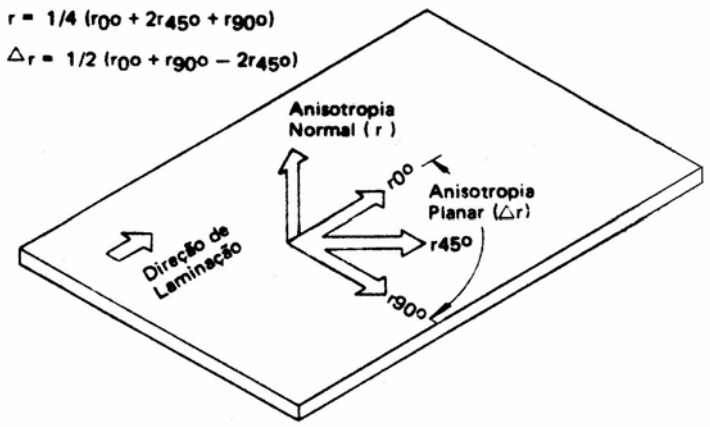

Figura 2.7 – Método de amostragem para obtenção de *R* médio e ΔR - Usiminas, 1999.

A equação matemática da anisotropia planar é:

$$\Delta R = \frac{R_0 + R_{90} - 2R_{45}}{2} \tag{2.9}$$

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

A direcionalidade ocorre em três direções, entretanto, sua ausência no plano da chapa não significa que propriedades medidas em uma direção perpendicular ou normal à chapa são iguais àquelas do plano da chapa. A importância pratica 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 0º, 45º e 90º em relação à direção de laminação, normalmente, obtendo-se assim $R_{0º}$, $R_{45º}$ e $R_{90º}$, respectivamente (figura 2.6 e 2.7).

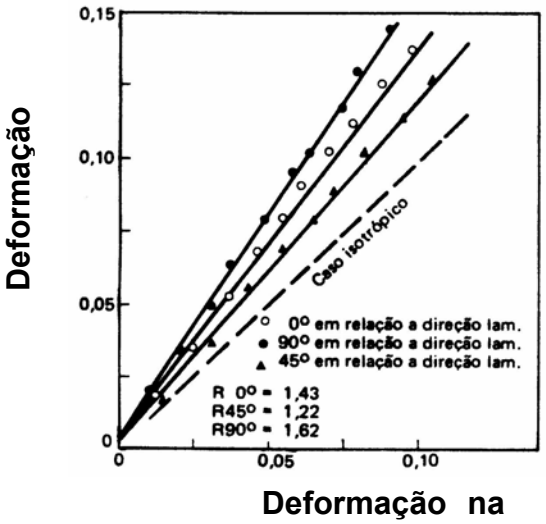

Figura 2.8 – Deformação na espessura versus deformação na largura – Usiminas, 1999.

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

Primeiro caso: $R_{0º} = R_{45º} = R_{90º} = 1,0$ (isotropia total);

Segundo caso: $R_{0º} = R_{45º} = R_{90º} \neq 1,0$ (anisotropia normal pura e isotropia planar);

Terceiro caso: $R_{0º} \neq R_{45º} \neq R_{90º} \neq 1,0$ (anisotropia normal + anisotropia planar).

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

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

$$\overline{R} = \frac{R_0 + R_{90} + 2R_{45}}{4} \qquad (2.10)$$

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

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

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

A influência da anisotropia é graficamente mostrada na figura 2.9.

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

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

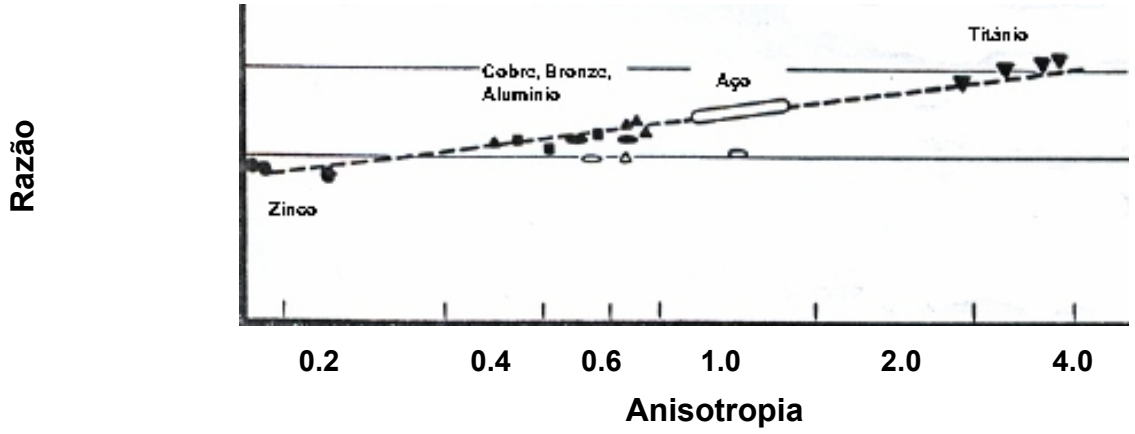

Figura 2.9 – Anisotropia normal para vários materiais versus RCD (Razão Crítica dos Diâmetros)

Um valor alto de $\overline{R}$ indica boa conformabilidade, desde que ΔR seja igual a zero – Keeler, 1968.

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

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

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

O valor *R* tem uma boa base física, tendo sido interpretado em termos da orientação cristalina (textura) do material, por vários autores. Também pode ser introduzido nas equações da teoria da plasticidade de Hill, (1983).

CAPÍTULO 3

TESTES SIMULATIVOS PRÁTICOS E CURVAS LIMITE DE CONFORMAÇÃO

3.1 Introdução

Segundo o fascículo de informações técnicas nr. 6 da Usiminas, (1999), esta 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 em: testes com predomínio de estiramento; testes com predomínio de estampagem profunda; testes combinados (estiramento + estampagem); testes que simulam o flangeamento e testes de dobramento.

O estiramento, segundo Dieter, (1981), 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 derivado do desempenho por tração de chapas finas laminadas, sendo 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.

A figura 3.1 mostra uma representação simples de uma operação de estiramento.

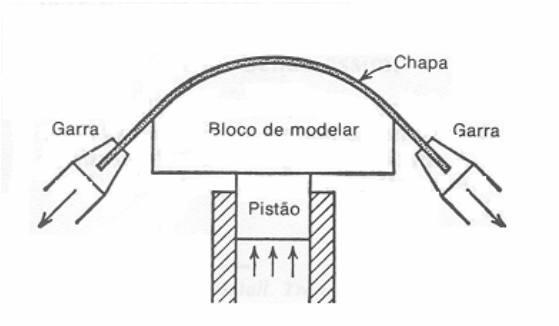

Figura 3.1 – Operação de estiramento por tração – Dieter (1981).

A estampagem profunda ou Embutimento, por sua vez, corresponde ao processo de fabricação utilizado para modelar chapas planas em artigos com forma de copo. A estampagem é realizada 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. Ainda de acordo com Dieter, (1981), a maior parte dos estudos experimentais e teóricos têm sido realizados na estampagem profunda de um copo cilíndrico de fundo plano (teste de *Swift*) a partir de um disco plano (*blank*). A figura 3.2 mostra representação do teste de embutimento profundo.

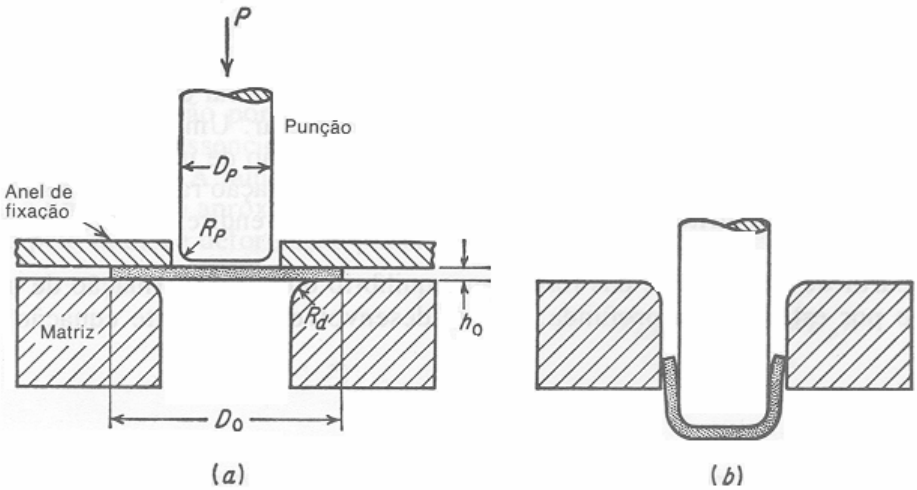

Figura 3.2 – Estampagem profunda de um copo cilíndrico. (a) Antes da estampagem; (b) após a estampagem – Dieter (1981).

Na estampagem profunda de um copo, o metal é submetido a três tipos diferentes de deformação. A figura 3.3, representa as deformações e tensões desenvolvidas num segmento do *blank* circular durante a estampagem. O metal situado no centro do disco, sob a cabeça do punção , é acomodado em torno do perfil do punção e, assim, tem sua espessura reduzida. Nesta região o metal está

sujeito a um estado biaxial de tração devido à ação do punção. O metal situado na região interna do *blank* é deformado radialmente para o interior em direção da garganta da matriz e, à medida que isto ocorre, a circunferência externa deve decrescer continuamente desde a dimensão do disco original até aquela relativa à peça final. Isto significa que o metal está submetido a uma deformação compressiva na direção circunferencial e a uma deformação trativa na direção radial. Quando o metal ultrapassa o raio da matriz, é primeiramente dobrado e depois endireitado, ao mesmo tempo que sofre um esforço de tração. Este dobramento plástico sob tração resulta numa considerável redução de espessura, que modifica o aumento da mesma produzido pela contração circunferencial. Entre a zona interna tracionada e a zona externa contraída esxiste um estreito anel do metal que não foi dobrado, seja sobre a matriz, seja sobre o punção. O metal nesta região foi submetido apenas a um carregamento de tração ao longo da operação de estampagem.

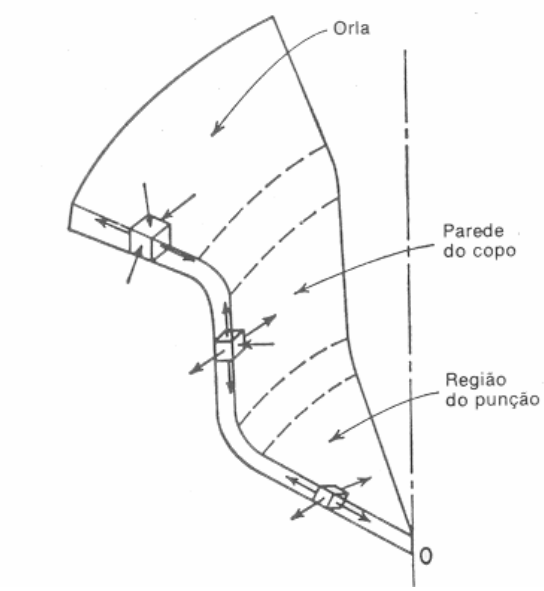

Figura 3.3 - Tensões e deformação presentes em uma seção de um copo embutido – Dieter (1981).

Keeler, (1968), faz uma representação dos testes de embutimento profundo e estiramento, como mostram as figuras 3.4 e 3.5 respectivamente, indicando não apenas a região de deformação da chapa , mas também forma de ruptura do material em cada caso.

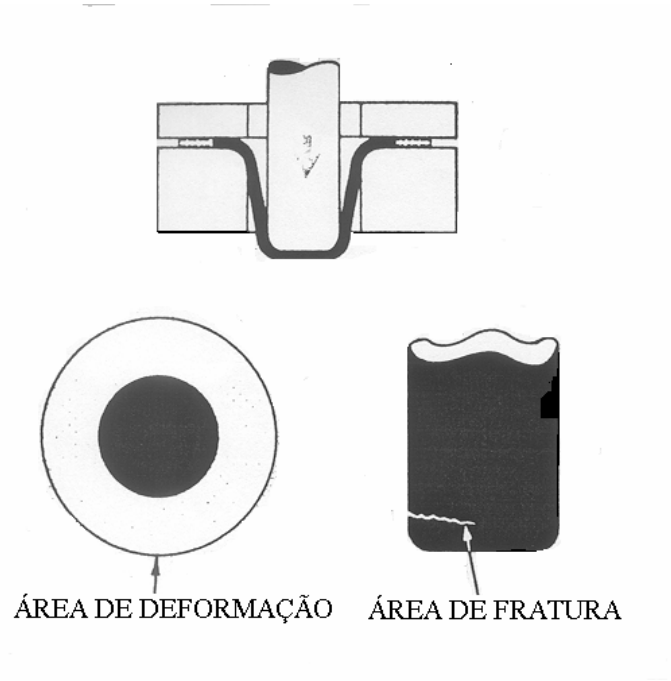

Figura 3.4 – Operação de embutimento profundo – Keeler (1968).

Figura 3.5 – Operação de estiramento – 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, Fukui entre outros. Uma classificação destes testes de

estampagem, de acordo com o modo de deformação, é feita pelo fascículo de informações técnicas da Usiminas, (1999), como mostra a figura 3.6.

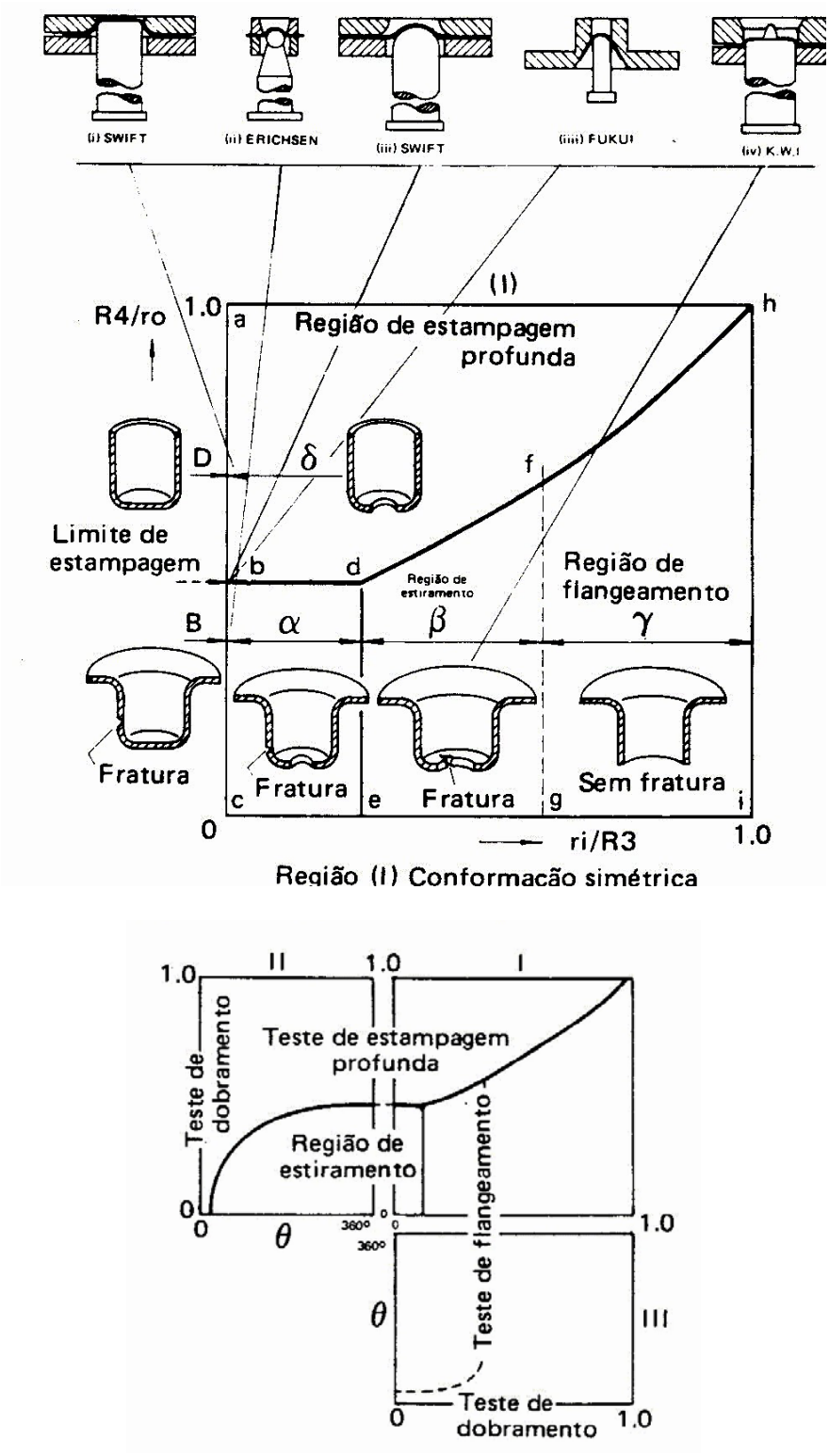

Figura 3.6 – Classificação dos testes de acordo com o modo de deformação – Usiminas (1999).

3.2 Teste de estiramento

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

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

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

O valor Erichsen correlaciona-se razoavelmente com o índice *n*, mas não é capaz de prever o comportamento da chapa quanto à estampagem profunda. Tem o inconveniente de não ser um número adimensional e depende essencialmente da espessura do material ensaiado, não se podendo estabelecer correlação entre materiais de espessuras diferentes.

Na figura 3.7, mostra-se um esquema, do ensaio de Erichsen com as dimensões de punção e matriz para a faixa de 0,6 a 1.6 mm.

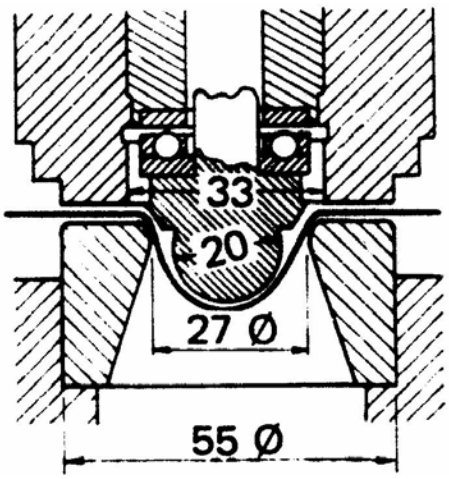

Figura 3.7 – Dispositivo para execução do ensaio de Erichsen. Punção de cabeça esférica e matriz de seção circular. Cotas em mm – Usiminas, 1999.

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

3.3 Testes de estampagem

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

O teste mais representativo deste modo de conformação é o ensaio Swift, que está esquematizado na Figura 3.8. O procedimento é o seguinte: realiza-se uma série de ensaios nos quais vai-se aumentando gradativamente as dimensões do corpo de prova até que não se consiga mais estampar o material, isto é, até que o material se rompa antes de ser completamente embutido.

O valor medido é o denominado RCD ou razão crítica dos diâmetros (LDR: “limit drawing ratio”) que consiste na razão entre o diâmetro máximo do corpo de prova que estampou sem romper pelo diâmetro do punção (D_0/d_p, na Figura 3.8).

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

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

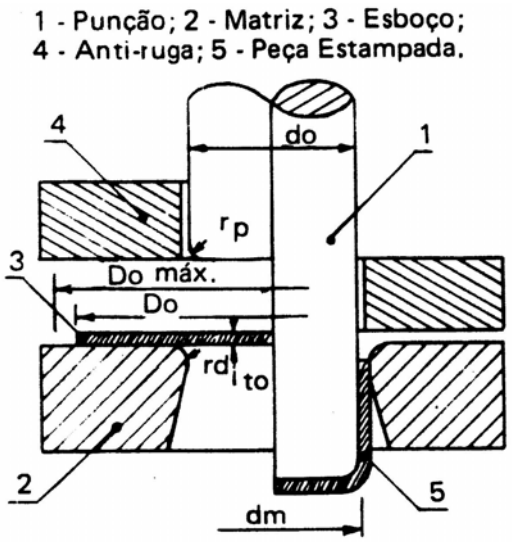

Figura 3.8 – Corte do dispositivo para execução do Ensaio de Swift. Punção de cabeça chata, matriz circular – Usiminas, 1999.

3.4 Testes combinados

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

Neste teste a matriz é cônica na parte de apoio do corpo de prova conforme mostra a figura 3.9 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 cilindricamente através da cavidade da matriz até iniciar-se a ruptura. A forma final da peça está indicada na parte inferior da figura 3.9. O valor medido através de dispositivo especial, é a média dos diâmetros máximo e mínimo (na direção circunferencial da parte mais larga do corpo de prova) – D_m – na figura 3.9. As variações de diâmetros ocorrem por causa de anisotropia planar ΔR da chapa. Então, tem-se que:

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

O valor CCV tem o inconveniente de ser dimensional (mm) e de depender do diâmetro inicial do corpo de prova que é padronizado por faixa de espessura, assim como o conjunto matriz e punção, tornando-se problemática a comparação de

valores referentes a faixas de espessura diferentes. O posicionamento do corpo de prova na matriz influi notavelmente nos resultados, tornando sensível à influência do operador.

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

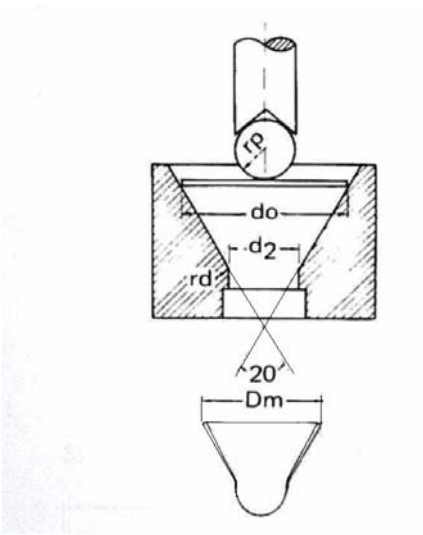

Figura 3.9 – Ferramentas para o Teste CCV (acima) e forma da peça rompida após o Teste (abaixo) – Usiminas, 1999.

3.5 – Curvas limite de conformação

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 (CLC). 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 vs. 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 materiais devem ser definidas para se determinar as deformações limites sob condições prescritas de carregamento.

Para Keeler, (1968), 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.

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

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

Lange, (1993), faz uma representação do Diagrama Limite de Conformação, mostrando o tipo de deformações sofridas pelo matéria para uma malha circular impressa na chapa, tanto no estiramento quanto no embutimento profundo. Este diagrama está apresentado na figura 3.10.

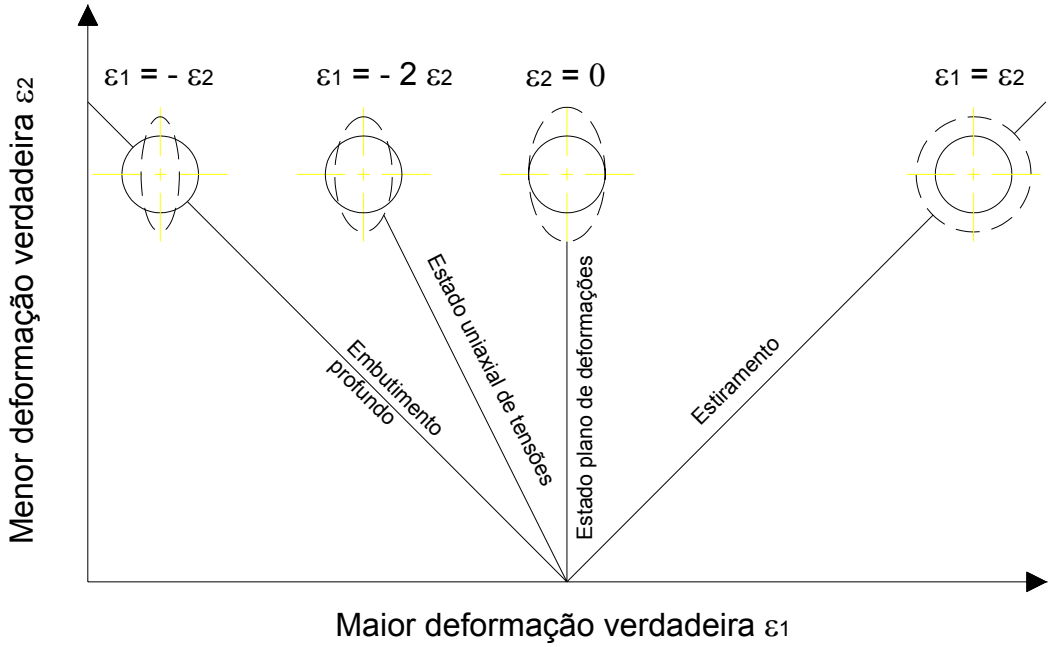

Figura 3.10 – Deformações no embutimento profundo e no estiramento para uma malha circular – Lange (1993).

