

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA
E ENGENHARIA DE MATERIAIS

**ANÁLISE DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM DE CHAPAS DE
AÇO ATRAVÉS DA CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO**

ALEXANDRE LUNDGREN BASTOS

FLORIANÓPOLIS, DEZEMBRO DE 2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

ALEXANDRE LUNDGREN BASTOS

**ANÁLISE DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM DE CHAPAS DE
AÇO ATRAVÉS DA CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA
CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO
GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS

FLORIANÓPOLIS, DEZEMBRO DE 2009

ANÁLISE DO PROCESSO DE ESTAMPAGEM DE CHAPAS DE AÇO ATRAVÉS DA CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO

ALEXANDRE LUNDGREN BASTOS

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA PARA OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE MESTRE EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE
MATERIAIS

ESPECIALIDADE CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS E
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE
MATERIAIS

Prof. DSc. Carlos Augusto Silva de Oliveira
Orientador e Coordenador do curso

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Carlos Enrique Niño Bohórquez - UFSC

Prof. Dr. Rolf Bertrand Schroeter - UFSC

Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha - USP

À minha esposa
À minha mãe, in memoriam
Ao meu pai
Aos meus irmãos

AGRADECIMENTOS

A Deus que me deu forças e persistência.

À minha mãe, Maria de Fátima Lundgren, in memoriam, pelo amor, carinho e incentivo que me levaram a cursar engenharia e tornou possível a minha formação como mestre em engenharia.

Ao meu pai, Garibaldi Monteiro Bastos, pelos seus esforços para dar o direito a uma educação de qualidade, o que contribuiu para minha formação como mestre em engenharia.

Aos meus irmãos, Frederico, Gustavo e Victor, pelo carinho, conselhos e incentivos.

À minha esposa Beatriz, pela paciência, compreensão, amor e carinho.

À minha sogra, Terezinha, e meu sogro, Ari, pelos incentivos.

Ao Professor Carlos Augusto Silva de Oliveira, pela orientação, ensino, incentivo e oportunidade de desenvolvimento deste trabalho.

À Universidade Federal de Santa Catarina, pela oportunidade de realização deste curso e obtenção do grau de mestre.

Aos bolsistas do laboratório de conformação mecânica - UFSC, pelo auxílio na realização dos ensaios Nakazima.

Aos colegas e aos amigos pelo convívio e apoio durante esta etapa da minha vida.

E a todos aqueles que, de forma direta ou indireta, contribuíram para a realização deste trabalho.

"Fale, e eu esquecerei;
Ensine-me, e eu poderei lembrar;
Envolva-me, e eu aprenderei."
(Benjamin Franklin)

RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo aplicar na indústria de eletrodomésticos da linha branca uma metodologia para avaliação do processo de estampagem de chapas de aço que auxilie a seleção do grau de estampagem e parâmetros de processo mais adequados a aplicações específicas. Esta metodologia foi adaptada a partir da metodologia já largamente difundida na indústria automobilística, e consiste no estudo das propriedades mecânicas (limite de escoamento, limite de resistência, razão elástica, alongamento total, coeficiente de encruamento, coeficientes de anisotropia normal e planar, dureza, rugosidade) e de ensaios simulativos (Curvas Limite de Conformação - CLC's) buscando o melhor equilíbrio entre o atendimento aos requisitos de produto e as necessidades do processo. O trabalho foi dividido em três etapas principais: i) caracterização das propriedades mecânicas dos materiais selecionados; ii) obtenção em laboratório das CLC's e iii) levantamento das distribuições das deformações em duas peças específicas para avaliação do efeito da força de sujeição, do tipo de lubrificação, da geometria do *blank* e do revestimento de zinco. Para tal trabalho foram selecionados três aços com graus de estampagem distintos (qualidade comercial - QC, estampagem extra-profunda - EEP e estampagem extra profunda para peça crítica eletrogalvanizada – EEP-PC EG). Para cada grau de estampagem foram obtidas suas respectivas CLC's, considerando as possíveis variações entre lotes distintos de um mesmo grau de estampagem. Para este trabalho, foram também selecionadas duas peças estampadas (painel estufa e painel forno), a partir de um critério que considerou o histórico de quantidade de falhas durante o processo de fabricação. Foram então obtidas as distribuições das deformações para estas duas peças, utilizando os três aços, em diversas condições de processo, onde foram manipulados controladamente o tipo de lubrificação e a força do prensa chapas. O maior limite de conformação do aço EEP-PC EG e o menor do aço QC, foram evidenciados tanto pela análise das propriedades mecânicas quanto das CLC's. Para o aço EEP, a análise das propriedades mecânicas indicou um limite de conformação nas operações de estiramento menor que o aço EEP-PC EG, o que foi confirmado na análise das CLC's. Já para a região de embutimento, as análises divergiram. Os efeitos da força de sujeição e do tipo de lubrificação foram determinantes na eliminação

dos defeitos associados com a estampagem, quando o aço era adequado aquela aplicação.

Palavras-chave: Estampabilidade, CLC, Conformação de chapas

ABSTRACT

This work had as objective to apply in home appliances industry a methodology to evaluate the sheet metal forming process that aids the selection of steel forming grade and process parameters suitable to specific applications. This methodology was adapted from the methodology already widely applied in the automobile industry, and it consists about mechanical properties study (yield strength, tensile strength, tensile/yield ratio, total elongation, strain-hardening index, normal and planar plastic anisotropy ratio, hardness, roughness) and simulative tests analysis (forming limit diagrams – FLD's) looking for the best balance between fulfillment the product requirements and the process needs. The work was divided in three main steps: i) mechanical properties characterization for the selected materials; ii) FLD's attainment in laboratory and iii) strain distributions attainment in two specific parts to evaluate the effect of the blank-holder force, type of lubrication, blank geometry and zinc coating. For such work three steels were selected with different forming grades (cold rolled commercial quality - CRCQ, cold rolled extra deep drawing quality - CR-EDDQ, and electrogalvanized extra deep drawing plus – EG-EDDQ+). For each forming grade its respective FLD's were obtained, considering the variation between different batches of the same steel. For this work, there were also selected two stamped parts (stove panel and range panel), from a criterion that considered the historical amount of failures during manufacturing. The strain distributions had been obtained for these two parts, using the three steels, in several process conditions, where were manipulated the type of lubrication and blank-holder force. The highest forming limit of the steel EG-EDDQ+ and the lowest of the steel CRCQ were shown up by both analysis (mechanical properties and FLD's). For the steel CR-EDDQ, the mechanical properties analysis indicated a forming limit in stretching operations lower than the steel EG-EDDQ+, which was confirmed by FLD analysis. However on drawing operations the analyses disagreed. The effects of the blank-holder force and type of lubrication were decisive in the elimination of defects associated with stamping, only if the steel was suitable to that application.

Key words: Formability, FLD, Sheet metal forming

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	27
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	31
2.1 O processo de estampagem.....	31
2.2 Operações de estampagem.....	31
2.2.1 Corte.....	32
2.2.2 Dobramento.....	32
2.2.3 Estiramento	33
2.2.4 Embutimento.....	34
2.2.5 Cunhagem	34
2.3 Comportamento mecânico da chapa na estampagem	35
2.3.1 Distribuição das deformações	36
2.3.2 Modos de deformação	37
2.3.3 Identificação dos modos de deformação nas operações de estampagem.....	43
2.4 A estampabilidade	46
2.4.1 Lubrificante	47
2.4.2 Força de sujeição.....	50
2.4.3 Velocidade de deformação.....	51
2.4.4 Tamanho e geometria do blank	52
2.4.5 Geometria do ferramental.....	54
2.4.6 Revestimento de zinco	55
2.4.7 Avaliação da estampabilidade das chapas através das propriedades mecânicas	56
2.4.8 Ensaaios simulativos	65
2.5 Curva Limite de Conformação (CLC).....	67
2.5.1 Fatores que influenciam a CLC.....	70
2.5.2 Determinação da CLC.....	74
2.6 Aços para estampagem	79
2.6.1 Chapas laminadas a frio para estampagem.....	79

3. METODOLOGIA E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	81
3.1 Metodologia.....	81
3.2 Procedimentos Experimentais	84
3.2.1 Ensaio de Dureza	84
3.2.2 Ensaio de tração para determinação das propriedades mecânicas.....	84
3.2.3 Determinação da CLC.....	86
3.2.4 Determinação da Distribuição das Deformações	88
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	95
4.1 Resultados dos ensaios de tração e dureza	95
4.2 Análise das CLC's.....	102
4.3 Determinação da Distribuição das Deformações na Estampagem das Peças.....	110
4.3.1 Experimento 1.....	110
4.3.2 Experimento 2 - Efeito das diferenças de geometria do ferramental	122
4.3.3 Experimento 3 – Efeito do revestimento zinco pelo processo eletrolgalvanização	130
4.3.4 Experimento 4 - Efeito da geometria do <i>blank</i>	132
5. CONCLUSÕES	135
6. SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS	139
REFERÊNCIAS	141

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Diagrama relacionando os fatores que influenciam a estampagem [Adaptado de Plaut, 2005].....	28
Figura 2.1 – Esquema operação de corte por cisalhamento [<i>Metals Handbook</i> ASM, 1993].....	32
Figura 2.2 – Dobramento (a) em eixo reto (b) e (c) em eixo curvo [<i>Metals Handbook</i> ASM, 1993].....	33
Figura 2.3 – Estiramento [<i>Metal Forming Handbook</i> Schuler, 1998]...	33
Figura 2.4 – <i>Emboss</i> [<i>Metal Forming Handbook</i> Schuler, 1998].	33
Figura 2.5 – Embutimento [<i>Metal Forming Handbook</i> Schuler, 1998].	34
Figura 2.6 – Região qualquer de uma chapa plana (a) sem deformação; (b) deformada [Marciniak, 2002].....	35
Figura 2.7 – Diagrama de deformações [Marciniak, 2002].....	37
Figura 2.8 – Diagrama das deformações principais representando os diferentes modos de deformação, correspondentes às diferentes razões de deformação [Marciniak, 2002].....	38
Figura 2.9 – Diagrama das tensões principais representando os diferentes modos de deformação, correspondentes às diferentes razões de tensão [Marciniak, 2002].....	39
Figura 2.10 – Estiramento equi-biaxial em um domo estirado [Marciniak, 2002].....	40
Figura 2.11 – Deformação plana na parede lateral de um perfil longitudinal [Marciniak, 2002].	40
Figura 2.12 – Tração uniaxial na aresta de um furo extrudado [Marciniak, 2002].....	41
Figura 2.13 – Embutimento no flange de um copo obtido por embutimento profundo [Marciniak, 2002].	42
Figura 2.14 – Compressão uniaxial na extremidade do flange de um copo obtido por embutimento profundo [Marciniak, 2002].....	42
Figura 2.15 – Modos de deformação presentes num copo obtido por embutimento [Adaptado de Folle, 2008].....	44
Figura 2.16 – Desenho esquemático da variação da espessura de um copo embutido [Caddell e Hosford, 2007].	46

Figura 2.17 – Atrito recomendado nas diferentes regiões (flange, raio da matriz e raio do punção), conforme o modo de deformação [Tigrinho, 2005].	48
Figura 2.18 – Perfis de distribuição das deformações obtidas no estiramento, com e sem lubrificação do punção [Keeler, 1965].	49
Figura 2.19 – Janela de conformação para um copo de paredes cônicas. Para a profundidade de 50 mm, a força do prensa chapas deve estar entre 30 e 80 kN [Adaptado de Hosford, 2007].	51
Figura 2.20 – <i>Blank</i> desenvolvido para peça com geometria retangular [Metals Handbook ASM, 1993].	53
Figura 2.21 – (a) <i>Blank</i> com cantos retos. (b) <i>Blank</i> com cantos arredondados [Lange, 1993].	53
Figura 2.22 – Distribuição das deformações das peças da figura 2.21 associadas à CLC do material [Lange, 1993].	54
Figura 2.23 – Efeito da camada de revestimento na queda do valor “r” de Lankford de aços revestidos com zinco [Pereira, Alvarenga e Barcelos, 1995].	56
Figura 2.24 – Curva esquemática da tensão verdadeira x deformação verdadeira para materiais com diferentes valores de n [Keeler, 2003].	60
Figura 2.25 – Representação das principais direções avaliadas para o cálculo da anisotropia plástica. [SME Handbook, 1978].	62
Figura 2.26 – Efeito do percentual de redução a frio na anisotropia normal para dois aços [Lange, 1993].	64
Figura 2.27 – Desenho esquemático dos ensaios: (a) Erichsen [Schaeffer, 1999]; (b) Swift [Swift, 1952].	66
Figura 2.28 – Ferramental do ensaio Fukui [Frommann, 1968].	66
Figura 2.29 – CLC para vários materiais metálicos [Sheet Metal Forming - Tecnologie Industriali - Department of Mechanical Engineering - University of Calabria].	68
Figura 2.30 – CLC e a janela de conformação [Holmberg et al, 2003].	69
Figura 2.31 – (a) Efeito do valor de n na CLC; (b) Efeito na CLC decorrente do aumento de n e redução da deformação após início da estricção [Marciniak, 2002].	70
Figura 2.32 – Efeito da espessura e coeficiente de encruamento, na CLC [Hosford, 2007].	72
Figura 2.33 – Efeito de m na CLC [Marciniak, 2002].	72

Figura 2.34 – Efeito da magnitude dos defeitos na CLC [Marciniak, 2002].	73
Figura 2.35 – Ferramental do ensaio Nakazima, sendo 1 a camada de lubrificação [Nakazima, 1968].	75
Figura 2.36 – Ferramental do ensaio Marciniak [ISO/WD 12004].	76
Figura 2.37 – Simulação de diversos modos de deformação para construção da CLC [Klein, 1981].	76
Figura 3.1 – Representação da aplicação das peças utilizados neste estudo.	82
Figura 3.2 – Corpo de prova para o ensaio de tração – Dimensões em mm.	85
Figura 3.3 – Ferramental do ensaio Nakazima	87
Figura 3.4 – Medição dos diâmetros dos círculos deformados nos corpos-de-prova do ensaio Nakazima.	88
Figura 3.5 – Regiões analisadas no painel estufa	92
Figura 3.6 – Regiões analisadas no painel forno	93
Figura 3.7 – Representação das localizações dos diferentes modos de deformação.	93
Figura 4.1 – Correlação entre dureza e LR.	97
Figura 4.2 – Deformações obtidas no ensaio Nakazima para aço EEP lote D.	103
Figura 4.3 – CLC's dos aços QC (lote 1 e lote 2).	104
Figura 4.4 – Deformações obtidas no ensaio Nakazima para aço QC lote 2.	106
Figura 4.5 – CLC's dos aços EEP (lote A, B e D).	106
Figura 4.6 – Comparativo das CLC's aços QC, EEP e EEP-PC.	108
Figura 4.7 – Defeitos de estampagem analisados: (a) Estricção; (b) Fratura; (c) Distorção de forma; (d) Enrugamento.	110
Figura 4.8 – Distribuição das deformações do painel estufa estampado com o aço QC – Tratamentos 1 a 5.	112
Figura 4.9 – Distribuição das deformações do painel estufa estampado com o aço EEP – Tratamentos 6 a 9.	114
Figura 4.10 – Distribuição das deformações do painel estufa estampado com o aço EEP-PC EG – Tratamentos 10 a 13.	117
Figura 4.11 – Distribuição das deformações do painel forno estampado com o aço QC - Tratamentos 14 a 16.	118

Figura 4.12 – Representação do grau das fraturas que ocorreram nos tratamentos 14 a 16.	118
Figura 4.13 – Distribuição das deformações do painel forno estampado com o aço EEP – Tratamentos 17 a 19.	119
Figura 4.14 – Distribuição das deformações do painel forno estampado com o aço EEP-PC EG – Tratamentos 20 a 23.	121
Figura 4.15 – Distribuição das deformações do painel forno estampado com o aço EEP, força de sujeição 118 kN e <i>blank</i> lubrificado. Seleção dos círculos por região e localização para avaliação dos modos de deformação presentes.	123
Figura 4.16 – Distribuição das deformações do painel forno estampado com o aço EEP, força de sujeição 196 kN e <i>blank</i> lubrificado. Seleção dos círculos por região e localização para avaliação dos modos de deformação presentes.	125
Figura 4.17 – Distribuição das deformações do painel forno estampado com o aço EEP-PC EG, força de sujeição 196 kN e <i>blank</i> sem lubrificação. Seleção dos círculos por região e localização para avaliação dos modos de deformação presentes.	126
Figura 4.18 – Distribuição das deformações do painel forno estampado com o aço EEP-PC EG, força de sujeição 343 kN e <i>blank</i> sem lubrificação. Seleção dos círculos por região e localização para avaliação dos modos de deformação presentes.	128
Figura 4.19 – Distribuição das deformações do painel forno estampado com o aço EEP-PC EG, força de sujeição 343 kN e <i>blank</i> com lubrificação. Seleção dos círculos por região e localização para avaliação dos modos de deformação presentes.	130
Figura 4.20 – Distribuição das deformações do painel forno estampado a partir de <i>blanks</i> do aço EEP-PC EG, com lubrificação e aplicação de força de sujeição de 235 kN para avaliação do efeito do revestimento de zinco.	131
Figura 4.21 – Distribuição das deformações do painel forno estampado a partir de <i>blanks</i> do aço EEP com lubrificação e aplicação de força de sujeição de 196 kN para avaliação do efeito da geometria do <i>blank</i>	133

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Valores orientativos para velocidade de deformação para diversos materiais [Grüning, 1975].....	52
Tabela 3.1 – Aços utilizados neste trabalho	83
Tabela 3.2 – Valores composição química conforme normas e encontrados nos materiais utilizados.....	83
Tabela 3.3 – Propriedades Mecânicas conforme NBR's 05915 e 06658	84
Tabela 3.4 – Tratamentos simulados no Experimento 1 para determinação das distribuições das deformações.....	90
Tabela 3.5 – Tratamentos simulados no Experimento 2 para determinação das distribuições das deformações.....	91
Tabela 3.6 – Fatores e níveis simulados no Experimento 3 para determinação das distribuições das deformações.....	91
Tabela 3.7 – Fatores e níveis simulados no Experimento 4 para determinação das distribuições das deformações.....	91
Tabela 4.1 – Valores obtidos para as propriedades mecânicas.....	95
Tabela 4.2 – Resultados obtidos para o coeficiente de encruamento, n , nas 3 direções e médio.	99
Tabela 4.3 – Resultados obtidos para o coeficiente de anisotropia nas 3 direções, valores calculados de \bar{r} e Δr	100
Tabela 4.4 – Resultados inspeção visual para identificação de defeitos de estampagem do experimento 1.	111
Tabela 4.5 – Resultados da inspeção visual para identificação de defeitos de estampagem no experimento 2.	122
Tabela 4.6 – Resultados inspeção visual para identificação de defeitos de estampagem no experimento 3.....	132
Tabela 4.7 – Resultados inspeção visual para identificação de defeitos de estampagem no experimento 4.....	133

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

α	Razão de tensão
β	Razão de deformação
β'	Relação de embutimento
ε	Deformação verdadeira
ε_l	Deformação verdadeira na direção do comprimento
ε_t	Deformação verdadeira na direção da espessura
ε_w	Deformação verdadeira na direção da largura
ε_1	Deformação principal maior
ε_2	Deformação principal menor
ε_3	Deformação principal na direção da espessura
$\dot{\varepsilon}$	Taxa de deformação
μ	Coefficiente de atrito
σ	Tensão verdadeira
σ_1	Tensão principal na direção de maior deformação
σ_2	Tensão principal na direção de menor deformação
σ_3	Tensão principal na direção da espessura
σ_{rup}	Tensão de ruptura
A_{pc}	Área do prensa chapas
C	Coefficiente de severidade
D_0	Diâmetro inicial do <i>blank</i>
D_1	Diâmetro do punção
d_0	Diâmetro inicial
d_1	Diâmetro elipse eixo maior
d_2	Diâmetro elipse eixo menor
E	Módulo de elasticidade
F_{pc}	Força prensa chapas (ou força de sujeição)
K	Coefficiente de resistência
LE	Tensão limite de escoamento
LR	Tensão limite de resistência à tração
m	Expoente de sensibilidade à taxa de deformação
n	Coefficiente de encruamento
P_{pc}	Pressão do prensa chapas (ou pressão de sujeição)
r	Coefficiente de anisotropia
\bar{r}	Coefficiente de anisotropia normal

Δr	Coeficiente de anisotropia planar
r_0	Coeficiente de anisotropia na direção de laminação
r_{90}	Coeficiente de anisotropia a 90° da direção de laminação
r_{45}	Coeficiente de anisotropia a 45° da direção de laminação
t_0	Espessura inicial
Along	Alongamento total
CLC	Curva limite de conformação
DL	Direção de laminação
EG	Revestimento de zinco por eletro galvanização
EM	Estampagem Média
EP	Estampagem Profunda
EEP	Estampagem Extra-Profunda
EEP-PC	stampagem Extra-Profunda Peça Crítica
EEP-IF	Estampagem Extra-Profunda Livre de Interstícios
GI	Revestimento de zinco puro com cristais minimizados
GA	Revestimento Zn-Fe
HDG	<i>Hot dip galvanized</i> (Galvanizado por imersão a quente)
HRB	Dureza Rockwell B
MP	Matéria prima
NBR	Norma técnica brasileira
PE	Polietileno
QC	Qualidade comercial

1. INTRODUÇÃO

A estampagem é o processo de transformação de uma chapa plana em uma peça com uma geometria de acordo com uma especificação de produto, pela ação de uma matriz e um punção. A ocorrência de defeitos como fratura, estrição, empenamento, enrugamento e distorção de forma são relativamente comuns durante a estampagem, mas são indesejáveis, pois levam ao descarte das peças.

Se por um lado a seleção de um material com elevado grau de estampagem aumenta a probabilidade de ter a operação de estampagem bem sucedida, por outro lado, o material representa uma fração elevada no custo total dos produtos, de modo que para reduzir os custos, otimizações dos materiais utilizados e dos processos de estampagem se fazem necessários para aumentar a competitividade do negócio. Deste modo, pequenas diferenças nas propriedades do material, condições do ferramental e prensas, lubrificação, parâmetros como velocidade e força de prensagem podem causar mudanças consideráveis no processo, demandando experiência e habilidade para realizar a avaliação do processo de estampagem.

Realizar uma análise do processo de estampagem somente através das propriedades mecânicas do material pode levar a um resultado insatisfatório, pois estariam sendo desconsiderados diversos fatores que influenciam a estampagem, fatores estes que são mostrados no diagrama de Ishikawa, figura 1.1.

Identificar e interpretar o modo de deformação o qual está diretamente sujeita determinada peça estampada nas condições reais do processo industrial pode ajudar no diagnóstico dos modos de falha, inerentes ao processo de estampagem, relacionados no diagrama da figura 1.1

Neste contexto, a obtenção da curva de limite conformação do material pode ser interessante. Ela corresponde ao lugar geométrico dos pontos de máxima deformação de uma chapa metálica submetida aos diversos modos de deformação possíveis. Conhecer a curva limite de conformação (CLC) e a distribuição das deformações característica de cada peça é importante para que os fatores de processo sejam definidos de tal forma que a deformação que ocorrerá durante a operação industrial não exceda ao percentual seguro de deformação, assim garantindo a qualidade da peça final.

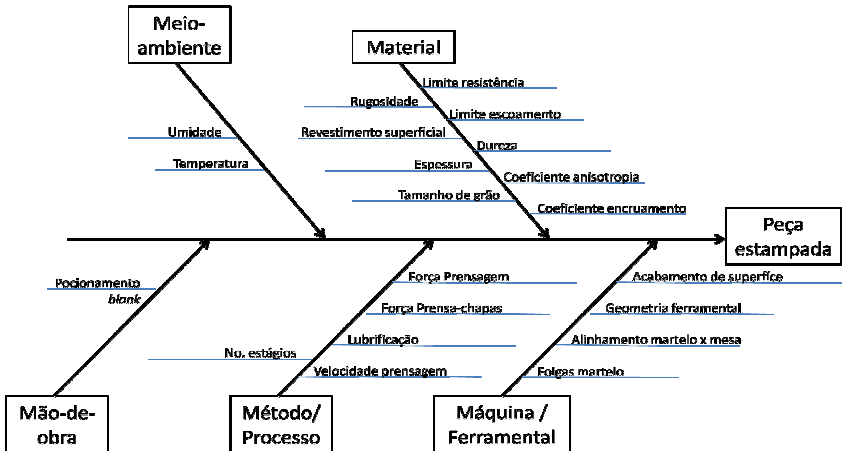


Figura 1.1 – Diagrama relacionando os fatores que influenciam a estampagem [Adaptado de Plaut, 2005].

A partir de uma CLC e da distribuição das deformações, ainda podem ser obtidos:

- Conhecimento da margem de segurança na estampagem de peças, sem que ocorra a falha do material na prensa;
- Conhecimento preciso do(s) ponto(s) crítico(s) para a estampagem de determinada peça;
- Conhecimento da severidade dos parâmetros de operação (força no prensa chapas, lubrificação, velocidade de prensagem) bem como condições de operação (acabamento de superfície do ferramental, homogeneidade da geometria do ferramental, paralelismo entre martelo e mesa da prensa, distribuição homogênea da força pelo prensa chapas);
- Efeito das propriedades do metal lote a lote, sobre a margem de segurança na fabricação da peça estampada.

O objetivo deste estudo, portanto, foi aplicar na indústria da linha branca uma metodologia já aplicada na indústria automobilística, que consiste da análise do processo de estampagem através da CLC e das distribuições das deformações, adequando-a às características peculiares da indústria da linha branca. Diferentes aços e espessuras foram estudados, bem como os fatores de processo que influenciam fortemente a estampagem, entre eles, força de sujeição, tipo de lubrificação e geometria do *blank*. As principais ferramentas utilizadas durante este estudo foram a CLC e a distribuição das deformações, que forneceram

dados essenciais para caracterização dos processos de estampagem, permitindo a seleção do material mais adequado e a otimização dos parâmetros de processo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada uma revisão sobre o processo de estampagem e suas operações, bem como sobre o comportamento mecânico da chapa durante a estampagem. Os fatores e propriedades relacionados com a estampabilidade e os ensaios para determinação da estampabilidade também serão abordados neste capítulo, com um enfoque maior para a CLC e a distribuição da deformação.

2.1 O processo de estampagem

O processo de estampagem, ou conformação de chapas planas, teve origem no século 18, quando se desenvolveu um método de fabricação de copos e painéis em larga escala e com custos mais baixos que os métodos artesanais, utilizando-se o princípio de moldes machos e fêmeas. Desde então, vem evoluindo continuamente, existindo hoje fábricas automatizadas produzindo peças de elevada complexidade e em série. No entanto, o seu desenvolvimento continua sendo um grande desafio, para técnicos e engenheiros [Tenório, 2005].

O processo de estampagem pode ser simples, como o realizado através de uma única operação de dobra, ou uma sequência de operações complexas como, por exemplo, na fabricação de painéis externos de automóveis.

2.2 Operações de estampagem

As operações de estampagem são bastante diversas e impactadas por vários fatores, de modo que testes simples não conseguem fornecer indicações precisas a respeito da estampabilidade das chapas. Existem muitas operações complexas de estampagem, porém todas consistem de combinações ou seqüências das operações básicas de corte, dobramento, estiramento, embutimento e cunhagem [*Metals Handbook* ASM, 1993].

As operações de corte, dobramento e cunhagem não são o objetivo deste estudo e por este motivo será somente apresentada uma breve descrição destas operações.

2.2.1 Corte

Como as chapas são usualmente fornecidas em bobinas, a primeira operação é cortá-las em *blanks*. A operação básica de corte está ilustrada na figura 2.1. Pode-se observar que este é um processo complexo de cisalhamento plástico e fratura, e que o material na aresta cortada tende a sofrer encruamento localizado. Este efeito pode causar dificuldades nas operações subseqüentes [Metals Handbook ASM, 1993].

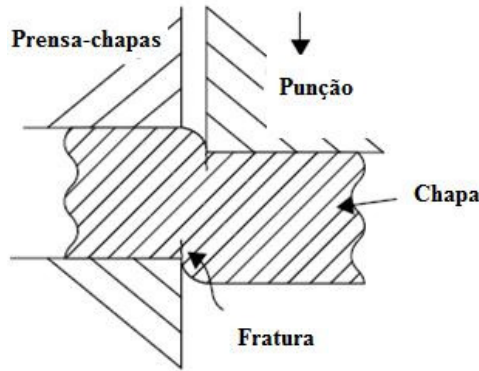


Figura 2.1 – Esquema operação de corte por cisalhamento [Metals Handbook ASM, 1993].

2.2.2 Dobramento

É a operação de estampagem mais comum. Pode ser executado ao longo de um eixo reto, conforme figura 2.2a, ou curvo, conforme figuras 2.2b e 2.2c. Quando executado ao longo de um eixo reto, a deformação plástica ocorre apenas na região dobrada, portanto, no raio. Quando executado ao longo de um eixo curvo, deformações plásticas também ocorrem nas regiões adjacentes ao raio. A maior dificuldade deste processo é atingir a precisão e repetibilidade no ângulo da dobra, já que o retorno elástico é neste caso bastante considerável. A orientação da chapa em relação à direção de laminação é muito importante numa operação de dobramento, uma vez que as propriedades podem variar consideravelmente em função da direção [Metals Handbook ASM, 1993].

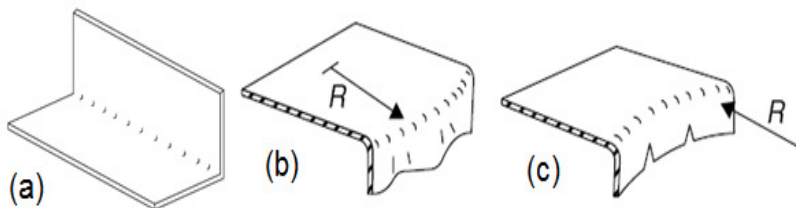


Figura 2.2 – Dobramento (a) em eixo reto (b) e (c) em eixo curvo [Metals Handbook ASM, 1993].

2.2.3 Estiramento

Cria formas ou cavidades em chapas metálicas, de modo que a área superficial aumenta e conseqüentemente, pela conservação de massa, a espessura do material é reduzida, conforme desenho esquemático da figura 2.3 [Metal Forming Handbook Schuler, 1998].

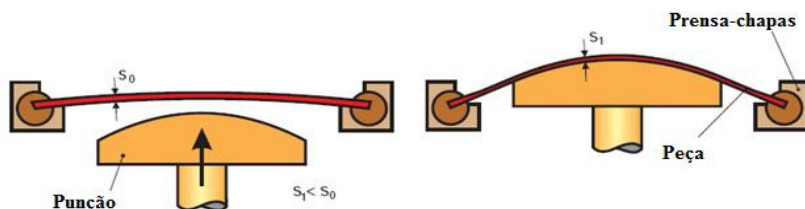


Figura 2.3 – Estiramento [Metal Forming Handbook Schuler, 1998].

O *emboss*, representado na figura 2.4, é considerado uma versão mais branda do estiramento, e consiste na criação de uma impressão, sendo que a profundidade desta é pequena quando comparada às demais dimensões da peça [Tenório, 2005].

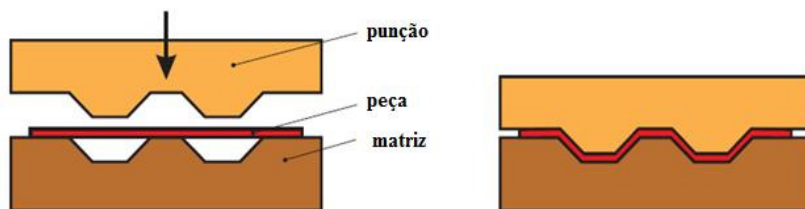


Figura 2.4 – Emboss [Metal Forming Handbook Schuler, 1998].

2.2.4 Embutimento

É a operação de estampagem que ocorre sob forças de compressão e tração, no qual não se deseja o afinamento da parede. O exemplo mais simples é a estampagem de um copo cilíndrico como o da figura 2.5. O embutimento é realizado por meio de um punção, uma matriz e um prensa chapas para evitar que haja enrugamento no flange quando o material está fluindo para dentro da matriz pela ação do punção. Também a relação entre as forças exercidas pelo punção e pelo prensa chapas é muito importante na formação de rugas. A lubrificação também é importante, já que a chapa deve deslizar entre a matriz e o prensa chapas. O estiramento sob o punção é pequeno e grande parte da deformação está no flange, e como esta ocorre sob tensões de compressão, grandes deformações podem ser obtidas e é possível conformar um copo com a altura igual ou até ligeiramente maior que o diâmetro do mesmo [*Metal Forming Handbook Schuler, 1998* e *Metals Handbook ASM, 1993*].

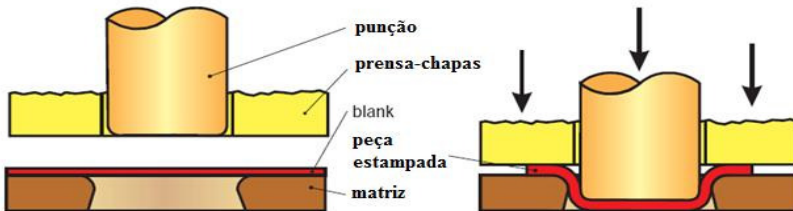


Figura 2.5 – Embutimento [*Metal Forming Handbook Schuler, 1998*].

2.2.5 Cunhagem

Ocorre quando o material metálico é comprimido entre duas matrizes. É extensamente usado na fabricação de moedas e partes com superfícies semelhantes como talheres. Tem como vantagens os bons níveis de planicidade atingidos e a redução do retorno elástico. Na maioria das operações que envolvem estiramento e embutimento, a cunhagem é indesejável, pois ela restringe o movimento do material, concentra deformação e produz superfícies irregulares. Muitos dos ajustes de ferramentais consistem na localização e eliminação de regiões de cunhagem.

2.3 Comportamento mecânico da chapa na estampagem

Como o objetivo deste estudo é a avaliação do processo de estampagem de peças obtidas principalmente através das operações de embutimento e estiramento, o estudo do comportamento mecânico da chapa será direcionado para estas duas operações.

Para melhor explicar o comportamento mecânico das chapas durante o embutimento e o estiramento, pode-se considerar uma região qualquer de uma chapa plana, inicialmente de espessura t_0 , e marcada com uma rede de círculos de diâmetro d_0 , conforme mostrado na figura 2.6(a). Após a deformação desta chapa pela ação das tensões principais σ_1 e σ_2 , os círculos irão deformar-se em elipses de eixo maior e menor d_1 e d_2 , respectivamente, conforme mostrado na figura 2.6(b) [Marciniak, 2002].

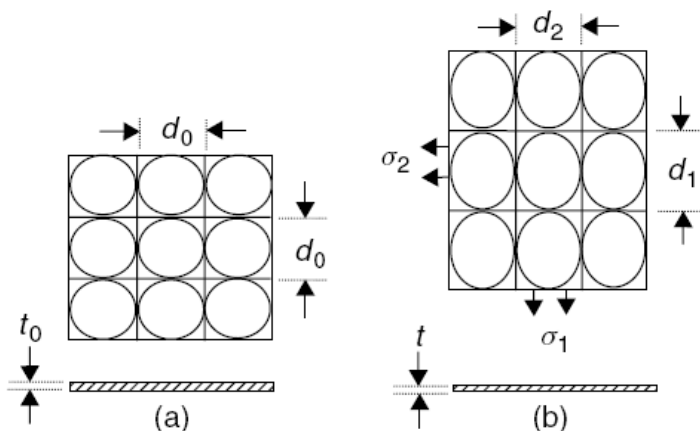


Figura 2.6 – Região qualquer de uma chapa plana (a) sem deformação; (b) deformada [Marciniak, 2002].

Portanto, as tensões são:

$$\sigma_1; \quad \sigma_2 = \alpha \sigma_1; \quad \sigma_3 = 0 \quad (2.1)$$

Uma característica comum ao embutimento e estiramento, é que a tensão perpendicular à superfície da mesma, σ_3 , é muito pequena em comparação com as tensões presentes no plano da chapa, σ_1 e σ_2 , devido à pressão de contato entre a chapa e o ferramental de estampagem ser

muito menor que o limite de escoamento do material. Portanto, pode-se assumir que esta tensão normal é igual a zero e tem-se então um estado plano de tensões [Marciniak, 2002].

Já as deformações principais desenvolvidas são:

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{d1}{d0}; \quad \varepsilon_2 = \ln \frac{d2}{d0}; \quad \varepsilon_3 = \ln \frac{d3}{d0} \quad (2.2)$$

Sendo que estas também podem ser descritas em termos da razão de deformação β :

$$\varepsilon_1; \quad \varepsilon_2 = \beta \varepsilon_1; \quad \varepsilon_3 = -(1 + \beta) \varepsilon_1 \quad (2.3)$$

2.3.1 Distribuição das deformações

No estudo de qualquer processo, geralmente primeiro se determina a deformação sobre a peça. Isto pode ser feito medindo-se uma grade impressa na superfície da chapa após a estampagem, conforme figura 2.6(b). Um exemplo é o embutimento representado na figura 2.7(a). Como o processo é simétrico em torno de seu eixo, podem ser consideradas as deformações nos pontos sobre a linha como mostrada na figura 2.7(b). Representando estas deformações no espaço das deformações principais, figura 2.7(c), obtém-se o local das deformações para um estágio particular do processo [Marciniak, 2002]. Assim que o processo continua, este local se expandirá, mas não necessariamente uniformemente; alguns pontos poderão parar de se deformar, enquanto outros alcançarão o limite do processo [Rocha, 2003].

Para qualquer processo de embutimento e estiramento, haverá um padrão característico de deformação, como mostrado na figura 2.7(c). Isto é algumas vezes conhecido como “assinatura deformacional” [Rocha, 2003]. Os pontos individuais sobre o local de deformação na figura 2.7(c) podem ser obtidos das medidas de uma grade de círculos como mostrado na Figura 2.6 e calculadas a partir das equações 2.2 ou 2.3.

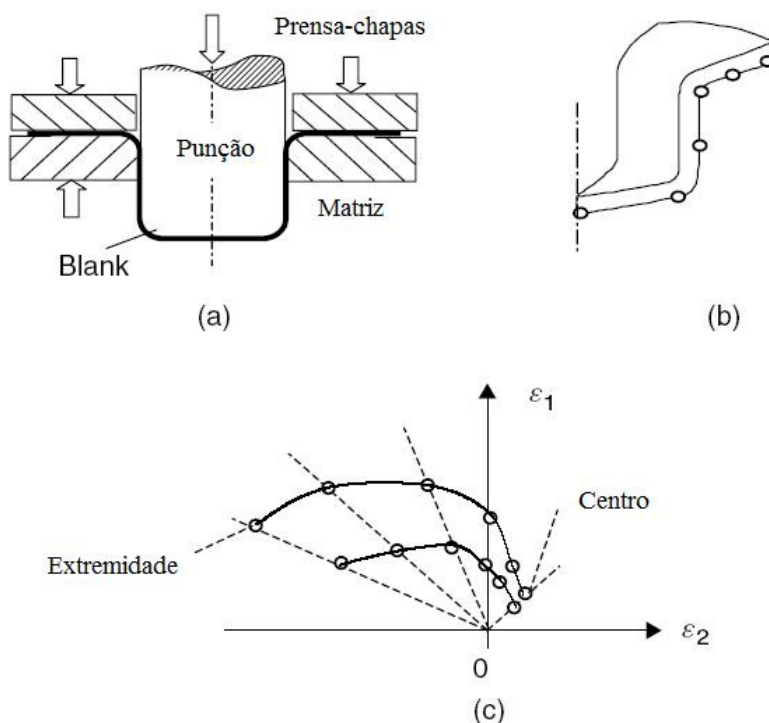


Figura 2.7 – Diagrama de deformações [Marciniak, 2002].

2.3.2 Modos de deformação

O diagrama das deformações principais mostrado na figura 2.8 não representa nenhum processo em particular, e sim os modos de deformação aos quais uma chapa, sob o estado plano de tensões, estaria sujeita. A elipse representa o contorno de igual deformação efetiva, ou seja, um elemento com a tensão de escoamento conhecida, que se deforma sobre diversos caminhos de deformação (várias combinações de $\epsilon_1 \times \epsilon_2$), percorrerá a trajetória de uma elipse. Para os modos de deformação onde $\beta > -1$ a chapa tem sua espessura reduzida e para $\beta < -1$ a espessura é aumentada.

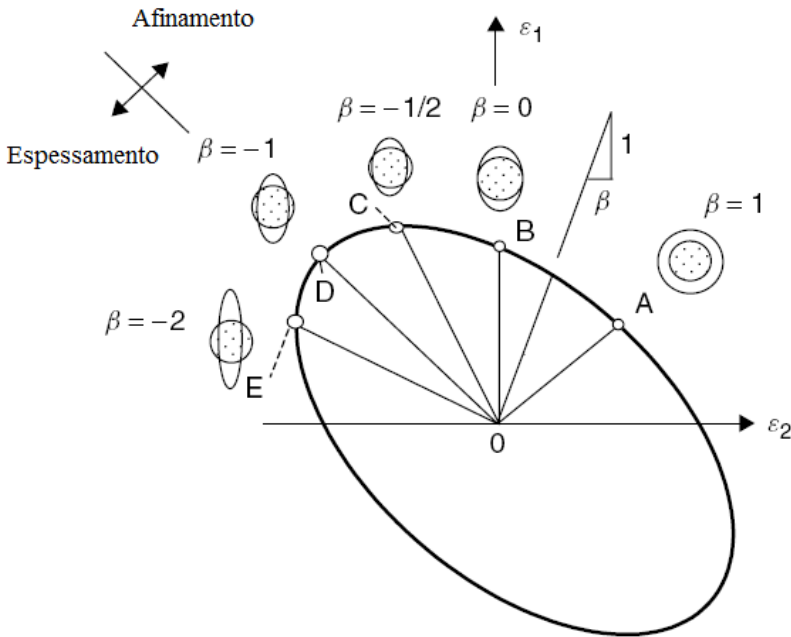


Figura 2.8 – Diagrama das deformações principais representando os diferentes modos de deformação, correspondentes às diferentes razões de deformação [Marciniak, 2002].

Por analogia, pode-se representar os modos básicos de deformação num diagrama de tensões principais envolvidas no processo, figura 2.9, sendo este também bastante útil no entendimento das forças envolvidas no embutimento e estiramento.

Por convenção, a tensão principal e a deformação principal na direção 1 (σ_1 e ε_1), sempre serão as trativas maiores ou “mais positivas”. Por esta razão, todos os caminhos de deformação possíveis nos processos de conformação de chapas restringem-se ao vértice projetado OA e OE , a razão de deformação varia na faixa $-2 \leq \beta \leq 1$ e a razão de tensão varia na faixa de $-\infty \leq \alpha \leq 1$.

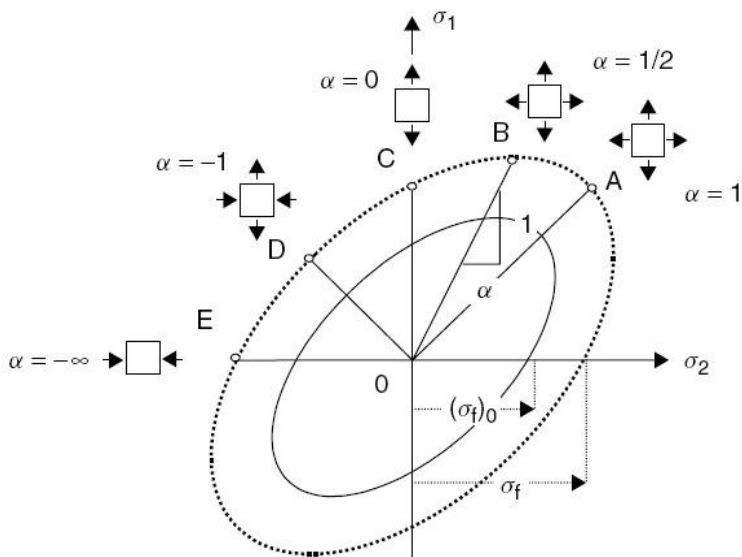


Figura 2.9 – Diagrama das tensões principais representando os diferentes modos de deformação, correspondentes às diferentes razões de tensão [Marciniak, 2002].

Os modos de deformação que podem ser encontrados numa chapa sob estado plano de tensões são: estiramento equi-biaxial, deformação plana, tração uniaxial, embutimento e compressão uniaxial, conforme mostrados a seguir.

Estiramento Equi-biaxial, $\beta = 1$ e $\alpha = 1$

É representado pelo caminho OA das figuras 2.8 e 2.9. A chapa estirada sobre um punção hemisférico irá deformar na região central como mostrado na figura 2.10. As tensões e deformações no plano são iguais nas duas direções, $\sigma_2 = \sigma_1$ e $\varepsilon_2 = \varepsilon_1$, e a grade de círculos se expande, porém permanece circular. Para $\beta = 1$, a partir da equação 2.3, tem-se que a deformação na direção da espessura é duas vezes maior que na direção principal, $\varepsilon_3 = -2\varepsilon_1$. Este é o modo de deformação no qual a espessura é reduzida mais rapidamente em relação à deformação principal ε_1 , pois a deformação é homogênea em todas as direções, o que torna a estricção mais difusa [Marciniak, 2002; Xua et al, 2000; Xu et al, 1998; Mielnik, 1991; Rocha, 2003].

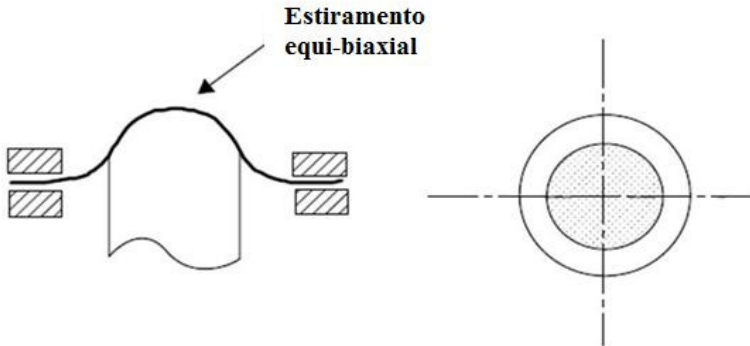


Figura 2.10 – Estiramento equi-biaxial em um domo estirado [Marciniak, 2002].

Deformação Plana $\beta = 0$ e $\alpha = 1/2$

Neste modo de deformação, ilustrado pelo caminho OB das figuras 2.8 e 2.9, a chapa se deforma apenas em uma direção e os círculos das grades se tornam elipses, nas quais o eixo menor não é alterado. Como $\beta = 0$ tem-se que $\varepsilon_2 = 0$ e $\varepsilon_3 = -\varepsilon_1$, e ainda, como $\alpha = 1/2$ tem-se que $\sigma_2 = \frac{\sigma_1}{2}$. A magnitude da tensão principal σ_1 é maior neste modo de deformação do que em qualquer outro.

Em peças longas, este modo de deformação é facilmente observado nas laterais conforme mostrado na figura 2.11. Particularmente na deformação plana, a chapa está mais susceptível a fraturar, devido ao aparecimento de estiricções localizadas [Marciniak, 2002; Rocha, 2003].

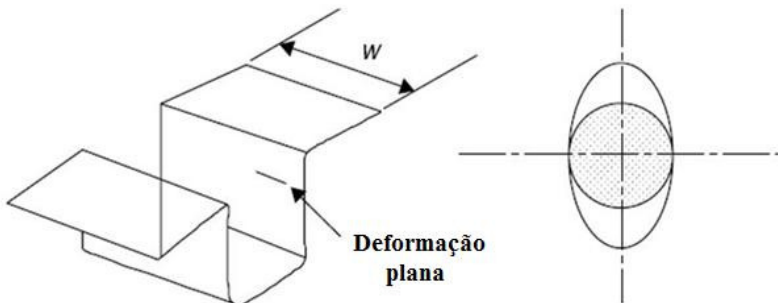


Figura 2.11 – Deformação plana na parede lateral de um perfil longitudinal [Marciniak, 2002].

Tração Uniaxial, $\beta = -1/2$ e $\alpha = 0$

O caminho OC, das figuras 2.8 e 2.9, representa o modo de deformação tração uniaxial, que é equivalente ao ensaio de tração, pois a menor tensão principal é igual a zero, $\sigma_2 = 0$. Como $\beta = -1/2$ tem-se que $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = -\frac{\varepsilon_1}{2}$ e ainda, como $\alpha = 0$ tem-se que $\sigma_2 = 0$. Portanto, a chapa estira-se na direção principal 1 e se contrai na direção principal 2 e na espessura. Nas operações de estampagem, este modo de deformação irá ocorrer toda vez que uma aresta livre é estirada, como no caso da extrusão de um furo, ilustrado na figura 2.12.

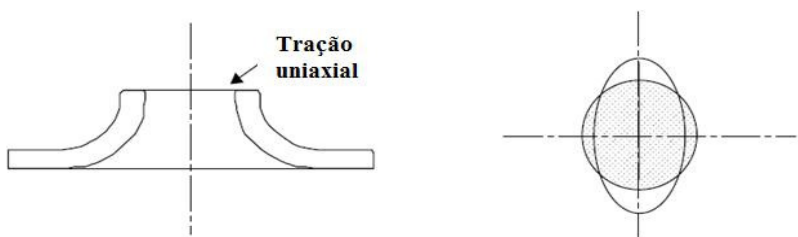


Figura 2.12 – Tração uniaxial na aresta de um furo extrudado [Marciniak, 2002].

Embutimento, $\beta = -1$ e $\alpha = -1$

Neste modo de deformação, caminho OD, as tensões e deformações são iguais, porém opostas e a chapa deforma sem que a espessura seja alterada. Como $\beta = -1$ e $\alpha = -1$, tem-se que $\varepsilon_2 = -\varepsilon_1$, $\varepsilon_3 = 0$ e $\sigma_2 = -\sigma_1$. É chamado de embutimento, pois é o modo de deformação predominante no flange de um copo obtido por embutimento profundo quando a chapa é puxada para dentro da região convergente, ilustrado na figura 2.13.

A ocorrência de rupturas é improvável e na prática, grandes deformações são encontradas com frequência neste modo, apesar da magnitude das tensões principais serem as menores dentre todos os modos de deformação. Esta magnitude é da ordem de 58% da tensão requerida para iniciar o escoamento se comparado com um elemento sob tração uniaxial. Por estas razões, este pode ser considerado o modo de deformação ideal.

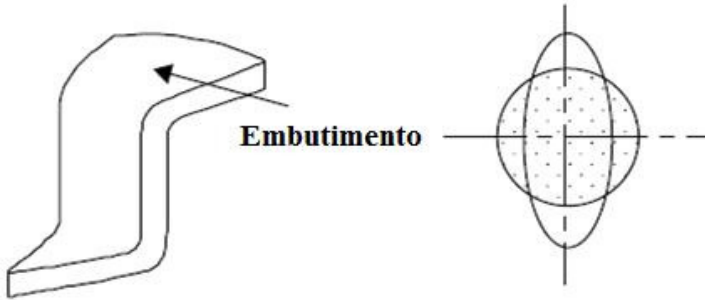


Figura 2.13 – Embutimento no flange de um copo obtido por embutimento profundo [Marciniak, 2002].

Compressão Uniaxial, $\beta = -2$ e $\alpha = -\infty$

Indicado pelo caminho OE, este modo ocorre quando a maior tensão é zero, $\sigma_1 = 0$, como nas arestas do flange de um copo obtido por embutimento profundo, ilustrado na figura 2.14. A menor tensão é compressiva e igual à tensão de escoamento, $\sigma_2 = -\sigma_e$. Neste modo de deformação, a chapa aumenta sua espessura e provavelmente ocorrerá enrugamento.

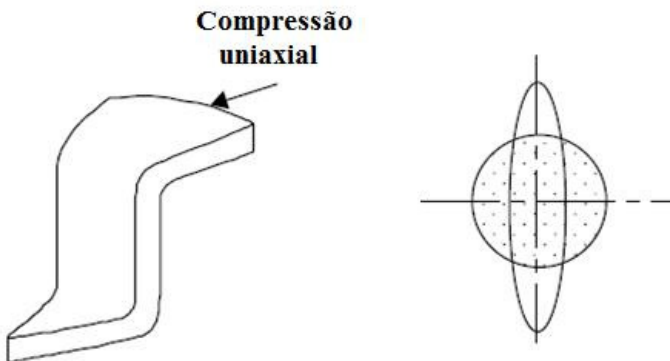


Figura 2.14 – Compressão uniaxial na extremidade do flange de um copo obtido por embutimento profundo [Marciniak, 2002].

2.3.3 Identificação dos modos de deformação nas operações de estampagem

A figura 2.15 [Adaptada de Folle, 2008] mostra esquematicamente uma peça obtida pela operação de embutimento e os modos de deformação nela presentes. A análise teórica do processo de embutimento do copo está definida na literatura em vários trabalhos [Eary & Reed, 1974; Rossi, 1971]. Erroneamente pode-se presumir que nesta operação será encontrado somente o modo de deformação embutimento. Na verdade, diversos modos de deformação coexistem numa única peça, pois na prática a fabricação de uma peça é composta por uma combinação de mais de uma operação básica de estampagem.