3.5.1 – Determinação da curva limite de conformação

Um dos métodos utilizados para a determinação na 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. A figura 3.11 mostra a curva limite de conformação segundo o método IRSID.

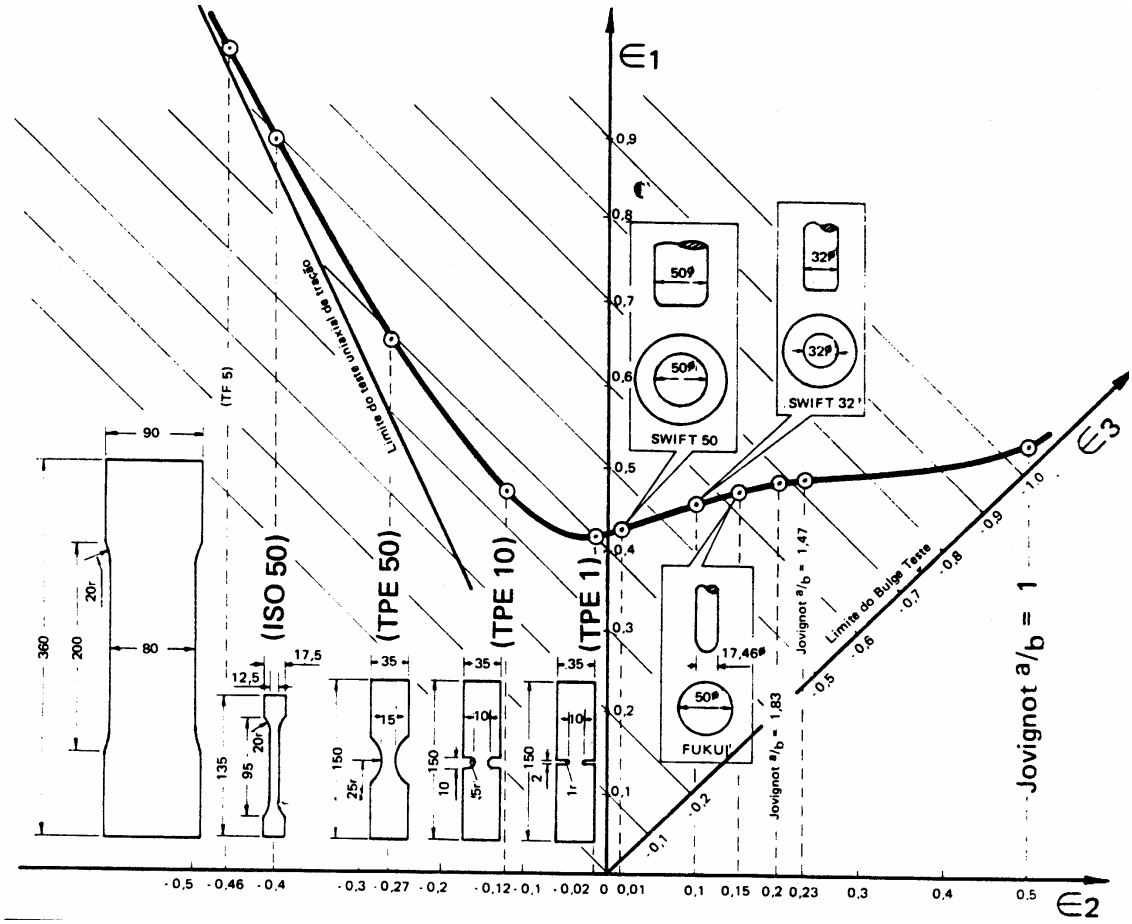

Figura 3.11 – Curva limite de conformação de acordo com o método IRSID – Usiminas (1999).

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, que vem sendo adotado ns 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).

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 ferramental utilizado nos ensaios, de forma que o teste conforme Marciniak é composto por um punção cilíndrico, uma matriz e um prendedor de chapas. A força aplicada no prendedor de chapas evita qualquer

escoamento do material do flange para aparte central do corpo de prova que está sendo deformado durante o ensaio, como mostra a figura 3.12.

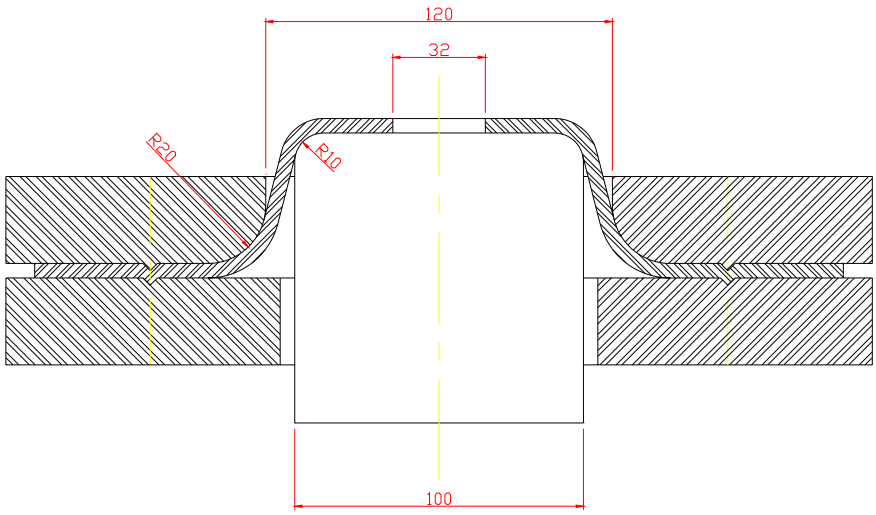

Figura 3.12 – Ferramental utilizado para execução do teste Marciniak – Richter (2003).

Os corpos de prova utilizados no teste segundo Marciniak são tiras de chapas retangulares em diferentes larguras, que são cortados de forma que a direção longitudinal deles seja ortogonal ao sentido de laminação da chapa, feito de maneira análogo ao ensaio de tração. Ainda segundo Richter, a preparação dos corpos de prova compreende a aplicação de uma grade de medição em cima da superfície da chapa, de forma a não influenciar na sua conformabilidade. Em chapas de aço a grade é aplicada a partir de um processo eletroquímico, apesar de que Moreira *et al*, (2003), e o próprio Keeler, (1968), proporem um método de marcação por serigrafia (pintura). Voltando a descrição do ensaio segundo Marciniak, Richter, (2003), destaca que entre o próprio corpo de prova e o punção fica mais uma chapa perfurada na parte central, para que se reduza o atrito entre a face frontal do punção e o corpo de prova. Esta chapa é chamada *dummy blank* ou *driving blank*. Entre o corpo de prova e o *dummy blank* não há lubrificação nenhuma para maximizar o atrito e evitar movimento relativo, enquanto que, entre o punção e o *dummy blank* há lubrificação com óleo para diminuir o atrito e facilitar o escoamento.

Durante o ensaio a chapa é deformada até ocorrer a primeira trinca no material do corpo de prova, de forma que, para que o ensaio seja válido, torna-se

necessário que o corpo de prova trinque mais ou menos no centro do punção, que o *dummy blank* não esteja trincado e que o punção não chegue a passar pelo furo do *dummy blank*, sem entrar em contato com o corpo de prova.

Já o método segundo Nakazima, Richter (2003), descreve o ensaio 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, de forma que os copos de prova mais estreitos têm a forma de um corpo de prova para o ensaio de tração, 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, que pode conter uma almofada elástica, colocada com o objetivo de melhorar a distribuição das deformações. As figuras 3.13 e 3.14 mostram o ferramental de ensaio Nakazima e a curva limite de conformação obtida segundo este método, respectivamente.

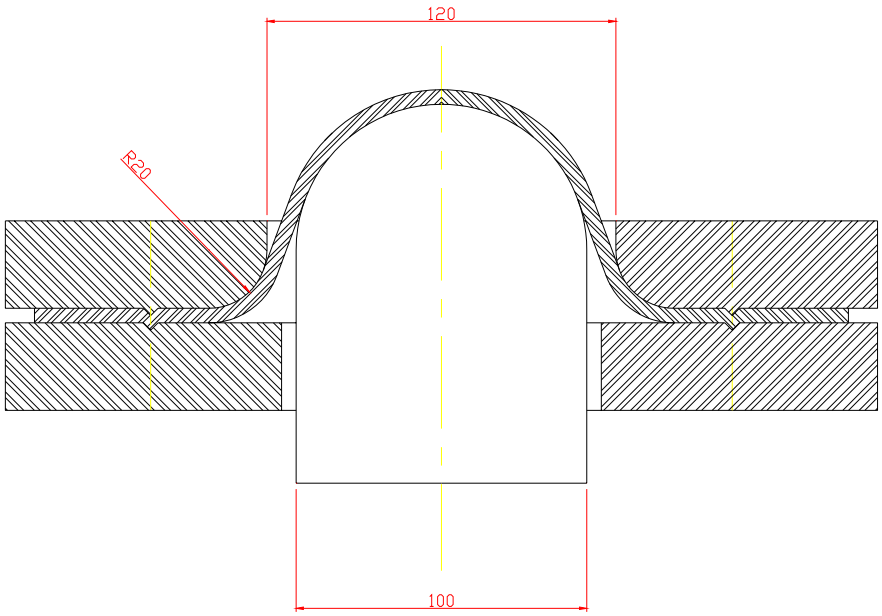

Figura 3.13 – Ferramental utilizado para execução do teste Nakazima – Richter (2003).

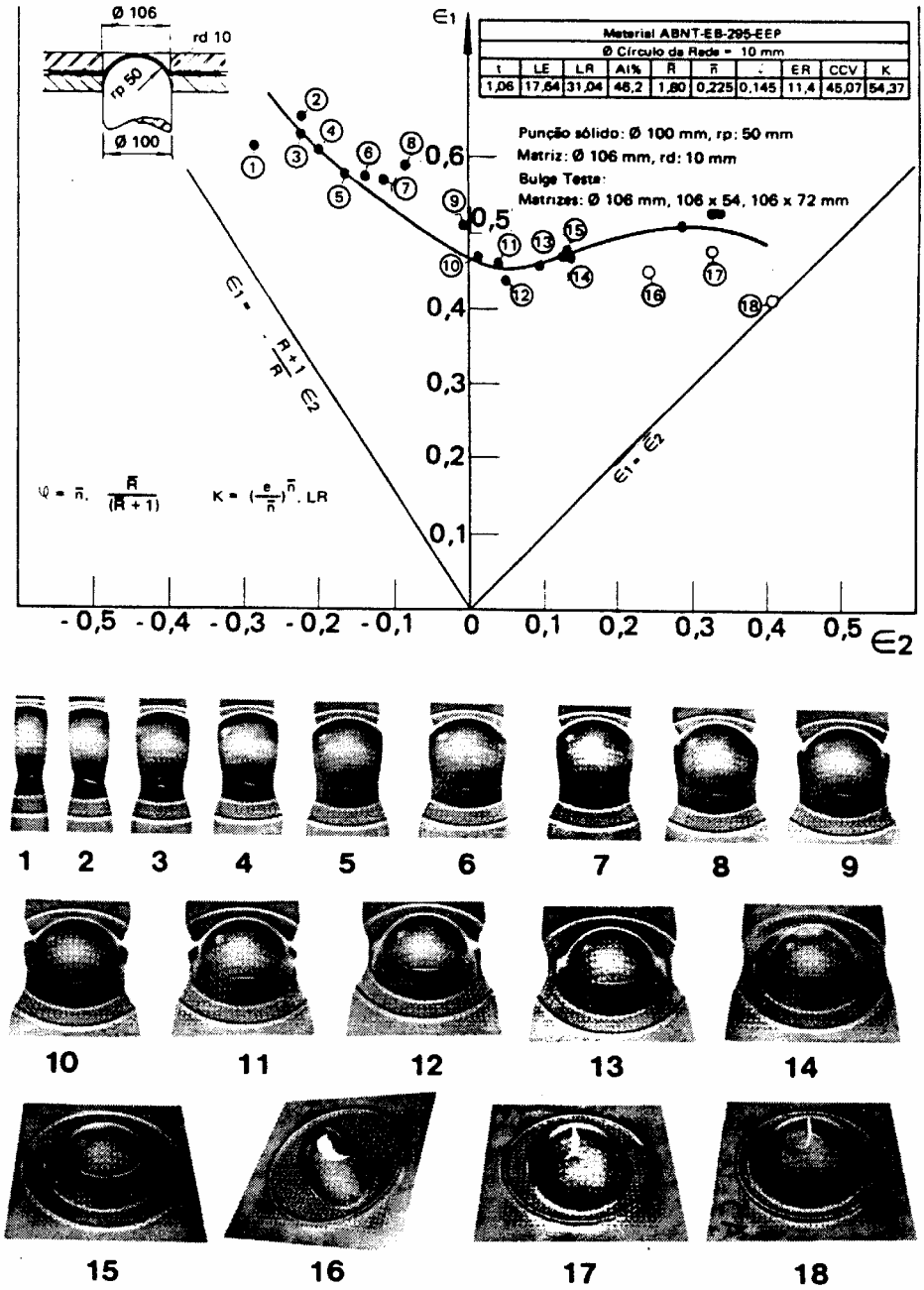

Figura 3.14 – Curva limite de conformação segundo o método Nakazima – Usiminas (1999).

3.5.2 – 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 esticção 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 última. Esta metodologia requer o levantamento do histórico completo de deformação durante o ensaio, isto é, a aquisição via análise de imagens dos compôs de deslocamentos impostos a malha de círculos.

De acordo com Srour (2002), escolhida uma elipse adequada para a medição das deformações, tem-se no diâmetro maior da elipse a maior deformação principal convencional, e no menor diâmetro a menor deformação principal convencional. As deformações convencionais e as verdadeiras são calculadas através das seguintes fórmulas:

maior deformação:

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

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

menor deformação:

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

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

onde: - D_0 é o diâmetro inicial do círculo.

- D_1 é o diâmetro maior final da elipse.

- D_2 é o diâmetro menor final da elipse.

Para medir os diâmetros e calcular as deformações, são utilizados escalas graduadas ou, paquímetros. No caso do uso da escala, a medida do diâmetro final maior da elipse é acrescida da fratura. Para fazer o cálculo correto da deformação utiliza-se medir o comprimento final de cada borda da elipse, entre a fratura e a

ponta da curva. O cálculo é feito com relação ao diâmetro inicial através das equações (3.6), (3.7) e (3.8), onde D_{1F} e D_{2F} são os comprimentos entre a fratura e as pontas da elipse na direção de maior deformação:

deformação de um lado da elipse:

$$e_{1F} = \frac{D_{1F} - D_0}{D_0} \tag{3.6}$$

deformação do segundo lado da elipse:

$$e_{2F} = \frac{D_{2F} - D_0}{D_0} \tag{3.7}$$

deformação do diâmetro maior da elipse é:

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

$$\frac{D_{1F} + D_{2F} - D_0}{D_0} = \frac{D_1 - D_0}{D_0} \tag{3.8}$$

O diâmetro menor da elipse não é alterado pela presença da fratura, sendo possível medir a deformação diretamente. Depois da medida das deformações de engenharia deve-se fazer a conversão das deformações para a unidade verdadeira e assim plotar a CLC experimental. A figura 3.15 mostra um procedimento de medição da malha de círculos após a deformação do material.

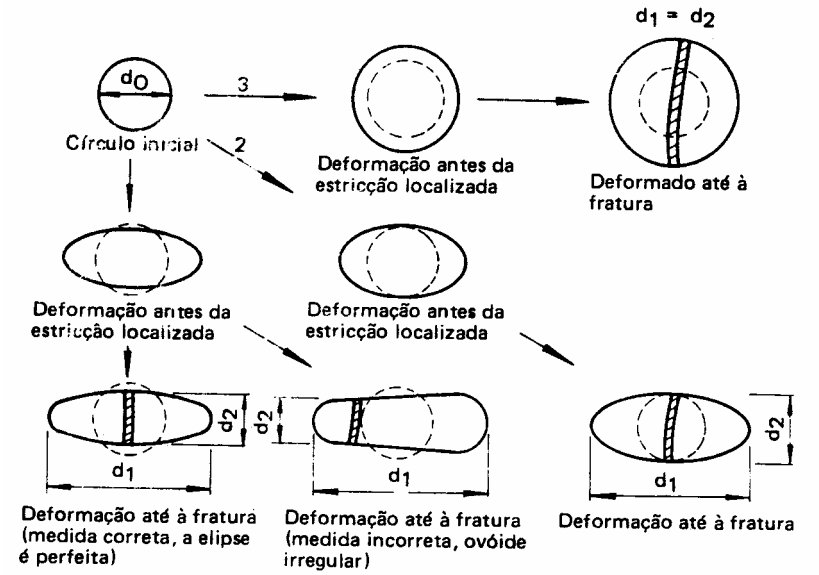

Figura 3.15 – Medida da rede de círculos para obtenção das deformações principais - Usiminas, 1999.

Keeler, (2003), 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 (3.9) e (3.10):

$$(e_1 + 1) * (e_2 + 1) * (e_3 + 1) = 1 \tag{3.9}$$

$$(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3) = 0 \tag{3.10}$$

onde e_3 é a deformação convencional no sentido da espessura da chapa, ou seja, representa o afinamento do material, enquanto que ε_3 representa a deformação verdadeira no sentido da espessura do material.

3.5.3 – Novas geometrias de punções propostas para os ensaios de estampagem

Muitos autores como Haberfield *et al* (1975) e Boyles *et al* (1982), propuseram estudos referentes a testes e conceitos de estampagem de chapas metálicas. Recentemente, no entanto, Borsoi *et al* (2000 e 2001) realizou ensaios para análise da conformabilidade de chapas para a indústria de estampagem, utilizando geometrias variadas para os punções de ensaio, como mostra a figura 3.16.

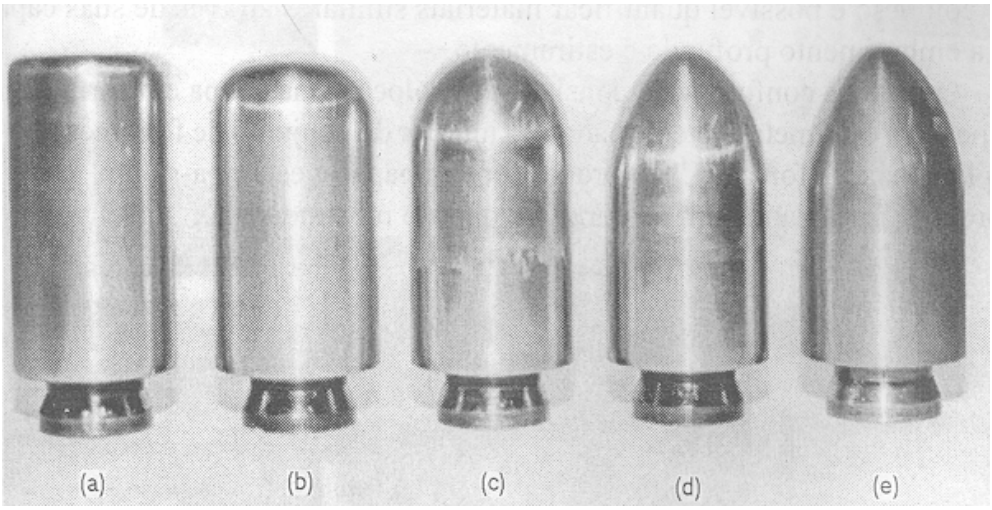

Figura 3.16 – Punções de geometria variada utilizados em ensaios de estampagem – Borsoi *et al* (2000 e 2001).

Segundo o autor, estes punções foram projetados e construídos desta forma para produzirem nas chapas estampadas, fenômenos de estiramento ou estampagem profunda de forma isolada ou simultânea, sendo o primeiro fenômeno caracterizado pela redução localizada da espessura da chapa, enquanto que o segundo pela redução de espessura de forma mais homogênea ao longo da peça.

Segundo Borsoi *et al*, (2000) o punção (a) é um elemento que gera preferencialmente fenômenos de estampagem profunda devido ao seu formato cilíndrico e sua grande área de contato inicial com a chapa. Para o punção (b), a forma cilíndrica, porém com um raio de concordância maior que o anterior, gera fenômenos de estampagem profunda em menor quantidade devido à redução da área inicial de contato, dando início ao surgimento do estiramento da chapa.

A medida que o raio de curvatura vai aumentando, ou seja, se tomando o punção uma forma mais aguda (punções c e d), o fenômeno de estiramento é mais favorecido enquanto que o fenômeno de estampagem profunda reduz seu efeito e se torna menos importante na conformação da chapa, descreve Borsoi *et al*, (2000).

O punção (e), empregado nos testes, apresenta a geometria mais aguda de todos os punções, sendo este o modelo que submete a chapa estampada preferencialmente ao fenômeno de estiramento devido à sua forma geométrica e a pouca área de contato inicial do punção com a chapa.

No processo de estampagem ocorre a mistura destes dois tipos de fenômenos devido à geometria mais complexa das peças estampadas. Dificilmente eles ocorreram isoladamente, por isso, saber o comportamento do material frente a estes fenômenos é importante para evitar no processo de estampagem possíveis falhas de material.

O uso de diferentes formas de punções, com diferentes raios no fundo servem para forçar condições semelhantes a realidade da estampagem e muitas vezes provocar rupturas prematuras no material, e assim, prever possíveis regiões das ferramentas onde podem ocorrer falhas na estampagem, ou mesmo regiões onde o estiramento pode impedir o processo de conformação da chapa causando a ruptura, estimando-se assim, o comportamento real do material na indústria.

CAPÍTULO 4

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1 Generalidades

Como já discutido anteriormente, o objetivo deste estudo foi avaliar a influência de diferentes geometrias de punções no ensaio de embutimento Nakajima, para o qual, foi necessária uma análise prévia do material a ser utilizado nos ensaios. Esta análise partiu de um ensaio metalográfico, para verificação 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 embutimento Nakajima, realizados inicialmente pelo método tradicional, para obtenção da curva limite de conformação da chapa metálica e posteriormente utilizando-se quatro novas geometrias de punções, a fim de se verificar a influência do formato da ferramenta através da variação das 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 modelo de punção utilizado nos ensaios, visando uma análise da influência da geometria do ferramental não apenas em termos da deformação planar causada na chapa, mas também em termos da distribuição das deformações e do afinamento da chapa na espessura.

4.2 Material utilizado

Inicialmente foram obtidas, junto a Volkswagen do Paraná, as amostras de chapas utilizadas na fabricação da carroceria do Golf, produzidas pela Usiminas segundo a especificação DC 06, de acordo com a norma DIN 10152, também

fornecida pela empresa juntamente com o material. Este material, tomado como base para a realização dos ensaios de laboratório, foi especificamente selecionado por se tratar de uma chapa fina (0,7 mm 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 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.

4.3 Ensaios 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 0º, 45º e 90º em relação a direção de laminação do material.

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

Para 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 0º, 45º e 90º 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 (0º), 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.

4.4 Realização do ensaio de tração para determinação das propriedades fundamentais

4.4.1 Preparação dos corpos de prova

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

O dimensionamento e o formato adotados para os corpos de prova foram tomados a partir das normas ABNT NBR 6673, ASTM E 646 e DIN EM 10 002-1 que descrevem o ensaio. Desta forma convencionou-se a utilização dos corpos de prova com formato “gravata”, considerado ideal para o ensaio, com suas dimensões estabelecidas de forma a atender as três normas indicadas. Isto foi possível, uma

vez que nenhuma das três normas estabelece medidas exatas para os corpos de prova e sim dimensões mínimas e máximas dentro das quais os corpos de prova atendem às exigências de ensaio.

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

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

Tabela 4.1 – Dimensões em mm para o corpo de prova de tração.