O processo inicia quando o metal sob o punção é conformado para o interior da matriz pela ação do punção. Na região do flange próximo ao raio da matriz, região 1 da figura 2.15, a peça é conformada com tensão de compressão na direção circunferencial, σ_2 , e de tração na direção radial, σ_1 . Estes esforços fazem com que o flange diminua de diâmetro, podendo até acarretar num aumento de espessura caso a tensão na direção circunferencial, σ_2 , seja ligeiramente maior que a tensão na direção radial, σ_1 . Há ainda a aplicação de uma força perpendicular à chapa, que tem como objetivo evitar o enrugamento e controlar o fluxo de metal que se move para o interior da matriz. Esta é denominada força de sujeição, e é aplicada através de um prensa chapas [Fernandes, 1998]. Como tanto as tensões quanto as deformações de compressão e de tração são de mesma intensidade, correlaciona-se a deformação que ocorre nesta região ao modo de deformação embutimento.

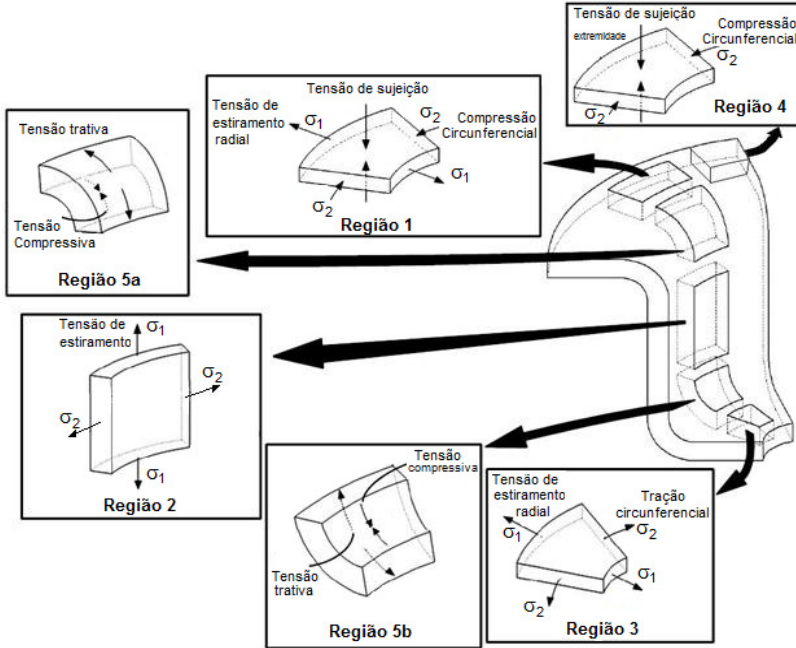


Figura 2.15 – Modos de deformação presentes num copo obtido por embutimento [Adaptado de Folle, 2008]

Neste mesmo flange, porém, um elemento localizado na extremidade do disco, região 4 da figura 2.15, é submetido apenas a esforços de compressão na direção circunferencial, ou seja; compressão uniaxial. Nesta região também se faz necessária a aplicação da força de sujeição como mostrado para a região 1, no entanto, aqui a tendência de formação de rugas é maior. Para evitar a formação de rugas, normalmente se emprega quebra-rugas (*draw beads*). Devido a este estado de tensões, à medida que o punção avança, ocorre um aumento de espessura, pois o fluxo de metal das bordas é forçado na direção da matriz [Silveira Netto, 2004].

Na parede lateral, região 2 da figura 2.15, os esforços são de tração na direção radial, σ_1 , resultantes da força exercida pelo punção no fundo do copo e da força do prensa-chapa no flange do copo, e também de tração na direção circunferencial, σ_2 , proveniente da restrição à deformação do material pelo diâmetro do punção [Magalhães, 2005]. A intensidade dos esforços de tração na direção circunferencial é

aproximadamente a metade dos esforços de tração na direção radial. Nesta situação o material se deforma apenas segundo a direção radial (alongamento), ε_1 , e na direção da espessura (afinamento), ε_3 , não havendo qualquer deformação na direção circunferencial, $\varepsilon_2 = 0$, ou seja; modo deformação plana.

O metal no centro do disco sob a cabeça do punção, região 3 da figura 2.15, 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 [Santos, 2007], ou seja; estiramento equi-biaxial.

Um estado de tensões ainda mais complexo ocorre nas regiões 5a e b da figura 2.15, devido à presença de dobramento que traciona as fibras superiores e comprime as inferiores da chapa, no caso da região 5a, e tem o efeito oposto na região 5b. O elemento da região 5a, figura 2.15, apresenta além das tensões de estiramento radial e compressão circunferencial da região 1, tensões de tração e compressão inerentes às operações de dobramento. No elemento da região 5b, além das tensões de dobramento mencionadas, estão presentes também as mesmas tensões da região 2. Como estas tensões de dobramento são proporcionais à espessura, quanto maior for a espessura maiores serão as tensões de compressão e de tração. Enquanto que nas chapas com maior espessura a identificação dos modos de deformação torna-se mais difícil devido ao efeito mais pronunciado das tensões de dobramento, para chapas de menor espessura os efeitos destas tensões de dobramento podem ser desprezados.

Como consequência do embutimento do copo da figura 2.15, ocorrem variações de espessura inerentes aos diferentes modos de deformação. A figura 2.16 [Caddell e Hosford, 2007] representa esquematicamente a variação da espessura deste copo, quando embutido a partir de um disco com espessura inicial de 1 mm.

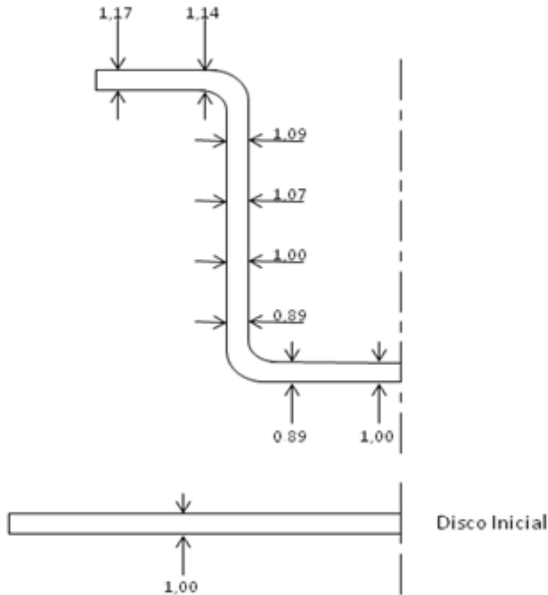


Figura 2.16 – Desenho esquemático da variação da espessura de um copo embutido [Caddell e Hosford, 2007].

2.4 A estampabilidade

A estampabilidade de uma chapa metálica é a sua capacidade de se deformar, adquirindo a forma imposta pelos esforços gerados por uma matriz e por um punção, sem que ocorra ruptura durante a conformação ou aparecimento de outros defeitos que inviabilizem a utilização da peça [Hosford, 2007; Semiatin, 1984; Mielnik, 1991].

As operações para estampagem de chapas são tão diversas que testes simples não fornecem uma indicação precisa sobre a estampabilidade de um material que seja válida em diferentes aplicações. Não há um índice simples e direto para a medição da estampabilidade de um material que seja válido e aplicável a diversas situações, uma vez que um determinado material que atendeu perfeitamente ao projeto de uma determinada peça pode falhar quando da realização de outra peça. Portanto, a estampabilidade é uma função do material e das características de processo. O conhecimento das propriedades do material e a análise das variáveis do processo são

indispensáveis na determinação da probabilidade de sucesso na produção de peças estampadas e no desenvolvimento de processos mais eficientes [Taylor, 1988; Boyles, 1982].

A seguir serão mostrados os efeitos de alguns parâmetros de processo na estampabilidade e a avaliação da estampabilidade das chapas através de ensaios mecânicos e ensaios simulativos.

2.4.1 Lubrificante

O uso dos lubrificantes na estampagem de peças reduz o atrito pela introdução de uma interface facilmente cisalhada.

Numa operação de estampagem sob condições a seco, ou seja, quando nenhum lubrificante é utilizado na interface e somente estão presentes as camadas de óxido da matriz e da matéria prima, o coeficiente de atrito raramente é menor que 0,5, e em muitos casos é ainda maior [Carlsson, 2005]. Nestes casos, o atrito é alto, situação indesejável para a maioria das operações de estampagem.

Segundo Marcondes (2002), os efeitos funcionais dos lubrificantes são:

- Reduzir os carregamentos necessários para a deformação;
- Aumentar os limites de deformação antes da fratura;
- Melhorar o controle do acabamento de superfície;
- Minimizar a adesão do metal no ferramental;
- Minimizar o desgaste das ferramentas;
- Isolar termicamente as peças e ferramentas;
- Resfriar as peças e ferramentas.

Os lubrificantes mais utilizados na estampagem são os óleos emulsionáveis, devido à sua performance na lubrificação aliada à eficiente dissipação do calor e ao baixo custo, e os filmes poliméricos sólidos, que possuem altíssimo desempenho aliado ao fácil manuseio e à limpeza. Há ainda os óleos puros e os sintéticos.

Jeffery (2003), através de vários experimentos, mostrou que a utilização de lubrificantes poliméricos sólidos nas operações de embutimento e estiramento, têm desempenho superior aos óleos emulsionáveis. Aumentos de 30 a 55% na capacidade de embutimento e estiramento foram obtidos, quando comparados aos resultados com óleos emulsionáveis. Keeler (2005) relata que em experimentos

utilizando lubrificantes poliméricos sólidos, de forma geral as deformações são deslocadas para baixo no diagrama de deformações.

Quando uma peça rompe ou apresenta afinamento excessivo ao ser estampada a partir de um *blank* já lubrificado, a adição de mais lubrificante é uma prática comum na tentativa de solucionar este problema. Mas esta solução nem sempre é a mais correta [Keeler, 2005].

A lubrificação do punção não tem grande influência no embutimento, ao passo que no estiramento o punção deve ser bem lubrificado, para que o nível de deformação suportado pela chapa para este modo de deformação seja aumentado [Keeler, 1965]. A figura 2.17 [Tigrinho, 2005] mostra que em função do modo de deformação e da região, pode-se requerer coeficientes de atrito diferentes.

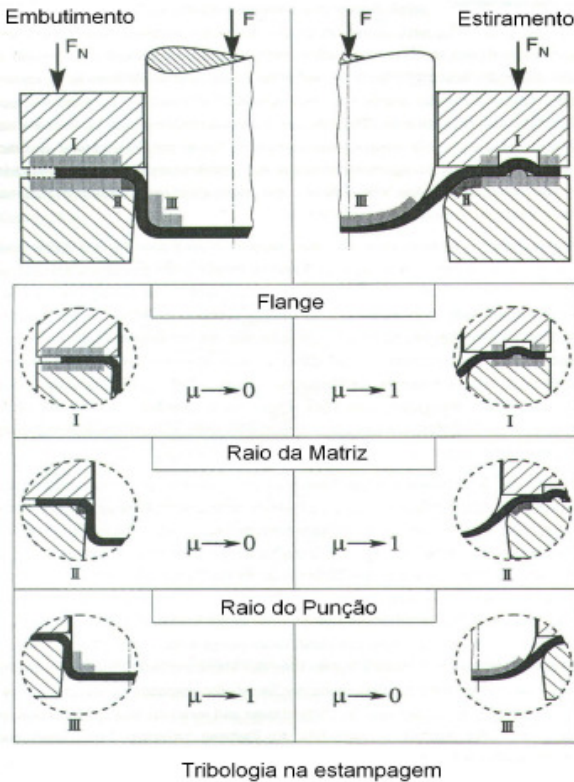


Figura 2.17 – Atrito recomendado nas diferentes regiões (flange, raio da matriz e raio do punção), conforme o modo de deformação [Tigrinho, 2005].

Para o estiramento, lado direito da figura 2.17, na região do flange e do raio da matriz, o atrito deve ser alto para que o escoamento da chapa para dentro da matriz seja dificultado. Porém, na região do raio do punção, o atrito tem que ser baixo, já que haverá movimento relativo entre as superfícies do punção e da chapa metálica, que está sendo conformada pela redução de sua espessura [Tigrinho, 2005; Hosford, 2007].

Já no embutimento, lado esquerdo da figura 2.17, verifica-se que nas regiões do flange e raio da matriz o atrito deve ser baixo para que o material possa escoar livremente. O mesmo não deve acontecer no raio de punção. Nesta região o atrito deve ser máximo, para que não haja movimento relativo entre as superfícies e o material consiga atingir alto nível de deformação sem romper [Tigrinho, 2005; Hosford, 2007].

De acordo com Hosford (2007), com uma boa lubrificação no estiramento, a ruptura tende a ocorrer próxima do centro, com altos valores da deformação menor, ϵ_2 , muitas vezes próximas da deformação maior, ϵ_1 . Segundo Keeler (1965), uma lubrificação adequada faz com que a deformação se torne mais homogênea, reduzindo a amplitude entre as maiores e menores deformações e suavizando o crescimento dos picos de deformação, como mostrado na figura 2.18.

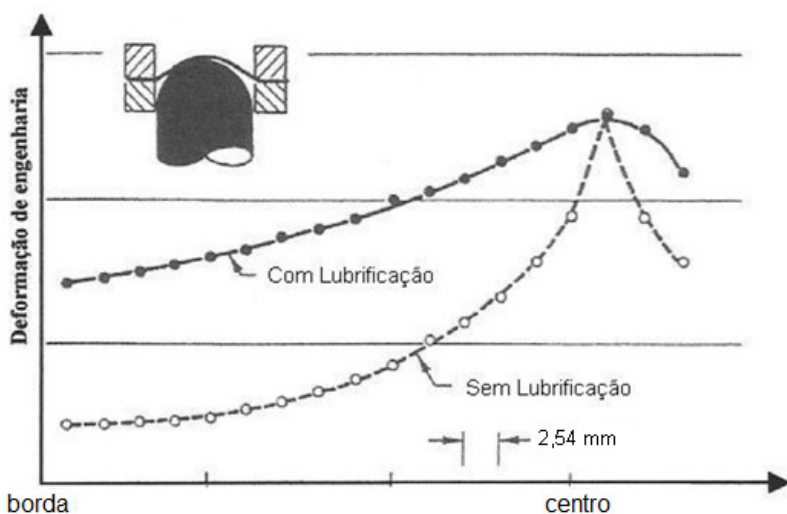


Figura 2.18 – Perfis de distribuição das deformações obtidas no estiramento, com e sem lubrificação do punção [Keeler, 1965].

2.4.2 Força de sujeição

As tensões tangenciais de compressão que atuam na região do flange das peças submetidas ao embutimento ocasionam o enrugamento das extremidades deste flange, conforme mostrado na figura 2.15 regiões 1 e 4. A fim de controlar esse enrugamento, é utilizado um prensa-chapa para exercer pressão [Lange, 1993] e controlar o fluxo de material que se deforma para dentro da matriz. A força do prensa-chapa (sujeição), F_{pc} , é dada por:

$$F_{pc} = A_{pc} \cdot P_{pc} \quad (2.4)$$

Sibel e Beisswänger [Lange, 1993] propõem que a pressão necessária do prensa-chapa pode ser calculada através da equação 2.5.

$$P_{pc} = 10^{-3} \cdot C \cdot \left[(\beta' - 1)^3 + \frac{0,005 \cdot d_0}{t_0} \right] \cdot \sigma_{rup} \quad (2.5)$$

$$\beta' = \frac{D_0}{D_1} \quad (2.6)$$

Para cada material e profundidade de embutimento desejada, existe uma “janela” de conformação com valores de trabalho para a força do prensa chapas. Se esta força for muito baixa ocorrerá enrugamento, por outro lado, se for muito alta haverá falha na parede do copo, conforme mostrado na figura 2.19.

Por esta razão a força do prensa chapas precisa ser controlada. Pode-se ainda alterar esta força durante a operação, possibilitando atingir maiores profundidades de embutimento se a força do prensa chapas começar num nível mais baixo e aumentar gradativamente até o fim do processo [Hosford, 2007].

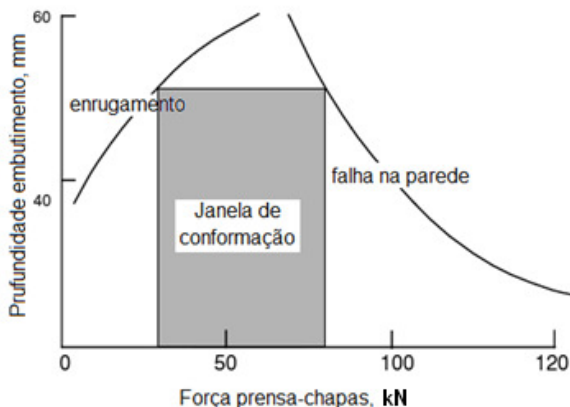


Figura 2.19 – Janela de conformação para um copo de paredes cônicas. Para a profundidade de 50 mm, a força do prensa chapas deve estar entre 30 e 80 kN [Adaptado de Hosford, 2007].

2.4.3 Velocidade de deformação

A velocidade de deformação tem um grande efeito na estampabilidade do metal. A fabricação de uma peça que transcorre bem em baixa velocidade de deformação pode começar a gerar defeitos ao aumentar-se esta velocidade.

Se o material não escoar com a velocidade adequada, a deformação não será uniforme, e pode ocorrer uma estrição localizada na folga entre o estampo e a matriz, podendo resultar em fratura [Grüning, 1975].

A velocidade de deformação influencia também o desempenho dos lubrificantes, afetando por consequência a estampabilidade [Srouf, 2002].

A velocidade deve, sempre que possível, ser baixa quando o punção inicia a conformação do *blank*, aumentando progressivamente durante o processo. Quanto menor for a velocidade da prensa maior será a relação de embutimento β' que se pode obter. A tabela 2.1 mostra as velocidades de deformação recomendadas para alguns materiais submetidos ao embutimento [Grüning, 1975].

Tabela 2.1 – Valores orientativos para velocidade de deformação para diversos materiais [Grüning, 1975].

Material	Velocidade de Deformação
Alumínio	30 mm/s
Latão	45 mm/s
Aço Inoxidável	12 mm/s
Aço Carbono	18 mm/s
Zinco	22 mm/s

2.4.4 Tamanho e geometria do blank

O tamanho e a geometria do *blank* devem ser definidos de forma que:

- Possibilitem a aplicação da força de sujeição adequada;
- O fluxo de material seja favorecido para peças complexas;
- A geometria do *blank* se assemelha à geometria da peça final.

A utilização de quebra-rugas no prensa chapas propicia a utilização de *blanks* menores sem a perda efetiva de força de sujeição.

Blanks circulares são usados para todas as peças que possuem forma desenvolvida por revolução, e suas dimensões podem ser obtidas por cálculos simples. No entanto, estes cálculos não podem ser usados para peças retangulares ou peças mais complexas.

Quando o *blank* da peça é desenvolvido a partir da mesma, pode-se observar o excesso de material na região hachurada da figura 2.20. Os *blanks* com cantos retos são utilizados mais comumente na indústria devido ao menor custo operacional por dispensar uma operação prévia de corte, porém o excesso de material na região do canto irá causar altos níveis de deformação que podem resultar em ruptura e consequente descarte da peça.

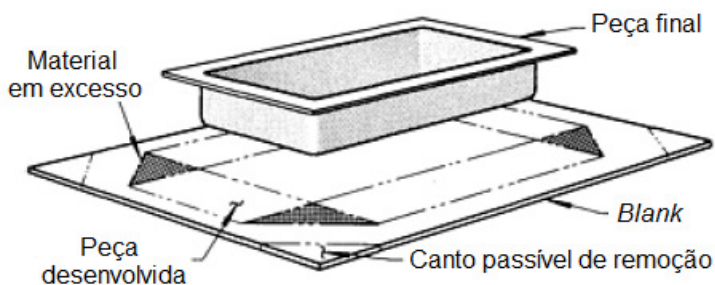


Figura 2.20 – *Blank* desenvolvido para peça com geometria retangular [Metals Handbook ASM, 1993].

Existem métodos para desenvolver a geometria nos cantos de um *blank* para peças retangulares e outras de maior complexidade, de tal forma a minimizar o excesso de material. Uma regra citada por Lange (1993) determina que quando a profundidade da peça for maior que duas vezes o raio dos cantos, estes devem ser chanfrados ou arredondados, numa operação de corte prévia, para melhorar o fluxo de material e evitar as rupturas.

A figura 2.21 compara a utilização de duas geometrias diferentes de *blanks* para estampagem de uma única forma complexa. Na figura 2.21a, foi utilizado um *blank* com os cantos retos e na figura 2.21b os cantos foram arredondados por uma operação de corte prévia. O arredondamento ou chanfro dos cantos pode reduzir significativamente os níveis de deformação, conforme mostrado na figura 2.22.

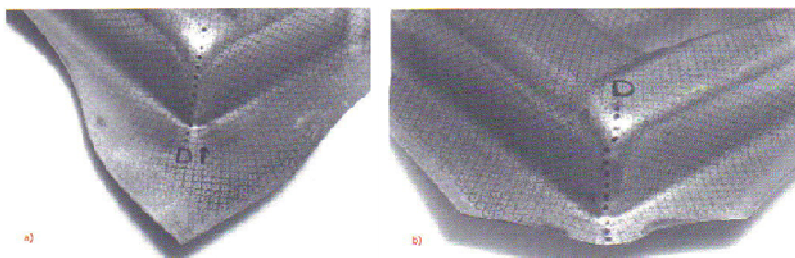


Figura 2.21 – (a) *Blank* com cantos retos. (b) *Blank* com cantos arredondados [Lange, 1993].

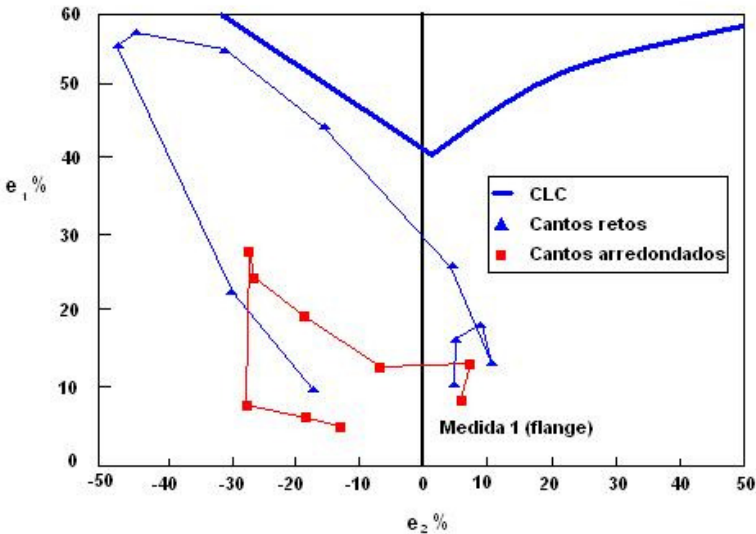


Figura 2.22 – Distribuição das deformações das peças da figura 2.21 associadas à CLC do material [Lange, 1993].

2.4.5 Geometria do ferramental

O efeito da geometria do ferramental na estampabilidade é gerado a partir de variações nos raios da matriz e do punção. Para ambos, existe um ponto ótimo de trabalho.

O raio da matriz deve variar de 5 a 10 vezes a espessura, dependendo do material. À medida que este raio aumenta, a força de dobra diminui, melhorando então o fluxo do material. Por outro lado o retorno elástico é cada vez maior. Quando o raio da matriz diminui, aumenta a tensão de compressão, gerando mais atrito e mais desgaste na matriz. Para materiais como alumínio e aço inoxidável, existe ainda a possibilidade de ocorrerem micro-soldagens [Marcondes, 2002].

Já o raio do punção deve variar de 2 a 5 vezes o raio da matriz, também dependendo do material, e quanto maior o raio do punção, mais estiramento ocorrerá no fundo da peça, sendo isto favorável para materiais com elevado coeficiente de encruamento.

2.4.6 Revestimento de zinco

A galvanização é um dos processos mais efetivos e econômicos de proteção do aço contra a corrosão. A proteção do aço pelo revestimento de zinco se desenvolve por meio de dois mecanismos: proteção por barreira exercida pela camada de revestimento e proteção galvânica ou de sacrifício, que ocorre na exposição simultânea do par aço-zinco.

O revestimento deve possuir uma boa conformabilidade e uma boa adesão à chapa para resistir às severas operações de estampagem.

Os revestimentos de zinco puro são macios e dúcteis, o que confere excelentes propriedades de estampabilidade. No entanto, revestimentos macios têm uma grande tendência de aderir ao ferramental de estampagem, um fenômeno que também é chamado de desgaste adesivo, e que após vários ciclos sucessivos pode ocasionar defeitos superficiais como riscos e até mesmo trincas na peça estampada [Carlsson, 2005].

Comparando os produtos galvanizados, observa-se que tanto o aço revestido por eletro galvanização, EG, quanto o aço revestido por imersão a quente, HDG – *Hot Dip Galvanized*, são equivalentes em termos de proteção à corrosão e de estampabilidade, no entanto os aços revestidos por imersão a quente são mais suscetíveis aos defeitos de descamamento, ou seja, perda do zinco. Ainda com relação às superfícies expostas, foi observado que o acabamento de superfície dos aços EG também se apresenta melhor após a pintura que os HDG [American Galvanizers Association, 2002; Leitzke, 2008].

O revestimento de zinco diminui o coeficiente de anisotropia normal, pois a camada intermetálica, situada entre o substrato e o revestimento de zinco e que contém aproximadamente 6% de ferro, restringe as deformações na largura. Estas restrições se devem principalmente a elevada dureza da camada intermetálica, que ao se difundir para o interior do substrato fragiliza o material [Coni, 2004]. Estudos realizados mostram que a camada de zinco influencia na conformabilidade (valor r de Lankford) dos aços laminados a frio mais utilizados pela indústria automobilística. De acordo com a figura 2.23, a maior redução no valor r ocorre quando a espessura do revestimento é proporcionalmente maior em relação à espessura do aço base [Pereira, Alvarenga e Barcelos, 1995].

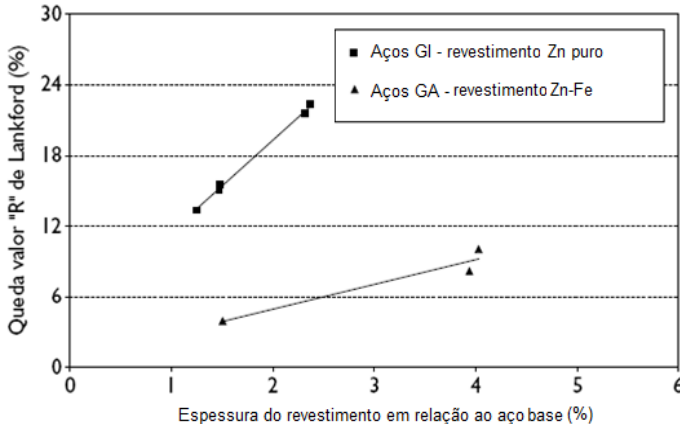


Figura 2.23 – Efeito da camada de revestimento na queda do valor “r” de Lankford de aços revestidos com zinco [Pereira, Alvarenga e Barcelos, 1995].