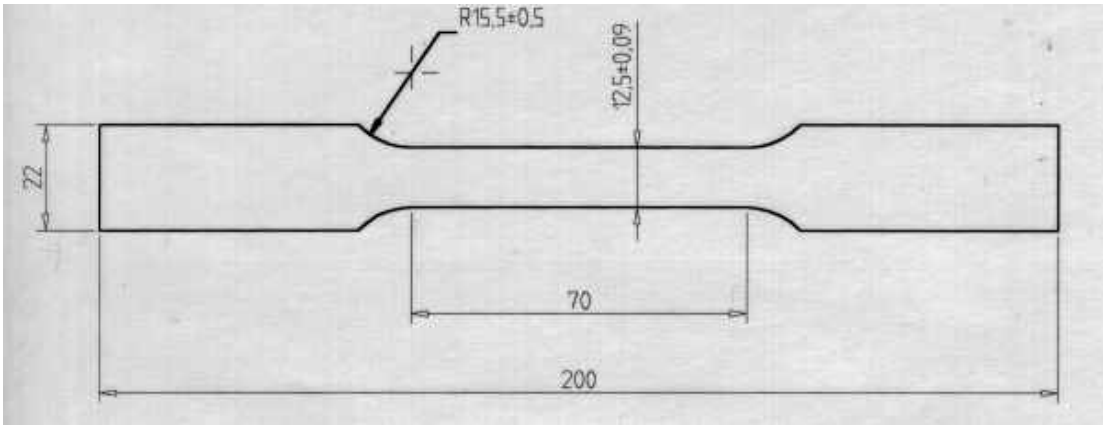

Figura 4.1 – Corpo de prova para o ensaio de tração.

Determinado o corpo de prova padrão a ser adotado, realizou-se a marcação nas chapas das posições onde deveriam ser recortados os corpos de prova, de forma que fossem extraídos formando ângulos de 0º, 45º e 90º em relação à direção de laminação. Os corpos de prova foram estampados (recortados) em uma matriz

desenvolvida especialmente para confecção destas amostras, passando em seguida por uma operação de retificação da seção lateral (na região útil do corpo de prova), com o propósito de se reduzir a incidência de sulcos ou rebarbas que poderiam acarretar pontos de concentração de tensão e mascarar os resultados obtidos.

Foram retirados um total de seis corpos de prova para cada direção de laminação da chapa DC 06, visto que estava prevista a utilização de quatro corpos de prova para cada direção (três para se levantar o fator de anisotropia e o coeficiente de encruamento e um para a obtenção do limite de resistência), restando outros dois como segurança. Desta forma, foi preparado um total de doze corpos de prova da chapa utilizada adotada para os testes de laboratório. O número de corpos de provas depende do número de ensaios programados, podendo variar de três a cinco para cada direção de laminação, conforme previsto pelas normas técnicas citadas anteriormente para o ensaio de tração.

4.4.2 Preparação da máquina de tração

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

Para a utilização do equipamento foi necessária a montagem dos dispositivos apropriados para o tipo de ensaio a ser realizado, bem como a adaptação do programa Tesc para captação dos dados de interesse e geração do relatório de ensaio, fornecido pelo microcomputador instalado na máquina.

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

- Montagem das garras (com superfície plana, próprio para ensaio de chapas) e célula de carga (com capacidade para 2 toneladas), tomando o cuidado para que a capacidade da célula de carga seja sempre superior a carga exigida durante o ensaio. Inicialmente, por não conhecer a carga máxima que o ensaio exigiria, foi incluída, no programa da máquina, uma rotina, com a função de interromper o

ensaio, caso a carga ultrapassasse um limite de 75% da capacidade da célula de carga, a fim de evitar danos ao equipamento.

- Montagem do extensômetro, evitando durante o ensaio, que este ultrapassasse 25 mm de abertura durante a deformação do corpo de prova. Uma abertura superior a este valor ocasionaria a quebra do extensômetro.
- Adaptação do programa Tesc, a fim de se obter os dados previstos para análise dos materiais, além da organização destes dados no relatório de ensaio da máquina.

4.4.3 Ensaios de tração

Com o equipamento e os corpos de prova devidamente preparados, iniciou-se a realização dos ensaios de tração com o material DC 06.

Buscamos nestes ensaios determinar os valores do fator de anisotropia *R* e coeficiente de encruamento *n*, além do limite de resistência, alongamento e tensão de escoamento 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.

Para realização dos testes, selecionou-se inicialmente no microcomputador, o programa para determinação do fator de anisotropia. Em seguida tomou-se um dos corpos de prova do aço DC 06 recortado a 0º da direção de laminação, no qual medimos os valores da espessura e da largura da região útil do mesmo, antes de prendê-lo às garras da máquina. Com o corpo de prova na máquina, acoplamos a ele o extensômetro, entramos com os dados pedidos pelo programa (espessura inicial, largura inicial, comprimento útil e direção de laminação) e iniciamos o ensaio. Para o ensaio de anisotropia, assim como para o ensaio de encruamento, o corpo de prova é deformado até um percentual entre 15 e 20% do seu comprimento útil. No caso em questão, os corpos de prova foram deformados até o limite de 18%, onde a máquina parou automaticamente o ensaio.

Retirado o corpo de prova da máquina, mediu-se novamente os valores da espessura e da largura da região útil, estes agora tomados como valores finais, após

a deformação do corpo de prova. Entramos com estes dados ("finais") no programa, de forma que o computador pudesse calcular o valor da anisotropia R_0 para aquele corpo de prova, retirado a 0º 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 0º da direção de laminação. Realizou-se ainda mais três testes para os corpos de prova a 45º e outros três ensaios para os corpos de prova a 90º da direção de laminação, sempre respeitando esta ordem, 0º, 45º e 90º respectivamente, num total de nove ensaios.

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

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

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, finalizando os ensaios de tração num total de 12 ensaios realizados.

4.5 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.

O equipamento em questão 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 para cada elemento presente, sendo estes o resultados percentuais de cada elemento presente na amostra.

4.6 Ensaios de estampagem Nakajima

4.6.1 Preparação da ferramenta para os ensaios de estampagem

Nesta etapa do estudo, em que se visou a realização dos testes simulativos práticos, foram confeccionados os novos modelos de punções a serem utilizados nos ensaios de estampagem Nakajima, com base nas características construtivas do ferramental.

A ferramenta de ensaio, mostrada na figura 4.2, pertence ao Laboratório de Conformação Mecânica da UFPR, e foi projetada e contruída de forma a ser utilizada em diversos trabalhos de pesquisa, como o de Srour (2002).

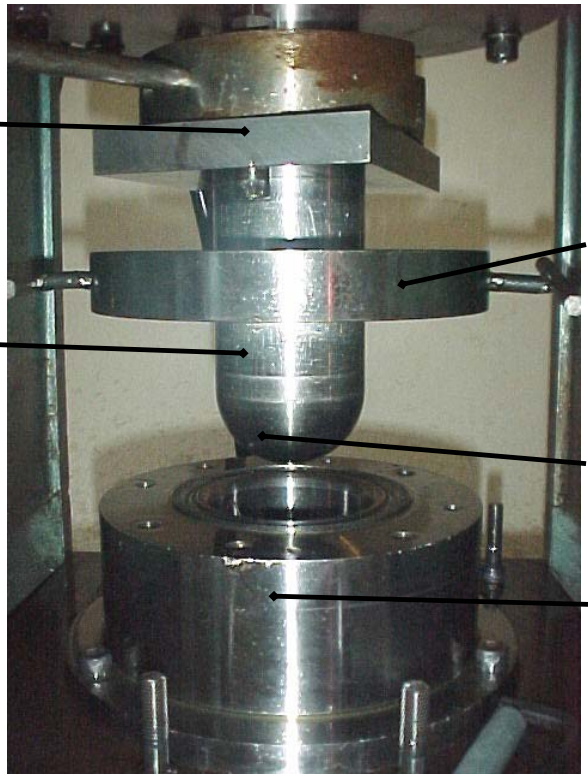

Figura 4.2 – Ferramenta utilizada no ensaio de Nakajima.

A ferramenta de ensaio Nakajima (figura 4.3) tem a seguinte configuração:

Porta punção - Tem a função única e exclusiva de fixar o inserto e o punção ao êmbolo da prensa;

Punção - Responsável direto pela deformação do material;

Inserto - Possui o mesmo diâmetro do punção e está acoplado entre ele e o porta-punção. Serve para aumentar o comprimento útil da ferramenta, ou seja, garante desta forma que a ferramenta terá comprimento suficiente para ultrapassar a espessura do prensa-chapa e embutir o material até uma profundidade limite, na qual a chapa se romperá;

Matriz - Corresponde ao maior dos componentes da ferramenta, atuará de maneira tal que a chapa será empurrada pelo punção para dentro de seu furo central (precisamente dimensionado para o ensaio), servindo como uma espécie de “forma” que delimita o diâmetro do copo embutido;

Prensa chapa - Tem função não menos importante que os demais itens para a perfeita realização dos ensaios. Ele será o responsável por posicionar e prender a

chapa que será ensaiada, de forma que esta fique devidamente alinhada com o equipamento e não permita que o material escorregue para dentro da matriz sob o efeito do punção.

Com base nesta configuração do ferramental, que possui originalmente um punção hemisférico com 100 mm de diâmetro, foram desenvolvidos quatro novos modelos de punções, um com o formato cilíndrico, denominado P1 e um segundo modelo com a forma de uma elipse rasa, identificado por P2. O punção hemisférico já existente no ferramental foi chamado P3, por ser uma geometria intermediária entre o punção P2 e o punção P4, projetado segundo a forma de uma elipse profunda. O último modelo de punção projetado para os testes tomou a forma de uma elipse extra profunda, o qual foi identificado por P5. Em todos os quatro novos modelos de punções, foi mantido o diâmetro de 100 mm, de acordo com o dimensionamento proposto por Nakajima para o ensaio.

A parte principal no desenvolvimento da geometria de cada punção foi a especificação dos raios R1 e R2, sendo o primeiro referente à medida da cabeça do punção e o segundo responsável pela concordância de R1 com a porção retilínea da ferramenta. A concordância entre estes raios, que foi o fator determinante para a atribuição dos formatos descritos anteriormente para cada punção, esta apresentado na figura 4.3, que mostra o desenho de cada uma das cinco ferramentas utilizadas ns ensaios.

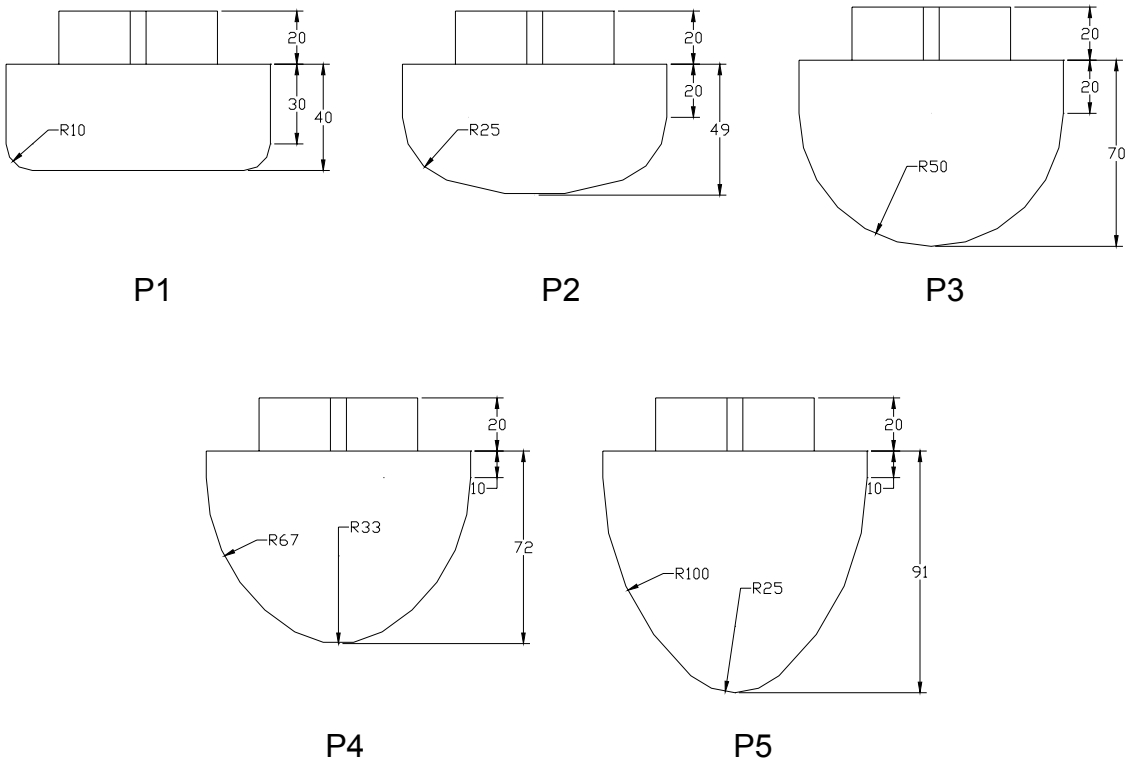

Figura 4.3 – Desenho dos punções mostrando os raios de concordância de cada ferramenta.

As figuras 4.4, 4.5, 4.6 e 4.7 mostram as fotos dos punções P1, P2, P4 e P5 respectivamente, os quais foram usinados em torno CNC pelo CEFET-PR.

Figura 4.4 – Punção cilíndrico P1.

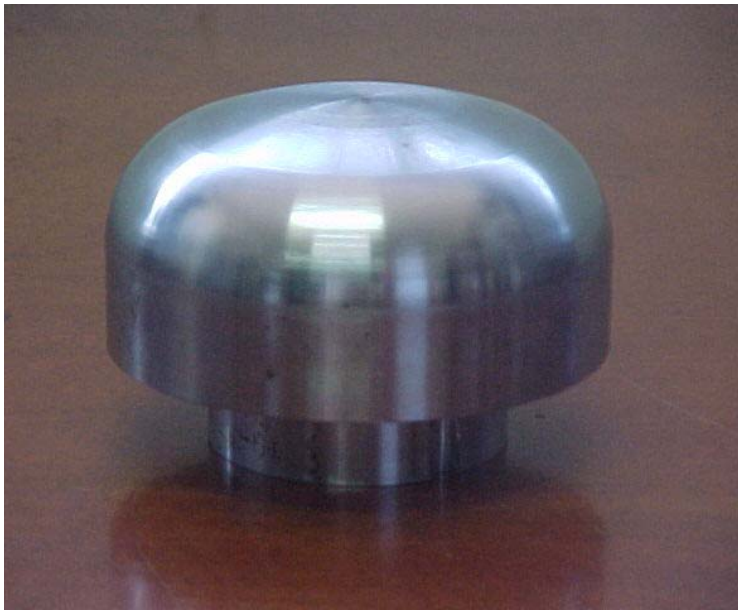

Figura 4.5 – Punção na forma de uma elipse rasa P2.

Figura 4.6 – Punção na forma de uma elipse profunda P4.

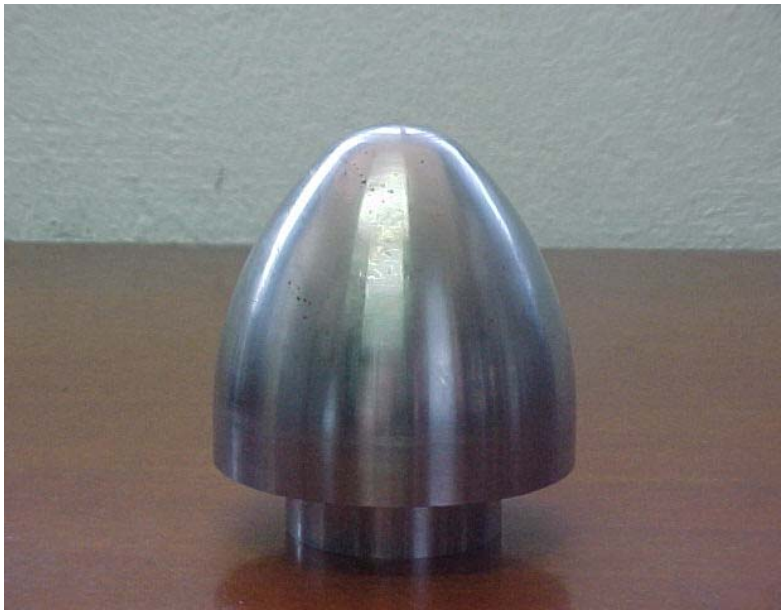

Figura 4.7 – Punção na forma de uma elipse extra profunda P5.

O punção é a parte da ferramenta diretamente responsável pela deformação causada na chapa metálica durante o ensaio, uma vez que atua diretamente (num movimento vertical descendente) sobre a amostra. Desta forma, a realização de sucessivos ensaios, substituindo gradativamente cada modelo de punção, desde o P1 até o P5, tende a promover uma deformação diferenciada no material, não apenas em termos do formato “copo” estampado, mas pela própria distribuição das deformações ao longo do corpo de prova e pelos níveis de estampabilidade atingidos.

4.6.2 Preparação dos corpos de prova

O ensaio Nakajima prevê originalmente um total de dezoito corpos de prova, todos com 200 mm de comprimento, porém, com a largura variando de 40 mm a 200 mm. Esta variação na largura dos corpos de prova é o fator determinante para a simulação dos modos de deformação por estiramento, quando largura da amostra for suficiente para a plena atuação do draw bed (esticador) em todo o contorno do copo estampado, e embutimento profundo, quando a chapa é mais estreita, de forma que uma porção lateral do corpo de prova não fica preso pelo draw bed.

Com base nesta configuração das amostras de ensaio, as chapas foram preparadas para duas baterias de testes, sendo a primeira destinada apenas para o levantamento da Curva Limite de Conformação (CLC) do aço base de estudo, utilizando-se neste caso somente o punção hemisférico P3. Nesta etapa foi prevista a utilização de um agente lubrificante (foi testado o óleo Ratax Butex 250/45, da Fuchs do Brasil e um filme de poliuretano) apenas para os corpos de prova mais largos, onde a redução de atrito entre o punção e a chapa se fez necessária para que se atingir um maior patamar de deformação da CLC na condição de estiramento. Ja a segunda bateria de testes, destinou-se aos ensaios com os demais punções (P1, P2, P4 e P5), com os quais foi avaliada a influência da geometria do ferramental, tomando-se como base comparativa a curva CLC levantada com o punção P3 (que corresponde ao método tradicional utilizado para o levantamento da CLC).

Para o levantamento da CLC, segundo o método tradicional de ensaio (com o punção P3), foram utilizados doze corpos de prova, quantidade esta considerada suficiente para o propósito esperado. Desta forma, as chapas foram cortadas em guilhotina, todas com 200 mm de comprimento e com larguras de 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 125, 150, 175 e 200 mm, respectivamente. A figura 4.8 mostra o desenho destas amostras.

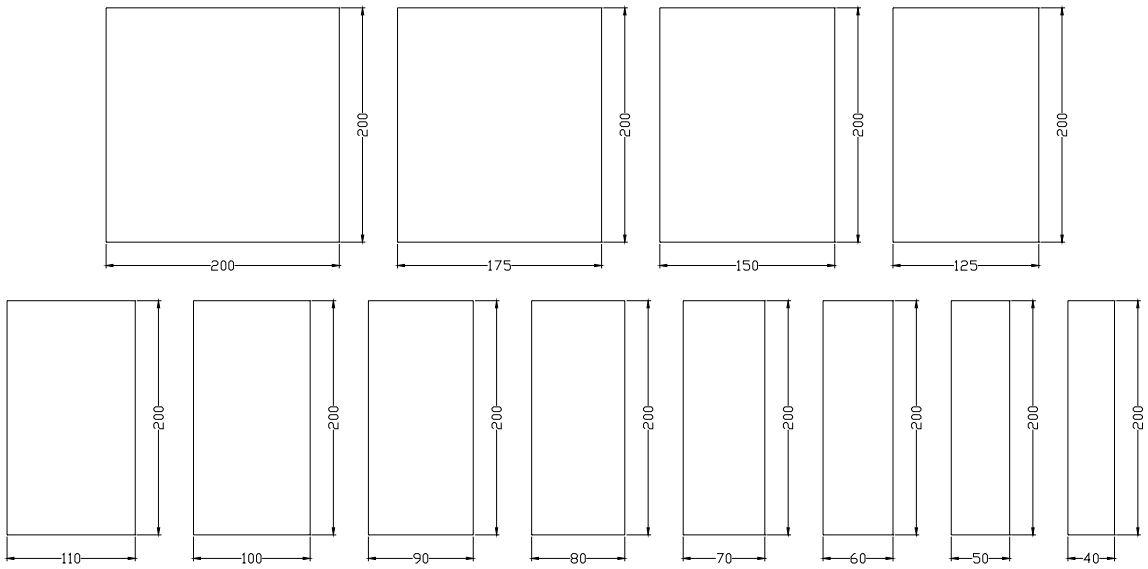

Figura 4.8 – Desenho dos corpos de prova utilizados para o levantamento da CLC do aço DC 06.

Para a segunda bateria de testes, no entanto, foram preparadas apenas duas amostras para cada modelo de punção, uma para simular a condição de estiramento e outra para o embutimento profundo, sendo que ambas as amostras foram confeccionadas com 200 mm de comprimento, porém, com larguras de 125 mm e 200 mm respectivamente. Estes modelos de corpos de prova tomados, foram os mesmos modelos utilizados na primeira bateria de testes, dentre os quais foram especificamente selecionados, porque decidiu-se pela utilização de apenas um corpo de prova para cada modo de deformação, afim de se obter resultados mais simplificados para a análise da influência da geometria do punção na curva CLC. Desta forma, foram preparados, além dos apresentados anteriormente, um total de dez copos de prova, sendo cinco com 200 x 200 mm e cinco com 125 x 200 mm.

Nota-se que foram preparadas duas amostras também para o punção P3, o que não seria necessário, visto que apenas se repetiriam os mesmos ensaios realizados para o levantamento da CLC. Estes testes foram repetidos, no entanto, com o objetivo de prolongar a CLC no sentido do estiramento, a partir da utilização de um filme de poliuretano como lubrificante. Isto porque, de acordo com trabalhos anteriores (Srour 2002), sem lubrificação, o nível máximo atingido para a deformação menor no estiramento seria muito pequeno, não gerando um perfil completo da CLC.

Todos os copos de prova, após o corte em guilhotina, passaram ainda pela impressão da malha de círculos na sua superfície, malha esta destinada à medição da deformação sofrida pelo material após a estampagem. Esta malha foi impressa por um novo processo, até então nunca utilizado e que foi desenvolvido durante a pesquisa. Ao contrário dos processos anteriormente utilizados (marcação eletrolítica, por resina foto-sensível ou a laser) este novo processo de marcação utiliza uma tela (máscara), similar às telas utilizadas em serigrafia (silk screen) com o desenho da malha, sendo mais simples, de fácil aplicação e mais barato, além de não exigir equipamentos durante o processo de pintura.

Desta forma foi preparada uma tinta especial para metais, diluída com solvente e ácido nítrico à 25%, com a qual a malha (composta por círculos tangentes entre si, com 5 mm de diâmetro) 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.

4.6.3 Preparação da prensa de ensaio

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

O ajuste da ferramenta foi necessário para que se regulasse o alinhamento do punção de acordo com a folga existente no diâmetro da base inferior, além da necessidade de se determinar os limites de curso da ferramenta de acordo com a capacidade da máquina. Com a ferramenta em perfeita condição de uso, realizou-se então a montagem e regulagem 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, de forma que a ruptura do corpo de prova não excedesse um patamar que comprometesse os resultados dos ensaios. Em outras palavras, a válvula permitiu que, com a redução da velocidade do punção (para 80 mm/min), os corpos de prova não se partissem por completo, de forma a apresentar uma leve trinca que determinava o final do ensaio.

O manômetro por sua vez fornecia a leitura da carga exigida para a deformação do material (resistência da chapa metálica), o que permitiu durante os testes a percepção prévia do instante de ruptura do material. Isto era percebido quando, durante a estampagem, a carga parava de subir devido ao material sofrer estricção (relaxamento de tensões do material), fenômeno este que ocorre num último instante antes da ruptura. A resistência do material correspondia ao máximo valor da carga indicada no manômetro até a 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 índice de embutimento (IE) atingido. O IE corresponde à altura máxima do copo formado no corpo de prova, medido do instante em que o punção tocou a chapa metálica até o instante de sua ruptura.

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

4.6.4 Ensaios de estampagem

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

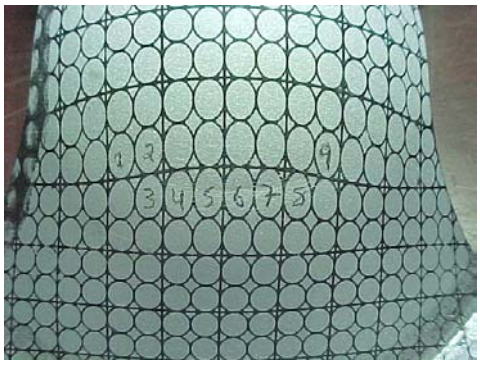

Figura 4.9 - Elipses formadas após a deformação do material.

As figuras 4.10 e 4.11 mostram os corpos de prova ensaiados na primeira e na segunda bateria de testes respectivamente.

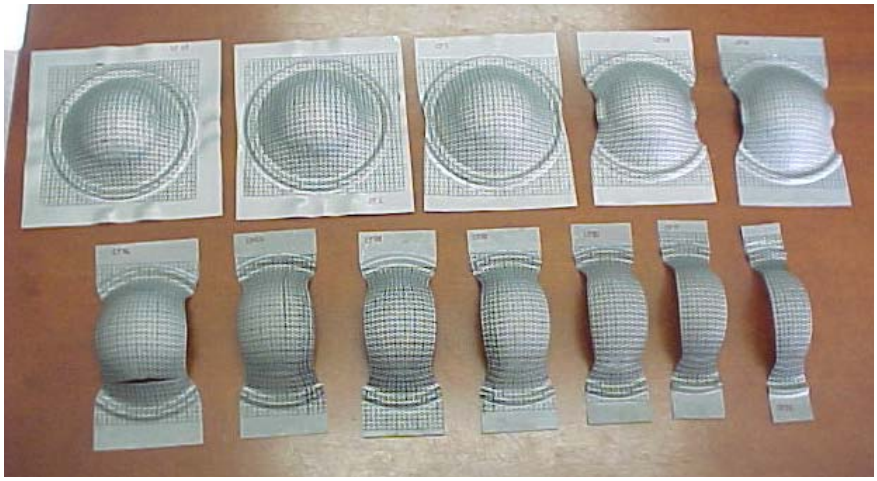

Figura 4.10 – Corpos de prova ensaiados com o punção hemisférico P3 para obtenção da CLC do aço DC 06.

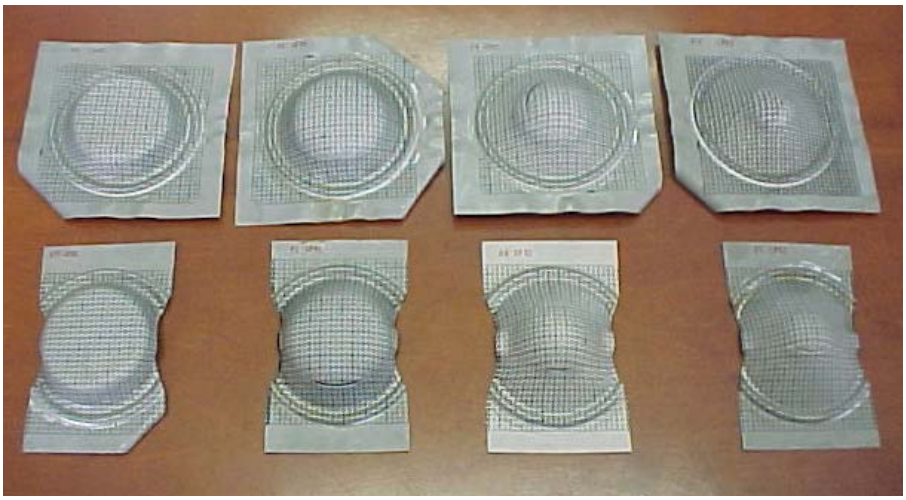

Figura 4.11 – Corpos de prova ensaiados com os punções P1, P2, P4 e P5.

Os círculos, inicialmente com 5 mm de diâmetro, tomaram o formato de elipses após a deformação, sendo que o alongamento da elipse foi maior nos pontos de maior deformação do material.

4.6.5 Medição dos corpos de prova estampados

Após deformados, os corpos de prova foram medidos num projetor de perfil, onde foram tomados os valores do eixo maior e menor das elipses formadas pela deformação do material.

Todo o processo de medição dos corpos de prova dividiu-se em duas etapas, da seguinte maneira:

_ Medição no lado contrário à trinca, na mesma latitude e nas faixas imediatamente superior e inferior à linha fraturada;

_ Medição dos pontos seguindo uma linha reta desde o ombro da matriz até o topo do copo estampado;

A primeira etapa de medição serviu para o levantamento da Curva Limite de Conformação (CLC) do material, a partir dos corpos de prova mostrados na figura 4.14, e para avaliação do efeito das diferentes geometrias da ferramenta, neste caso quando comparadas as medições dos corpos de prova da figura 4.15 à CLC obtida.

Já a segunda etapa de medições visou a análise do perfil de distribuição das deformações do material, desde o ombro da matriz até o centro do punção. Isto com o propósito de se verificar em que ponto do perfil do punção concentraram-se os maiores níveis de deformação, ou seja, se trinca do material foi ocasionada principalmente pelo raio da cabeça do punção (R1) ou pelo raio de concordância (R2).

A partir dos valores do eixo maior e menor de cada elipse medida, foram então calculadas as deformações convencionais maior e menor, e_1 e e_2 respectivamente, de acordo com as equações vistas no capítulo 3. Com os valores das deformações de engenharia, calculamos os valores das deformações verdadeiras ε_1 e ε_2 .

Finalmente, para investigação da redução de espessura ocasionada na chapa estampada, os corpos de prova ensaiados anteriormente foram cortados em pontos estratégicos, como mostra a figura 4.12, de forma que a linha de corte passasse próxima à elipse selecionada para medição da espessura final (figura 4.13). Desta forma, foram secionadas três elipses, uma que sofreu estiramento, outra embutimento profundo e uma terceira no estado plano de deformações, para cada um dos cinco modelos de punções utilizados.

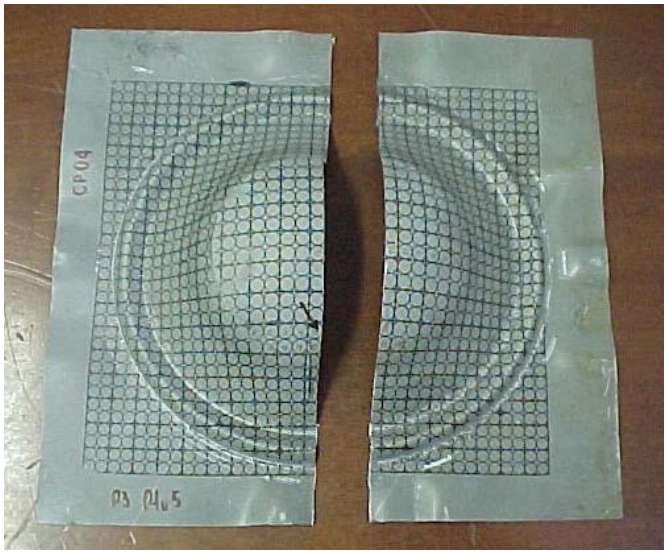

Figura 4.12 – Corpo de prova cortado para medição da redução de espessura.

Figura 4.13 – Linha de corte tangente á elipse indicada para medição.

Como resultado foi possível a verificação do afinamento da chapa (redução de espessura) provocado pelos punções P1, P2, P3, P4 e P5 nos modos de deformação por estiramento, embutimento profundo e no estado plano de deformações.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Ensaios metalográficos

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

As figuras 5.1 e 5.2 apresentadas a seguir, mostram as fotos da secção longitudinal da chapa submetida ao ensaio metalográfico com aumento de 200X e 500X respectivamente.

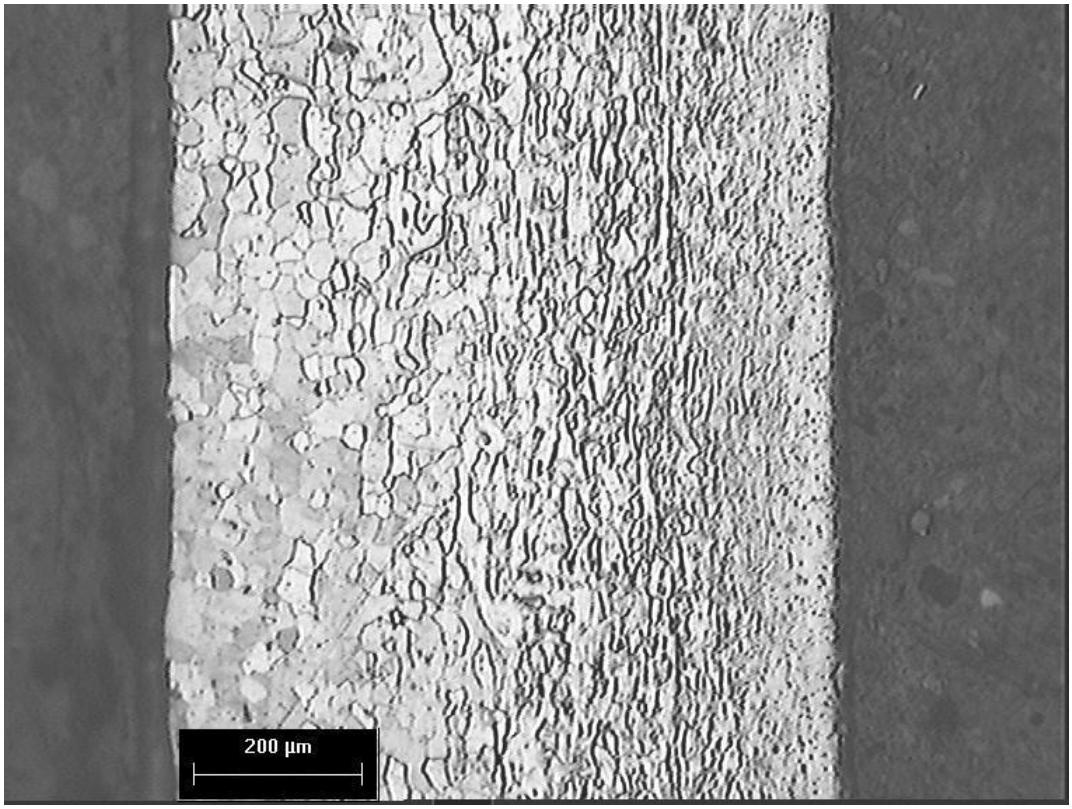

Figura 5.1 – Metalografia da secção longitudinal da chapa.

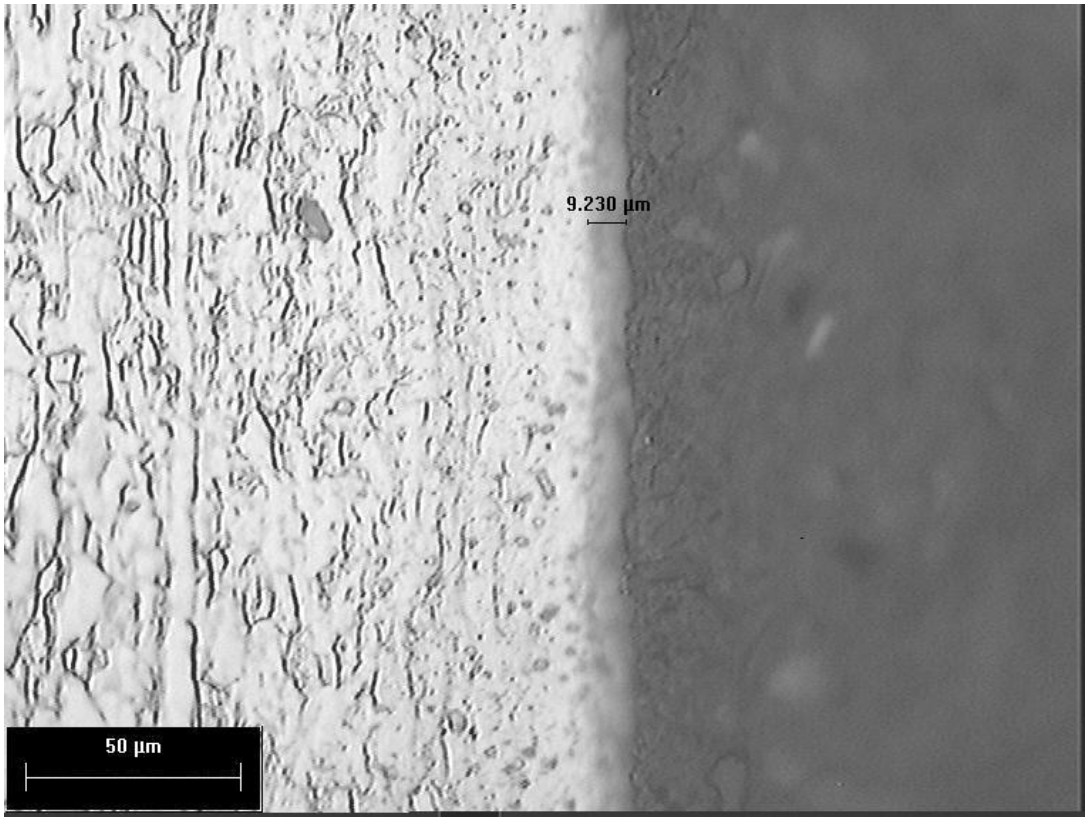

Figura 5.2 – Metalografia da secção longitudinal da chapa mostrando a espessura do revestimento.

As fotos mostradas nas figuras 5.1 e 5.2 mostram claramente um alongamento dos grãos do material na direção da seta vertical colocadas ao lado da primeira foto. Isto caracteriza o material estudado como sendo laminado a frio, uma vez que os grãos permaneceram alongados após o encruamento, sem sofrer um processo de recristalização, muito comum no processo de laminação a quente.

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, 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 se deu por meio de ensaios de tração.

Os ensaios metalográficos permitiram ainda uma análise prévia relativa ao percentual de carbono do material, o que influencia diretamente nas suas propriedades mecânicas e características de estampabilidade. Neste caso, nota-se pelas fotos que se trata de um aço com predominância da matriz ferrítica (parte

clara) e pouca quantidade de cementita precipitada (Fe_3C), que são características típicas de uma chapa com baixo percentual de carbono.

Os testes metalográficos comprovam as condições de laminação a frio e baixo teor de carbono previstos pela norma DIN 10152, que descreve as características de fabricação do aço DC 06 ZE, alvo de estudo nesta dissertação. Nota-se ainda na figura 6.2 a medida de 9,230 μm para a espessura do revestimento de zinco da chapa metálica, característica que comprova o processo de zincagem como sendo eletrolítico, também previsto pela norma DIN 10152.

5.2 Análise química

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

A tabela 5.1 mostra 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, ao passo que a tabela 5.2 apresenta o resultado do ensaio de análise química realizado em uma amostra do material utilizado neste trabalho.

Material	Composição Química (partes da massa em %, máx.)				
	C	P	S	Mn	Ti
DC 06+ZE	0,02	0,020	0,020	0,25	0,3

Tabela 5.1 – Composição química máxima em % segundo a norma DIN 10152.

Material	Composição química (partes da massa em %)															
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Al	Cu	Ti	V	Nb	Sn	B	Pb
DC 06+ZE	0,01	0,01	0,12	0,015	0,008	0,011	0,009	0,001	0,035	0,008	0,062	0,001	0,003	0,000	0,0002	0,0008

Tabela 5.2 – Composição química em % resultante da 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 do titânio como elemento 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 do titânico como elemento de liga. 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.

5.3 Ensaios de tração

Os ensaios de tração, realizados com os corpos de prova retirados formando ângulos de 0º, 45º e 90º 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 (Al). Estas propriedades caracterizam o material quanto aos seus valores limite em termos de resistência, ou seja, a máxima tensão atingida ao longo de todo o ensaio (LR), a tensão máxima atingida ao final da deformação elástica e conseqüente início de deformação plástica (LE) e finalmente o alongamento máximo (Al) do material até o instante da fratura.

Outros dados colhidos 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, sendo o coeficiente de encruamento (n) diretamente associado ao modo de conformação por estiramento e o fator de anisotropia (R) ligado ao modo de conformação por embutimento profundo.

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 vs. Deformação da chapa metálica. Todos os dados obtidos nos ensaios estão no anexo A, que traz os relatórios impressos.

A tabela 5.3 mostra os resultados referentes às propriedades mecânicas do material obtidas nos ensaios em comparação aos valores determinados pela norma técnica do aço DC 06.

Material : DC 06		
Média dos ensaios de tração	**LR (MPa)**	300,5
	LE (MPa)	169,9
	Al (%)	49,6
Norma DIN 10152	**LR (MPa)**	270 - 350
	LE (MPa)	máx. 190
	Al (%)	min. 37

Tabela 5.3 – Comparativo das propriedades LR, LE e A.

Os resultados apresentados na tabela 5.3 mostraram que tanto os valores do LR quanto do LE e do Al, obtidos pelos ensaios de tração, se enquadram 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 subseqüentes está perfeitamente liberada, sem 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 5.4. 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 5.4 apresenta, além dos valores médios de R e n para as direções de 0º, 45º e 90º, o valor da anisotropia normal ($\bar{R}$) e da anisotropia planar (ΔR).

Material: DC 06	
Parâmetros	**Média dos Ensaios**
R0	2,0483
R45	1,8659
R90	2,5988
$\bar{R}$	2,0948
ΔR	0,4576
n0	0,2392
n45	0,2352
n90	0,2323

Tabela 5.4 – Parâmetros de estampagem R e n.

Os ensaios de tração realizados permitiram não apenas uma confirmação das características de estampabilidade e resistência mecânica, previstos anteriormente para o material através dos ensaios metalográfico e de análise química, mas também uma análise direta das reais condições de estampagem do aço.

Os resultados da tabela 5.4 mostraram que o aço DC 06 é realmente 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 R = 0,4576 ficou extremamente alto, descrepante 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. Um fato importante de ser observado é a grande variação dos resultados do fator R para cada uma das três direções (0º, 45º e 90º) de corpos de prova ensaiados, representados por R0, R45 e R90 respectivamente. Neste caso, o maior valor de R foi atingido para a direção de 90º, em torno de 2,6, 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 0º e 45º, os valores de R se apresentaram na faixa de 2,0 e 1,9 respectivamente. Estes valores se encontram dentro de uma faixa para a qual típica para materiais com boa conformabilidade, apesar de serem inferiores aos valores atingidos para a direção de 90º.

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 R0, R45 e R90 nos ensaios de tração, visto que este alongamento preferencial dos grãos em uma direção acarretaria numa característica anisotrópica da chapa, influenciando desta forma 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 R0, R45 e R90 ($R0 \neq R45 \neq R90$). 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, como mostra a figura 5.3, que nada mais é do que uma ondulação ocasionada na superfície livre da chapa, posição esta que não sofre a ação do prensa-chapa durante o processo de estampagem do material. A tendência do material sofrer o orelhamento é quantificado pelo ΔR, apresentado na tabela 5.4 com valor de 0,4576 para o DC 06. Quanto maior o valor do ΔR 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. Já o valor obtido para o DC 06, indica que este aço certamente apresentará um nível de orelhamento.

Figura 5.3 – Enrugamento ocorrido na região fora do prensa chapa.

Além da anisotropia planar, o DC 06 apresentou ainda anisotropia normal, apresentado na tabela 5.4 pelo parâmetro $\bar{R}$. O valor obtido para o $\bar{R}$ foi de 2,0978, o que faz com que este material sofra 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) atribuem 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 0,23 para cada uma das três direções em que o material foi ensaiado,, representados por n0, n45 e n90 para os ângulos de 0º, 45º e 90º 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, porém o fator R determinando a estampabilidade para o modo de deformação por embutimento profundo e o expoente n para o modo de deformação por estiramento. 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 a 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 num 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 5.4 mostra a curva Tensão vs. Deformação para cada um dos 9 corpos de prova ensaiados (três para cada ângulo em relação a direção de laminação do material). As curvas mostram a deformação do material até um

percentual de 18%, quando os ensaios forma interrompidos para medição dos corpos de prova.

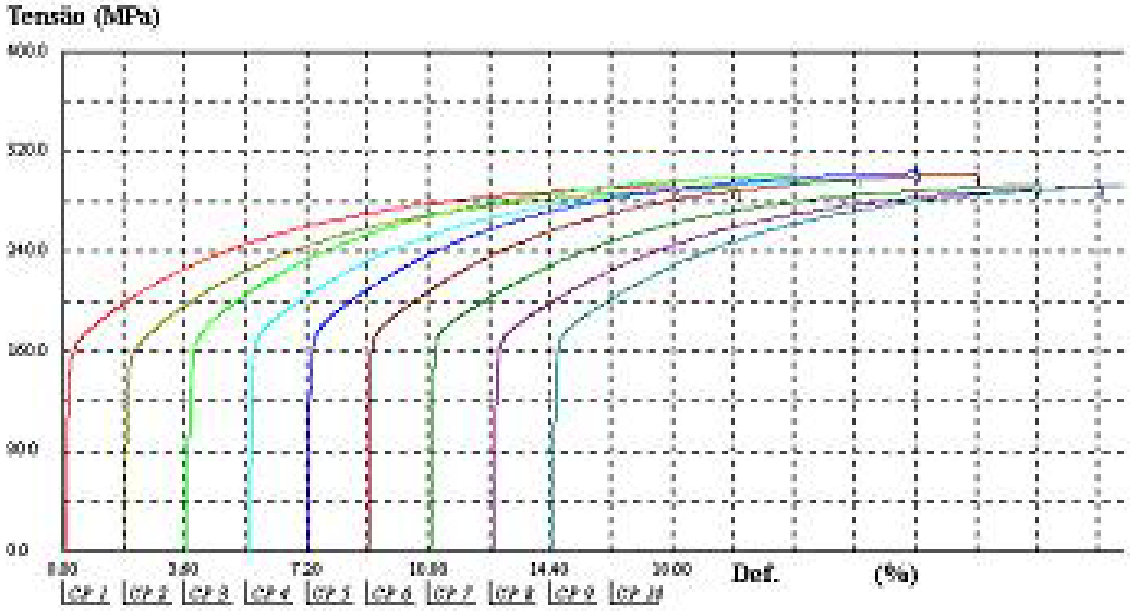

Figura 5.4 – Gráfico Tesão vs. Deformação.

As curvas se mostraram idênticas em todos os ensaios, o que comprova a boa repetibilidade dos ensaios. 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, 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 provoca uma conseqüente elevação na posição do ponto de escoamento na curva.

5.4 Ensaios Nakazima com punção hemisférico

Os ensaios de embutimento Nakazima, nesta etapa realizados segundo o método tradicional proposto pelo autor, tiveram dois focos importantes no estudo. O primeiro visando finalizar a caracterização do aço DC 06, material de estudo nesta pesquisa, e o segundo com o objetivo de gerar uma base comparativa para os testes subseqüentes, ou seja, os resultados dos ensaios Nakazima com diferentes

geometrias de punções foram comparados aos resultados dos ensaios pelo método tradicional para verificação dos efeitos produzidos pelo formato diferenciado dos punções.

O ensaio originalmente proposto por Nakazima utiliza um único formato de punção, hemisférico com 100 mm de diâmetro, e um total de 18 corpos de prova com a largura variando desde 40 até 200 mm, todos com 200 mm de comprimento. A partir desta configuração de ensaio, tomando-se, porém, um número reduzido de corpos de prova (ver item 4.6.2, do procedimento experimental), foi obtida a curva limite de conformação (CLC) do DC 06 para duas condições específicas de ensaio, inicialmente sem lubrificação, simulando a condição mais crítica de ensaio, como mostra a figura 5.5 e, posteriormente, utilizando-se um filme de poliuretano apenas para o corpo de prova de 200 x 200 mm, que simula a condição de estiramento. O aumento dedeformação provocado pelo filme de poliuretano utilizado, pode ser visto na figura 5.6.