Portanto, para melhorar a conformabilidade dos aços galvanizados para estampagem a camada de zinco deverá ser a menor possível. Esses resultados são válidos tanto para os aços eletro galvanizados como para os aços galvanizados por imersão a quente. Neste aspecto os aços EG obtêm melhores resultados que os aços HDG, pois as camadas de zinco são mais controladas e menores, chegando até a 20 g/m², enquanto nos aços HDG não se consegue menos que 85 g/m².

A adição de revestimento de zinco nas chapas de aço também é considerada muito importante no controle do atrito, evitando o contato metal-metal, o que resulta em desgaste acentuado das partes. No entanto, estas características tribológicas das chapas metálicas revestidas são fortemente influenciadas pela composição química do revestimento, topografia de superfície do substrato e distribuição da espessura do revestimento [Carlsson, 2005].

2.4.7 Avaliação da estampabilidade das chapas através das propriedades mecânicas

Para uma boa estampabilidade numa extensa faixa de aplicações, o material deveria:

- Distribuir uniformemente a deformação.

- Atingir altos níveis de deformação sem estricção ou fratura.
- Resistir a tensões compressivas planares sem enrugar.
- Resistir a tensões cisalhantes planares sem fraturar.
- Manter a forma da peça ao ser removida da matriz.
- Manter uma superfície lisa e resistir a danos superficiais.

Três propriedades mecânicas são determinantes na distribuição da deformação nas operações de conformação:

- O coeficiente de encruamento (n)
- O coeficiente de anisotropia (r)
- Expoente de sensibilidade à taxa de deformação (m)

A capacidade de distribuir a deformação uniformemente depende do coeficiente de encruamento e do expoente de sensibilidade à taxa de deformação. A capacidade de alcançar altos níveis de deformação depende de fatores como composição química, estado de encruamento, coeficiente de encruamento, coeficiente de anisotropia, expoente de sensibilidade à taxa de deformação, espessura, homogeneidade e isenção de defeitos e inclusões.

Altos valores do coeficiente de encruamento e do expoente de sensibilidade à taxa de deformação conduzem a uma boa estampabilidade nas operações de estiramento, mas tem pouco efeito no embutimento. Numa operação de embutimento o material do flange deve fluir para dentro da matriz sem que ocorra fratura nas paredes laterais. Neste caso, altos valores do coeficiente de encruamento e expoente de sensibilidade à taxa de deformação aumentam a resistência destas paredes, o que é benéfico. Por outro lado a resistência do flange também aumenta, dificultando o modo de deformação de embutimento.

Já as propriedades mecânicas utilizadas atualmente (limite de escoamento, limite de resistência, alongamento e dureza) têm uma relação indireta com o estiramento ou embutimento como será mostrado a seguir [Keeler, 2003].

Dureza, limite de escoamento (LE), limite de resistência (LR) e alongamento

A dureza tem sido utilizada em muitas estamparias como medida de estampabilidade, monitorando as mudanças em uma classe particular

de material, causadas por alterações no seu processamento. As medidas de dureza se correlacionam bem com os valores do limite de resistência [Kasper et al, 1976], e por esta razão o ensaio de dureza é útil no controle de qualidade, para assegurar que o material utilizado é da classe especificada e tem o nível adequado de dureza [*Metals Handbook ASM*, 1993].

No entanto, as medidas de dureza são sensíveis às condições superficiais da chapa, à planicidade do corpo de prova e aos procedimentos de ensaio. Além disso, são muito afetadas pela quantidade de trabalho a frio perto da superfície do material, no passe de encruamento, por exemplo, de modo que um material macio pode apresentar picos de dureza elevada. Outras propriedades mecânicas influenciam a estampabilidade de chapas mais do que a dureza, de modo que valores de dureza, somente, não devem ser considerados como base para rejeição de chapas [Al-Qureshi, 2003].

Outra propriedade, o limite de escoamento (LE), é comumente correlacionado com a estampabilidade, porém, tal qual a dureza, esta correlação só pode ser considerada válida quando se comparam aços de uma mesma classe. 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. Um exemplo é comparar o aço baixo carbono com o aço inoxidável. A tensão de escoamento do aço inoxidável pode ser o dobro do aço baixo carbono, mas a estampabilidade é geralmente melhor [Souza, 1974; Srour, 2002].

O limite de escoamento ainda tem a desvantagem de ser sensível à velocidade de deformação. Ele aumenta com o aumento da velocidade de deformação. Enquanto os testes conduzidos em laboratório ocorrem em baixas velocidades, nas estamparias as velocidades utilizadas são maiores, para aumentar a produtividade. O mesmo ocorre com o limite de resistência, porém em menor intensidade.

O limite de resistência (LR), por ser uma propriedade bem determinante, é especificado sempre com as outras propriedades mecânicas dos metais e ligas. O limite de resistência é influenciado pela anisotropia de metais trabalhados mecanicamente, se bem que em menor grau, comparativamente, ao limite de escoamento.

A razão LR/LE é definida como sendo o quociente entre o limite de resistência e o limite de escoamento, e também é utilizada como um índice para a estampabilidade nas indústrias. Este índice pode ser interpretado como uma medida para a ductilidade, desde que a comparação seja entre aços de um mesmo grupo.

Outra relação, segundo Havranek (1976), pode ser considerada como parâmetro para comparação de estampabilidade, a relação entre o limite resistência e o módulo de elasticidade (LE/E). Quanto menor, menor será a possibilidade de ocorrência do enrugamento.

Há ainda o alongamento total, que inclui tanto a parte uniforme, antes da estricção, quanto a parte não uniforme, aquela observada após estricção localizada no corpo de prova do ensaio de tração. Como o aparecimento de estricções em peças submetidas a operações de estampagem é frequentemente motivo de rejeição das peças, não é recomendado utilizar o alongamento total como índice de estampabilidade [Coni, 2004].

Coefficiente de encruamento (n)

O coeficiente de encruamento, n , fornece uma medida da capacidade do material distribuir a deformação durante a estampagem na presença de um gradiente de tensões. Apesar de, geralmente, os estados combinados de tensão estarem envolvidos nos processos de conformação, tal coeficiente constitui um parâmetro útil para prever o comportamento da chapa metálica no que se refere à formação de um pescoço difuso, altos valores de n , ou localizado, baixos valores de n [Rocha, 2006].

A região de deformação plástica uniforme da curva tensão verdadeira, σ , versus deformação verdadeira, ϵ , obtida em ensaios de tração em aços de baixo carbono para estampagem, é razoavelmente descrita pela equação 2.7 de Hollomon [Mielnik, 1991].

$$\sigma = K \cdot \epsilon^n \quad (2.7)$$

Em materiais com um alto valor de n , quando comparados com materiais de menor valor de n , a tensão de escoamento cresce rapidamente com a deformação, distribuindo as deformações subsequentes para regiões de mais baixa tensão de escoamento, homogeneizando as deformações, como ilustrado pela figura 2.24.

Um metal com um alto valor de n tende a deformar-se mais uniformemente, até mesmo sob tensões não uniformes. Assim, para um bom estiramento, um alto expoente de encruamento, n , é desejável.

O valor de n também tem efeito indireto no enrugamento que ocorre nas operações de embutimento. Valores de n elevados permitem aumentar a força no prensa chapas, o que reduz o enrugamento.

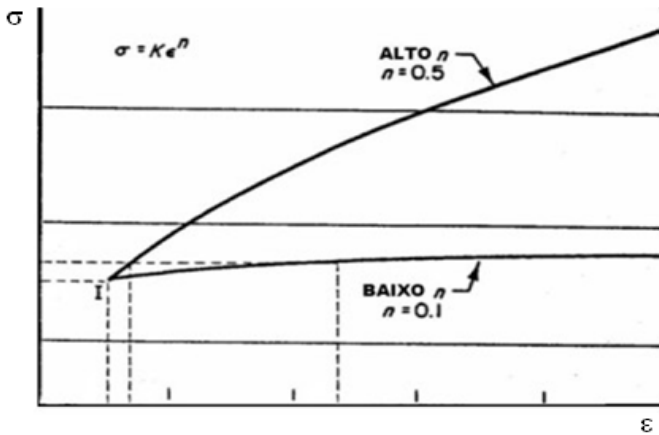


Figura 2.24 – Curva esquemática da tensão verdadeira x deformação verdadeira para materiais com diferentes valores de n [Keeler, 2003]

É importante destacar que o coeficiente de anisotropia, embora seja considerado uma constante do material, depende da história termomecânica do mesmo, ou seja, n é dependente da microestrutura do material. Valores típicos de n para aços baixo carbono destinados à estampagem com limite de escoamento menor que 345 MPa estão entre 0,16 e 0,26 [Ferreira Filho *et al*, 2005]. Já para os aços de alta resistência, os valores de n podem ser estimados pela equação 2.11 [Backofen, 1974].

$$n = \frac{70}{LE} \quad (2.8)$$

Expoente de sensibilidade à taxa de deformação (m)

Outro parâmetro importante nas operações de conformação é o expoente de sensibilidade à taxa de deformação, m , o qual é uma medida do comportamento da tensão quando ocorrem mudanças incrementais na taxa de deformação. A equação de Norton-Hoff é utilizada para o endurecimento com a taxa de deformação [Hosford, 2007]:

$$\sigma = c \cdot \dot{\epsilon}^m \quad (2.9)$$

O valor de m influencia a distribuição de deformações de uma maneira similar ao valor de n . Um valor de m positivo indica que a tensão de escoamento aumenta com o aumento da taxa de deformação. Como consequência, reduz a localização de deformação na presença de um gradiente de tensões e opõe-se à rápida formação do pescoço pela melhor distribuição das deformações, tornando-a mais difusa. Entretanto, tensões elevadas são necessárias para conformar peças em altas taxas de deformação. De maneira contrária, um valor de m negativo promove a localização da deformação e gera um gradiente de deformação mais severo. Portanto, ambos, o sinal e magnitudes de m , são importantes [Graf & Hosford, 1990; Hosford, 2007].

Assim como n , altos valores de m levam a uma boa estampabilidade em operações de estiramento, mas tem pouco efeito no embutimento, pois se por um lado é benéfico aumentando a resistência ao afinamento das paredes, também aumenta a resistência à deformação do flange.

Coefficiente de anisotropia (r)

Durante a estampagem, a chapa metálica pode apresentar comportamento anisotrópico como resultado de sua textura. Texturas descritas por $\{hkl\} \langle uvw \rangle$ significam que os planos $\{hkl\}$ estão paralelos ao plano da chapa e que a direção $\langle uvw \rangle$ está alinhada com a direção de laminação.

A formação de textura favorável nos aços baixo carbono é função da composição do aço, temperatura de acabamento e de bobinamento durante a laminação a quente, porcentagem de redução durante laminação a frio, velocidade de aquecimento e temperatura de recozimento após a deformação a frio [Ferreira Filho *et al*, 2003; Turazi, 2008].

A textura de um material pode ser avaliada através da relação entre a resistência oferecida à deformação nas diferentes direções do plano e na espessura da chapa, obtidos a partir de um ensaio de tração. O coeficiente de anisotropia plástica, r , é definido como o quociente entre a deformação verdadeira na largura e na espessura do corpo de prova ensaiado:

$$r = \frac{\varepsilon_w}{\varepsilon_t} \quad (2.10)$$

Como a deformação na espessura é muito pequena, e a medição da mesma está sujeita a um erro expressivo, pela lei da conservação do volume, pode-se reescrever a equação 2.10 da seguinte forma:

$$r = - \frac{\epsilon_w}{\epsilon_w + \epsilon_l} \quad (2.11)$$

E conseqüentemente:

$$r = \frac{\ln\left(\frac{w_o}{w_f}\right)}{\ln\left(\frac{l_f w_f}{l_o w_o}\right)} \quad (2.12)$$

Como as propriedades mecânicas da chapa podem variar nas diferentes direções do plano da mesma, é de interesse uma relação média do comportamento de deformação ao longo deste plano. Pode-se caracterizar, então, o coeficiente de anisotropia normal, determinado a partir de medidas nas direções paralela (0°), transversal (90°) e a 45° da direção de laminação, conforme figura 2.25.

$$\bar{r} = \frac{r_{0^\circ} + 2r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{4} \quad (2.13)$$

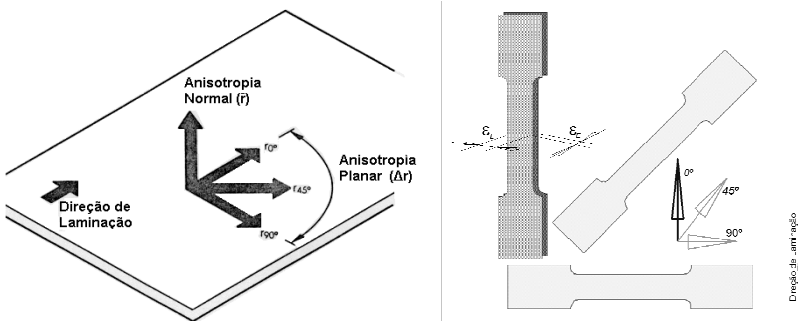


Figura 2.25 – Representação das principais direções avaliadas para o cálculo da anisotropia plástica. [SME Handbook, 1978]

Um coeficiente de anisotropia normal unitário é indicativo de resistência à deformação no plano da chapa igual à deformação na direção da espessura da chapa. Se a resistência na direção da espessura é maior que a média da resistência nas diferentes direções do plano da chapa, a relação de deformação média é maior que a unidade. Neste caso o material é resistente ao afinamento. Em geral, o coeficiente de anisotropia normal, \bar{r} , está diretamente relacionado com a profundidade do embutimento, quanto mais alto o valor de \bar{r} mais profundo será o embutimento [Rocha, 2006].

Os valores da anisotropia normal em aços efervescente variam de 0,8 a 1,2, em aços acalmados ao alumínio a anisotropia normal pode variar de 1,5 a 1,8, e em alguns aços IF, *Interstitial free*, a anisotropia normal pode chegar a 2,2. Já para o cobre e aços inoxidáveis austeníticos, a anisotropia normal pode ser tão baixa quanto 0,1 [Ferrarini, 2004].

Quanto maior for a porcentagem de planos {111} paralelos à superfície da chapa e à direção de laminação, maior será o valor de \bar{r} [Araújo Neto, 2005].

O aumento da porcentagem de planos {111}, ou seja, formação de textura preferencial, está diretamente relacionado com o percentual de redução a frio. Portanto, o percentual de redução a frio possui uma influência significativa no valor de \bar{r} [Lange, 1993; Araújo Neto, 2005]. Esta relação é mostrada na figura 2.26 para dois aços, sendo um acalmado ao alumínio e outro IF.

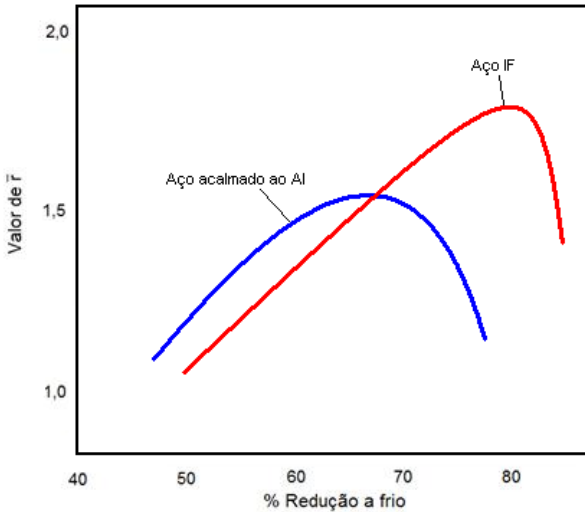


Figura 2.26 – Efeito do percentual de redução a frio na anisotropia normal para dois aços [Lange, 1993].

Outro parâmetro importante é o coeficiente de anisotropia planar, Δr , que indica a variação do comportamento da deformação nas diferentes direções do plano da chapa. Este é expresso por:

$$\Delta r = \frac{r_{0^\circ} - 2r_{45^\circ} + r_{90^\circ}}{2} \quad (2.14)$$

Um Δr igual a zero indica que o material apresenta um comportamento isotrópico. É de interesse nas operações de embutimento que Δr seja igual ou próximo de zero, pois isto permitirá uma deformação uniforme sem a formação de “orelhas” em um produto estampado.

A anisotropia planar Δr tem relação direta com a altura das orelhas. Normalmente, verifica-se que para $\Delta r > 0$, as orelhas ocorrem a 0° e 90° , sendo característica dos aços baixo carbono, enquanto que para $\Delta r < 0$ as orelhas ocorrem a 45° e 135° em relação à DL, que é característico dos aços de maior resistência (maior LE) [Plaut, 2005; Ferrarini, 2004].

Em geral, materiais com alta anisotropia normal possuem alta anisotropia planar [Lange, 1993].

2.4.8 Ensaios simulativos

Os ensaios simulativos são utilizados para avaliar a estampabilidade de chapas metálicas, através da simulação em laboratório da conformação que a chapa vai sofrer em escala industrial, reproduzindo experimentalmente um modo de deformação em particular. Os ensaios simulativos mais comuns são descritos brevemente a seguir.

Ensaios Olsen e Erichsen

Ambos submetem a chapa a um estiramento biaxial e diferem entre si, principalmente, pelas dimensões da ferramenta utilizada. O prensa chapas fixa o corpo de prova na matriz enquanto uma esfera de aço endurecida com 22 mm de diâmetro (Olsen) ou 20 mm (Erichsen – figura 2.27a) é forçada contra o corpo de prova preso na ferramenta.

O fim do ensaio Erichsen é determinado pelo aparecimento de estricção e então se mede a profundidade do copo formado, em milímetros. A relação entre o diâmetro e a altura do copo formado determina o índice de ductilidade Erichsen (IE) [NBR 5902, 1980]. O valor Erichsen tem o inconveniente de não ser um número adimensional e depende essencialmente da espessura do material ensaiado, não podendo estabelecer correlação entre materiais de espessuras diferentes [Tigrinho, 2005].

Durante o ensaio Olsen, a carga e a profundidade de estampagem são medidas continuamente e o índice de ductilidade Olsen é obtido através da profundidade da calota, em milésimos de polegada, no momento em que a carga começa a diminuir. A espessura nominal da chapa é limitada a 1,57 mm devido à folga entre o punção e a matriz [Srou, 2002].

Ensaio Swift

Este ensaio simula o embutimento profundo. Utiliza um punção cilíndrico de 32 ou 50 mm de diâmetro para formar um copo cilíndrico, onde a provável região da fratura está localizada no raio de arredondamento no fundo do copo. Permite a medição da razão limite de embutimento e indicações qualitativas da textura cristalográfica do material, a partir da irregularidade do flange do copo formado. O ferramental para o ensaio é mostrado na Figura 2.27b.

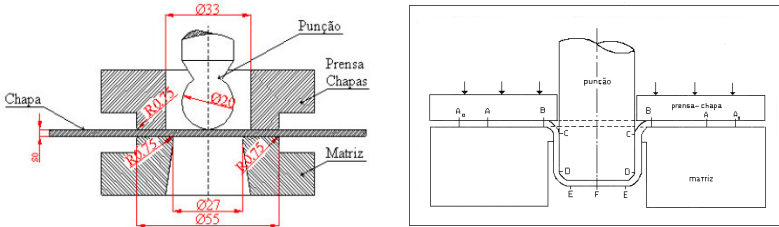


Figura 2.27 – Desenho esquemático dos ensaios: (a) Erichsen [Schaeffer, 1999]; (b) Swift [Swift, 1952].

Ensaio Jovignot ou Bulge Test

Permite desenvolver grandes deformações de estiramento antes de o material romper, devido principalmente à ausência de atrito entre punção e chapa, uma vez que a deformação do disco é realizada por uma pressão hidráulica ao invés de um estampo. Neste teste simula-se o estiramento puro e o valor medido é a altura da calota hemisférica (em mm) no momento da ruptura.

Ensaio Fukui

A combinação dos processos de estiramento e embutimento pode ser simulada no teste de copo cônico de Fukui. O teste do copo cônico de Fukui consiste em forçar um disco de chapa para o interior de uma matriz cônica com um punção hemisférico, conforme figura 2.28.

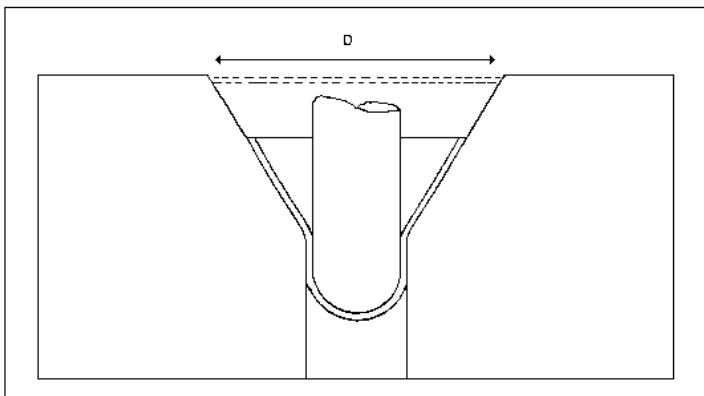


Figura 2.28 – Ferramental do ensaio Fukui [Frommann, 1968].

O valor medido é a média dos diâmetros máximo e mínimo. As variações de diâmetros ocorrem por causa de anisotropia planar da chapa. Estes valores tem o inconveniente 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 difícil a comparação de valores referentes a faixas de espessura diferentes. O posicionamento do corpo de prova na matriz influi notavelmente nos resultados.

2.5 Curva Limite de Conformação (CLC)

A avaliação da estampabilidade de chapas metálicas pode ser feita através do uso de curvas de limite de conformação, ou CLC's. O conceito das CLC's foi desenvolvido por Keeler em 1965 quando este sugeriu um critério de falha empírico, baseado no par de medidas da maior, ϵ_1 , e menor, ϵ_2 , deformações principais em um ponto crítico de falha. Este par de deformações foi definido como o ponto onde eventualmente uma fratura poderia ocorrer. Posteriormente este conceito foi estendido para valores negativos da menor deformação [Woodthorpe, 1969; Goodwin, 1971].

Uma CLC, portanto, é um diagrama empiricamente construído, largamente utilizado para descrever o lugar geométrico das deformações principais e críticas, que ocorrem na superfície da chapa, para as quais a estricção localizada se torna visível ou ocorre à fratura. As CLC's são empregadas para avaliar o limite das deformações de um determinado material quando submetido aos diversos modos de deformação inerentes aos processos de conformação. A figura 2.29 mostra CLC's de diversos materiais metálicos.

Para controlar as falhas mecânicas no processo, compara-se a distribuição das deformações nas peças com as CLC's do material, obtidas em laboratório. Este procedimento permite ainda inferir se um determinado material está conveniente para a peça projetada, bem como ajustar adequadamente as condições de lubrificação e a geometria do ferramental adotado no processo [Ghosh, 1975].

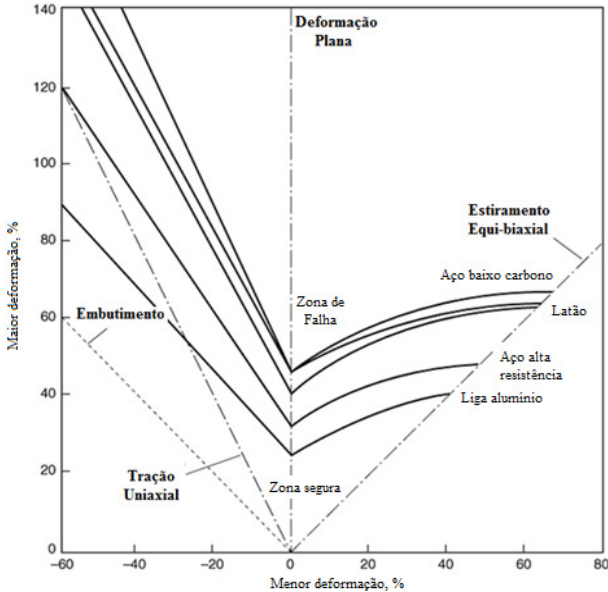


Figura 2.29 – CLC para vários materiais metálicos [*Sheet Metal Forming - Tecnologie Industriali - Department of Mechanical Engineering - University of Calabria*].

A fim de evitar o surgimento de fraturas ou estricções em uma determinada peça estampada, é necessário que os níveis de deformação em todos os pontos desta peça estejam abaixo da CLC. Uma margem de segurança é normalmente inserida, resultando num deslocamento imaginário da CLC para baixo. O risco de rompimento é determinado pela avaliação da proximidade das deformações da peça em relação a CLC. No entanto, não é suficiente apenas verificar o risco de rompimento quando se está definindo um processo de estampagem. Outros defeitos como afinamento excessivo, enrugamento ou estiramento insuficiente podem ser identificados através da CLC. Através da CLC, pode então ser estabelecida uma “Janela de Conformação”, conforme mostrado na figura 2.30 [Holmberg et al, 2003; Marciniak, 2002].

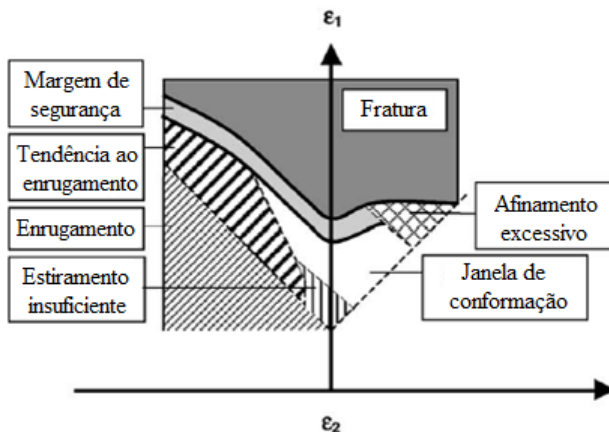


Figura 2.30 – CLC e a janela de conformação [Holmberg et al, 2003].