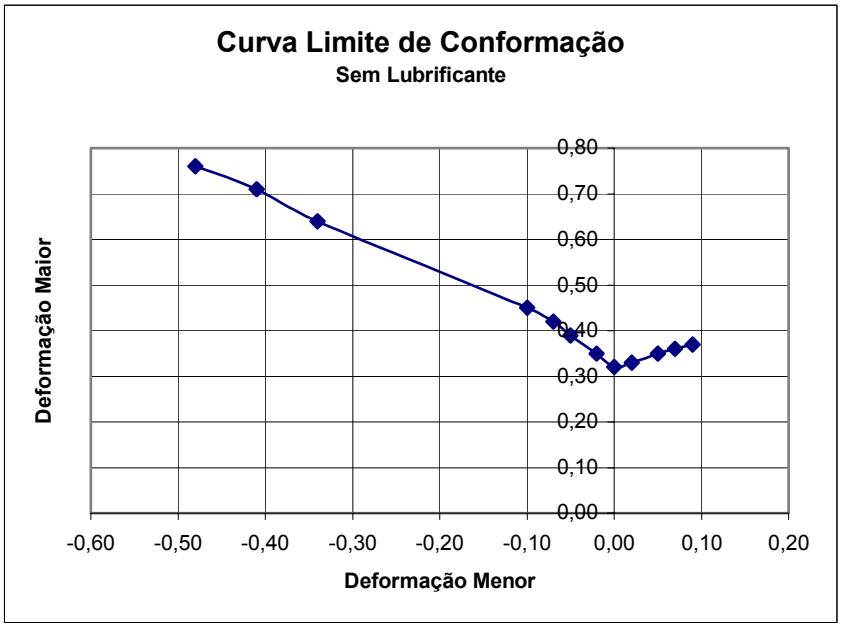

Figura 5.5 – Curva limite de conformação sem lubrificante.

Os ensaios realizados sem lubrificante apresentaram uma CLC com um alto nível de deformação para a condição de embutimento profundo, lado esquerdo da curva, onde a deformação menor (ε_2) chegou a 0,48. Em contrapartida, para o lado direito da curva, que representa a condição de estiramento, o nível máximo de

deformação atingido ε_2 não foi tão elevado, sendo inferior a 0,1. Este fato apontou uma dificuldade característica deste tipo de ensaio em se atingir um perfil completo da CLC para o estiramento, chegando a pequenos níveis de deformação ε_2 .

A explicação para esta diferença nos níveis de deformações atingidas para o embutimento profundo e para o estiramento se encontra na variação da largura dos corpos de prova. Como o embutimento profundo é um modo de deformação que permite certo escorregamento da chapa durante o embutimento, à medida que se reduzia a largura dos corpos de prova se diminuía conseqüentemente a ação do "draw bed", que prende o material circunferencialmente em torno do punção, afim de impedir o escorregamento da chapa. Desta forma, uma porção lateral dos copos de prova mais estreitos que o diâmetro do "draw bed" oferecia certa liberdade para o material se deformar, 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. Isto ocasionou 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 obtenção de todo o perfil da CLC para o embutimento profundo.

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 125 mm, o "draw bed" já atuava em todo o contorno do copo formado no embutimento, o que mantinha a chapa presa em todos os sentidos de deformação, gerando em estado biaxial de tensão. Nestas condições, a malha impressa no material gerou elipses alongadas em ambos os eixos, 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, se concentrou 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.

Sendo assim, uma possível solução para se obter um maior perfil da CLC no estiramento, seria a utilização de um lubrificante para melhorar a estampagem que, teoricamente diminuiria o atrito entre o punção e a chapa, aumentando a conformabilidade do material e, conseqüentemente, as deformações ε_1 e ε_2 que geram a CLC. Com base neste conceito foram realizados novos ensaios, apenas com o corpo de prova com 200 x 200 mm (que simula o modo de deformação por estiramento), aplicando-se vários óleos lubrificantes utilizados pela indústria automotiva na estampagem de peças da carroceria dos automóveis. Estes óleos não apresentaram resultados satisfatórios nos ensaios, ou seja, não conseguiram reduzir o atrito entre o punção e a chapa a ponto de gerar um maior perfil da CLC no estiramento. A solução encontrada foi a utilização de um filme de poliuretano que, aplicado entre a ferramenta e a amostra, gerou uma maior deformação da chapa pricipalmente na cabeça do punção, gerando pontos com uma deformação ε_2 superior ao nível máximo atingido nos ensaios anteriores. A figura 5.6 mostra a CLC do aço DC 06 obtida sem lubrificante e, sobrepostos a curva, os pontos de maior deformação obtidos nos ensaios com o filme de poliuretano aplicado a amostra de 200 x 200mm.

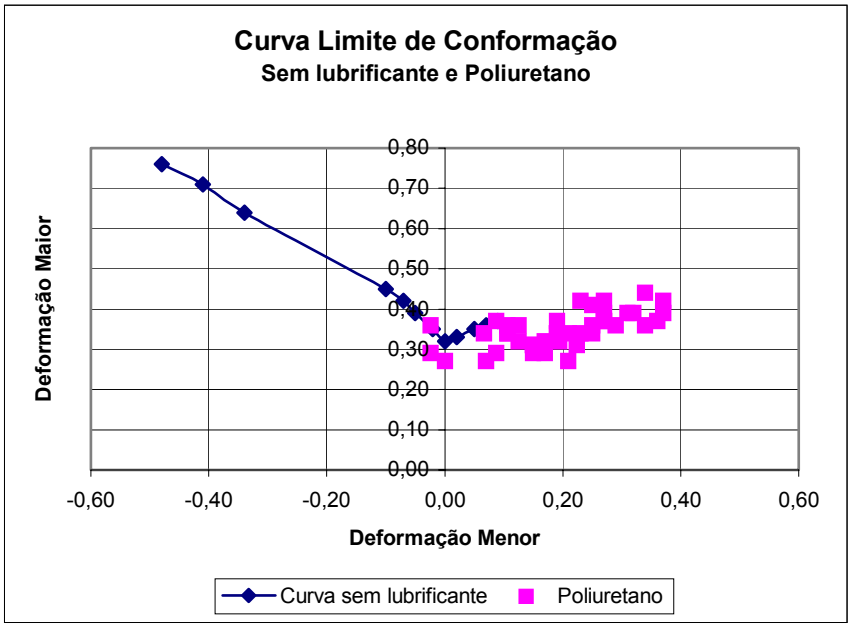

Figura 5.6 – Pontos de máxima deformação atingidos com o filme de poliuretano.

Pelos pontos mostrados na figura 5.6, que representam a máxima deformação atingida com o filme de poliuretano, nota-se que este agente lubrificante conseguiu gerar pontos com uma maior deformação ε_2, com valores próximos a 0,40, ao passo que, sem lubrificante este nível não chegou a 0,10 de deformação para o eixo menor ε_2. Estes resultados mostram o ganho real obtido em termos de estampabilidade do material com este lubrificante.

Juntando os pontos de maior deformação obtidos para cada uma destas condições de ensaio (sem lubrificação e com o poliuretano), levantou-se uma curva limite de conformação com um perfil bem desenvolvido tanto para o embutimento profundo quanto para o estiramento, como mostra a figura 5.7.

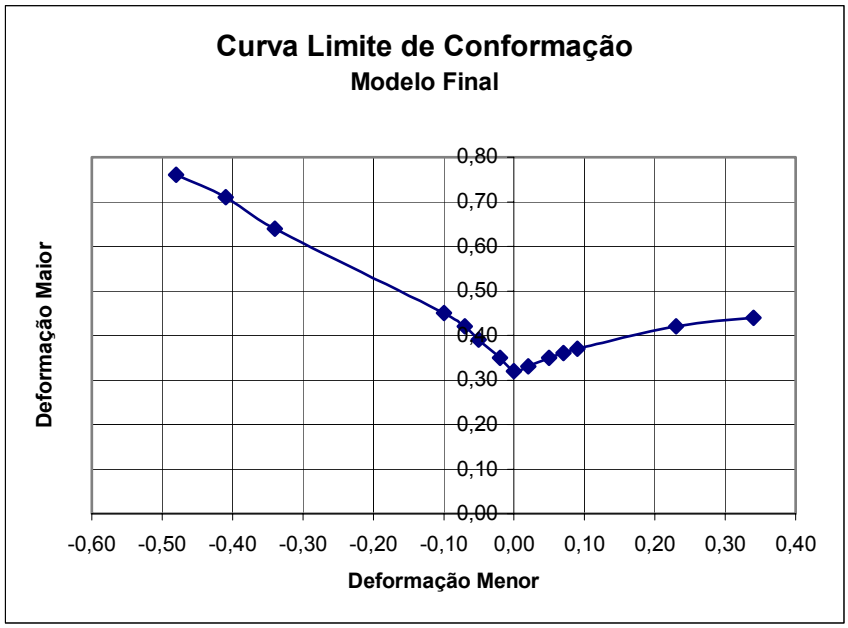

Figura 5.7 – Modelo final curva limite de conformação do aço DC 06.

Pela comparação dos resultados mostrados na figura 5.7, notou-se que a utilização do lubrificante realmente aumentou o perfil da CLC gerada para o estiramento, uma vez que, com lubrificante atingiu-se uma deformação de aproximadamente 0,35 para ε_2, enquanto que sem o filme lubrificante este valor limitou-se a aproximadamente 0,9. Apesar da melhora na deformação máxima de ε_2 no estiramento, a curva manteve o perfil normal esperado, de acordo com a curva sem lubrificante gerada no estiramento, ou seja, pela figura 5.6, nota-se os pontos obtidos com o poliuratano, que se posicionaram próximos ao estado plano de

deformações até o final da curva sem lubrificação, não geraram uma maior deformação ε_1 (os pontos de máxima ficaram sobrepostos a curva sem lubrificante), de forma que o que se conseguiu foi apenas aumentar o perfil da curva para um maior nível de deformação ε_2, seguindo a mesma curvatura da CLC sem lubrificante. Com base nestes resultados, pode-se dizer que o lubrificante gerou uma distribuição mais uniforme das deformações no plano da chapa, atingindo, conseqüentemente, maiores níveis deformações para o estiramento.

Procurou-se desenvolver ao máximo, e de forma bastante minuciosa, todo o perfil da curva limite de conformação mostrada na figura 5.7, por ser ela o padrão de comparação para avaliação dos demais perfis de punções utilizados neste trabalho. Todos os resultados obtidos, para cada um dos diferentes formatos de punções utilizados nos ensaios subseqüentes, foram comparados a esta curva (figura 5.7), que foi levantada com o punção hemisférico originalmente proposto pelo autor, motivo pelo qual foi utilizado o filme lubrificante para se chegar a este resultado. Os demais testes, variando-se a geometria do ferramental, foram realizados sem qualquer agente lubrificante, que simula a condição mais crítica de ensaio, e os resultados comparados a CLC mostrada na figura 5.7.

5.5 Ensaios Nakazima com punções de geometria variada

Nos ensaios Nakajima com punções de geometria variada foi utilizado o mesmo procedimento dos testes pelo método tradicional, sendo que a única variável em relação aos ensaios anteriores foi a geometria dos punções utilizados. Neste caso foram utilizados quatro novas geometrias de punções, sendo o primeiro com um formato cilíndrico (P1) e o segundo com a forma de uma elipse rasa (P2). O modelo tradicional de ensaio, com formato hemisférico, foi considerado como sendo o terceiro modelo (P3), o quarto modelo possuía a forma de uma elipse profunda (P4) e o quinto e último punção utilizado tinha a forma de uma elipse extra profunda (P5), vide figuras 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8.

Foram utilizados nesta etapa do trabalho apenas corpos de prova com 125 mm e 200 mm de largura, ambos com 200 mm de comprimento, uma vez que se procurou minimizar o número de ensaios para cada um dos modelos de punções

utilizados. Desta forma, os corpos de prova com as medidas descritas anteriormente foram os que apresentaram pontos na CLC próximos do estado plano de deformações (acima do eixo Y do gráfico), como mostra a figura 5.8 para a condição sem lubrificação.

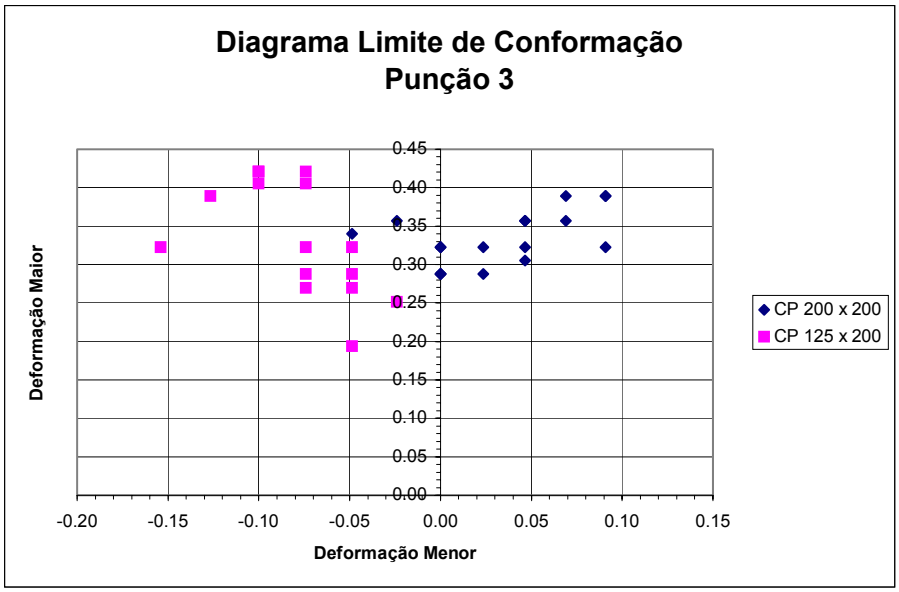

Figura 5.8 – Distribuição dos pontos para o punção hemisférico (P3).

Pela distribuição dos pontos mostrados no gráfico da figura 5.8, nota-se que para os corpos de prova com 125 e 200 mm de largura os pontos se distribuíram desde o eixo Y até a condição de embutimento profundo (lado esquerdo) e estiramento (lado direito) respectivamente, de forma que a utilização de apenas estes modelos de corpos de prova fora suficiente para uma análise comparativa do efeito causado pelas geometrias dos punções, com relação a CLC obtida a partir do punção hemisférico.

Desta forma foram ensaiados estes dois modelos de corpos de prova para cada um dos quatro novos modelos de punções (P1, P2, P4 e P5). Os pontos obtidos nos ensaios realizados foram comparados a curva CLC obtida pelos testes realizados anteriormente, com o punção hemisférico, segundo o método tradicional de ensaio segundo Nakajima. A figura 5.9 mostra a comparação do resultado dos ensaios com o punção cilíndrico, realizados sem lubrificação.

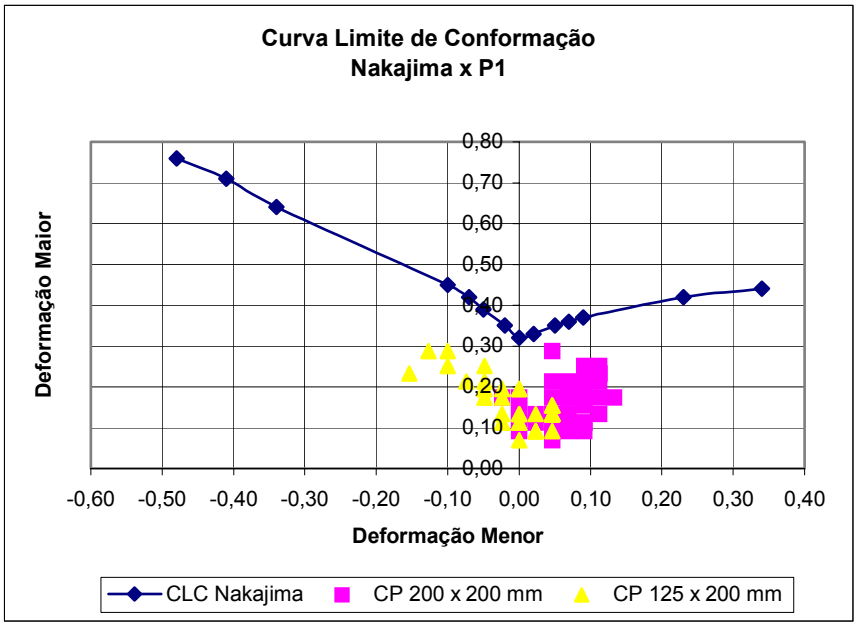

Figura 5.9 – Comparação entre a CLC segundo Nakajima e o punção cilíndrico (P1).

Pelos resultados mostrados na figura 5.9, nota-se que os pontos de máxima deformação, levantados para os corpos de prova de 125 mm e 200 mm com o punção cilíndrico (P1), ficaram abaixo da CLC azul, obtidos segundo o método Nakajima original, com o punção hemisférico (P3). A diferença entre os pontos de máxima e a curva chegou a 0,12 no estado plano de deformações, uma vez que com o punção cilíndrico atingiu-se um índice máximo de aproximadamente 0,20, ao passo que a curva com punção hemisférico chegou a um valor de 0,32 para a deformação maior ε_1.

Pela dispersão dos pontos coloridos, que definem as duas geometrias de corpos de prova utilizados (rosa para o corpo de prova de 200 x 200 mm, e amarelo para o corpo de prova de 125 x 200 mm), nota-se que os corpos de prova tenderam a apresentar os mesmos modos de deformação que apresentaram para o punção hemisférico, naquele caso o CP com 125 mm de largura ocasionou preferencialmente a condição de embutimento profundo e o CP com 200 mm de largura propiciou o modo de deformação por estiramento.

Desta forma pode-se afirmar que esta primeira geometria de punção (P1) praticamente não influenciou o modo de deformação correspondente a cada um dos corpos de prova ensaiados, ou seja, o CP com 125 mm de largura manteve a grande

maioria de seus pontos na condição de embutimento profundo enquanto que o CP de 200 mm de largura concentrou seus pontos na condição de estiramento. Este fato mostra que o punção com um formato cilíndrico tende a influenciar principalmente o índice de estampabilidade do material, determinado pela altura da CLC, ao passo que o modo de deformação permanece definido preferencialmente pela geometria do corpo de prova.

A redução na altura da curva limite de conformação do material, para um nível mais baixo de deformação gerado com o punção cilíndrico, deveu-se principalmente a tensão de tração superficial gerada na chapa durante o embutimento. Como o material tem uma tendência natural a se romper sempre na altura do raio do punção, por ser esta a região de maior concentração de tensões trativas no embutimento, pode-se atribuir o menor índice de embutimento atingido com o punção cilíndrico a uma maior concentração de tenções no raio do punção. Esta concentração de tensões no raio do punção deveu-se ao fato do punção cilíndrico apresentar um raio muito pequeno, o que gerou uma menor área de contato entre ele e a chapa. Com esta menor área para distribuição da força aplicada sobre o material, o resultado foi uma deformação demasiada nesta região sem distribuí-la para as porções vizinhas do embutimento. Esta condição foi evidenciada devido ao fato da chapa praticamente não se deformar na região da cabeça do punção durante o ensaio, o que comprova que os esforços aplicados sobre o material durante a sua deformação se concentraram principalmente na área do raio do punção sem se distribuir às demais porções da amostra embutida.

O mesmo procedimento de ensaio utilizado para o punção cilíndrico foi repetido para o punção com o formato de uma elipse rasa (P2), onde foram ensaiados corpos de prova com 125 e 200 mm de largura e os resultados comparados a CLC levantada com o punção hemisférico (P3), tomado como base de comparação nos estudos. A figura 5.10 mostra o resultado desta comparação.

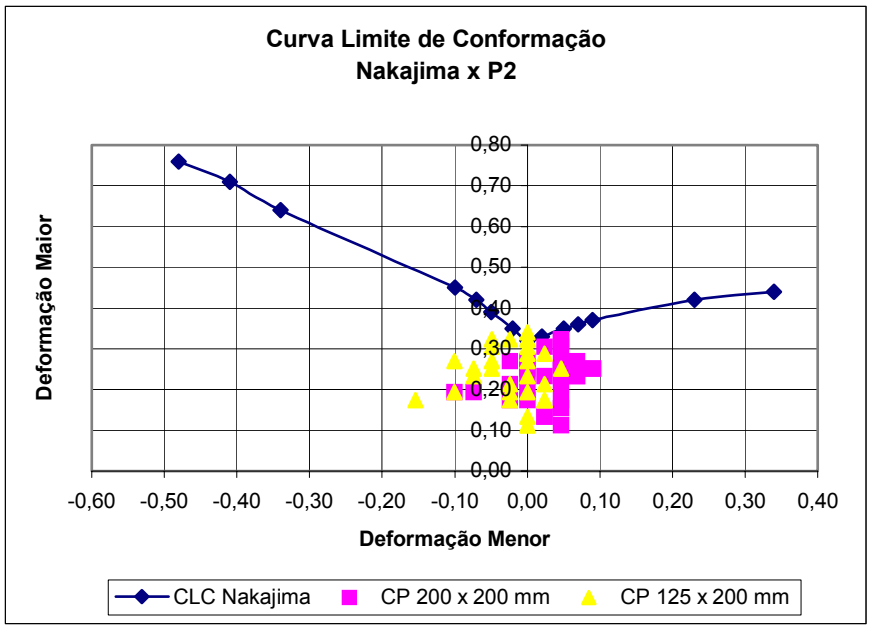

Figura 5.10 – Comparação entre a CLC segundo Nakajima e o punção na forma de uma elipse rasa (P2).

O segundo modelo de punção, na forma de uma elipse rasa (P2), corresponde a um modelo intermediário entre o formato cilíndrico (P1) e o formato hemisférico (P3). Se analisado geometricamente, este modelo de punção possui um o raio de concordância entre a cabeça do punção e porção retilínea da ferramenta, maior do que o punção cilíndrico, como mostra a figura 4.4.

Pela análise do gráfico mostrado na figura 5.10, pode-se notar uma grande aproximação entre os pontos de máxima de deformação obtidos com punção P2 e a curva limite de conformação resultante dos ensaios com o punção hemisférico. Esta aproximação ocorre para o estado plano de deformações, condição esta em que a deformação menor ε_2 no plano da chapa é zero, o que implica dizer que a deformação do material ocorre somente em relação ao eixo maior (ε_1), no plano da chapa, e em relação a redução da sua espessura (afinamento do material). A concentração dos pontos sobre o eixo Y do gráfico (estado plano de deformação) ocorreu para os dois modelos de corpos de prova, com 125 e 200 mm de largura, de forma que ambos tiveram seus pontos tendendo a esta condição. Assim sendo, pode-se dizer que este modelo de punção por sua vez, reduz o efeito provocado pela geometria do corpo de prova em distribuir os pontos para as condições de

estiramento e embutimento profundo, aproximando-os do estado plano de deformações.

Uma constatação importante, porém, foi o fato de que os pontos de máxima deformação praticamente coincidiram com a CLC obtida pelo método Nakajima (curva azul do gráfico), de forma que a diferença foi de apenas 0,02 para a deformação maior ε_1. Este fato mostra que, à medida que se aumenta o raio de curvatura do punção, há um tendência lógica do limite de conformabilidade do material também aumentar. Este aumento da conformabilidade da chapa deve-se única e exclusivamente à variação do formato da ferramenta que promoveu a estampagem, sendo esta a única variável de ensaio. Dentro desta condição, o que afeta diretamente o ensaio é a maneira como a carga aplicada pelo punção se distribui sobre o material, uma vez que a resistência mecânica do aço em teste também é constante. Assim sendo, quanto mais concentrada a força de estampagem em um espaço menor sobre a superfície do material, maior será a tensão gerada nesta região e, consequentemente, menor será sua deformação até a ruptura.

O estado plano de deformações é o ponto mais baixo da curva limite de conformação do material, ou seja, é o modo de deformação para qual se tem o menor limite de conformabilidade da chapa. À medida que a curva se estende para o modo de deformação por estiramento ou embutimento profundo, este limite de conformação aumenta quanto maior for o afastamento do estado plano de deformações. Como o material não se deforma no sentido do eixo menor ε_2, todo o esforço aplicado se distribui apenas em função do eixo ε_1 e da espessura da chapa, ao passo que, quanto maior a deformação ε_2 (maior o afastamento do estado plano para o estiramento ou para o embutimento), este esforço se distribui ao longo de mais uma direção, reduzindo assim a resistência (reação do material contrária ao esforço aplicado) do material no sentido de ε_1, o que permite que o mesmo se deforme melhor neste sentido (CLC mais elevada).