Geralmente, a CLC mostra um mínimo para a maior deformação principal, ε_1 , quando a outra deformação principal ε_2 é igual ou próxima de zero, indicando que o modo de deformação plana da chapa é muito crítico. Estudos mostram que 85% das falhas nas peças estampadas ocorrem nestas condições, com a menor deformação principal no plano da chapa situada entre $\pm 2\%$ [Ayres *et al*, 1979]. Isto é devido ao fato de que quando uma das deformações principais no plano da chapa se aproxima de zero a estricção se torna menos difusa, as tensões desenvolvidas são maiores e ocorre então o afinamento da chapa devido à conservação de volume. Para este ponto mínimo da CLC, a deformação principal ε_1 é aproximadamente igual ao coeficiente de encruamento, n [Marciniak, 2002, Xua et al, 2000; Xu et al, 1998; Mielnik, 1991; da Rocha, 2003].

A utilização da CLC possui algumas limitações e incertezas. A construção da CLC é baseada na hipótese de que as trajetórias das deformações são lineares, por exemplo, o modo de deformação permanece constante durante todo o processo. No entanto, esta condição não é observada na maioria dos casos industriais. Vários estudos a respeito do efeito das trajetórias das deformações da CLC foram conduzidos, como Graf & Hosford (1993) e Friedman & Houston (1999), correlacionando parte deste desvio das trajetórias de deformações aos efeitos do dobramento durante a conformação.

Outras dificuldades na construção da CLC são a grande dispersão dos resultados experimentais e o longo tempo para determinação da CLC, face ao curto prazo para desenvolvimento de um processo nas indústrias. Para minimizar estas dificuldades, foram desenvolvidos diferentes métodos empíricos e teóricos para previsão da CLC [Holmberg et al, 2003].

2.5.1 Fatores que influenciam a CLC

Podem ser destacados alguns fatores que de alguma forma alteram as CLC's:

Coefficiente de encruamento, n

De modo geral, como a CLC intercepta o eixo das maiores deformações, ϵ_1 , a um valor aproximadamente igual ao coeficiente de encruamento n , à medida que n diminui a CLC se desloca para baixo, conforme mostrado na figura 2.31a [Marciniak, 2002].

Podem acontecer interações entre as propriedades do material que influenciem a CLC. Na figura 2.31b [Marciniak, 2002], um exemplo é dado no qual um aumento do coeficiente de anisotropia pode não melhorar o limite de conformação em todos os modos de deformação se o aumento do n for acompanhado de uma redução da deformação após a estricção, que reduz o limite de conformação no estiramento equibiaxial, apesar da elevação do limite de conformação nos demais modos de deformação devido ao aumento de n [Marciniak, 2002].

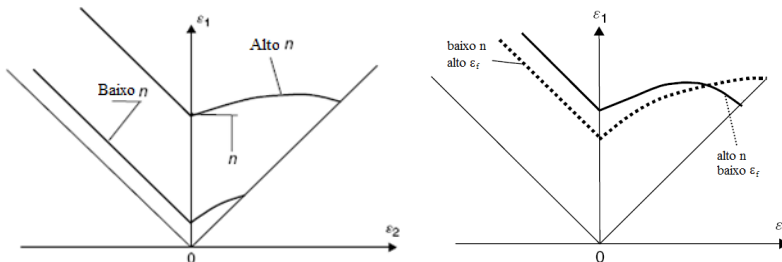


Figura 2.31 – (a) Efeito do valor de n na CLC; (b) Efeito na CLC decorrente do aumento de n e redução da deformação após início da estricção [Marciniak, 2002].

Nos ensaios simulativos para determinação do limite de conformação na região do modo de deformação por estiramento equibiaxial, ao comparar alguns materiais, as diferenças encontradas podem ser mais devido às propriedades da fratura do que ao coeficiente de anisotropia [Marciniak, 2002].

Coefficiente de anisotropia, r

Na região em que as deformações são menores e negativas, $\varepsilon_2 < 0$, a CLC é insensível ao valor de \bar{r} . No entanto, o valor de \bar{r} afeta a trajetória das deformações, ou seja, para valores mais elevados de \bar{r} a trajetória se torna não-linear e se desloca para pontos mais altos da CLC [Turazi, 2008; Plaut, 2003].

O material tem sua capacidade de deformação aumentada para $\varepsilon_2 < 0$ e reduzida para $\varepsilon_2 > 0$ quando $r_{90^\circ} > r_{0^\circ} > r_{45^\circ}$, isto é, a CLC sofre uma rotação no sentido horário [Silveira Netto, 2004].

No entanto, segundo Marciniak (2002), mudanças nos valores de \bar{r} não tem influência significativa na CLC.

Espessura da chapa

A CLC é afetada pela espessura da chapa. Uma diminuição da espessura leva a menores valores limites de deformação, devido à menor capacidade do material acomodar as deformações, permitindo assim o surgimento da estrição localizada e, com esta, um estado triaxial de tensões, favorável à ruptura da peça. O aumento da espessura implica em retardar a formação da deformação localizada devido à maior zona de estrição.

O efeito conjunto da espessura e dos valores de n no ponto onde a CLC corta o eixo das deformações maiores, ε_1 , deformação plana, é mostrado na figura 2.32.

Expoente de sensibilidade à taxa de deformação, m

Como mostrado na figura 2.33, para um material com elevado expoente de sensibilidade à taxa de deformação, m , a CLC pode interceptar o eixo das maiores deformações, ε_1 , em valores maiores que n , devido à melhor distribuição das deformações, tornando a estrição mais difusa [Marciniak, 2002].

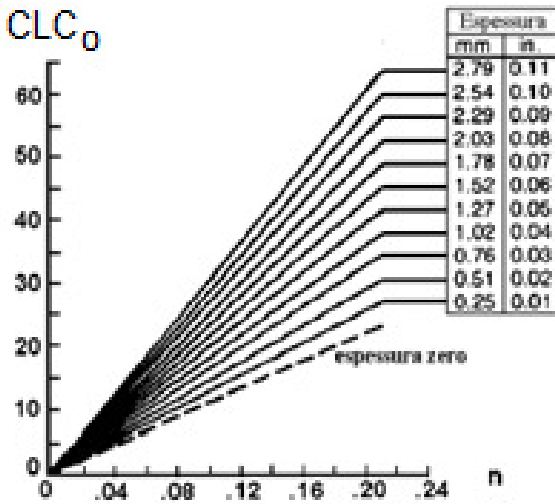


Figura 2.32 – Efeito da espessura e coeficiente de encruamento, na CLC [Hosford, 2007].

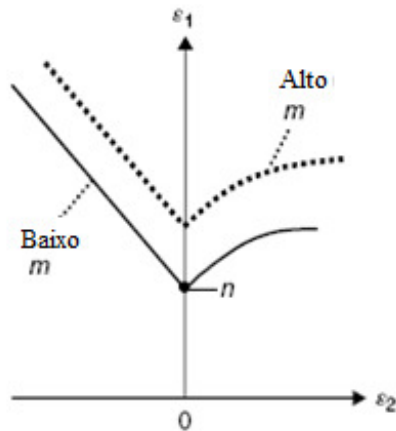


Figura 2.33 – Efeito de m na CLC [Marciniak, 2002].

Inclusões, impurezas e composição química

A curva CLC é afetada pela composição química do aço de acordo com os teores de carbono, manganês, e microligantes. De modo geral, a CLC tende para valores mais baixos à medida que mais elementos de liga são adicionados [Plaut, 2003].

É esperado que quanto maiores os defeitos presentes no material (riscos, rugosidades, inclusões, impurezas, segregações ou variação pontual de textura ou espessura) menores serão os limites de conformação, conforme mostrado na figura 2.34 [Marciniak, 2002].

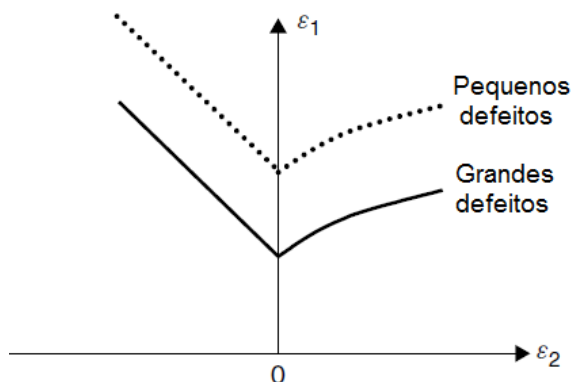


Figura 2.34 – Efeito da magnitude dos defeitos na CLC [Marciniak, 2002].

Outros fatores

Quanto menor for o coeficiente de atrito entre punção e o corpo de prova, maiores serão as deformações e conseqüentemente a CLC será deslocada para cima [Silveira Netto, 2004].

Corpos de prova preparados na direção de laminação apresentam maiores deformações e quando preparados na direção perpendicular à laminação apresentam menores deformações [Silveira Netto, 2004].

Quanto menor a velocidade do punção, maior a capacidade do material ser deformado, elevando a CLC [Silveira Netto, 2004].

2.5.2 Determinação da CLC

As etapas para determinação da CLC podem ser descritas conforme abaixo:

- Impressão de uma grade de quadrados ou círculos nas chapas metálicas;
- Execução do ensaio, até início da estricção ou ruptura;
- Medição das deformações principais ocorridas (máxima e mínima);
- Seleção do critério e método para determinação da falha;
- Plotagem da curva limite de conformação.

Impressão da grade e medição das deformações

É importante que se utilize um método capaz de garantir a consistência dos resultados para as condições específicas do ensaio. Existem na literatura relatos e detalhes de diversos processos possíveis para impressão da grade, modelos de grade e método da medição das deformações principais [Lobão, 2003; Srouf, 2002; Magnabosco, 1994].

Execução do Ensaio

Existe na literatura a descrição de muitos ensaios a partir dos quais pode ser determinada a CLC, como os testes uniaxiais (tração) e os ensaios simulativos Swift, Fukui, Erichsen, e Bulge Teste, que possibilitam a obtenção da CLC. Estes ensaios embora provoquem deformações que atingem a zona plástica, não são os mais indicados para determinar a CLC de um material, pois eles definem apenas um único modo de deformação. Como os materiais durante um processo real de conformação estão sujeitos a combinações dos diversos modos de deformação, seriam necessários diferentes ensaios para definir a CLC por completo [Moreira et al, 2003; Silveira Netto, 2004].

Nakazima (1968) através de um único método de ensaio propôs determinar tanto as deformações de embutimento quanto as de estiramento, comparando seus resultados com os obtidos através de outros métodos de ensaios simulativos conhecidos em sua época, Bulge Teste e Erichsen.

Gronostjski e Dolny em 1980, buscando otimizar o método Nakazima, descreveram uma variação onde era utilizado o ferramental Marciniak, com a intenção de eliminar os efeitos do atrito entre a chapa e o ferramental.

Atualmente o processo para determinação da CLC segue a norma ISO/WD 12004, a qual descreve os métodos de ensaios de Nakazima e Marciniak.

Ensaio Nakazima - Permite com um único ferramental reproduzir estados de deformações uniaxiais e biaxiais, através da deformação imposta por um punção semi-esférico em chapas metálicas retangulares que variam de largura e são fixas por uma matriz e um prensa-chapa. O ferramental é mostrado esquematicamente na Figura 2.35 [Nakazima, 1968].

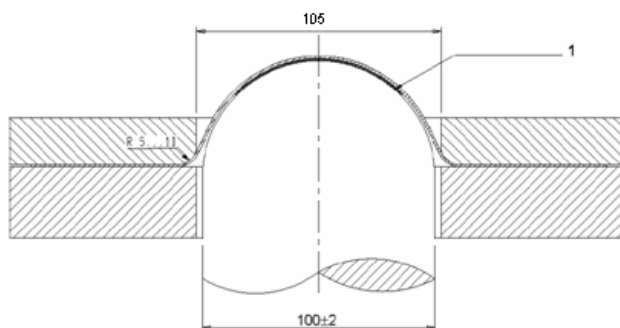


Figura 2.35 – Ferramental do ensaio Nakazima, sendo 1 a camada de lubrificação [Nakazima, 1968].

Ensaio Marciniak - Difere do ensaio Nakazima principalmente devido à conformação simultânea do corpo de prova e de um espaçador posicionado na sua superfície. Este impede que ocorra o contato direto entre o punção e a chapa, eliminando desta forma o efeito do atrito. Outra diferença refere-se ao formato das chapas que passam a ser circulares com entalhes circulares de raios variados. O punção neste ensaio tem um formato de copo cilíndrico. O ferramental é mostrado esquematicamente na Figura 2.36 [Gronostajski & Dolny, 1980]. A fim de obter diferentes caminhos de deformação, punções com diferentes geometrias também podem ser utilizados.

Em ambos os ensaios os modos de deformação são simulados, variando-se a largura dos corpos de prova. Simula-se mais adequadamente o modo de estiramento equi-biaxial à medida que se aumenta a largura dos corpos de prova, conforme mostrado na figura 2.37 para o ensaio Nakazima.

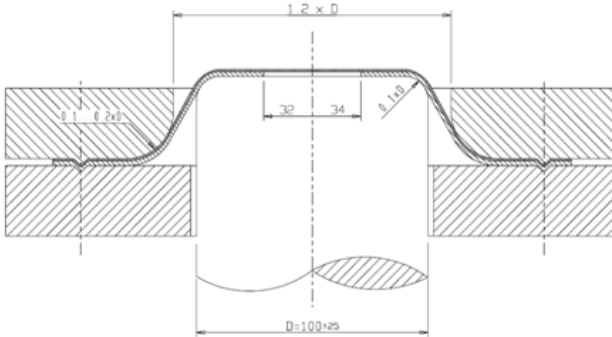


Figura 2.36 – Ferramental do ensaio Marciniak [ISO/WD 12004].

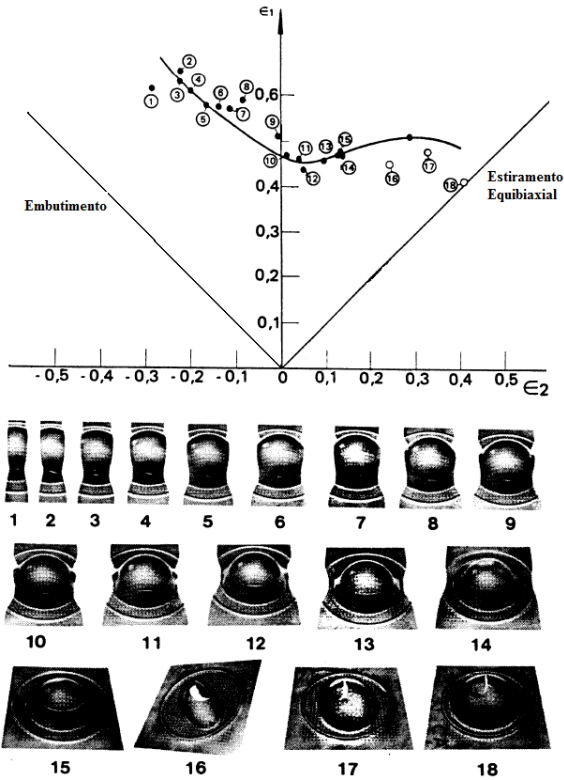


Figura 2.37 – Simulação de diversos modos de deformação para construção da CLC [Klein, 1981].

Critérios e métodos para determinação da falha

Quando aparecem estricções ou fraturas em chapas metálicas submetidas ao processo de estampagem, considera-se que o material atingiu o seu limite de conformação. Por este motivo, estes defeitos são utilizados como valores limites, possibilitando a definição de dois critérios para a determinação das CLC's, à fratura e à estricção.

Critério de fratura – as medições das deformações maiores e menores são realizadas depois que no corpo de prova surge uma trinca. As medições são realizadas diretamente sobre a rede de círculos ou quadrados. É recomendado, para facilitar a medição, interromper o ensaio após a ocorrência da fratura, e não esperar pela completa separação. Isto pode ser conseguido através do controle da força e velocidade do punção. A fratura é um critério bem definido, fácil de detectar, sem ambiguidade, mas quando ocorre, a região da fratura já foi alterada e a medição das deformações é muito difícil, quando não impossíveis [Coll, 2000].

Critério de estricção – o surgimento da estricção na chapa metálica possibilita a medição das deformações maiores e menores da rede de quadrados ou círculos impressos. É interessante prever o início da estricção localizada, pois uma peça com estricção localizada está sujeita a ser rejeitada devido ao seu aspecto não aceitável para peças expostas, sua resistência pode ser afetada, existe um grave risco de iniciar fadiga e a proteção contra oxidação pode ser reduzida. Este critério é também mais conservador, pelo fato de que a fratura dúctil sempre vem precedida pela estricção que ocorre em níveis menores de deformação. Na estricção, a medição da deformação é tão difícil quanto na fratura, porém sua detecção é mais difícil [Coll, 2000].

Yoshida et al (1968) e Keeler (1965) estudaram um dos grandes problemas envolvendo a determinação da CLC: “A CLC deve ser determinada em termos da fratura ou estricção ?”

Novos critérios de falha, estricção pronunciada e estricção difusa, foram desenvolvidos ao longo dos anos, mas nenhum se tornou prática comum e difundida nas indústrias [Holmberg et al, 2003; Butuc, 2004].

Para o critério de estricção localizada, os métodos para determinação das deformações são baseados na detecção do início de um forte gradiente de deformações, característica da estricção localizada. Os métodos propostos para determinação das deformações correspondentes à estricção localizada são [Butuc, 2004]:

- Método Veerman (Veerman et al, 1971) – compara a deformação de 3 círculos adjacentes e descreve a deformação do círculo central como média da deformação dos círculos adjacentes.
- Método Bragard (Bragard, 1972) – baseado na distribuição da deformação na fratura e utiliza o método matemático da regressão parabólica para determinar o ponto correspondente a estrição localizada.
- Método do “perfil duplo” (D’Haeyer & Bragard, 1974) – consiste na determinação de dois perfis de distribuição da deformação, sendo um correspondente à estrição localizada e outro correspondente à fratura. Ambos os perfis são então plotados num único gráfico e os dois últimos pontos em comum são selecionados para definir os limites de conformação na estrição localizada.
- Método Hecker (Hecker, 1972) – consiste na medição de três tipos de círculos (círculos fraturados, círculos com estrição localizada e círculos sem falhas). A CLC é obtida pela plotagem dos limites entre os diferentes tipos de círculo.
- Método Kobayashi (Kobayashi et al., 1972) – propôs determinar a estrição localizada no momento em que um aumento brusco da rugosidade de superfície ocorre.
- Método nº 5 de Zürich (Parniere & Sanz, 1976) – Propôs a padronização da interpolação do método de Bragard, através da medição de um círculo fraturado e de 3 círculos adjacentes de cada lado, desde que a diferença entre dois círculos adjacentes seja menor que 5%.

A Sociedade de Metalurgia da França (1974), ao comparar todos os diferentes ensaios e métodos utilizados para determinação experimental da CLC, mostrou que a CLC é fortemente dependente do tipo de ensaio utilizado, principalmente na região da deformação plana. No entanto, para um único ensaio (Nakazima, Marciniak, etc), a CLC não depende de forma significativa do método de determinação das deformações limites de conformação [Butuc, 2004].

2.6 Aços para estampagem

2.6.1 Chapas laminadas a frio para estampagem

A laminação a frio é empregada para produzir chapas, folhas e tiras com espessuras de 0,15 até 3,00 mm, com acabamento de superfície e tolerâncias dimensionais superiores quando comparadas com as tiras produzidas por laminação a quente. Além disso, o encruamento resultante da redução a frio pode ser utilizado para aumentar a resistência do produto final. A redução total atingida por laminação a frio geralmente varia de 50 a 90%. Normalmente, as menores reduções são realizadas nos últimos passes para permitir um melhor controle do aplainamento, espessura e acabamento de superfície.

Aços recozidos apresentam limite de escoamento descontínuo, o que acarreta em deformações heterogêneas nos processamentos posteriores (linhas de Lüders). Isto é devido ao alongamento descontínuo do limite de escoamento. A prática normal é dar uma pequena redução final a frio no aço recozido, chamada de passe de encruamento de superfície, que elimina o alongamento descontínuo do limite de escoamento. Esse passe de acabamento também resulta numa melhora da qualidade de superfície e controle dimensional. Outros métodos podem ser utilizados na melhoria do controle dimensional das tiras ou folhas laminadas, entre estes estão o aplainamento por rolos e o desempenho por tração.

Aços Qualidade Comercial

Utilizados em conformação simples, suas principais aplicações são em relaminação, construção civil, tubos, componentes e peças. A norma NBR6658 estabelece condições exigíveis para fabricação e fornecimento de bobinas e chapas finas de aço-carbono, laminadas a frio, destinadas a uso geral, as quais compreendem apenas garantias de composição química e valores de referência para dureza máxima de 65HRb.

Aços para Estampagem

Indicados para aplicações em que ocorrem desde deformações relativamente pequenas até conformações bastante severas. Conforme norma NBR5915, alterações em suas composições químicas e nas

variáveis de processamento térmico e mecânico proporcionam níveis diferentes de propriedades mecânicas e, conseqüentemente, diversos graus de estampabilidade, sendo estes:

- Estampagem Média (EM);
- Estampagem Profunda (EP);
- Estampagem Extra-Profunda (EEP);
- Estampagem Extra-Profunda Peça Crítica (EEP-PC);
- Estampagem Extra-Profunda Livre de Interstícios (EEP-IF).

3. METODOLOGIA E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

3.1 Metodologia

O objetivo deste estudo foi aplicar na indústria da linha branca uma metodologia para análise do processo de estampagem. As principais ferramentas utilizadas durante este estudo foram a CLC e a distribuição das deformações, que forneceram informações importantes para a caracterização dos processos de estampagem, permitindo a seleção do material mais adequado e a otimização dos parâmetros de processo.

Neste estudo foram utilizadas chapas de aço de 3 diferentes graus de estampagem, conforme mostrado na tabela 3.1. Na tabela 3.2 são mostradas as composições químicas estabelecidas por norma e as obtidas através de análises de laboratório nas amostras utilizadas nos ensaios. Fica evidente que se tratam de aços de baixo carbono, acalmados ao alumínio e sem elementos de liga. Na tabela 3.3 são mostradas as propriedades mecânicas na direção transversal à direção de laminação estabelecidas em norma.

Duas peças fabricadas internamente na estamperia da Whirlpool foram selecionadas a partir de um critério que considerou o histórico de quantidade de falhas durante o processo de estampagem. Estas peças, painel estufa e painel forno, são componentes que compõem a estética de uma linha de fogões, conforme mostrado na figura 3.1. Na produção do painel estufa e do painel forno são utilizadas 2 operações, sendo a primeira de formar e a segunda de recortar. Como o objeto deste estudo foi estudar as operações críticas, embutimento e estiramento, a segunda operação não foi avaliada.



Figura 3.1 – Representação da aplicação das peças utilizados neste estudo.

O trabalho foi dividido em três etapas:

- i. caracterização das propriedades mecânicas;
- ii. obtenção em laboratório das CLC's;
- iii. obtenção da distribuição das deformações.

Na primeira etapa, de caracterização dos materiais, amostras dos materiais selecionados foram analisadas para determinação das propriedades mecânicas através de ensaios de dureza e tração. Além da comparação entre as propriedades dos materiais de diferentes graus de estampagem, possíveis variações de propriedades mecânicas entre lotes de um mesmo grau de estampagem também foram estudadas através destes ensaios.

Na segunda etapa foram determinadas as CLC's para cada um dos três aços de diferentes graus de estampagem, através do ensaio de Nakazima. Possíveis variações na CLC devido a diferentes lotes de um mesmo grau de estampagem também foram estudadas.

Uma vez determinadas as CLC's dos três aços, obteve-se o comportamento destes materiais quando submetidos aos diversos modos de deformação. O próximo passo foi determinar a distribuição das deformações impostas pela geometria das peças painel estufa e painel forno, utilizando as três classes de aço e comparando-as às CLC's dos respectivos materiais.

Através desta comparação e da análise das propriedades mecânicas ensaiadas, o efeito de alguns parâmetros de processo que influenciam fortemente a estampagem (tipo de lubrificação, força de sujeição, revestimento de zinco, geometria do *blank* e geometria do ferramental) foram estudados, procurando-se obter a melhor configuração de parâmetros que resultariam na peça final mais próxima da especificação e isenta de defeitos.

Tabela 3.1 – Aços utilizados neste trabalho

Material	Grau de estampagem	Fornecedor	Esp. (mm)	No. Lotes
Chapa Fina Laminada a Frio	Qualidade Comercial (QC), conforme NBR06658	CSN	0,60	2
Chapa Fina Laminada a Frio	Estampagem Extra Profunda (EEP), conforme NBR05915	CSN	0,60	5
Chapa Fina Laminada a Frio Eletro galvanizada (EG)	Estampagem Extra Profunda para peça crítica (EEP-PC), conforme NBR05915	Usiminas	0,55	1

Tabela 3.2 – Valores composição química conforme normas e encontrados nos materiais utilizados

Grau de Estampagem		Composição Química (% peso máx.)					
		C	Mn	P	S	Al	Ti
QC	NBR06658	0,15	0,60	0,045	0,045	-	-
	Real	0,11	0,45	0,015	0,010	0,03	0,001
EEP	NBR05915	0,08	0,45	0,030	0,030	0,02	-
	Real	0,05	0,30	0,014	0,018	0,04	0,001
EEP-PC EG	NBR05915	0,06	0,35	0,025	0,025	0,02	-
	Real	0,04	0,22	0,011	0,009	0,04	0,001

Tabela 3.3 – Propriedades Mecânicas conforme NBR's 05915 e 06658

Grau de Estampagem	LE (MPa)	LR (MPa)	Alongamen- to min. (%)	Dureza (HRB) máx.	\bar{r}	n
			Lo=50mm			
QC	-	-	-	65	-	-
EEP	140-250	270-350	36	50	-	-
EEP-PC EG	140-230	270-350	37	50	1,6 min.	0,20

3.2 Procedimentos Experimentais

3.2.1 Ensaio de Dureza

O ensaio de dureza foi realizado em amostras de todos os materiais (QC, EEP e EEP-PC). Este ensaio foi realizado segundo a norma ASTM A 18, utilizando-se um durômetro Officine Galileo, modelo SA200.

Devido à pequena espessura, as leituras foram feitas na escala Rockwell 30T. Para tal, as identações foram realizadas com carga aplicada de 30 kg, por um tempo mínimo de 5 segundos e através de um penetrador de esfera de aço de diâmetro 1/16 in.

As medidas obtidas foram então convertidas para a escala Rockwell B de acordo com a norma ASTM E 140. Cada valor apresentado é o resultado da média de três identações.

3.2.2 Ensaio de tração para determinação das propriedades mecânicas

Foram obtidas as seguintes propriedades no ensaio de tração: limite de escoamento (LE), limite de resistência (LR), razão LR/LE, alongamento total, coeficiente de encruamento (n), coeficiente de anisotropia normal (\bar{r}) e coeficiente de anisotropia planar (Δr).

Os ensaios foram executados numa Máquina Universal de Teste MTS – Sintech 10/D, com capacidade de 5 toneladas. A taxa de deformação foi mantida constante para todas as amostras em 0,1/min.