Com base nesta discussão, pode-se dizer que o punção P2 ainda não gera uma condição de deformação tão uniforme quanto o punção hemisférico, porque apesar de atingir o mesmo limite de conformabilidade no estado plano, a sua geometria ainda permite que o material atinja o mesmo nível de conformabilidade

para o estiramento e para o embutimento por ainda haver uma concentração de tensão na altura do raio do punção, onde ocorrem as maiores deformações na amostra, e uma menor deformação na porção correspondente à cabeça do punção.

Para uma observação em termos da variação geométrica do punção, desde o formato cilíndrico (P1), passando pelo formato de uma elipse rasa (P2) até o modelo hemisférico (P3), nota-se claramente uma melhora da conformabilidade do matrial em virtude da variação da área de contato do punção e da chapa. Desta forma, à medida que se aumenta o raio do punção tendendo a uma aproximação do formato hemisférico, maior e mais uniforme será a área na qual a força se distribui sobre o material, implicando em melhores condições de estampagem da chapa.

Um outro caminho para a análise da influência da geometria dos punções de embutimento, foi aumentar ainda mais o raio lateral do punção, diminuindo porém o raio da cabeça do mesmo. A partir disto foram novamente testadas as amostras de 125 e 200 mm de largura para os punções P4 e P5, com a forma de uma elipse profunda e de uma elipse extra profunda respectivamente. A figura 5.11 mostra o resultado da comparação entre a curva limite de conformação segundo Nakajima (obtida com o punção P3) e os pontos de deformação medidos na amostra embutida com o punção P4.

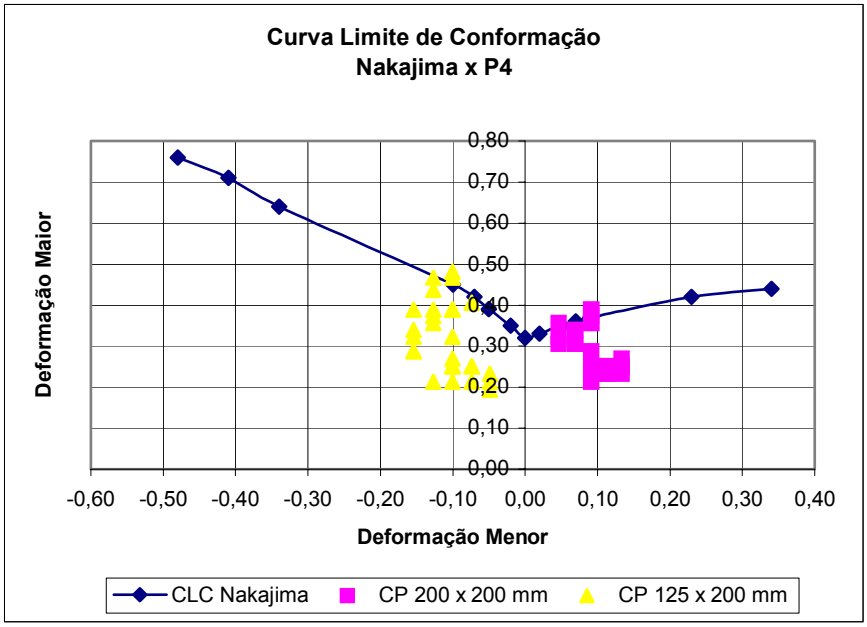

Figura 5.11 – Comparação entre a CLC segundo Nakajima e o punção na forma de uma elipse profunda (P4).

Esta nova variação da geometria da ferramenta, partindo agora para um raio externo maior e um menor raio para a cabeça do punção, provocou uma mudança na região do corpo de prova onde se concentravam os esforços aplicados, local este onde ocorria a fratura do material como conseqüência direta deste efeito. No caso do punção P4, com a forma de uma elipse profunda, esta região de maior deformação passou a ser a porção correspondente à cabeça do punção, e não mais a área referente ao raio externo do punção, onde ocorria a ruptura para as geometrias anteriormente ensaiadas, P1 e P2.

A partir desta observação, nota-se claramente o efeito provocado pelos raios de concordância da geometria de cada punção, ou seja, a maior concentração de tensões no material sempre ocorre na região referente ao menor raio do punção que causa a estampagem, seja ele no contorno externo ou na cabeça da ferramenta.

Pelos pontos de deformação medidos nas amostras ensaiadas com o punção P4, mostrados na figura 5.11, duas características principais ficam evidentes: a primeira com relação aos pontos de máxima deformação, que atingiram o mesmo limite de conformabilidade da CLC segundo o método Nakajima (curva azul), e uma segunda característica devido ao aspecto como se dispersaram os pontos, totalmente afastados do estado plano de deformações, definindo claramente os modos de deformação por embutimento profundo e estiramento para os corpos de prova com 125 e 200 mm de largura respectivamente.

O punção P4, do mesmo modo que o modelo P2, atingiu um limite de conformabilidade praticamente idêntico a CLC obtida com o punção hemisférico (P3), uma vez que os pontos de maior deformação ficaram em sua grande maioria sobrepostos ou muito próximos da curva azul. Desta forma, pode-se dizer que esta geometria de ferramenta, na forma de uma elipse profunda, não afetou o nível de embutibilidade do material, mantendo os pontos de maior deformação no mesmo patamar obtido pelos testes Nakajima convencionais.

Com relação à dispersão dos pontos para o lado direito e esquerdo do gráfico, que define os modos de deformação por estiramento e embutimento profundo respectivamente, nota-se um efeito contrário ao punção P2, quando os pontos tenderam ao estado plano de deformações. Neste caso, para o punção P4, os pontos tenderam a se afastar do estado plano, definindo claramente a condição de

estiramento para os pontos rosa, referentes ao corpo de prova com 200 mm de largura, e a condição de embutimento profundo para os pontos em amarelo, oriundos da amostra com 125 mm de largura.

Com base nestes resultados, pode-se dizer que o punção P4 simula melhor a condição de estiramento e/ou embutimento profundo de forma isolada, de acordo com o grau de liberdade atribuído ao material durante a deformação (neste caso determinado pela largura do corpo de prova), pronunciando preferencialmente um efeito ou outro. Uma explicação para isso se encontra no fato de que, como a região de maior deformação do material ficou posicionada na porção correspondente ‘a cabeça do punção, a região circunvizinha a ela, por sua vez mais próxima ‘as laterais da chapa, não sofreram tanto o efeito da geometria da ferramenta, podendo assim se deformar com maior liberdade (livre de atrito, por exemplo). Sendo assim, o punção gerou pontos puramente de estiramento para a chapa de 200 mm de largura, a qual esteve totalmente presa pelo draw bed em todo o contorno da matriz. Para a chapa com 125 mm de largura, o modo de deformação pronunciado foi puramente a condição de embutimento profundo, uma vez que por ser esta amostra mais estreita, uma parte lateral da chapa não se prendia ao draw bed (esticador) da ferramenta, se deformando quase que livremente durante o ensaio.

Uma dificuldade ao se realizarem os ensaios de embutimento Nakjima encontra-se no fato de que para o modo de deformação por estiramento, não se consegue prolongar a curva CLC a níveis mais elevados de ε_2, ou seja, os níveis de deformações atingidas são muito pequenas para este eixo (ε_2). Isto não ocorre no lado esquerdo do gráfico (condição de embutimento profundo) porque a curva se extende cada vez mais ‘a medida que simplesmente se reduz a largura dos copos de prova (com isso o material tem maior liberdade para se deformar). Como deve-se travar totalmente a chapa para que o estiramento ocorra, com o objetivo de não conceder qualquer liberdade a deformação do material, a única alternativa para se extender lateralmente a curva é a redução do atrito entre o punção e a chapa por meio de um agente lubrificante, como óleos para estampagem, por exemplo.

Com base nesta discussão, um outro fator pode ser observado para o punção P4. Nota-se que esta geometria de ferramenta conseguiu gerar pontos no estiramento com uma deformação ε_2 maior do que os níveis atingidos pela CLC

convencional. Pode-se dizer assim, que esta geometria estendeu a curva à sua direita, para a condição de estiramento, porém não mantendo o mesmo nível de deformação ε_1, que determina o grau de estampabilidade do material. Este foi o mesmo efeito produzido quando se utilizou o óleo lubrificante Ratax Butex 250/45 para estampagem da Fuchs do Brasil nos primeiros ensaios para se levantar a CLC com o punção hemisférico P3, conforme o método originalmente proposto por Nakajima. O óleo lubrificante também gerou pontos com de maior deformação ε_2 no estiramento, porém não atingiu o mesmo nível de deformação para ε_1.

Investigou-se ainda, no decorrer dos ensaios, o quinto e último modelo de punção previsto para este trabalho, com a forma de uma elipse extra profunda. O efeito causado por esta nova geometria de ferramental pode ser observado na figura 5.12.

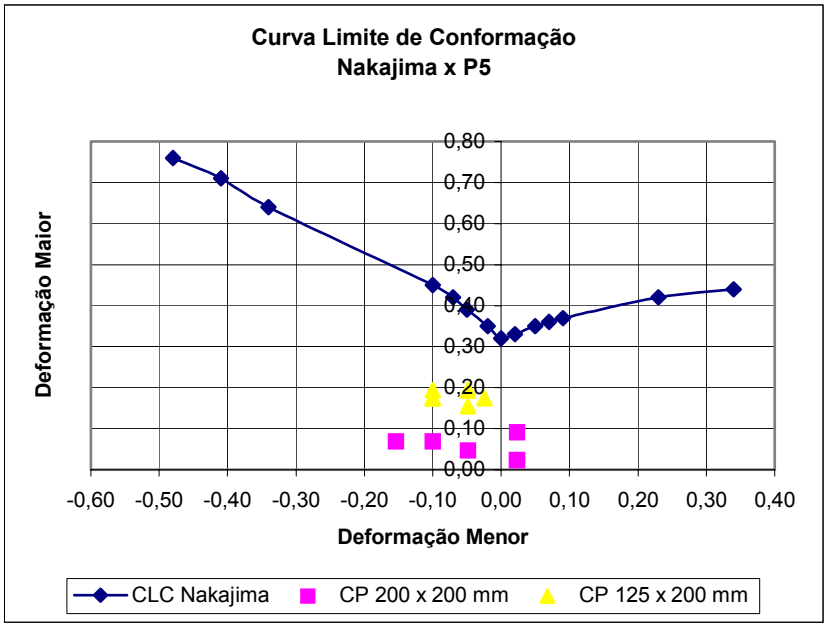

Figura 5.12 – Comparação entre a CLC segundo Nakajima e o punção na forma de uma elipse extra profunda (P5).

Este novo modelo de punção caracterizou-se principalmente por apresentar o raio da cabeça do punção bastante reduzido, tendo assim um raio de curvatura externo aumentado. O aumento do raio externo deveu-se a necessidade de concordância com a medida adotada para a cabeça do punção, sendo que esta característica da ferramenta reduziu de forma bastante significativa a conformabilidade do material, uma vez que os pontos de maior deformação

resultantes dos testes com este modelo de ferramenta geraram pontos com deformações aproximadamente 18% menores em relação à curva limite de conformação obtida com o punção hemisférico.

Os corpos de prova ensaiados com o punção modelo P5 (elipse extra-profunda) promoveram, da mesma forma que o modelo P4 (com a forma de uma elipse profunda) uma deformação concentrada principalmente na cabeça do punção. A interpretação para este resultado segue a idéia discutida anteriormente para o modelo P4, onde efeito causador desta deformação concentrada na cabeça do punção deve-se a redução do raio nesta região da ferramenta. Com o raio do punção ainda mais reduzido nesta posição, a área de contato entre o punção e o material foi ainda mais reduzida, aumentando conseqüentemente a concentração de tensões neste local.

Como o raio da cabeça do punção P5 é ainda menor que o modelo P4, os esforços nesta região concentraram-se de forma demasiada, a ponto de reduzir drasticamente os valores alcançados para a deformação maior ε_1, o que determinou um índice de estampabilidade inferior ao atingido pelo material segundo o método Nakajima convencional (com punção hemisférico). O punção P4, apesar de também concentrar esforços na região da cabeça do punção (devido a redução do raio neste local), ainda sim não gerou como conseqüência direta a redução do nível de estampabilidade da chapa, promovendo apenas uma melhor caracterização dos modos de deformação por embutimento profundo e estiramento. Já o punção P5, com o raio da cabeça do punção inferior ao do modelo P4, afetou diretamente a conformabilidade do material, a ponto de não tornar possível uma avaliação relativa a sua influência nos modos de deformação do material.

Estes resultados reforçam a idéia de que, quanto menor o raio da ferramenta, maior a concentração de tensões no material, independente desta redução de raio ser dada no contorno externo ou na cabeça da ferramenta. Um fato porém a ser mencionado, é que esta variação de raios na geometria da ferramenta, até certo ponto afeta apenas as características de estampabilidade do material, como embutimento profundo e estiramento, ao passo que uma redução mais acentuada nestes raios, passa a ter sua influencia direcionada ao nível de conformação da

chapa, ou seja, uma medida quantitativa da deformação do material, determinada pela altura dos pontos obtidos em relação ao eixo ε_1 da CLC.

5.6 Perfil de distribuição das deformações desde o ombro da matriz até a ponta do punção

Uma característica observada nos ensaios realizados com os cinco modelos de punções utilizados nos ensaios Nakajima, foi que a fratura ocorreu sempre no menor raio de concordância dos punções, ou seja, cada modelo de punção possui dois raios principais que caracterizam a sua geometria. O primeiro raio (R1) corresponde à curvatura da cabeça (ponta do punção) enquanto que o segundo raio (R2) da ferramenta se refere à curvatura que estabelece a concordância entre o raio da cabeça do punção e porção cilíndrica da mesma. Estes raios podem ser vistos na figura 4.4, que mostra a geometria adotada para cada um dos cinco modelos de punção empregados nos testes de laboratório.

Para verificação desta condição de ruptura sempre no menor raio do punção, tomada como alvo de discussão no item 5.5 deste capítulo, foram realizadas medições da deformação maior ε_1 para uma seqüência linear de pontos, desde a posição relativa ao ombro da matriz até o topo do corpo de prova, na posição correspondente a atuação da cabeça do punção durante o ensaio de estampagem. As medidas foram tomadas no lado do corpo de prova oposto à fratura, a fim de se itar ter que medir pontos sobre a trinca do material. A figura 5.13 mostra um desenho esquemático referente as medições realizadas.

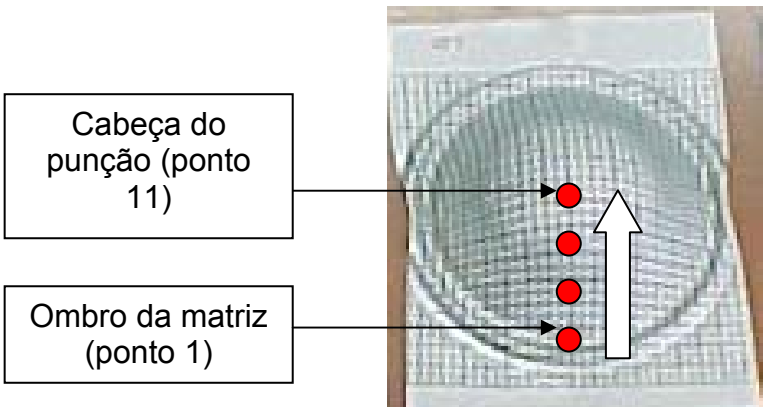

Figura 5.13 - CP mostrando os pontos de medida do perfil de distribuição das deformações.

Os resultados obtidos foram colocados num gráfico que mostra a variação da deformação maior ε_1 a cada ponto medido, desde o ponto 1, referente ao ombro da matriz, até o ponto correspondente ao topo do punção. Com base nesta configuração do diagrama, pode-se observar o perfil de distribuição das deformações ao longo do corpo de prova embutido, observando-se principalmente o nível máximo de deformação atingido para cada punção (para os corpos de prova com 125 mm e 200 mm de largura respectivamente), além da posição deste ponto de máxima deformação ao longo do corpo de prova ensaiado. A posição do ponto de máxima deformação do corpo de prova permite identificar que parte do punção que agiu nesta região, ou seja, se a máxima deformação do material foi causada pelo raio da cabeça do punção (R1) ou pelo raio de concordância externo (R2).

A figura 5.14 mostra o perfil de distribuição das deformações do corpo de prova de 200 x 200 mm, ensaiado com o punção cilíndrico (P1).

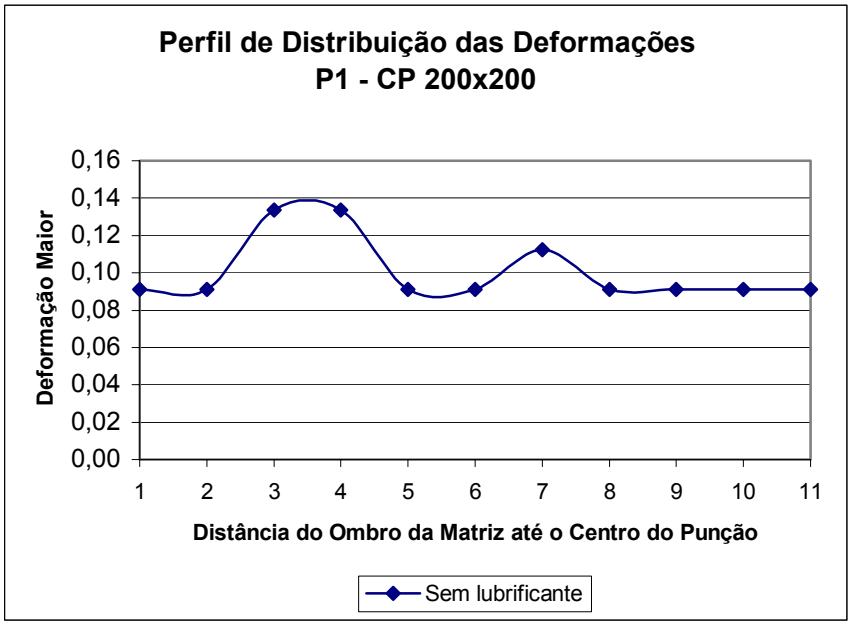

Figura 5.14 – Distribuição das deformações no corpo de prova de 200 x 200 mm para o punção cilíndrico (P1).

A curva apresentada nesta figura possui um pico de máxima deformação (ε_1) entre os pontos 3 e 4, na exata posição do raio externo da ferramenta. Esta geometria de punção não apresenta qualquer curvatura na cabeça do punção,

sendo plano nesta região, de forma que os mais altos níveis de tensão e, conseqüentemente maiores deformações, na faixa de 0,14, se limitam a esta região da ferramenta.

Se compararmos a curva obtida no ensaio com o punção cilíndrico (P1), mostrada na figura 5.14, com a curva obtida através do punção com a forma de uma elipse rasa (P2), mostrada na figura 5.15 para a mesma dimensão de corpo de prova, notamos que o pico de deformação deslocou-se para um nível mais elevado de deformação, entre 0,15 e 0,16, ao passo que sua posição concentrou-se no ponto 4, se afastando sensivelmente do ombro da matriz no sentido do topo do punção.

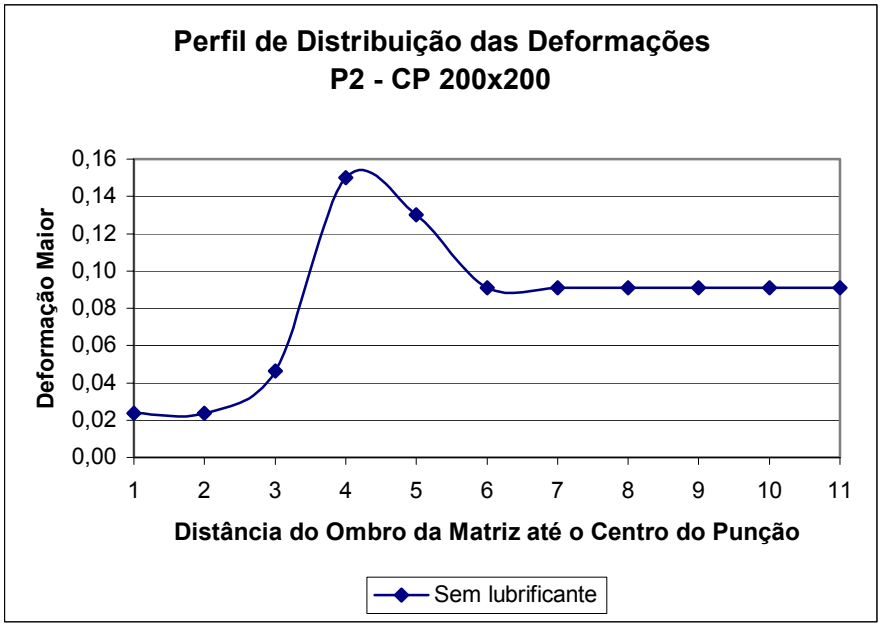

Figura 5.15 – Distribuição das deformações no corpo de prova de 200 x 200 mm para o punção na forma de uma elipse rasa (P2).

Tanto o aumento do nível de deformação quanto o deslocamento deste pico para a direita (no sentido do topo do punção), se devem ao aumento do raio externo (R2) e à existência de um raio R1 na cabeça do punção P2. Esta nova característica geométrica do ferramental manteve a máxima deformação no raio externo (R2), por ser este raio de concordância muito menor que o raio da cabeça do punção (R1). O leve aumento do nível máximo de deformação atingido, de 0,14 para 0,15, do punção P1 para o punção P2 respectivamente, ocorreu por ser o raio externo (R2) do punção P2 maior que o raio externo do punção P1, o que gerou uma menor

concentração de tensões nesta região crítica do material, permitindo a chapa atingir um índice de estampagem pouco superior.

A figura 5.16 traz o perfil de distribuição das deformações para o punção hemisférico (P3), que corresponde ao modelo de ferramenta originalmente utilizado nos ensaios Nakajima.

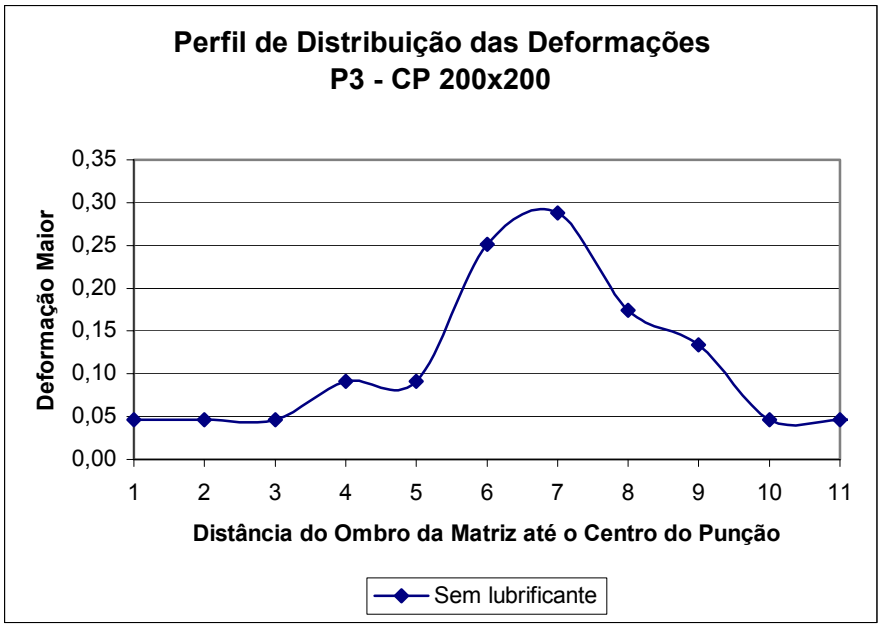

Figura 5.16 – Distribuição das deformações no corpo de prova de 200 x 200 mm para o punção hemisférico (P3).

A curva do perfil de distribuição das deformações obtida para o punção P3 apresentou a mesma tendência da curva resultante das medições de deformação para o punção P2, quando esta atingiu um nível mais alto de deformação, com o pico deslocado para o topo do punção (‘a direita do gráfico). O punção hemisférico P3 aumentou ainda mais esta variação da curva, com o pico de máxima deformação concentrando-se na faixa de 0,29, de forma que este ponto de máxima deformação ficou posicionado entre os pontos 6 e 7.