O ensaio de tração foi realizado segundo a norma ASTM E 8M, à exceção da determinação do coeficiente de anisotropia, onde foi utilizada a norma ASTM E 517. Foi utilizado para os dois ensaios o

mesmo corpo de prova, mostrado na figura 3.2, pois atende ambas as normas.

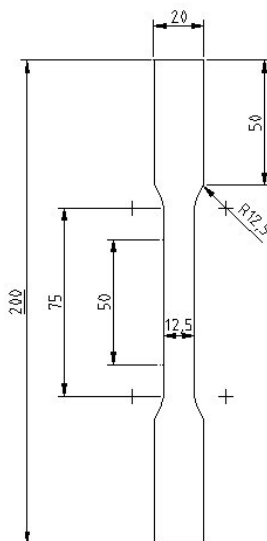


Figura 3.2 – Corpo de prova para o ensaio de tração – Dimensões em mm.

Os corpos de prova foram obtidos a 0° , 45° e 90° em relação à direção de laminação. Foram utilizados 3 corpos de prova por condição.

Os valores do limite de escoamento e do limite de resistência à tração foram obtidos diretamente do software da máquina universal de testes. Já o alongamento total, os coeficientes de anisotropia (normal e planar) e o coeficiente de encruamento foram obtidos através de cálculos a partir dos resultados dos ensaios.

Para determinação do coeficiente de anisotropia e de encruamento em um único ensaio, foram realizadas interrupções em dois pontos da curva tensão x deformação de engenharia, sendo a primeira interrupção a 15% de deformação (distância entre garras) e a segunda interrupção a 20% deformação. Em cada uma destas interrupções foram medidos novamente a largura e o comprimento, e registrada a força aplicada, para então prosseguir o ensaio normalmente até o rompimento do corpo de prova, tornando possível também o cálculo do alongamento total.

3.2.3 Determinação da CLC

A determinação das CLC's foi baseada no procedimento e ferramental proposto por Nakazima e de acordo com as normas ASTM E2218-02 e ISO/WD 12004.

Foram utilizados nove corpos de prova para cada lote de material, conforme tabela 3.1, à exceção do aço EEP, onde 3 lotes foram utilizados para determinação da CLC. Estes corpos de prova foram cortados em tesoura guilhotina, evitando a geração de rebarbas. As dimensões de cada corpo de prova foram:

- Comprimento = 215 mm (paralela a direção de laminação);
- Largura = 55 a 215 mm, de 20 em 20 mm.

Em cada corpo de prova foi gravado, através do processo eletroquímico, uma grade para medição das deformações, composta de círculos de diâmetro 3mm e quadrados. A opção por este tipo de grade foi decorrente da necessidade de uma gravação resistente à remoção, de boa precisão e de aplicação relativamente simples. O equipamento utilizado para gravação eletroquímica foi o modelo RB200 Industrial, fabricado pela Tecnigrav, bem como o líquido eletrolítico, o líquido de neutralização e a matriz de gravação.

O ferramental utilizado para a realização dos ensaios é mostrado na figura 3.3. As descrições técnicas e dimensionais do ferramental utilizado podem ser obtidas no trabalho de Lobão (2003).

As chapas foram fixadas através de uma prensa chapas com *draw beads* (quebra-rugas) para evitar o escorregamento da chapa durante a deformação. Entre a chapa e o punção foi utilizado como lubrificante bissulfeto de molibdênio (*Molikote*).

Para realização dos ensaios foi adaptada uma máquina universal de ensaios ZDM U 30T, que se encontra no Laboratório de Conformação Mecânica (LabConf) da UFSC.

O critério utilizado para o término do ensaio foi à fratura da chapa devido à maior simplicidade e à máquina não possuir sensibilidade para a detecção do início da estricção no material. A velocidade de deslocamento utilizada foi de 15 mm/min. O reconhecimento do momento da fratura e consequente indicativo de que o ensaio deveria ser interrompido era a diminuição brusca da força indicada no painel do equipamento.

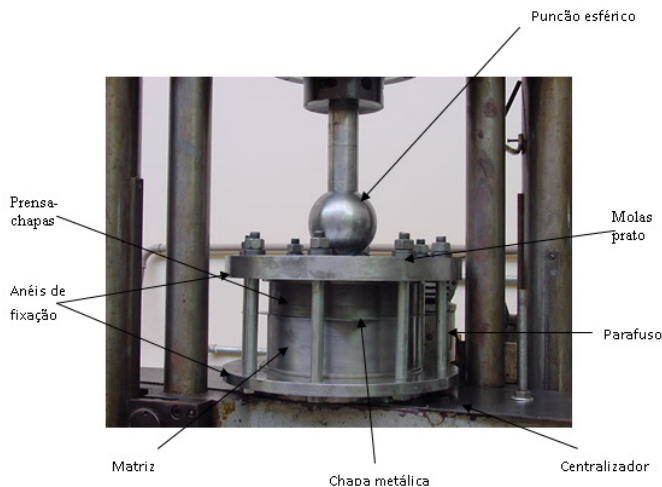


Figura 3.3 – Ferramental do ensaio Nakazima

Após o ensaio, os corpos de prova foram avaliados com relação ao posicionamento da fratura, e então, pedaços de papel milimetrado foram colados junto às regiões de falha dos corpos de prova, para servir como escala. Em seguida foram retiradas três fotografias destas regiões para cada corpo de prova. Para isso, procurou-se posicionar as chapas metálicas de tal forma que as regiões de falha ficassem o mais paralelo possível em relação à lente da câmera fotográfica, com o intuito de diminuir o erro devido à planificação das fotos.

As medidas dos diâmetros, menor e maior, dos círculos deformados foram realizadas nos softwares de análise de imagens, *Image-Pro Express* e *UTHSCSA Image Tool*. Foram medidos de três a cinco círculos por fotografia (marcados como A, B e C na figura 3.4), sendo que foram selecionados somente círculos não fraturados e próximos às fraturas. Procurou-se medir sempre os mesmos círculos nas diferentes fotografias. Este procedimento garante uma maior segurança, e torna a medição mais simples e precisa.

A média das deformações obtidas foi dividida em dois grupos, sendo:

- Grupo 1 - formado pelos corpos de prova em que a deformação ε_2 foi predominantemente negativa;
- Grupo 2 - formado pelos corpos de prova em que a deformação ε_2 foi predominantemente positiva;

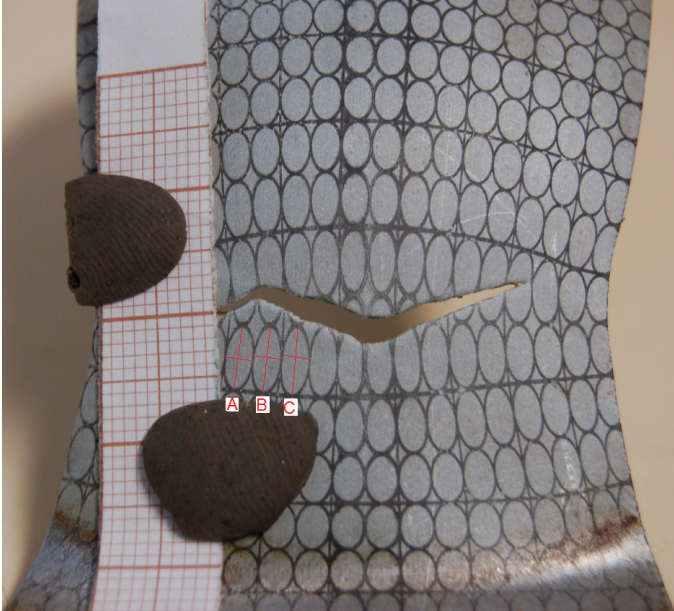


Figura 3.4 – Medição dos diâmetros dos círculos deformados nos corpos-de-prova do ensaio Nakazima.

A CLC foi então determinada através de linhas de tendência para os dois grupos separadamente, sendo estas linhas de tendência linear para o grupo 1 e logarítmica para o grupo 2. Unindo ambas as linhas de tendência, obtêm-se a CLC na sua forma final.

3.2.4 Determinação da Distribuição das Deformações

O ensaio para determinação da distribuição das deformações foi realizado utilizando-se os três aços na estampagem de duas peças diferentes, painel estufa e painel forno. Quatro experimentos foram conduzidos, com diferentes fatores de processo simulados a fim de entender o efeito destes fatores nas deformações geradas nas peças.

Os fatores de processo estudados nestes experimentos foram:

- Tipo de lubrificação – fator testado em três diferentes níveis: a seco; lubrificante emulsionável Frimax 100 (concentração 5%); e filme sólido de polietileno (PE).

- Força de sujeição – Através das equações 2.4 a 2.6, a força de sujeição teórica foi calculada para cada peça, tendo como resultado 118 kN para o painel estufa e 235 kN para o painel forno. Níveis em torno destes valores de referência foram simulados. Para o painel estufa foram utilizados os níveis 118, 216, 294, 392 e 441 kN. Para o painel forno foram testados os níveis 118, 196, 294 e 343 kN.
- Velocidade de deformação – mantido constante em 12 mm/s.
- Revestimento de zinco – aço sem revestimento, aço com revestimento e aço com revestimento removido quimicamente pela ação de ácido clorídrico 54%.
- Geometria do *blank* – *Blank* retangular com cantos retos e *blank* com cantos chanfrados (40 x 40 mm) para reduzir excesso de material, favorecendo seu fluxo.
- Geometria ferramental – medidas as deformações em duas posições simétricas com relação à peça, buscando possíveis diferenças devido à geometria do ferramental.

O experimento 1 foi conduzido de acordo com os tratamentos da tabela 3.4. O objetivo deste experimento foi avaliar as deformações máximas das peças painel estufa e painel forno quando fabricadas a partir dos aços QC, EEP e EEP-PC EG, além de estudar os efeitos do tipo de lubrificação e da força de sujeição nestas peças e materiais. O nível inicial utilizado para a força de sujeição foi 118 kN, ligeiramente menor que a força teórica calculada. Para o tipo de lubrificação, iniciou-se o experimento sem qualquer lubrificante. À medida que as peças eram estampadas, uma inspeção era realizada para identificação de defeitos de estampagem. De acordo com o resultado da análise destes defeitos, novos níveis eram testados para estes fatores até que uma condição satisfatória para a qualidade final da peça, isenção de defeitos, fosse alcançada ou os fatores deixassem de ter efeito na redução destes defeitos.

No experimento 2, conforme mostrado na tabela 3.5, foi analisado somente o painel forno estampado com os aços EEP e EEP-PC EG, com o objetivo de analisar diferenças nas distribuições das deformações entre duas regiões simétricas em relação à peça. Os níveis dos fatores força de sujeição e tipo de lubrificação foram definidos com base nos resultados do experimento 1.

No experimento 3, conforme mostrado na tabela 3.6, foi avaliado o efeito do revestimento de zinco na distribuição das deformações. Foi utilizada somente a peça painel forno estampada a partir do aço EEP-PC EG com força de sujeição de 343 kN e *blank* lubrificado com óleo.

No experimento 4, conforme mostrado na tabela 3.7, foi avaliado o efeito da geometria do *blank* na distribuição das deformações. Foi utilizada somente a peça painel forno estampada a partir do aço EEP com força de sujeição de 196 kN e *blank* lubrificado com óleo.

Tabela 3.4 – Tratamentos simulados no Experimento 1 para determinação das distribuições das deformações.

Peça	Aço	Força sujeição (kN)	Tipo Lubrificação	Tratamento
Painel Estufa	QC	118	Seco	1
		118	Óleo	2
		216	Seco	3
		216	Óleo	4
		294	Seco	5
	EEP	118	Seco	6
		294	Seco	7
		294	Filme PE	8
		392	Filme PE	9
	EEP-PC EG	216	Seco	10
		294	Seco	11
		392	Seco	12
		441	Seco	13
Painel Forno	QC	118	Óleo	14
		196	Óleo	15
		294	Seco	16
	EEP	196	Seco	17
		196	Óleo	18
		294	Seco	19
	EEP-PC EG	118	Seco	20
		196	Seco	21
		343	Seco	22
		343	Óleo	23

Tabela 3.5 – Tratamentos simulados no Experimento 2 para determinação das distribuições das deformações.

Peça	Aço	Força sujeição (kN)	Tipo Lubrificação	Tratamento
Painel forno	EEP	118	Óleo	24
		196	Óleo	25
	EEP-PC EG	196	Seco	26
		343	Seco	27
		343	Óleo	28

Tabela 3.6 – Fatores e níveis simulados no Experimento 3 para determinação das distribuições das deformações.

Peça	Aço	Força sujeição (kN)	Lubrificante	Revestimento Zn	Tratamento
Painel forno	EEP-	343	Óleo	Revestido	29
	PC EG	343	Óleo	Zn removido	30

Tabela 3.7 – Fatores e níveis simulados no Experimento 4 para determinação das distribuições das deformações.

Peça	Aço	Força sujeição (kN)	Lubrificante	Cantos do blank	Tratamento
Painel forno	EEP	196	Óleo	Retos	31
		196	Óleo	Chanfrados (40x40)	32

Como nos corpos de prova para o ensaio Nakazima, foi gravado nos *blanks* através do processo eletroquímico, uma grade para medição das deformações, composta de círculos de diâmetro 3 mm e quadrados.

As peças, conforme experimentos das tabelas de 3.4 à 3.7, foram estampadas em uma prensa hidráulica, com capacidade para aplicação de uma força de 2940 kN pelo martelo (transmitida ao punção) e 795 kN de força pela almofada hidráulica (transmitida para o prensa chapas).

A seleção dos círculos deformados a medir foi realizada segundo dois critérios diferentes. O critério inicialmente utilizado foi a seleção dos círculos com as maiores deformações percebidas. Este critério foi aplicado no experimento 1.

Um segundo critério, realizando a seleção dos círculos deformados segundo regiões e localizações, foi aplicado nos experimentos 2, 3 e 4. Desta forma foi possível correlacionar melhor a distribuição das deformações com as regiões da peça. Como as peças, painel estufa e painel forno, são simétricas em relação aos seus respectivos eixos central vertical, este critério permitiu também estudar o efeito de possíveis diferenças nas deformações entre estas regiões simétricas.

Portanto, no segundo critério, a medição das deformações no painel estufa foi realizada em 6 regiões, mostradas na figura 3.5 e no painel forno em 8 regiões, mostradas na figura 3.6. Cada uma destas regiões ainda foi subdividida em 4 localizações, com base nos modos de deformação pré-visualizados, mostradas na figura 3.7.

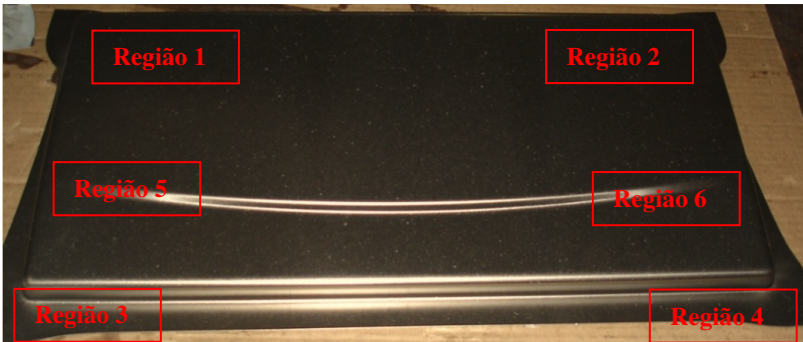


Figura 3.5 – Regiões analisadas no painel estufa

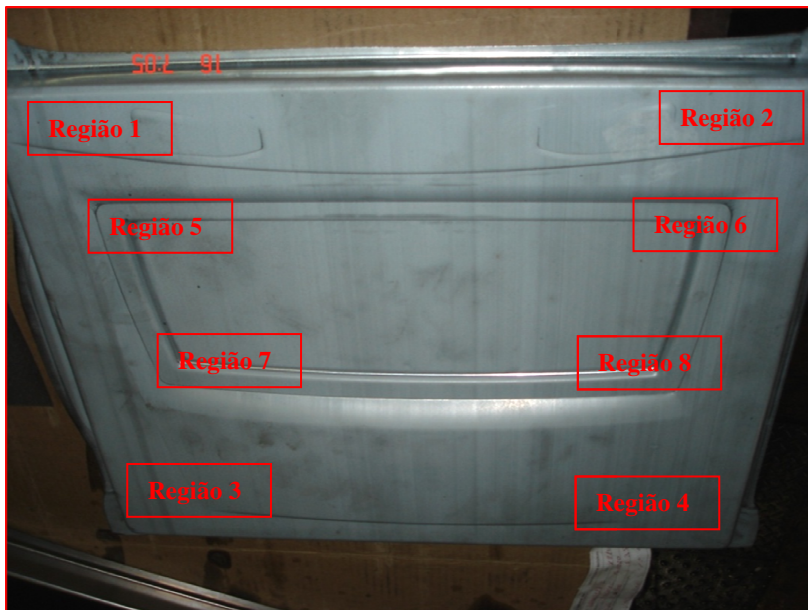


Figura 3.6 – Regiões analisadas no painel forno

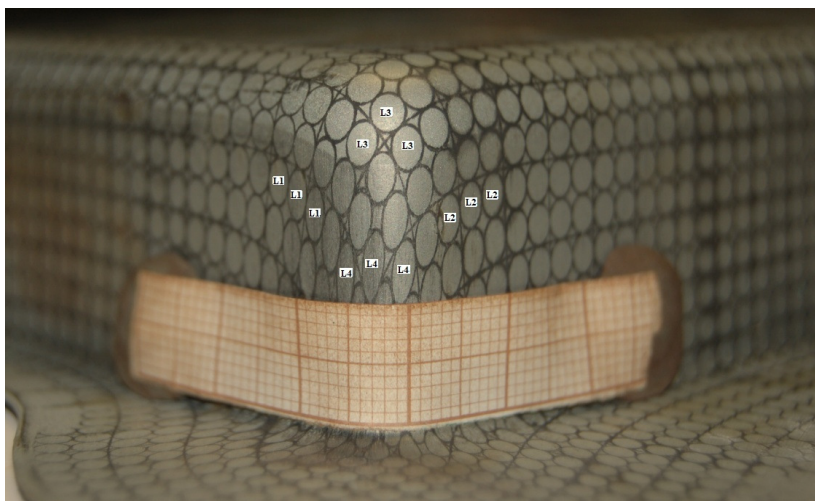


Figura 3.7 – Representação das localizações dos diferentes modos de deformação.

Pode-se prever, conforme apresentado no capítulo 2.4, a ocorrência de 3 modos de deformação distintos, que são:

- Localização 1 (L1) e Localização 2 (L2) => deformação plana e tração uniaxial;
- Localização 3 (L3) => estiramento equi-biaxial;
- Localização 4 (L4) => embutimento.

Depois de selecionados os círculos deformados, a medição e cálculo das deformações seguiu o mesmo procedimento utilizado na determinação das CLC's.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de dureza, ensaios de tração (limite de escoamento, limite de tração, alongamento, coeficiente de encruamento, coeficiente de anisotropia), ensaios Nakazima para determinação da CLC, e a distribuição das deformações nas peças conformadas. Uma análise de estampabilidade e dos efeitos dos fatores de processo foi realizada pela comparação dos resultados.

4.1 Resultados dos ensaios de tração e dureza

Os resultados da dureza, limite de escoamento (LE), limite de resistência (LR) e alongamento (Along) são apresentados e analisados, a seguir, individualmente.

A tabela 4.1 apresenta os valores obtidos para as propriedades mecânicas de cada aço e seus respectivos lotes. Os valores de dureza apresentados referem-se à média dos valores obtidos em 3 corpos de prova com 3 identificações realizadas em cada. Os valores de LE, LR e Along em cada direção referem-se à média dos valores obtidos de 3 corpos de prova.

Tabela 4.1 – Valores obtidos para as propriedades mecânicas.

Aço	Dureza (HRB)	LE (MPa)			LR (MPa)			LR / LE	Along (%)		
		0°	90°	45°	0°	90°	45°		0°	90°	45°
QC Lote 1	58	261	263	269	379	379	383	1,45	38%	33%	35%
QC Lote 2	60	351	343	355	399	402	411	1,14	37%	37%	35%
EEP lote A	45	195	203	203	297	298	301	1,52	42%	40%	42%
EEP lote B	44	191	188	197	290	280	295	1,52	42%	42%	42%
EEP lote C	44	193	195	200	282	277	289	1,46	45%	46%	38%
EEP lote D	47	237	230	235	333	326	335	1,40	46%	44%	42%
EEP lote E	45	195	203	204	297	298	302	1,52	42%	40%	42%
EEP-PC EG	31	195	198	208	316	313	320	1,62	50%	49%	48%

Os valores obtidos nos ensaios dos corpos de prova transversais à direção de laminação, para todos os aços e lotes, estão dentro das faixas estabelecidas pelas normas NBR 05915 e 06658, entretanto, dependendo do grau de estampagem, nem todas as propriedades mecânicas são normatizadas. Por exemplo, para o material QC a única propriedade

estabelecida em norma é a dureza máxima, já para o EEP, n e \bar{r} não são objeto de controle. Em função disto, a afirmação de que o material está de acordo com as propriedades estabelecidas nestas normas não significa que o material irá apresentar um bom desempenho durante o processo de estampagem.

Foram obtidas três diferentes faixas de dureza para os diferentes aços, o que os caracterizou bem. O aço EEP-PC EG apresentou o menor valor (31 HRB), seguido do aço EEP (44 a 47 HRB), e os maiores valores foram obtidos para o aço QC (58 a 60 HRB). Já entre lotes, a variação foi muito pequena quando comparada à variação entre amostras ensaiadas para obtenção dos valores médios.

O ensaio de dureza indicou as diferentes classes de aço, entretanto, não foi sensível para avaliar as diferenças entre lotes de um mesmo material, causadas por alterações no seu processamento e que podem afetar a estampabilidade.

Os valores de LR apresentaram uma correlação direta com os valores obtidos de dureza, conforme mostrado no gráfico da figura 4.1. Isto porque tanto o LR quanto a dureza são indicadores da resistência do material à deformação plástica. A exceção foi o aço EEP-PC EG, que apresentou valores baixos de dureza se comparados aos valores de LR apresentados. A princípio este baixo valor de dureza poderia ser devido a não remoção do revestimento de zinco antes da execução do ensaio de dureza. Foi realizado um novo ensaio, mas desta vez removendo a camada de zinco. A média obtida nas 3 indentações foi 33 HRB e, portanto, esta não foi a única causa da não correlação da dureza com LR. Menor tamanho de grão no material EEP-PC EG poderia ser outra causa para este efeito, entretanto, refino de grão aumenta tanto o limite de resistência quanto a dureza. Necessita-se, portanto, de maiores estudos para entender a real causa deste efeito.

Os valores de LR, LE e alongamento não apresentaram diferenças significativas entre as três direções analisadas. A análise que segue foi baseada nos valores obtidos a 90° da direção de laminação, conforme orientação das normas dos materiais utilizados.

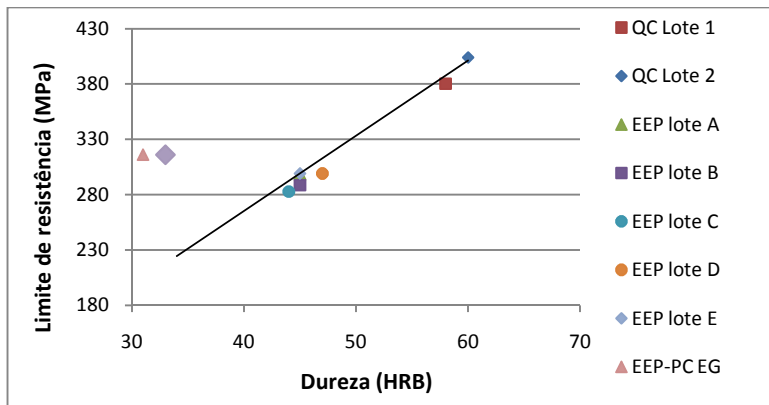


Figura 4.1 – Correlação entre dureza e LR.

O material QC também apresentou os maiores valores de LE e de LR, muito acima dos demais aços, provavelmente em função do maior percentual de carbono, próximo de 0,11%. Entre lotes do aço QC, a diferença no LE obtido foi bastante significativa, de 263 para 343 MPa, embora esta tenha pouca correlação com a composição química, pois o percentual de C e Mn são praticamente iguais e, portanto, insuficientes para causar esta diferença de 85 MPa. É mais provável que esta diferença seja devido ao percentual de deformação a frio ou ao tamanho de grão. Novamente, não foi investigada esta diferença, pois este não era o objetivo deste estudo.

Os aços EEP e EEP-PC EG apresentaram valores tanto de LE quanto de LR bastante próximos, à exceção do lote D do aço EEP, que apresentou valores de LE de 234 MPa e LR de 331 MPa. Como a composição química não foi estudada entre os lotes do aço EEP, e não foi realizada nenhuma análise metalográfica para medição do tamanho de grão, não se conhece a real causa para esta diferença.

A ocorrência de diferentes faixas para os valores encontrados LE se deve à influência de diversos fatores, e pode ser verificada através da equação de Hall-Petch modificada. Esta equação descreve a relação do limite de escoamento e limite de resistência com os parâmetros da composição química e da microestrutura dos aços (solução sólida substitucional, solução intersticial, formação de precipitados, discordâncias e formação de partículas de segunda fase) [Repas, 1988; Turazi, 2008; Gallego, 2005].

A adição de carbono no aço aumenta a dureza, o limite de resistência e de escoamento, mas diminui o alongamento e também a

conformabilidade, devido à formação de carbonetos na matriz ferrítica (cementita) [Granzow, 1970].

Teores típicos de manganês estão na faixa de 0,2% a 0,4% para aços de estampagem, embora em aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) quantidades acima de 2% possam ser utilizadas [Newby, 1988]. A adição de manganês no aço melhora as características de trabalho a quente, evitando os efeitos fragilizantes do enxofre em temperaturas elevadas. Quando a porcentagem de enxofre no aço é muito baixa, o teor de manganês é reduzido, permitindo que o aço seja processado para desenvolver uma melhor estampabilidade [Granzow, 1970].

O alongamento total apresentou valores em faixas distintas e bem correlacionadas com os graus de estampagem de cada um dos aços, sendo em torno de 49% para o aço EEP-PC EG, de 40 a 46% para o aço EEP e de 33 a 37% para o aço QC. A variação entre lotes de um mesmo aço não foi significativa.

Os melhores resultados para a razão LR/LE foram obtidos para o aço EEP-PC EG com 1,58, seguido do aço EEP que variou de 1,42 a 1,50 e por fim o aço QC que apresentou resultados bem distintos para seus dois lotes, 1,44 para o lote 1 e 1,16 para o lote 2. Este índice pode ser interpretado como uma medida de ductilidade, e portanto, quanto maior melhor para a conformabilidade.

Tentar prever o comportamento das chapas durante a estampagem apenas através dos resultados obtidos para dureza, LE, LR, LR/LE e alongamento total, resultaria em previsões contraditórias entre si, como mostrado abaixo:

- Os valores de dureza indicam que não há diferença significativa entre lotes, e também indicam uma diferença de estampabilidade do EEP para o EEP-PC;
- Os valores de LE indicam uma grande diferença de estampabilidade entre lotes e uma similaridade entre EEP e EEP-PC;
- Os valores de LR indicam que o EEP tem uma estampabilidade superior ao EEP-PC e que o lote D do aço EEP tem estampabilidade inferior aos demais lotes;
- Os valores de LR/LE indicam que o aço QC tem a mesma estampabilidade do aço EEP. Portanto, a análise da estampabilidade através dos resultados individuais das propriedades mecânicas dureza, limite de escoamento,

limite de resistência e LR/LE não indicam corretamente qual o material possui o melhor grau de estampagem.

- Os valores de alongamento estão de acordo com a definição de grau de estampabilidade, sendo o de maior grau de estampagem dos aços EEP-PC, seguido do EEP e do QC.

Uma característica fundamental a ser verificada na determinação da estampabilidade de um material é a capacidade deste em distribuir uniformemente as deformações. Os coeficientes de encruamento e de anisotropia são determinantes na distribuição da deformação nas operações de estampagem e, portanto, podem ser utilizadas para melhor prever o comportamento da chapa na estampagem, principalmente nas situações onde estão presentes o estiramento e o embutimento.

Para melhor descrever os resultados e discussões dos coeficientes de anisotropia e de encruamento, ambos serão analisados em tópicos a seguir.

Coefficiente de Encruamento, n

A tabela 4.2 mostra os valores do coeficiente de encruamento, obtidos a 0° , 90° e 45° em relação à direção de laminação, assim como o valor médio entre as três direções, para os três aços ensaiados e seus respectivos lotes.

Tabela 4.2 – Resultados obtidos para o coeficiente de encruamento, n , nas 3 direções e médio.

	Coefficiente de Encruamento (n)			
	0°	90°	45°	Médio
QC Lote 1	0,19	0,20	0,20	0,20
QC Lote 2	0,20	0,20	0,20	0,20
EEP lote A	0,23	0,21	0,21	0,22
EEP lote B	0,22	0,21	0,21	0,22
EEP lote C	0,23	0,20	0,20	0,21
EEP lote D	0,23	0,20	0,21	0,21
EEP lote E	0,23	0,21	0,21	0,22
EEP-PC EG	0,24	0,23	0,23	0,24

Para o aço QC, os valores encontrados nas três direções e em ambos os lotes não apresentaram diferenças significativas. Para os aços EEP-PC EG e EEP os valores obtidos na direção 0° foram sempre maiores que nas demais direções. Os valores médios calculados seguiram a tendência de acordo com o grau de estampagem, sendo o maior valor obtido para o aço EEP-PC EG, seguido do EEP e por fim para o QC. Já a variação entre os lotes do aço EEP de 0,01 não é significativa, pois é pequena quando comparada com a variação decorrente do erro na aquisição de dados, quando diferenças de até 0,02 foram encontradas entre amostras iguais.

Por apresentar os maiores valores de n , o aço EEP-PC EG possui a maior capacidade de distribuir a deformação durante a estampagem, na presença de um gradiente de tensões [Mielniek, 1991], sendo, portanto, o aço mais indicado para as operações de estiramento, pois este envolve os maiores níveis de tensões principais, conforme mostrado na figura 2.9 [Marciniak, 2002].

Coefficiente de anisotropia, r

A tabela 4.3 mostra os valores do coeficiente de anisotropia, obtidos a 0°, 90° e 45° em relação à direção de laminação, assim como o valor calculado para o coeficiente de anisotropia normal e planar para os três aços estudados e seus respectivos lotes.

Tabela 4.3 – Resultados obtidos para o coeficiente de anisotropia nas 3 direções, valores calculados de \bar{r} e Δr .

	Coeficiente de anisotropia, r			\bar{r}	Δr
	0°	90°	45°		
QC Lote 1	1,17	1,26	1,10	1,15	0,12
QC Lote 2	1,35	0,83	0,67	0,88	0,42
EEP lote A	1,43	1,56	1,29	1,39	0,21
EEP lote B	1,67	1,98	1,39	1,61	0,43
EEP lote C	1,82	2,16	1,30	1,65	0,69
EEP lote D	1,50	1,99	1,40	1,57	0,34
EEP lote E	1,37	1,56	1,29	1,38	0,18
EEP-PC EG	1,58	1,74	1,50	1,58	0,16

Os valores da anisotropia medidos a 90° da direção de laminação, para cada aço e seus respectivos lotes, foram maiores que os valores da anisotropia medidos a 0° e que por sua vez foram maiores que os valores medidos a 45° , à exceção do aço QC lote 2, onde o maior valor do coeficiente de anisotropia foi obtido a 0° .

O material pode ser submetido a maiores deformações no embutimento e menores no estiramento quando $r_{90^\circ} > r_{0^\circ} > r_{45^\circ}$ [Silveira Netto, 2004]. Isto significa que para dois materiais de mesma classe, um com valores de r segundo este comportamento e outro não, o primeiro apresentará a CLC rotacionada no sentido horário em relação à segunda. Pode-se esperar, então, que o lote 1 do aço QC tenha a CLC rotacionada no sentido horário em relação ao lote 2 do aço QC, fato que poderá ser verificado mais adiante na análise da CLC destes materiais.

O aço QC lote 2 apresentou valores para o coeficiente de anisotropia normal menores que 1, significando que a resistência à deformação no plano da chapa nestes aços é maior que a resistência à deformação na direção da espessura, o que é prejudicial para a estampagem, em especial no embutimento, pois favorece o afinamento da chapa.

Este valor do coeficiente de anisotropia abaixo de 1 pode ser decorrente do percentual de redução a frio, que possui uma correlação com os valores de anisotropia conforme apresentado na figura 2.26 [Lange, 1993].

Comparando o valor do coeficiente de anisotropia obtido com os valores da literatura, este aço apresenta valores dentro da faixa de aços efervescentes (coeficiente de anisotropia entre 0,8 e 1,2) [Ferrarini, 2004]. Entretanto, trata-se de um aço acalmado ao alumínio, mas que apresenta um percentual de alumínio na composição química menor que os demais aços. O alumínio tem efeito desoxidante e auxilia no desenvolvimento da textura cristalográfica [Blickwed, 1968].

Parâmetros de processamento do aço como temperaturas de acabamento, bobinamento e recozimento, e passe de encruamento afetam também a formação de textura favorável e consequentemente o valor do coeficiente de anisotropia [Ferreira Filho et al, 2001; Turazi, 2008].

Já os demais aços apresentaram resultados para o coeficiente de anisotropia normal maiores que 1, significando que a resistência à deformação na direção espessura destes aços é maior que a resistência à deformação no plano da chapa.

Os aços EEP-PC EG e EEP lotes B, C e D são os mais indicados para as operações de embutimento, já que apresentaram valores de \bar{r} acima de 1,57.

Em relação aos resultados obtidos para o coeficiente de anisotropia planar, Δr , foi encontrada uma grande dispersão dos resultados, e nenhuma correlação pode ser facilmente constatada. Os valores mais próximos de zero foram obtidos para o aço EEP-PC EG, QC lote 1 e EEP lote E, sendo estes portanto, os aços mais indicados para redução na formação de orelhas.

Todos os aços apresentaram $\Delta r > 0$, o que segundo Plaut [2005] é um comportamento típico dos aços de baixo carbono.

Materiais com alta anisotropia normal possuem alta anisotropia planar [Lange, 2003]. No entanto, os resultados obtidos mostraram que isto não é uma regra, pois para o aço EEP-PC EG foi obtido o segundo maior valor de \bar{r} mas também o segundo menor valor de Δr , assim como para o aço QC lote 2 foi obtido o menor valor de \bar{r} mas o terceiro maior valor de Δr . Um estudo específico poderia ser conduzido para avaliar este comportamento.

De fato, busca-se no material tido como ideal para a estampagem, a maximização do valor de \bar{r} e n , valores de Δr mais próximos de zero, de forma que a deformação ocorra preferencialmente no plano da chapa e a mais homogênea possível, e que não ocorra a formação de orelhas nas bordas do *blank*.

Sendo assim, o aço EEP-PC EG tem o melhor comportamento quando submetido tanto ao estiramento quanto embutimento. Para o aço EEP, onde foram analisados cinco lotes distintos, dois subgrupos foram identificados, sendo o primeiro subgrupo formado pelos lotes B, C e D, que apresentaram valores de n similares ao segundo subgrupo, mas \bar{r} maior, nos níveis do aço EEP-PC EG, sendo portanto mais indicados para aplicação em processos que predominem o embutimento, mas preferencialmente em peças com flange devido aos maiores valores de Δr .

4.2 Análise das CLC's

As deformações medidas na região de fratura nos corpos de prova do aço EEP lote D são mostradas na figura 4.2. Esta distribuição típica das deformações encontradas nos corpos de prova do ensaio Nakazima

para determinação da CLC também foi obtida para os aços QC lote 1, QC lote 2, EEP lote A, EEP lote B e EEP-PC EG.

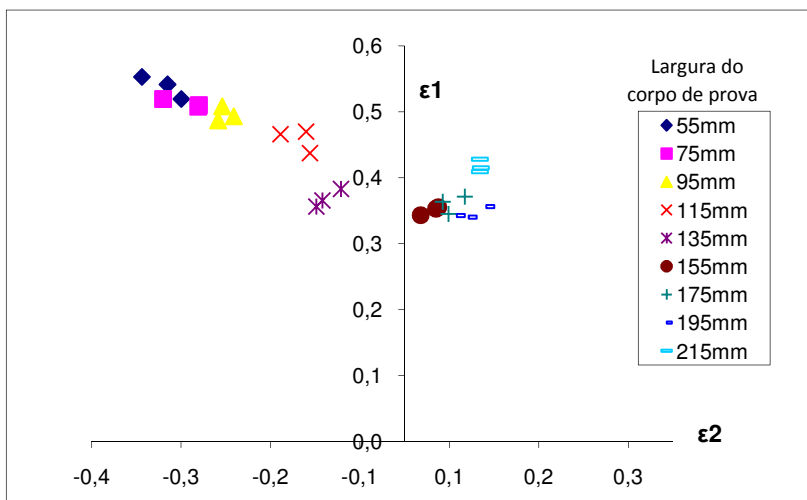


Figura 4.2 – Deformações obtidas no ensaio Nakazima para aço EEP lote D

Os valores nas legendas indicam as larguras dos corpos de prova ensaiados. Com as deformações obtidas nas chapas com larguras maiores obtêm-se os pontos que formam o lado direito da curva, região de estiramento biaxial. Os pontos se deslocam para o lado esquerdo da CLC à medida que se utilizam os corpos de prova com menor largura. Isto ocorre porque o maior corpo de prova, 215 mm x 215 mm, permite que o prensa chapas do ferramental Nakazima sujeite o *blank* com uma força homogênea em todas as direções, fazendo com que a deformação na direção do eixo das deformações menores, ϵ_2 , seja igual à deformação na direção do eixo das deformações maiores, ϵ_1 . À medida que a largura do corpo de prova diminui, uma porção cada vez menor deste é sujeitado pelo prensa chapas do ferramental e a deformação na direção ϵ_2 vai se tornando cada vez menor, passando de estiramento para compressão. Este efeito pode se observado na figura 2.37.

Na figura 4.3 é apresentada a CLC obtida para os aços QC, e também são representadas as linhas que indicam os principais modos de deformação.

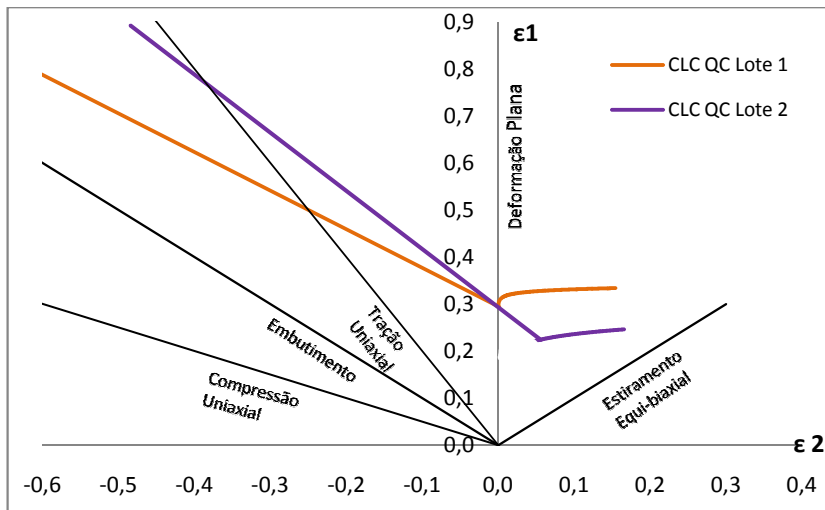


Figura 4.3 – CLC's dos aços QC (lote 1 e lote 2).

Na comparação mostrada na figura 4.3 entre a CLC do aço QC lote 1 com a CLC do aço QC lote 2, pode ser observado que apesar de ambas as curvas cortarem o eixo ϵ_1 praticamente no mesmo ponto, ocorreu um deslocamento para baixo e para a direita do cotovelo da CLC do lote 2. Este cotovelo é formado pela interseção das linhas de tendência. Isto resulta numa queda acentuada nos valores de deformação suportados na região do estiramento biaxial. Já na região do modo de deformação tração uniaxial e embutimento, é o aço QC lote 2 que pode suportar as maiores deformações.

Correlacionando o comportamento da CLC com as propriedades mecânicas apresentadas por estes dois lotes, pode-se verificar que:

- i. Os valores iguais obtidos para o coeficiente de encruamento, n , se refletem na CLC fazendo com que a interseção com o eixo ϵ_1 seja igual para as duas CLC's, entretanto, o cotovelo e conseqüentemente a região de estiramento biaxial apresentaram diferenças significativas;
- ii. A maior espessura da chapa do aço QC lote 1 (0,04 mm) pode ter influenciado no maior limite de conformação apresentado por este aço no lado direito da CLC, por

- retardar a formação da deformação localizada [Hosford, 2007];
- iii. Apesar do aço QC lote 1 ter apresentado um coeficiente de anisotropia normal maior que o aço QC lote 2, o que teoricamente deveria conferir maior limite de conformação na região de embutimento, a CLC do aço QC lote 1 apresentou um limite de conformação menor para esta região. O aço QC lote 2, ainda apresentou valores de coeficiente de anisotropia normal inferiores a 1, o que confere limites de conformação ainda menores;
 - iv. O efeito do coeficiente de anisotropia nas diferentes direções foi justamente o oposto do esperado segundo a previsão de Silveira Netto (2004), pois o lote 2 não apresentou valores de $r_{90^\circ} > r_{0^\circ} > r_{45^\circ}$, mas a CLC foi rotacionada no sentido horário em relação ao lote 1, que apresentou valores $r_{90^\circ} > r_{0^\circ} > r_{45^\circ}$. Esta rotação fez com que o limite de conformação do aço QC lote 2 tenha aumentado no lado esquerdo da curva e diminuído no lado direito na curva em relação ao lote 1.

Para o aço QC lote 2, pode-se atribuir os resultados obtidos à lubrificação deficiente do punção do ensaio Nakazima, pois o coeficiente de atrito afeta diretamente as deformações obtidas ao restringi-las [Silveira Netto, 2004].

Esta possibilidade é reforçada ao analisar a figura 4.4, que mostra a distribuição das deformações encontradas nos corpos de prova do ensaio Nakazima. Pode-se observar que o corpo de prova com largura de 135 mm apresentou valores incoerentes de deformação, sendo descartados na determinação da linha de tendência.

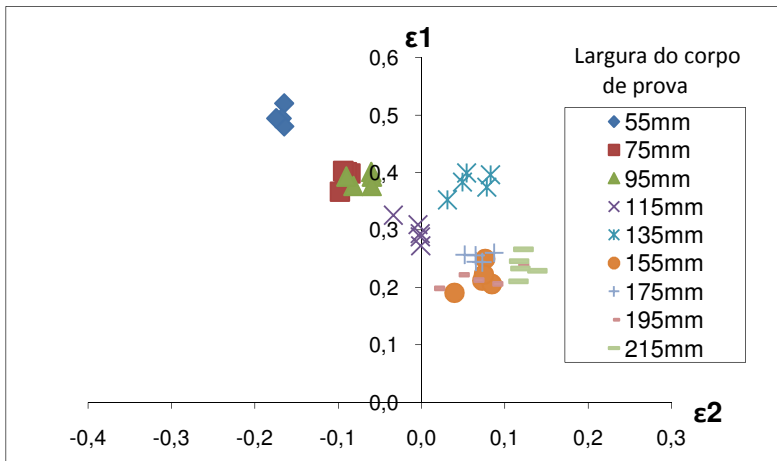


Figura 4.4 – Deformações obtidas no ensaio Nakazima para aço QC lote 2.

A figura 4.5 mostra as CLC's obtidas para 3 lotes do aço EEP.

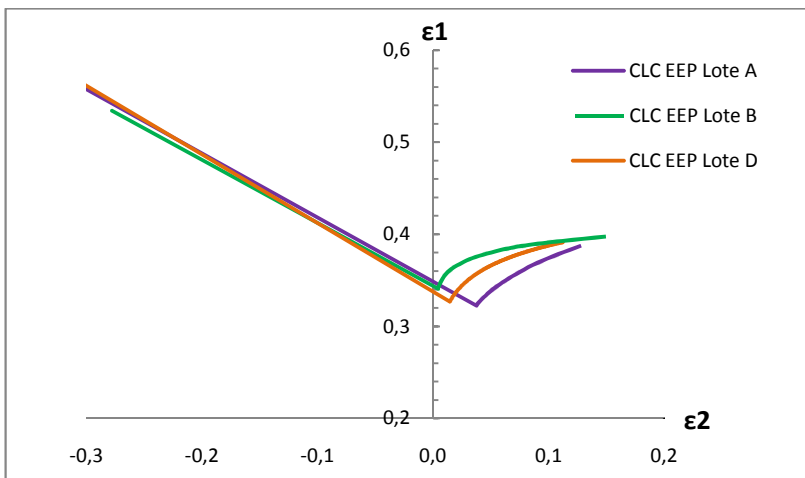


Figura 4.5 – CLC's dos aços EEP (lote A, B e D).

Pode-se observar uma grande similaridade na parte esquerda entre as CLC's dos 3 lotes do aço EEP, inclusive no ponto onde a CLC

corta o eixo ε_1 , ligeiramente maior para o lote A, seguido do lote B e por último o lote D.

No lado direito da CLC, na região de estiramento biaxial, observa-se que o lote A é o que apresenta os menores limites de conformação, seguido pelo lote D e por fim o lote B.

Correlacionando o comportamento da CLC com as propriedades mecânicas apresentadas por estes dois lotes, pode-se verificar que:

- i. Os aços EEP lote B e EEP lote D apresentaram valores de coeficiente de anisotropia normal semelhantes, e isto pode ser observado também na semelhança entre o lado esquerdo das CLC's destes dois lotes.
- ii. O aço EEP lote A apresentou um valor do coeficiente de anisotropia normal menor que os outros lotes, entretanto, observando o lado esquerdo das CLC's não se encontram diferenças significativas.
- iii. Os 3 lotes do aço EEP apresentaram praticamente o mesmo valor de coeficiente de anisotropia, o que se refletiu na proximidade dos pontos em que as CLC's cortaram o eixo ε_1 .
- iv. Quanto às diferentes posições dos cotovelos das CLC's, pode ser constatada uma correlação com o coeficiente de anisotropia. Quanto menor o coeficiente de anisotropia mais foi deslocado para a direita e para baixo o cotovelo da CLC. Não foram encontradas na literatura informações para sustentar esta correlação.

Caminhos de deformação não lineares podem sim resultar nestes deslocamentos do cotovelo da CLC. Em experimentos realizados em uma determinada liga de alumínio, Graaf e Hosford (1993) reproduziram mudanças bruscas no caminho de deformação durante o ensaio para determinação da CLC através de pré-deformações dos corpos de prova. Estas mudanças resultaram no deslocamento do cotovelo da CLC e na alteração na inclinação do lado direito da CLC. Na prática, estas mudanças no caminho de deformação podem ser causadas por lubrificação irregular.

Na figura 4.3, que mostra a CLC obtida para os dois lotes do aço QC, pode-se observar que esta correlação do coeficiente de anisotropia normal com a posição do cotovelo da CLC também é válida. Entretanto, não se pode afirmar que esta correlação possa ser aplicada em qualquer situação, pois não foi encontrada na literatura nenhuma referência a este

comportamento. Certamente, um estudo mais aprofundado sobre esta correlação pode explicar melhor este comportamento.

Na figura 4.6, é apresentado um comparativo entre a CLC do aço EEP-PC EG, com a CLC do aço EEP, representado pela CLC do lote D, e com a CLC do aço QC, representado pelo lote 1.

Pode-se observar que o lado esquerdo das CLC's, região de embutimento e tração uniaxial, as CLC são paralelas, sendo que a CLC do aço EEP-PC EG intercepta o eixo das maiores deformações, ϵ_1 , no maior valor, seguido do aço EEP e então o aço QC.

No lado direito das CLC's, observam-se inclinações e posições do cotovelo diferentes entre as CLC's dos 3 aços. Apesar disto, o limite de conformação na região de estiramento biaxial é maior para o aço EEP-PC EG, seguido do aço EEP e então do aço QC.

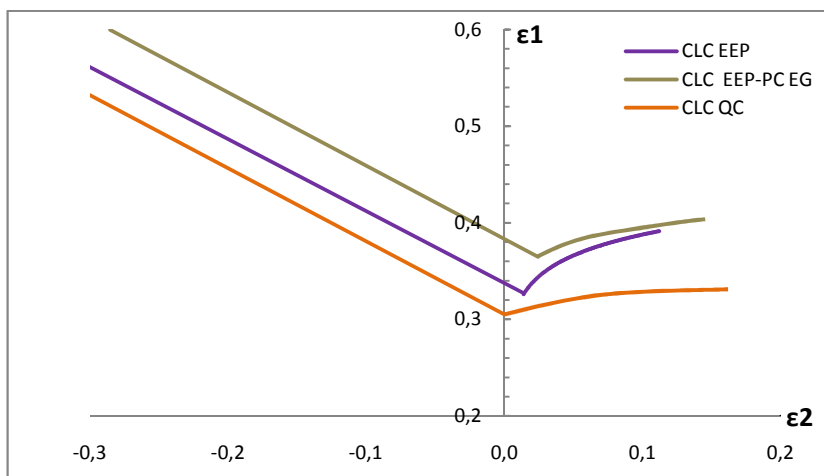


Figura 4.6 – Comparativo das CLC's aços QC, EEP e EEP-PC.

Correlacionando o comportamento da CLC com as propriedades mecânicas apresentadas por estes três aços, pode-se verificar que:

- i. Os valores obtidos para o coeficiente de encruamento dos aços correlacionaram-se direta e proporcionalmente com o ponto onde a CLC cortou o eixo ϵ_1 . Por exemplo, o aço EEP-PC EG que apresentou um coeficiente de anisotropia de 0,24 e interseção com o eixo ϵ_1 em 0,38, enquanto que o aço EEP apresentou um coeficiente de

anisotropia de 0,22 e interseção com o eixo ε_1 em 0,34. Portanto, o aço EEP-PC EG apresentou tanto um coeficiente de anisotropia quanto uma interseção com o eixo ε_1 cerca de 10% maior que ao aço EEP.

- ii. Para as diferenças na inclinação no lado direito da CLC entre os aços não foi encontrada nenhuma correlação com as propriedades mecânicas. É provável que este comportamento seja devido a outro fator que também afeta consideravelmente a CLC, o coeficiente de atrito. Este é um fator de difícil controle, e apesar dos cuidados no momento da lubrificação do punção, variações entre um ensaio e outro são prováveis.

Apesar da menor espessura do aço EEP-PC EG (0,57 mm) em relação aos aços EEP (0,61 mm), a maior capacidade de deformação do material EEP-PC EG pode ser evidenciada em todos os modos de deformação, pois a CLC deste aço está posicionada no diagrama das deformações acima das demais. Isto faz com que o aço EEP-PC EG seja o mais indicado tanto para operações de embutimento quanto estiramento.

Portanto, assim como constatado pela análise das propriedades mecânicas coeficiente de encruamento e coeficiente de anisotropia normal, a análise das CLC's indica que o material EEP-PC EG é o que apresenta o maior limite de conformação quando submetido às operações tanto de embutimento quanto de estiramento.

O aço QC apresentou os menores limites de conformação tanto nas análises através das propriedades mecânicas quanto na representação através das CLC's.

Para o aço EEP, a análise das propriedades mecânicas indicou um limite de conformação nas operações de estiramento menor que o aço EEP-PC EG, o que foi confirmado na análise das CLC's. Já para a região de embutimento, enquanto que o coeficiente de anisotropia normal indicava um limite de conformação similar entre estes dois aços, na análise da CLC ficou evidente que o EEP-PC EG possuía um limite de conformação mais elevado, provavelmente em função do maior coeficiente de encruamento que elevou a CLC como um todo.

4.3 Determinação da Distribuição das Deformações na Estampagem das Peças

4.3.1 Experimento 1

Após a estampagem das peças de acordo com os tratamentos do experimento 1 mostrados na tabela 3.4, estas foram submetidas a uma inspeção visual para identificação de defeitos inerentes à estampagem (fratura, estricção, ondulações, enrugamento e distorção de forma). Na figura 4.7 são ilustrados exemplos da ocorrência destes defeitos de estampagem, à exceção da ondulação, pois esta é de difícil visualização em imagens. Ondulação trata-se de um enrugamento leve.



Figura 4.7 – Defeitos de estampagem analisados: (a) Estricção; (b) Fratura; (c) Distorção de forma; (d) Enrugamento

Os resultados destas análises são apresentados na tabela 4.4. Nas colunas “Fratura”, “Estricção”, “Ondulação” e “Enrugamento”, foram registradas as regiões de ocorrência destes efeitos, regiões estas definidas nas figuras 3.5 e 3.6. Na coluna “Distorção de forma” foram registrados os valores medidos nos tratamentos que apresentaram este defeito. Quando o defeito não foi identificado naquele tratamento, consta na tabela “Não”.

Na prática, peças que apresentem qualquer um destes defeitos de estampagem devem ser descartadas, pois, o desempenho funcional ou a estética da peça na sua condição final estão comprometidos. Neste estudo a análise prosseguirá, pois é interessante interpretar o efeito destes defeitos nas frentes de deformação.