Tanto o aumento do nível de deformação quando o deslocamento do pico da curva, no sentido do topo do punção, foram maiores do que a variação apresentada pelo punção P2 quando comparado ao punção P1. Se analisarmos estes resultados tomando-se por base a geometria da ferramenta, pode-se dizer que o punção hemisférico apresenta um único raio que engloba todo o perfil do punção, ou seja,

não há uma concordância entre um raio externo (R2) e um raio interno (R1) que concentra tensões numa posição específica do material por influência da ferramenta. Desta forma, a geometria uniforme do punção P3 gera, conseqüentemente, uma melhor distribuição de tensões na superfície do material, permitindo que a chapa atinja um nível mais elevado de deformação num ponto intermediário (correspondente ao raio de curvatura da ferramenta, sendo este o ponto principal de atuação do punção sobre a amostra) entre o ombro da matriz e o topo do punção.

Alterando a configuração do punção para uma geometria com um raio mais agudo na cabeça do punção (R1) e um raio externo de concordância (R2) maior, nota-se que o pico do gráfico desloca-se ainda mais em direção ao topo do punção. Esta variação na curva do perfil de distribuição de deformações pode ser observada nas figuras 5.17 e 5.18, onde foram ensaiados corpos de prova com os punções na forma de uma elipse profunda (P4) e na forma de uma elipse extra profunda (P5), respectivamente. Ambas ferramentas possuem um menor raio R1, na cabeça do punção, fator este que tende a promover uma maior concentração de tensões nesta região do material, o que explica o deslocamento do pico de deformação das curvas para esta posição.

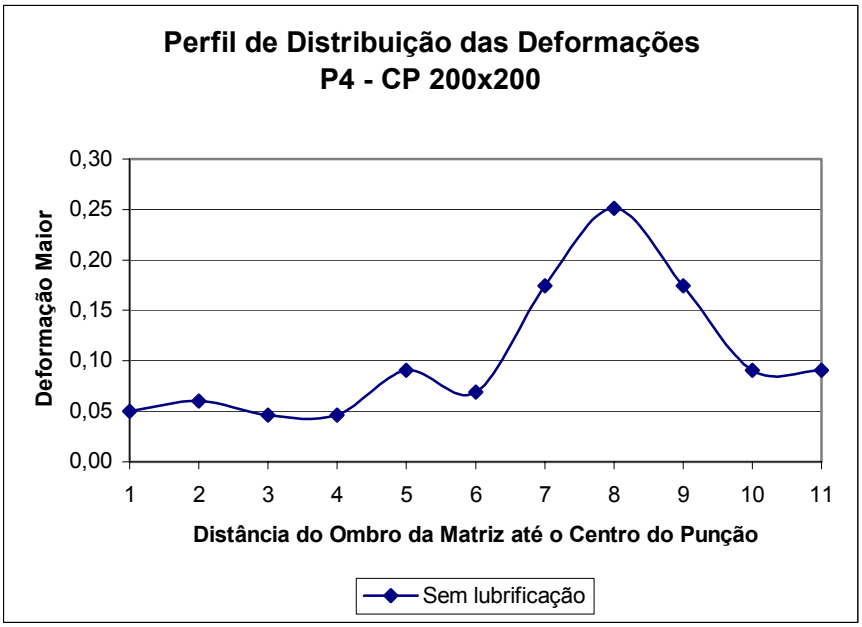

Figura 5.17 – Distribuição das deformações no corpo de prova de 200 x 200 mm para o punção na forma de uma elipse profunda (P4).

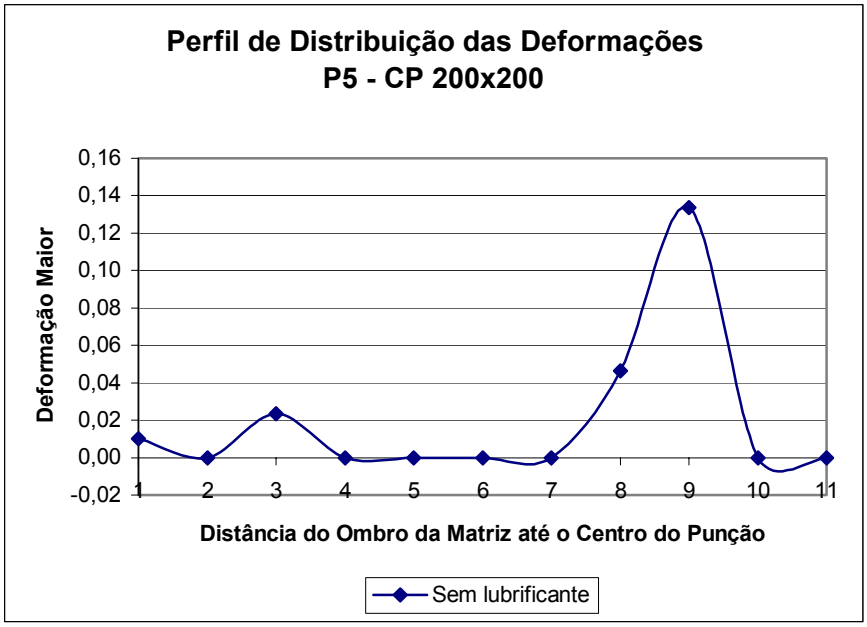

Figura 5.18 – Distribuição das deformações no corpo de prova de 200 x 200 mm para o punção na forma de uma elipse extra profunda (P5).

Pelas curvas apresentadas para os punções P4 e P5, nota-se que o pico de máxima deformação gerado, posicionou-se no ponto 8 para o punção P4 e no ponto 9 para o punção P5 (que possui um raio R1 ainda menor que o punção P4), ao passo que para o punção hemisférico (P3) este ponto extremo da curva encontrou-se entre os pontos 6 e 7. Estes dados mostram que a redução do raio do topo do punção, fez com que a ferramenta atuasse preferencialmente na porção central da amostra ensaiada, tornando esta a região de maior deformação da chapa. A região circunvizinha do material não sofreu um contato direto com o punção de estampagem, de forma que não sofreu uma deformação tão severa quanto a região central da chapa metálica.

Quanto menor o raio da cabeça do punção, maior a concentração de tensões no material, o que leva a um nível de estampabilidade menor. Esta afirmativa novamente se faz verdadeira pelos resultados obtidos para o nível máximo de deformações atingido nas curvas mostradas nas figuras 5.17 e 5.18. Como a ferramenta P4 apresenta um raio R1 menor que a ferramenta P3, nota-se que a curva resultante dos ensaios com este punção teve seu ponto de máxima deformação reduzido para 0,25, enquanto que, para o punção P5, que possui um raio ainda menor que a ferramenta P4, este nível foi ainda menor, em torno de 0,13.

Com base nas características das curvas representadas anteriormente, numa seqüência desde o punção P1 até o punção P5, pode-se observar claramente que, quanto mais uniforme a geometria da ferramenta, mais homogênea a distribuição de tensões no material estampado, permitindo que material atinja níveis mais elevados de deformações.

Os mesmos gráficos do perfil de distribuição das deformações foram levantados também para os corpos de prova de 125 x 200 mm, afim de se avaliar, além do nível máximo de deformação atingido, a posição deste pico entre o ombro da matriz e o topo do punção para este modelo de corpo de prova.

A figura 5.19 mostra o perfil das deformações na amostra de 125 x 200 mm, ensaiada com o punção cilíndrico (P1).

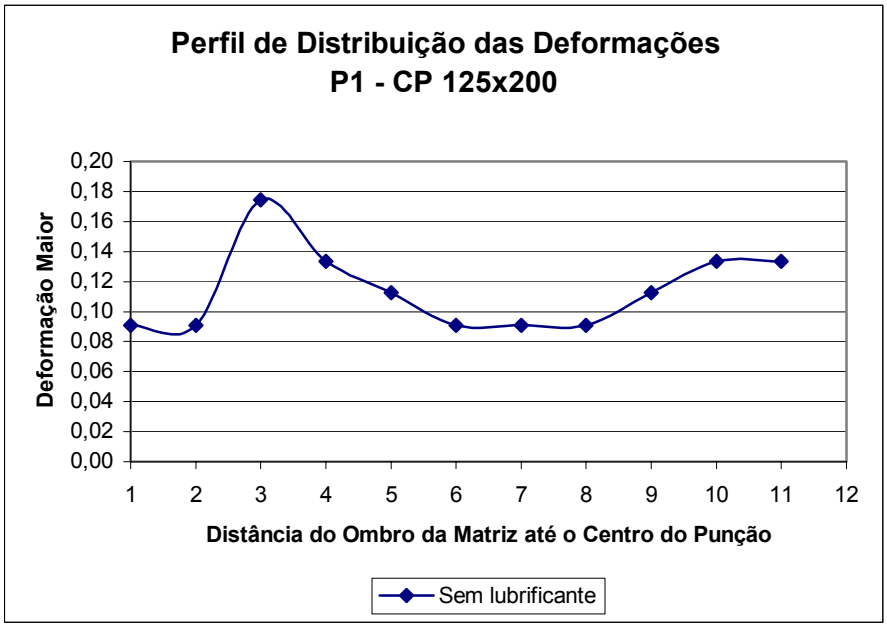

Figura 5.19 – Distribuição das deformações no corpo de prova de 125 x 200 mm para o punção cilíndrico (P1).

Pela curva obtida na figura 5.19 nota-se que a máxima deformação manteve-se no ponto 3, ou seja, numa posição próxima ao ombro da matriz , na altura do raio externo do punção (R2). Assim como no corpo de prova de 200 x 200 mm, a posição de maior deformação da chapa ensaiada concentrou-se no menor raio da ferramenta. Porém o nível de deformação atingido sofreu uma variação, passando de 0,14 para aproximadamente 0,18. Esta variação do nível de deformação atingido

deve-se ‘a variação da geometria do corpo de prova, uma vez que a amostra com 125 mm de largura não sofre a ação do drawbed em todo o contorno de punção, permitindo que a chapa se deforme lateralmente com maior liberdade. Esta liberdade que o material tem para se deformar na direção da largura do corpo de prova, é que o gera um maior alongamento das elipses (na direção do comprimento do corpo de prova) formadas pela deformação da malha. Desta forma, a chapa mais estreita proporciona conseqüentemente pontos de maior deformação ε_1, e uma menor deformação ε_2, evidenciando o modo de deformação por embutimento profundo.

Os demais gráficos levantados para o corpo de prova com 125 mm de largura, resultantes dos ensaios realizados com os punções P2, P3, P4 e P5 (mostrados nas figuras 5.20, 5.21, 5.22 e 5.23 respectivamente), apresentam a mesma tendência das curvas obtidas nos testes feitos com os corpos de prova de 200 x 200 mm, quando o nível máximo de deformação aumentou desde o punção P1 e P2 até o punção hemisférico P3, sofrendo posteriormente uma queda ‘a medida que foram utilizados os punções P4 e P5. Assim como o nível máximo de deformação, a posição deste pico também deslocou-se ao longo da chapa de maneira similar ao deslocamento observado nos corpos de prova de 200 x 200 mm, ou seja, caminhando de uma posição próxima ao ombro da matriz (para o punção P1) até uma posição quase que no topo do punção (para o punção P5). Este deslocamento do ponto de máxima deformação em direção ao topo do punção (seguindo uma seqüência lógica de ensaio, partindo do punção P1, passando pelos punções P2, P3 e P4, até o punção P5) deve-se também ao efeito provocado pelos raios R1 e R2 dos punções, ou seja, o pico concentrou-se sempre no menor raio da ferramenta, posição esta que atuou como um concentrador de tensões no material.

Estão apresentados a seguir, nas figuras 5.20, 5.21, 5.22 e 5.23, os gráficos do perfil de distribuição de deformações resultantes dos ensaios com os punções P2, P3, P4 e P5 respectivamente, todos realizados para os corpos de prova com 125 x 200 mm.

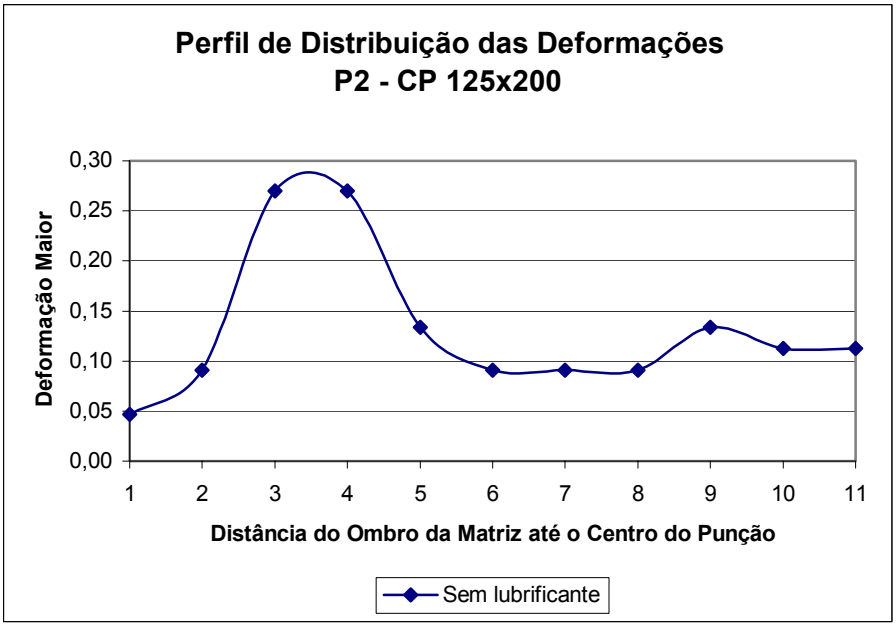

Figura 5.20 – Distribuição das deformações no corpo de prova de 125 x 200 mm para o punção na forma de uma elipse rasa (P2).

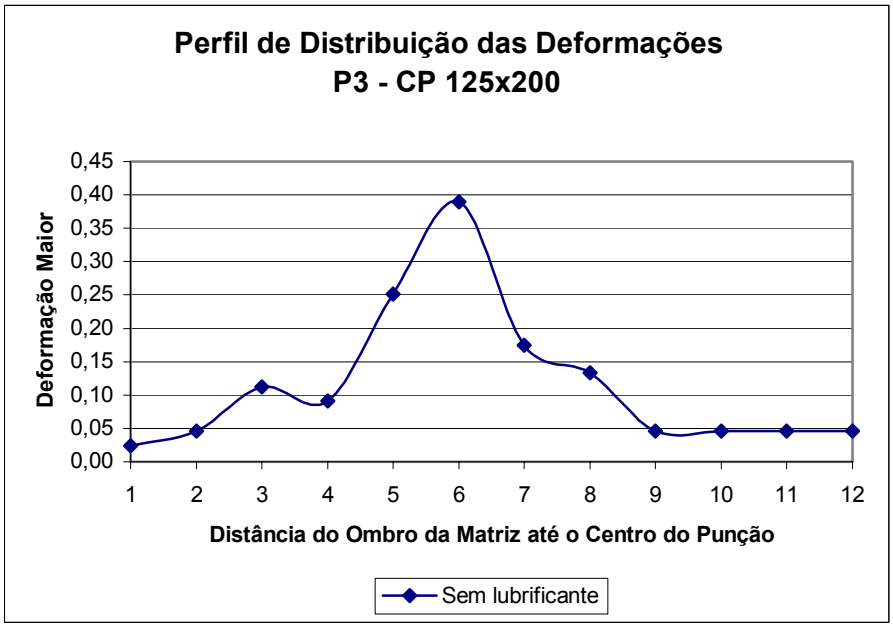

Figura 5.21 – Distribuição das deformações no corpo de prova de 125 x 200 mm para o punção hemisférico (P3).

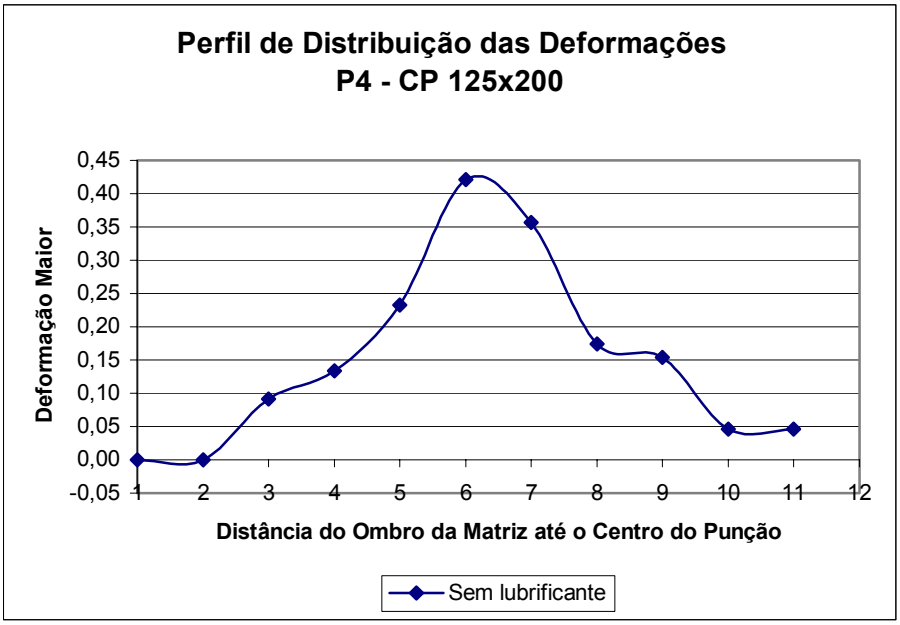

Figura 5.22 – Distribuição das deformações no corpo de prova de 125 x 200 mm para o punção na forma de uma elipse profunda (P4).

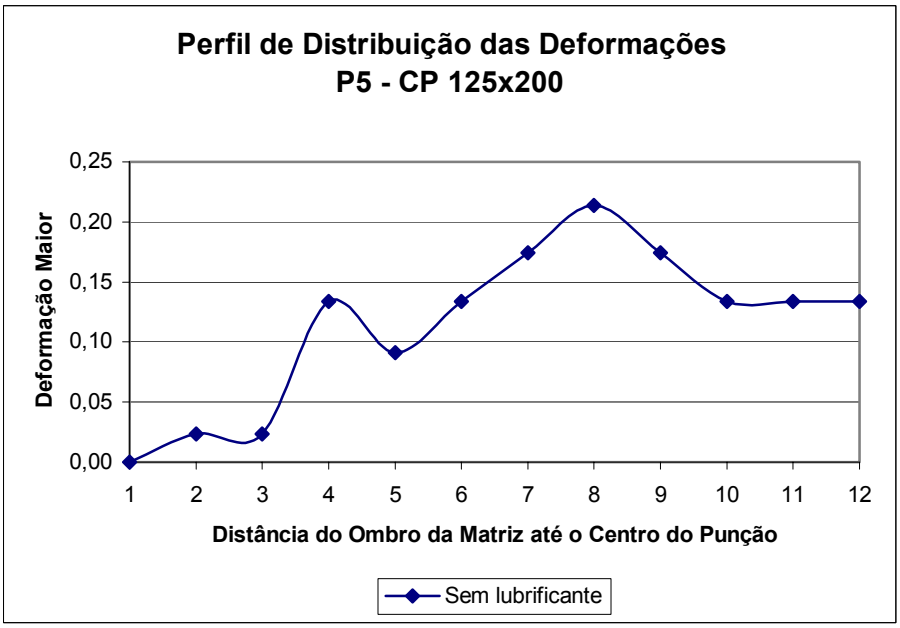

Figura 5.23 – Distribuição das deformações no corpo de prova de 125 x 200 mm para o punção na forma de uma elipse extra profunda (P5).

Para a curva obtida com o punção na forma de uma elipse rasa (P2), mostrada na figura 5.20, o nível máximo de deformação chegou a aproximadamente 0,30 para o corpo de prova com 125 mm de largura, ao passo que, nos ensaios com a chapa de 200 x 200 mm este nível foi 0,15. Esta variação foi de aproximadamente

100%, enquanto que a posição deste pico, que antes havia ficado no ponto quatro, agora se posicionou entre os pontos 3 e 4.

Os ensaios com o punção hemisférico (P3), apontaram uma deformação máxima de aproximadamente 0,40 para a amostra de 125 x 200 mm, aumentando este valor desde 0,30 quando testada a chapa com 200 x 200 mm. A posição do pico da curva também ficou um pouco deslocada no sentido do ombro da matriz, uma vez que nos ensaios anteriores (corpo de prova de 200 x 200 mm) a máxima deformação havia sido atingida no ponto 7, passando então para o ponto 6 (para o corpo de prova de 125 x 200 mm).

Com relação ‘a curva gerada com o punção na forma de uma elipse profunda (P4), o deslocamento do pico de máxima deformação, no sentido do ombro da matriz, foi ainda maior, saindo do ponto 9, quando ensaiadas as chapas com 200 x 200 mm, para uma posição intermediária entre os pontos 6 e 7, para as amostras de 125 x 200 mm. Este ponto, para a chapa de 125 x 200 mm ficou quase que na mesma posição da mesma amostra ensaiada com o punção hemisférico (P3), sendo que o nível de deformação atingido também foi praticamente o mesmo, com um valor aproximado de 0,40. Baseando-se nestes resultados, pode-se dizer que, para a chapa de 125 x 200 mm, a qual simula uma condição mais próxima ao modo de deformação por embutimento profundo, tanto o nível de deformação ε_1, quanto a posição do pico de máxima deformação tiveram uma variação muito pequena entre os punções P3 e P4. Assim sendo, com relação a estes parâmetros, podemos dizer que a geometria do punção P4 não apresentou uma influência significativa se comparado ao punção P3, o que não ocorreu para a chapa de 200 x 200 mm, onde a variação destes parâmetros foi maior.

Da mesma forma que nos casos anteriores, o punção P5, na forma de uma elipse extra profunda, também teve o pico de máxima deformação da curva deslocado para a esquerda (do ponto 10 para o ponto 8), e o nível máximo de deformação atingido neste pico com um valor superior ao índice atingido com o corpo de prova de 200 x 200 mm (de 0,14 para aproximadamente 0,22), quando ensaiado com este mesmo modelo de punção. Neste caso porém, a variação dos resultados, quando comparado o punção P5 ao punção P4, foi maior do que a variação resultante da comparação entre os punções P3 e P4, de forma que foi

mantida a tendência da curva deslocar o pico de deformação em direção ao topo do punção, atingindo um nível inferior de deformação, devido ao raio da ferramenta P5 ser menor e concentrar mais esforços durante o embutimento do material.

De acordo com os gráficos mostrados anteriormente, pode-se concluir que, tanto para o corpo de prova de 125 x 200 mm quanto para as amostras de 200 x 200 mm, a tendência do perfil de distribuição de deformações é atingir um baixo valor de deformação para o punção P1 (raio R2 pequeno); ter este valor aumentado até o punção P2; e atingir um nível máximo para o punção P3, ‘a medida que os raios R1 e R2 são aumentados; e decrescer para os punções P4 e P5, que têm o raio R1 diminuído. A única exceção se fez para os resultados dos ensaios com a chapa de 125 x 200 mm com os punções P3 e P4, onde a variação tanto do nível de deformação quanto da posição do pico da curva foram muito pequenas quando comparados os resultados entre estes modelos de ferramenta.

Com relação a posição do pico de máxima deformação da curva, entre o ombro da matriz e o topo do punção, conclui-se que este deslocou-se desde o ombro da matriz (partindo do punção P1) até a proximidade do topo do punção (para o punção P5), devido aos punções P1 e P2 possuírem um raio de concordância externo (R2) menor (concentrando esforços próximo ao ombro da matriz) e os punções P4 e P5, subseqüentes ao punção hemisférico P3, apresentarem um menor raio na cabeça da ferramenta (R1), concentrando esforços no topo do punção.

5.7 Análise da redução de espessura sofrida pelo material

Toda análise de deformações sofridas por uma chapa metálica durante um processo de estampagem, baseada na curva limite de conformação (CLC), leva em consideração apenas a deformação planar sofrida pelo material, ou seja, aquela ocorrida no plano (superfície) da chapa, através dos eixos maior (ε_1) e menor (ε_2) das elipses formadas pela deformação da malha de círculos 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 da amostra, em outras palavras, quanto o material afina (reduz de espessura) quando deformado. Através desta análise foi possível verificar, pela constância de volume, se uma maior

ou menor deformação em um dos eixos do plano da chapa (ε_1 ou ε_2) se refletiu numa menor ou maior redução de espessura (deformação ε_3) da amostra respectivamente. Desta forma pode-se dizer não apenas se o formato do punção propiciou uma deformação mais severa na espessura ou no plano da chapa, mas também verificar, pelas equações da constância de volume, o grau de precisão nas medições das deformações ε_1 e ε_2, utilizadas na obtenção da curva CLC.

Com o objetivo de avaliar o efeito da geometria do punção na redução de espessura da chapa, os corpos de prova ensaiados com cada um dos cinco modelos de punções foram cortados em três pontos (elipses) específicos, de forma que cada um deles representasse um dos modos de deformação da chapa (embutimento profundo, estiramento e estado plano de deformações). Para cada um destes pontos foram tomados os valores das deformações verdadeiras ε_1 e ε_2, medidos anteriormente, e medida a espessura final da chapa nesta posição. Pelos valores de ε_1 e ε_2 foi calculado o valor de ε_3 ($\varepsilon_{3\ calc}$), considerando a equação da constância de volume para deformação verdadeira. Com a medida da espessura final obteve-se o afinamento real sofrido pela chapa, valor este utilizado para obtenção da deformação ε_3 resultante da medição da amostra ($\varepsilon_{3\ med}$). A variação entre os valores calculado ($\varepsilon_{3\ calc}$) e medido ($\varepsilon_{3\ med}$) da deformação na espessura foram representados por $\Delta\varepsilon_3$.

As tabelas com os valores de todas as medições realizadas, equacionamento e cálculos para obtenção das deformações verdadeiras (ε_1, ε_2 e ε_3) estão no Anexo I desta dissertação.

A tabela 5.5 mostra os valores das deformações verdadeiras obtidas em um ponto de embutimento profundo, em um ponto de estiramento e em um ponto no estado plano de deformações dos corpos de prova ensaiados com o punção hemisférico P3.

Punção Hemisférico (P3)			
Grandeza	**Embutimento Profundo**	**Estiramento**	**Estado Plano de Deformações**
ε_1	0,511	0,389	0,323
ε_2	-0,336	0,091	0,000
$\varepsilon_{3\ calc}$	-0,174	-0,480	-0,323
Afinamento (mm)	0,120	0,240	0,200
$\varepsilon_{3\ med}$	-0,188	-0,420	-0,336
$\Delta\varepsilon_3$	-0,014	0,061	-0,014

Tabela 5.5 – Deformações verdadeiras obtidas nos ensaios com o punção P3.

Foram tomados inicialmente os resultados das deformações verdadeiras para os ensaios realizados com o punção P3, por ser esta a ferramenta padrão do ensaio Nakajima, ou seja, foi este o modelo de punção utilizado para se levantar a curva CLC do material, tomada como base de comparação para a análise dos resultados obtidos com os outros modelos de punções. Desta forma, a tabela 6.1, referente a ferramenta hemisférica, também será tomada como base para avaliação do efeito da geometria dos punções no afinamento do material estampado.

Pelos valores apresentados na tabela 5.5, nota-se que tanto o ponto medido para o embutimento, quanto para o estiramento e para o estado plano de deformações, a deformação do eixo maior (ε_1) foi elevado, de 0,511, 0,389 e 0,323 respectivamente, se comparado aos resultados dos demais punções mostrados nas tabelas 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9. O valor deste eixo é quem determina o nível máximo (altura) da curva limite de conformação, enquanto que a deformação do eixo menor (ε_2) representa os modos de deformação por estiramento, quando este valor for positivo, embutimento profundo quando negativo e o estado plano de deformações quando for igual a zero.

Pelos valores obtidos para o afinamento do material, nota-se que a maior redução de espessura ocorreu para o ponto no estiramento, com uma redução de 0,240 mm na espessura, enquanto que este valor foi de 0,120 mm para o embutimento profundo e 0,200 mm para o ponto medido no estado plano de deformações. Estes valores determinam a deformação do material no sentido da espessura da chapa ($\varepsilon_{3\ med}$), que se refere justamente ao afinamento da chapa, sendo de –0,188, -0,420 e –0,336 para o embutimento, estiramento e para o estado

plano respectivamente. O sinal negativo indica que houve uma redução da dimensão do material em relação ao eixo medido.

Com base nos resultados, é normal que no estiramento a chapa afine mais, isto porque nesta condição de ensaio o corpo de prova é preso pelo drawbed em todo o contorno do punção que realiza o embutimento, de forma que a estampabilidade atingida pelo material deve-se principalmente a deformação da chapa no sentido da espessura (afinamento do material). Já no embutimento profundo o material tem certa liberdade para se deformar, uma vez que uma porção lateral do corpo de prova (que é mais estreito) não fica preso pelo drawbed, de forma que a estampabilidade da chapa não se deve principalmente a sua redução de espessura, mas ao maior alongamento em relação ao eixo de maior de deformação (ε_1), que acaba provocando uma deformação negativa não apenas na espessura, mas também no sentido do eixo menor de deformação (ε_2). A conseqüência direta deste modo de deformação é justamente o menor afinamento da amostra nesta condição de ensaio.

Quanto a diferença entre os valores medido e calculado para a deformação ε_3, pode-se dizer que a maior variação ocorreu para o estiramento, chegando a 0,061, enquanto que nos demais modos de conformação esta variação foi de –0,014. Esta diferença, mais significativa para o estiramento, pode ser atribuída a imprecisão na medição da espessura chapa conformada, uma vez que a curvatura do corpo de prova embutido ocasionou certa dificuldade no tangenciamento do instrumento no ponto de medida, o que acabou gerando um maior erro de medição em alguns casos. Esta imprecisão não foi, entretanto, suficientemente grande a ponto de mascarar os resultados dos testes, a ponto de não tornar perceptível a maior redução de espessura no estiramento, conforme comentado anteriormente.

A tabela 5.6 apresenta os valores das deformações para os três modos de deformação (embutimento, estiramento e estado plano de deformações), calculados e medidos para os corpos de prova embutidos com o punção cilíndrico P1.

Punção Cilíndrico (P1)			
Grandeza	**Embutimento Profundo**	**Estiramento**	**Estado Plano de Deformações**
ε_1	0,251	0,174	0,112
ε_2	-0,100	0,134	0,000
$\varepsilon_{3\ calc}$	-0,151	-0,308	-0,112
Afinamento (mm)	0,120	0,160	0,100
$\varepsilon_{3\ med}$	-0,188	-0,260	-0,154
$\Delta\varepsilon_3$	-0,037	0,048	-0,042

Tabela 5.6 – Deformações verdadeiras obtidas nos ensaios com o punção P1.

Assim como o punção P3, o punção cilíndrico (P1) também gerou uma maior deformação ε_1 no embutimento profundo, uma vez que é neste eixo que o material se deforma mais para este modo de deformação. Os resultados obtidos para o punção P1 também coincidiram para o estiramento (se comparado ao punção P3), de forma que neste modo de deformação ocorreu a maior redução de espessura, de 0,160 mm, superior ao embutimento, com um afinamento de 0,120 mm e ao estado plano de deformações, com uma redução de 0,100 mm na espessura da chapa. Estes valores determinam as respectivas deformações $\varepsilon_{3\ med}$ de –0,188, -0,260 e –0,154 para cada um dos modos de deformações descritos.

A tabela 5.7 mostra as deformações verdadeiras, medidas e calculadas, para os corpos de prova embutidos com o punção na forma de uma elipse rasa (P2).

Punção Elipse Rasa (P2)			
Grandeza	**Embutimento Profundo**	**Estiramento**	**Estado Plano de Deformações**
ε_1	0,174	0,251	0,270
ε_2	-0,154	0,091	0,000
$\varepsilon_{3\ calc}$	-0,020	-0,342	-0,270
Afinamento (mm)	0,040	0,180	0,180
$\varepsilon_{3\ med}$	-0,059	-0,297	-0,297
$\Delta\varepsilon_3$	-0,039	0,045	-0,028

Tabela 5.7 – Deformações verdadeiras obtidas nos ensaios com o punção P2.

Para o punção P2, a deformação no eixo maior (ε_1) foi de 0,174 para o embutimento profundo e de 0,251 para o estiramento, resultado este que contraria os valores obtidos para os punções P3 e P1, onde a deformação ε_1 no embutimento superou o índice atingido para o estiramento. Nota-se, porém, que a maior deformação ε_1 foi no estado plano de deformações (com ε_1 = 0,270), o que também difere dos casos anteriores (para os punções P3 e P1), quando a deformação ε_1 para o estado plano de deformações havia sido a menor entre os três modos de deformações avaliados. Este fato evidencia uma característica já observada na figura 5.10, quando se observou que os pontos gerados no diagrama limite de conformação com esta ferramenta, tenderam a se concentrar justamente no estado plano de deformações, onde foram obtidos os maiores níveis de deformação resultantes dos ensaios com este modelo de punção. Foi apenas no estado plano de deformações que o punção P2 atingiu o mesmo nível de deformações da curva CLC originalmente levantada com o punção hemisférico, de forma que tanto para o embutimento profundo quanto para o estiramento, o nível máximo de deformação foi claramente inferior a curva CLC obtida pelo método Nakajima tradicional.

Uma característica, ou condição obrigatória para se obter pontos no estado plano de deformações, é que a deformação menor ε_2 seja nula, de forma que se analisarmos a deformação na espessura da chapa, fica obvio concluir que o maior afinamento do material ocorreu neste modo de deformação. Isto porque, se a deformação ε_2 é nula, todo o alongamento do material no sentido de ε_1 deve ser compensado apenas na redução de espessura chapa, como mostram os resultados da tabela 5.7.

Ainda com relação ao punção P2, observa-se na tabela 5.7 que o ponto medido para o embutimento profundo apresentou uma pequena redução de espessura, na faixa de 0,040 mm ($\varepsilon_{3\ med}$ = -0,059). Este fato nos permite concluir que o ponto medido para este modo de deformação aproxima-se da condição de embutimento puro, onde toda deformação positiva em relação ao eixo ε_1 é compensada apenas pela deformação negativa em relação a ε_2, ou seja, sem provocar qualquer deformação (afinamento) do material na espessura.

A tabela 5.8 traz os resultados das deformações medidas na amostras ensaiadas com o punção P4.

Punção Elipse Profunda (P4)			
Grandeza	**Embutimento Profundo**	**Estiramento**	**Estado Plano de Deformações**
ε_1	0,323	0,251	X
ε_2	-0,154	0,134	X
$\varepsilon_{3\ calc}$	-0,169	-0,385	X
Afinamento (mm)	0,120	0,220	X
$\varepsilon_{3\ med}$	-0,188	-0,377	X
$\Delta\varepsilon_3$	-0,019	0,008	X

Tabela 5.8 – Deformações verdadeiras obtidas nos ensaios com o punção P4.

As deformações obtidas nas amostras ensaiadas com o punção P4, na forma de uma elipse profunda, voltaram a apresentar as mesmas características de deformações obtidas para os punções P3 e P1, onde a deformação em relação ao eixo maior ε_1 no embutimento profundo foi superior ao estiramento (de 0,323 para o embutimento e 0,251 para o estiramento), ao passo que a deformação no sentido da espessura (afinamento da chapa) foi maior no estiramento (de –0,377 enquanto que no embutimento atingiu-se –0,188 para a deformação $\varepsilon_{3\ med}$).

Uma característica marcante nestes ensaios foi o fato não existirem pontos no estado plano de deformações, o que já havia sido evidenciado na figura 5.11. Conforme discutido anteriormente, este fato caracteriza este modelo de punção como sendo uma ferramenta que tende a definir preferencialmente os modos de deformações por embutimento profundo e estiramento, de acordo com o modelo de corpo de prova utilizado, afastando-se do estado plano de deformações.

Na tabela 5.9 foram apresentadas as deformações verdadeiras resultantes dos ensaios realizados com punção P5, na forma de uma elipse extra profunda.

Punção Elipse Extra Profunda (P5)			
Grandeza	**Embutimento Profundo**	**Estiramento**	**Estado Plano de Deformações**
ε_1	0,198	0,134	X
ε_2	-0,024	0,024	X
$\varepsilon_{3\ calc}$	-0,174	-0,157	X
Afinamento (mm)	0,120	0,120	X
$\varepsilon_{3\ med}$	-0,188	-0,188	X
$\Delta\varepsilon_3$	-0,014	-0,031	X

Tabela 5.9 – Deformações verdadeiras obtidas nos ensaios com o punção P5.

Assim como o punção P4, o punção P5 também não apresentou pontos no estado plano de deformações, o que vem a ser uma característica particular destes dois modelos de ferramenta, com o raio da cabeça do punção (R1) menor que o raio de concordância lateral.

Já para a deformação maior ε_1, atingiu-se um valor superior para o embutimento profundo (0,198) se comparado ao estiramento (0,134), o que normalmente se espera como resultado. Nota-se ainda que, no embutimento profundo, a deformação menor ε_2 do ponto medido foi próxima de zero (0,024), o que provocou uma maior deformação no sentido da espessura da chapa ($\varepsilon_{3\ med}$ = -0,188). Este foi o mesmo nível de deformação atingido pela chapa para ponto medido no estiramento ($\varepsilon_{3\ med}$ = -0,188), que também não atingiu uma elevado nível de deformação para o eixo menor ε_2.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

6.1 Conclusões

Pelos resultados dos ensaios metalográfico, de tração e pela análise química realizada, pode-se concluir que o aço DC 06 encontra-se perfeitamente de acordo com sua especificação de norma, caracterizando-se como um material laminado a frio e de alta estampabilidade.

Estas características ficam evidentes pelas fotos da microesrtutura da chapa, que apontam um alongamento dos grãos do material no sentido da laminação, característica esta, típica de um aço laminado a frio, além de apresentar um baixo percentual de carbono. Este baixo percentual de carbono, assim como o percentual dos demais constituintes do aço, obtidos a partir de um ensaio de análise química, evidenciam o material de estudo como um aço típico para operações que exigem um elevado grau de estampabilidade, o que se confirmou nos testes de tração.

Os ensaios de tração, por sua vez, apontaram valores relativamente altos para o fator de anisotropia e para o coeficiente de encruamento, características estas, típicas das chapas de alta estampabilidade utilizadas na indústria automobilística, como é o caso do DC 06.

Na etapa relativa aos testes simulativos práticos, onde o ensaio de estampagem Nakajima foi o método escolhido para o desenvolvimento do trabalho, investigou-se como a geometria do punção influenciou na estampabilidade da chapa. A base comparativa foi a Curva Limite de Conformação (CLC) do material, levantada apenas com o punção hemisférico, conforme proposto originalmente por Nakajima. Desta forma, os resultados obtidos com os punções de geometria variada foram comparados a esta CLC, tornando possível assim verificar como os diferentes formatos da ferramenta afetaram a conformabilidade do material.

Nos ensaios iniciais, apenas para o levantamento da CLC com o punção hemisférico, a primeira conclusão a que se chegou foi que, para que se conseguisse prolongar a curva para o lado do estiramento (a direita do gráfico), é necessária a utilização de um filme de poliuretano como agente lubrificante. Isto porque o poliuretano foi o único lubrificante estudado capaz de gerar um filme suficientemente forte a ponto de resistir a carga de ensaio sem se romper, visto que outros óleos de estampagem não tiveram um efeito tão satisfatório.

Já nos ensaios com os diferentes modelos de punções, a conclusão a que se chegou foi que o punção hemisférico é a geometria com a qual se obteve a melhor condição de estampagem do material. Isto porque as demais geometrias, por apresentarem um menor raio ou na cabeça do punção, ou no raio de concordância entre a cabeça do punção e a porção cilíndrica da ferramenta, tenderam sempre a apresentar uma maior concentração de tensões no menor raio, ocasionando na chapa uma distribuição de deformações cada vez mais desuniforme quanto menor era a medida deste menor raio.

Esta concentração de tensões no menor raio da ferramenta deve-se a variação da área de contato entre o punção e a chapa, ou seja, quanto maior esta área, melhor a distribuição da carga aplicada sobre a superfície do material a ser estampado, gerando uma distribuição mais uniforme das deformações. Assim sendo, conclui-se que a ferramenta hemisférica, por apresentar um perfil com um único raio, possui uma maior área de contato com a chapa durante a estampagem, ao passo que as demais geometrias de ferramentas, têm toda a carga de ensaio concentrada numa menor área de contato com o material, delimitada pelo menor raio da sua geometria.

Chegou-se a esta conclusão pelo fato de que os maiores níveis de estampabilidade e a melhor distribuição das deformações para o estiramento e para o embutimento profundo, foram atingidos com o punção hemisférico. A medida que a geometria do punção afastava-se deste modelo, hora tendendo ao formato cilíndrico, hora tendendo ao formato elíptico, observou-se como o grau de variação da geometria influenciou na deformação do material. Isto porque houve uma tendência inicial das deformações concentrarem-se no estado plano de deformações (para o punção com o formato de uma elipse rasa) e, preferencialmente em cada em um dos

modos de deformação (no caso do punção na forma de uma elipse profunda) respectivamente. O nível máximo de deformação atingido manteve-se o mesmo para estes dois punções. Chegando finalmente aos modelos cilíndrico e na forma de uma elipse extra profunda, onde os raios da cabeça do punção e de concordância entre a cabeça e a porção reta da ferramenta, respectivamente, eram ainda menores. Neste caso notou-se que este menor raio não mais afetou a distribuição das deformações para um ou outro modo de deformação, mas sim o nível de estampabilidade atingido, o qual foi consideravelmente reduzido.

Com base nas conclusões acima, pode-se dizer 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.

A comprovação de que o material tende a sofrer uma maior concentração de tensões no menor raio da ferramenta, foi obtida pelo perfil de distribuição das deformações medidas desde o ombro da matriz até o topo do punção, onde observou-se que os maiores níveis de deformação ocorreram mais próximos ao ombro da matriz, para os punções cilíndrico e na forma de uma elipse rasa (com o raio de concordância externo menor que o raio da cabeça do punção) e próximos ao topo do punção, no caso das ferramentas mais pontiagudas (punções com a forma de uma elipse profunda e extra profunda).

Conclui-se finalmente, que a redução de espessura sofrida pelo material, depende diretamente das deformações planares sofridas pela chapa, ou seja, ao passo que a variação da geometria da ferramenta afeta os pontos de deformações gerados no diagrama limite de conformação, a deformação da chapa no sentido da espessura (afinamento do material) sofrerá diretamente este efeito. Isto ocorre porque no modo de deformação por estiramento, onde o material se deforma positivamente tanto no eixo de deformação maior quanto no eixo de deformação menor, a forma dada a chapa depende diretamente da redução de espessura do material, ao passo que no embutimento profundo, onde deformação no eixo menor é

negativa, a deformação do material não depende necessariamente da redução de espessura para ocorrer. O estado plano de deformações é um caso particular, onde a deformação no eixo menor é nula, de forma que toda a deformação gerada no eixo maior se deve a redução de espessura da chapa.

Assim sendo, pode-se dizer que o punção na forma de uma elipse rasa, que tende a jogar os pontos para o estado plano de deformações, tem a capacidade de deformação do material diretamente relacionada a sua capacidade de afinamento, enquanto que o punção na forma de uma elipse profunda que, por sua vez joga os pontos ou para o estiramento (se utilizada a chapa de 200 x 200 mm) ou para o embutimento profundo (quando utilizada a chapa de 125 x 200 mm), submete a chapa a sofrer uma deformação mais severa na espessura (no caso do estiramento) ou em relação ao eixo menor de deformação (para o embutimento profundo) respectivamente.

No caso dos punções cilíndrico e na forma de uma elipse extra profunda, onde o nível máximo de deformação atingido foi reduzido, conclui-se que, pela maior concentração de tensões gerada no material, a chapa tende sofrer um afinamento localizado, não permitindo que se atinja níveis mais elevados de deformações no plano da chapa.

6.2 Trabalhos futuros

Com base nos resultados obtidos nesta pesquisa, pode-se dizer que o trabalho foi bastante abrangente em termos experimentais, ficando abertas, no entanto, novas possibilidades de realização pesquisas futuras na área de estampagem, tais como:

- Estudo da influência da lubrificação nos ensaios de estampagem Nakajima, avaliando o seu efeito na estampagem com as diferentes geometrias de ferramentas de ensaio;
- Realização de ensaios segundo o método de Marciniak, para análise comparativa com o método de ensaio Nakajima;

- Estudo relativo a velocidade de estampagem no ensaio Nakajima, afim de se verificar como esta variável afeta a estampabilidade do material;
- Desenvolvimento de um softwere para captação e apresentação dos resultados de ensaio, de acordo com as possibilidades do laboratório de Conformação Mecânica da UFPR, apesar de existirem outros modelos disponíveis no mercado.

CAPÍTULO 7

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BORSOI, C. A.; HENNIG, R.; SCHAEFFER, L. *Novo teste tecnolõgico no LdTM para a melhor determinação da conformabilidade de chapas metálicas*. III Conferência Nacional de Conformação de Chapas. Porto Alegre: Brasil, p. 50-59, 2000.

BORSOI, C. A.; HENNIG, R.; SCHAEFFER, L.; CRIVELLARO, R. S. *Análise da conformabilidade de chapas para a indústria de estampagem*. IV Conferência Nacional de Conformação de Chapas. Porto Alegre: Brasil, p. 80-90, 2001.

BOYLES, M. W., CHILCOTT, H. S. *Recent developments in the use of the stretch-draw test".* Sheet Metal Industries, 1982, p. 149 – 156.

DIETER, G. E. *Metalurgia mecânica*. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 2a ed., 1981.

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

HABERFIELD, B., BOYLES, M. W. *Modern concepts of sheet metal formability.* Metallurgist and Materials Technologist. 1975, p. 453 – 456.

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

HILL, R. *The mathematical theory of plasticity*. Oxford Press, 1952.

KEELER, S. P. *Determination of the forming limits in automotive stamping*. Sheet Metal Industries, v. 42, p. 683-691, 1965.

KEELER, S. P. Properties related to forming. *Understanding sheet metal formability*. Machinery, v.74, n. 8, p. 94-103, apr. 1968.

KEELER, S. P. *The enhanced FLC effect*. The Auto/Steel Partnership Enhanced Forming Limit Diagram Project Team, Southfield, jan. 2003.

KEELER, S. P. The state of the art. *Understanding sheet metal formability*. Machinery, v.74, n. 6, p. 88-95, fev. 1968.

KEELER, S. P. Visible strain patterns. *Understanding sheet metal formability*. Machinery, v.74, n. 7, p. 94-101, mar. 1968.

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

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

MARCINIAK, Z.; KUCZYNSKI, K. *Limit strains in the process of strch-forming sheet metals*. International Journal of Mechanical Sciences, p. 609-620, 1967.

MOREIRA, L. P.; SAMPAIO, A. P.; FERRON, G.; LACERDA, A. C. *Análise numérica e experimentação da influência da espessura inicial nas deformações limites em chapas*. VI Conferência Nacional de Conformação de Chapas, p. 39-49, 2003.

NAKAZIMA, K.; KIKUMA, T.; HASUKA, K. *Study on formability of steel sheets*. Yawata Tech. Rep. n. 264, p. 141, 1968.

RICHTER, A. *Comparação dos resultados de diferentes testes para a determinação da curva limite de conformação*. VI Conferência Nacional de Conformação de Chapas, p. 24-29, 2003.

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*. 1a Conferência Nacional de Conformação de Chapas, p. 89-99, 1998.

SCHAEFFER, L. *Conformação mecânica*. Porto Alegre: Editora da UFRS, 1999.

SOUZA, S. A. *Ensaios mecânicos de materiais metálicos*. Edgard Blucher, 1974.

SROUR, E. H. *Determinação do grau de conformabilidade de chapa de aço para suporte de coluna de direção e identificação de similar nacional*. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Paraná, dez. 2002.

USIMINAS. *Conformação na prensa*. Usiminas, n. 6, 1999.

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

WOODTHORPE, J., PEARCE, R. *The effect of r and n upon the forming limit diagrams of sheet metal.* Sheet Metal Industries. 1969, p. 1061 – 1067.

NORMAS TÉCNICAS:

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

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

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

DIN EN 10002. “Ensaio de tração”.

DIN EN 10152. “Produtos Planos de Aço, Eletrolíticamente Zincados e Laminados a Frio”, 1993.

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

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