Tabela 4.4 – Resultados inspeção visual para identificação de defeitos de estampagem do experimento 1.

Peça	Aço	Tratamento	Força sujeição (kN)	Tipo de lubrificação	Região de ocorrência dos defeitos				
					Fratura	Estricção	Ondulação	Enrugamento	Distorção de forma
Painel Estufa	QC	1	118	Seco	Não	1	5 e 6	Não	50mm
		2	118	Óleo	Não	Não	5 e 6	Não	50mm
		3	216	Seco	Não	1 e 2	5 e 6	Não	50mm
		4	216	Óleo	Não	1	5 e 6	Não	46mm
		5	294	Seco	2	1	5 e 6	Não	46mm
	EEP	6	118	Seco	Não	Não	5 e 6	Não	Não
		7	294	Seco	Não	2	Não	Não	Não
		8	294	Filme PE	Não	Não	Não	Não	Não
		9	392	Filme PE	2	Não	Não	Não	Não
	EEP-PC EG	10	216	Seco	Não	Não	Não	Não	Não
		11	294	Seco	Não	Não	Não	Não	Não
		12	392	Seco	Não	Não	Não	Não	Não
		13	441	Seco	2	Não	Não	Não	Não
Painel Forno	QC	14	118	Óleo	1, 2, 3, 4, 5, 6	Não	7 e 8	7 e 8	Não
		15	196	Óleo	1, 2, 3, 4, 5, 6	Não	Não	1	Não
		16	294	Seco	1, 2, 3, 4, 5, 6	Não	Não	Não	Não
	EEP	17	196	Seco	2, 3 e 4	5	7 e 8	1	Não
		18	196	Óleo	2 e 6	5	7	Não	Não
		19	294	Seco	1, 2, 3 e 6	4 e 5	Não	Não	Não
	EEP-PC EG	20	118	Seco	Não	Não	7 e 8	1	Não
		21	196	Seco	Não	Não	Não	Não	Não
		22	343	Seco	2	6	Não	Não	Não
		23	343	Óleo	Não	Não	Não	Não	Não

Nota: Regiões definidas nas figuras 3.5 e 3.6.

Nas figuras 4.8 a 4.14 são apresentados os gráficos das distribuições das deformações das peças estampadas segundo os tratamentos do experimento 1, realizado para avaliar o efeito da força de sujeição e do tipo da lubrificação nas peças painel estufa e painel forno quando estampadas com os aços QC, EEP e EEP-PC EG.

Distribuição das deformações do painel estufa estampado com o aço QC e avaliação do efeito da força de sujeição e do tipo de lubrificação

A figura 4.8 mostra o gráfico da distribuição das deformações de cinco peças do painel estufa, estampadas com o aço QC (tratamentos de 1 a 5), com forças de sujeição de 118, 216 e 294 kN, e combinadas com duas condições de lubrificação (com e sem lubrificação), conforme legenda. Como a seleção dos círculos deformados seguiu um critério segundo o qual as maiores deformações eram identificadas visualmente, não foram selecionados círculos submetidos à deformação plana e estiramento biaxial (lado direito da CLC), mas como será visto mais adiante no experimento 2, estes modos de deformação estavam presentes.

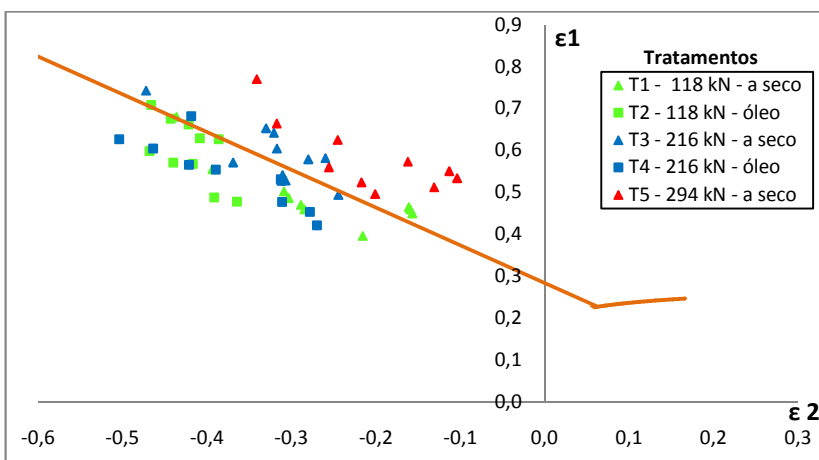


Figura 4.8 – Distribuição das deformações do painel estufa estampado com o aço QC – Tratamentos 1 a 5.

Pode ser observado que apenas o tratamento 2 não apresentou pontos acima da CLC, o que de certa forma explica os resultados da inspeção visual apresentados na tabela 4.4, segundo a qual os tratamentos 1, 3, 4 e 5 apresentaram estricção em pelo menos uma região, e o tratamento 5 ainda apresentou fratura. Também foram identificados nestes tratamentos os defeitos de ondulação e distorção de forma. As ondulações são uma consequência do nível crítico atingido pelas tensões tangenciais de compressão [Taylor, 1976]. Com o aumento da força de sujeição, aumenta-se a força de atrito da chapa com o ferramental, o que faz com que a tensão de tração na direção radial, responsável pelo fluxo de material para dentro da matriz, também aumente, o que de certa forma compensa as tensões de compressão, eliminando as ondulações. Foi utilizado no tratamento 5 o dobro do nível de força de sujeição calculado, mas neste caso, não foi possível eliminar as ondulações. Quanto à distorção de forma, como esta é causada pelo mesmo mecanismo do retorno elástico, quanto maior o LE maior será a incidência deste defeito [Havranek, 1976], e para o caso específico dos tratamentos de 1 a 5, foi utilizado o material QC lote 2, que apresentou valores de LE muito maiores que os demais aços.

Ao comparar as distribuições das deformações de duas peças do painel estufa estampadas com força de sujeição de 118 kN, sendo uma, tratamento 1, a seco (sem lubrificação), e outra tratamento 2, com lubrificação, pode ser observado o efeito da lubrificação, que faz com que a deformação se torne mais homogênea, reduzindo a amplitude entre as maiores e menores deformações [Keeler, 1965]. Este fato é ainda mais facilmente comprovado analisando comparativamente os tratamentos 3 e 4, onde as peças foram estampadas com a força de sujeição aumentada para 216 kN. Nesta comparação observa-se que pela ação da lubrificação praticamente todos os círculos deformados saíram da região crítica, acima da CLC, pois o modo de deformação se aproximou mais do embutimento, modo este de deformação que permite maiores deformações.

Analisando o efeito da força de sujeição na estampagem do painel estufa com o aço QC pela comparação dos tratamentos 1, 3 e 5, todos sem lubrificação, observa-se que com o aumento desta força, a deformação principal ε_1 aumentou enquanto que a deformação principal ε_2 diminuiu, significando que o modo de deformação tende a deslocar-se do embutimento para tração uniaxial. O mesmo pode-se concluir ao analisar os tratamentos 2 e 4. Isso ocorre, pois o aumento da força de sujeição reduz o fluxo de material que se deforma para dentro da matriz [Lange, 1993]. O aumento desta força de sujeição não se mostrou eficaz

na eliminação das ondulações que ocorreram nestes tratamentos, mas somente aumentaram a probabilidade de ocorrência de falhas, principalmente para a peça estampada a partir do *blank* sem lubrificação, já que a maioria dos elementos se posicionou acima da CLC. Pela figura 2.19, pode-se dizer então que para esta configuração, painel estufa estampado com aço QC, não se caracteriza uma “Janela de Conformação”.

Distribuição das deformações do painel estufa estampado com o aço EEP e avaliação do efeito da força de sujeição e do tipo de lubrificação

A figura 4.9 mostra o gráfico da distribuição das deformações de quatro peças do painel estufa, estampadas com o aço EEP (tratamentos de 6 a 9), com forças de sujeição de 118, 294 e 392 kN, e combinadas com duas condições de lubrificação (sem lubrificação e lubrificado com filme PE), conforme legenda.

Pode ser observado que os tratamentos 7 e 9 apresentaram pontos acima da CLC, estando coerentes com os resultados da inspeção visual, tabela 4.4, que detectou estricção e fratura, respectivamente para estes tratamentos. O tratamento 6 apresentou ainda ondulações em duas regiões.

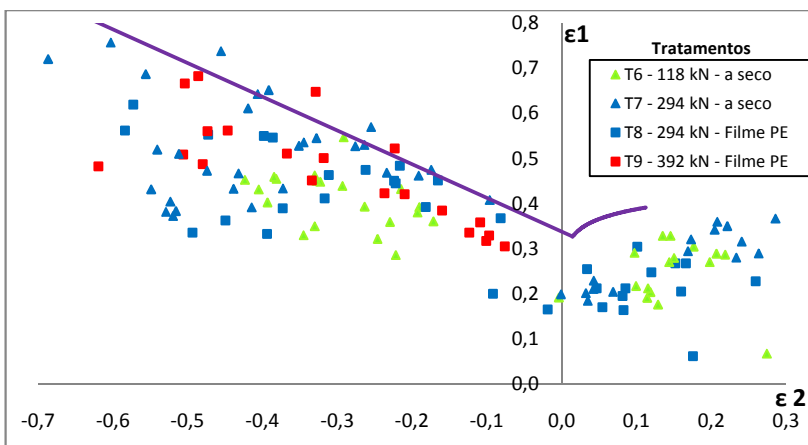


Figura 4.9 – Distribuição das deformações do painel estufa estampado com o aço EEP – Tratamentos 6 a 9.

Ao comparar as distribuições das deformações das peças do painel estufa estampados com aço EEP, força de sujeição de 294 kN e segundo os tratamentos 7 e 8, pode ser avaliado o efeito da lubrificação com o filme sólido de polietileno. Na região do embutimento, observa-se que os círculos deformados se deslocaram para baixo no diagrama de deformações, conforme previsões de Keeler (2005), deixando a região crítica, acima da CLC. Na região do estiramento o efeito não foi o esperado, pois as deformações diminuíram e em direção à deformação plana. É provável que o aumento na espessura devido à adição do filme de polietileno tenha criado uma restrição ao movimento do material.

Analisando o efeito da força de sujeição na estampagem do painel estufa com o aço EEP pela comparação dos tratamentos 6 e 7, ambos sem lubrificação, observa-se que com o aumento desta força, as deformações aumentaram nas duas direções principais, ε_1 e ε_2 , em todos os modos de deformação. Entretanto, o aumento das deformações no lado esquerdo (embutimento e tração uniaxial) foi mais pronunciado do que no lado direito (estiramento biaxial e deformação plana). Já quando se comparam os tratamentos 8 e 9, exceto por dois pontos que excedem a CLC, não fica tão evidenciado o aumento no nível das deformações.

A intensidade do efeito do aumento da força de sujeição varia em função das condições de atrito entre as superfícies (sem lubrificação e lubrificação por meio de filme de polietileno), conforme mostrado na figura 2.17 [Tigrinho, 2005]. Tanto a lubrificação quanto a força de sujeição afetam diretamente a força de atrito entre a chapa e o prensa chapas, alterando o fluxo de material que se deforma para dentro da matriz. Pode-se entender este comportamento, comparando também os tratamentos 7 e 9, onde apesar do aumento da força de sujeição de 30 para 392 kN, as deformações encontradas para o tratamento 9 foram ligeiramente menores, em função da lubrificação com filme de polietileno.

Com o aumento da força de sujeição do tratamento 6 para o 7, foi possível eliminar as ondulações, entretanto surgiram estricções numa região. A utilização de lubrificação com filme de PE eliminou estas estricções. Uma alternativa seria utilizar uma força de sujeição intermediária entre as dos tratamentos 6 e 7. Pode-se dizer então que um terceiro eixo poderia ser acrescentado à figura 2.19 que delimita a “Janela de Conformação”, o eixo da lubrificação.

Distribuição das deformações do painel estufa estampado com o aço EEP-PC EG e avaliação do efeito da força de sujeição

A figura 4.10 mostra o gráfico da distribuição das deformações de quatro peças do painel estufa, estampadas com o aço EEP-PC EG (tratamentos 10 a 13), com forças de sujeição de 216, 294, 392 e 441 kN, sem lubrificação, conforme legenda.

Podem ser observados que apenas o tratamento 13 apresentou pontos acima da CLC, estando coerente com os resultados da inspeção visual, tabela 4.4, que detectou uma fratura na região 2. Para os demais tratamentos, todas as deformações se situaram abaixo da CLC.

Podem-se analisar o efeito da força de sujeição na estampagem do painel estufa com o aço EEP-PC EG pela comparação entre todos os tratamentos desta distribuição das deformações. Do tratamento 10 ao tratamento 12, à medida que a força de sujeição aumentou as deformações também aumentaram nas duas direções principais, ε_1 e ε_2 , se deslocando na direção do modo de deformação embutimento, sob a CLC, mantendo-se na zona segura e isenta de falhas. Apenas no último tratamento, quando a força de sujeição foi elevada para 441 kN, as deformações aumentaram mais na direção principal ε_1 , se deslocando na direção do modo de deformação tração uniaxial e excedendo o limite de conformação dado pela CLC. Com força de sujeição acima de 441 kN, o fluxo de material que se deforma para dentro da matriz começa a ficar restrito. Isto ocorre pois o aumento da força de atrito gerada pelo aumento da força de sujeição faz com que a tensão de tração radial aumente excessivamente acelerando a deformação na direção principal ε_1 . Visto isto, a “Janela de Conformação” para a estampagem do painel estufa com o material EEP-PC EG sem lubrificação ficou bem caracterizada.

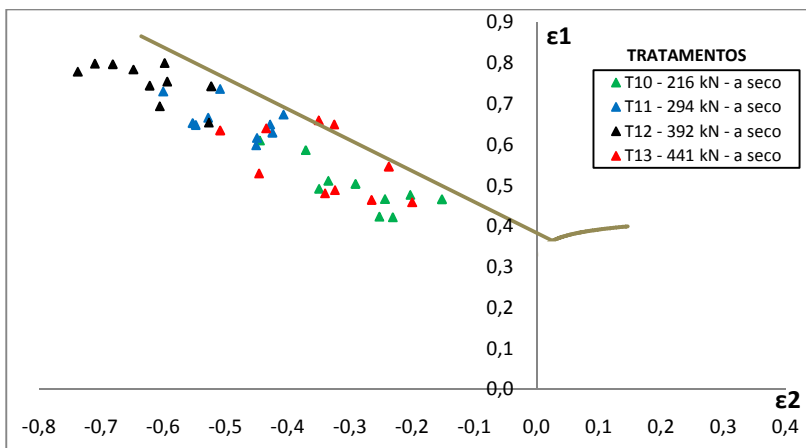


Figura 4.10 – Distribuição das deformações do painel estufa estampado com o aço EEP-PC EG – Tratamentos 10 a 13.

Distribuição das deformações do painel forno estampado com o aço QC

A figura 4.11 mostra o gráfico da distribuição das deformações de três peças do painel forno, estampadas com o aço QC segundo os tratamentos 14 a 16, onde as forças de sujeição utilizadas foram 118, 196 e 294 kN, combinadas com duas condições de lubrificação (com e sem lubrificação), conforme legenda.

A tabela 4.4 mostra que todos os tratamentos deste experimento apresentaram como defeito extremamente significativo a fratura em seis regiões. Estas fraturas ocorreram logo no início da conformação da peça, fato este caracterizado pelas grandes dimensões da fratura como mostrado na figura 4.12. Este tipo de fratura torna as medições das deformações inconsistentes e não representativas do real comportamento da chapa perante as solicitações impostas pela geometria da peça, pois a chapa ao invés de deformar-se apenas abre as fraturas, justificando as pequenas deformações medidas frente às fraturas que ocorreram. Pode-se observar que o tratamento 16 nem mesmo excedeu a CLC, entretanto a peça fraturou em todas as regiões analisadas.

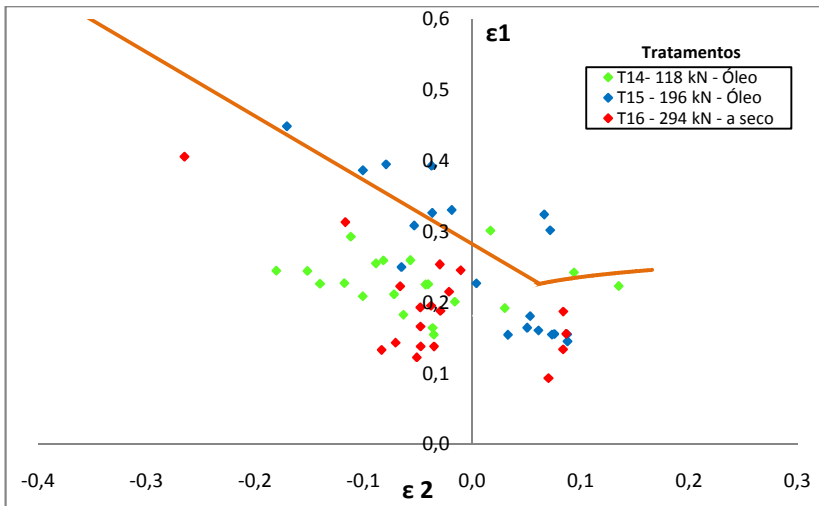


Figura 4.11 – Distribuição das deformações do painel forno estampado com o aço QC - Tratamentos 14 a 16.

O tratamento 14, além das fraturas em todas as regiões analisadas, apresentou ondulações e enrugamentos, sendo estes indicativos de força de sujeição insuficiente. O aumento desta força de sujeição eliminou as ondulações e enrugamentos, mas como esperado, a fratura persistiu. O aço QC portanto, não suporta o nível de deformação necessário para conformação do painel forno.

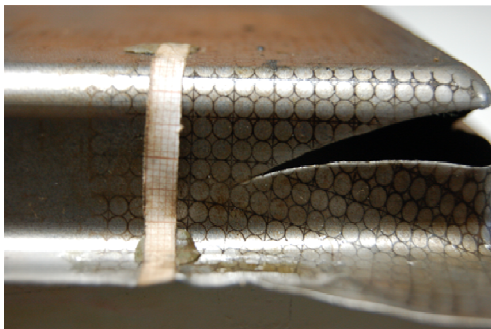


Figura 4.12 – Representação do grau das fraturas que ocorreram nos tratamentos 14 a 16.

Distribuição das deformações do painel forno estampado com o aço EEP e avaliação do efeito da força de sujeição e do tipo de lubrificação

A figura 4.13 mostra o gráfico da distribuição das deformações de três peças do painel forno, estampadas com o aço EEP segundo os tratamentos 17 a 19, onde as forças de sujeição utilizadas foram 196 e 294 kN, combinadas com duas condições de lubrificação (com e sem lubrificação), conforme legenda.

Pode ser observado que todos os 3 tratamentos apresentaram pontos acima da CLC, indicando uma possível falha por fratura ou estrição, o que foi comprovado nos resultados da inspeção visual, tabela 4.4, quando foram detectadas estrições e fraturas em diversas regiões, mas é fato que a estampagem do painel forno com o aço EEP falhou em todas os tratamentos testados. Ondulações e enrugamentos também ocorreram em alguns tratamentos.

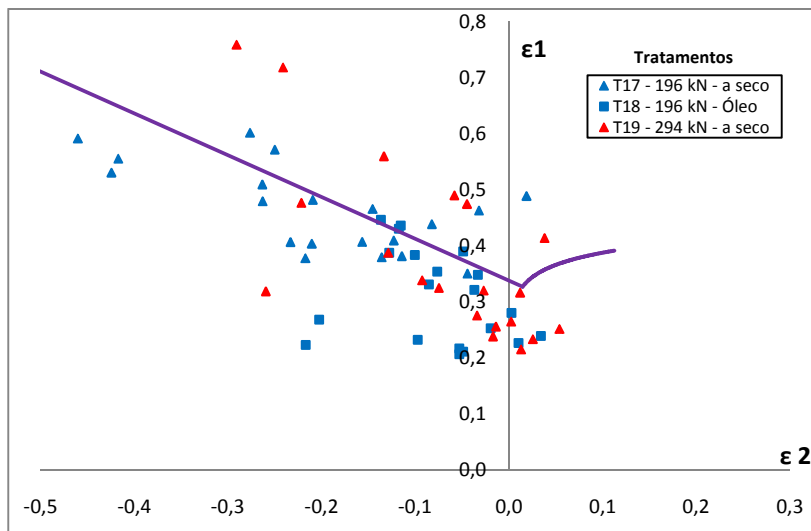


Figura 4.13 – Distribuição das deformações do painel forno estampado com o aço EEP – Tratamentos 17 a 19.

Ao comparar as distribuições das deformações das peças estampadas segundo os tratamentos 17 e 18, pode ser avaliado o efeito da lubrificação. De fato observa-se que as deformações reduziram

bastante, principalmente na direção principal 2, mostrando o efeito da lubrificação na homogeneização das deformações. Entretanto, alguns círculos ainda apresentaram deformações superiores ao limite de conformação. Estas deformações ocorreram em círculos submetidos a um modo de deformação próximo à deformação plana. Este efeito da lubrificação também pode ser observado na tabela 4.4, pois a quantidade de regiões que apresentaram fratura ou estricções reduziu.

Outro efeito da utilização de lubrificação observado nestes tratamentos foi a eliminação de ondulações e enrugamentos em algumas regiões. Enquanto que o tratamento 17 apresentou ondulações nas regiões 7 e 8 da peça e enrugamento na região 1, o tratamento 18 apresentou ondulação somente na região 7 e não apresentou enrugamento algum. Este fato pode ter sido consequência da homogeneização das deformações.

Analisando o efeito da força de sujeição na estampagem do painel forno com o aço EEP pela comparação dos tratamentos 17 e 19, ambos sem lubrificação, pode-se observar dois comportamentos distintos. Para alguns elementos as deformações aumentaram sensivelmente na direção principal 1 e reduziram na direção 2, o que fez com que o par de deformações excede-se o limite de conformação. Para outros elementos, devido à severidade e precocidade das fraturas, as deformações não desenvolveram e se mantiveram abaixo da CLC apesar da falha ter sido observada na inspeção visual. A maior força de sujeição novamente fez com que as deformações aumentassem, levando a fratura às regiões que estavam no limiar.

Distribuição das deformações do painel forno estampado com o aço EEP-PC EG e avaliação do efeito da força de sujeição e do tipo de lubrificação

A figura 4.14 mostra o gráfico da distribuição das deformações de quatro peças do painel forno, estampadas com o aço EEP-PC EG segundo os tratamentos 20 a 23, onde as forças de sujeição utilizadas foram 118, 196 e 343 kN, combinadas com duas condições de lubrificação (com e sem lubrificação), conforme legenda.

Pode ser observado que apenas o tratamento 22 apresentou pontos acima da CLC, estando coerente com os resultados da inspeção visual, tabela 4.4, que detectou uma fratura na região 2 e estricção na região 6. Para os demais tratamentos, todas as deformações se situaram na zona segura, abaixo da CLC.

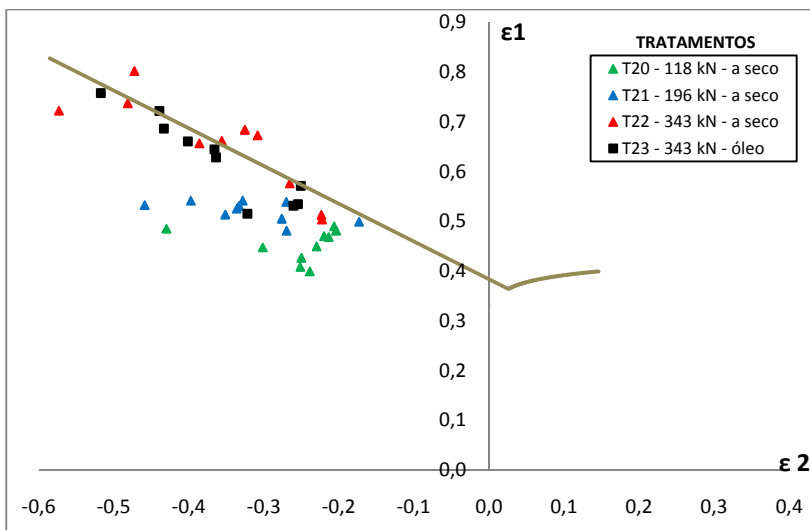


Figura 4.14 – Distribuição das deformações do painel forno estampado com o aço EEP-PC EG – Tratamentos 20 a 23.

Pode-se analisar o efeito da força de sujeição na estampagem do painel forno com o aço EEP-PC EG pela comparação entre os tratamentos 20 a 22. Do tratamento 20 para o 21, com o aumento da força de sujeição aumentaram também as deformações nas duas direções principais, ε_1 e ε_2 , se deslocando na direção do modo de deformação embutimento, sob a CLC, mantendo-se na zona segura e isenta de falhas. Com o ajuste da força de sujeição para o 343 kN, tratamento 22, as deformações aumentaram mais na direção principal ε_1 , seguindo o modo de deformação tração uniaxial e excedendo o limite de conformação dado pela CLC. A situação foi bastante semelhante quando a mesma análise foi realizada no painel estufa também com o aço EEP-PC EG. Novamente, a “Janela de Conformação” para a estampagem do painel forno com o material EEP-PC EG e sem lubrificação fica fácil de ser caracterizada, bastaria testar mais alguns níveis de força de sujeição entre os extremos utilizados, uma vez que com 118 kN ocorreram ondulações e enrugamentos e com 343 kN, fraturas.

A força de sujeição calculada para o painel forno, 235 kN, ficou bastante próxima da força testada e aprovada no tratamento 21, 196 kN, sem lubrificação. Provavelmente, se a força de sujeição calculada fosse

utilizada nas mesmas condições do tratamento 21, a operação também seria isenta de defeitos.

Ao comparar as distribuições das deformações dos tratamentos 22 e 23, pode ser avaliado o efeito da lubrificação na estampagem do painel forno a partir do aço EEP-PC EG com força de sujeição de 343 kN. Pode-se observar que as deformações reduziram nas duas direções principais, saindo da zona crítica para a zona segura e isenta de falhas, como comprovam os resultados apresentados na tabela 4.4.

4.3.2 Experimento 2 - Efeito das diferenças de geometria do ferramental

Na tabela 4.5 são mostrados os resultados da inspeção visual nas peças estampadas para o experimento 2. A inspeção visual seguiu o mesmo procedimento da realizada no experimento 1, tendo sido registradas as regiões de ocorrência destes efeitos, regiões estas definidas nas figuras 3.5 e 3.6.

Tabela 4.5 – Resultados da inspeção visual para identificação de defeitos de estampagem no experimento 2.

Peça	Aço	Tratamento	Força sujeição (kN)	Tipo de lubrificação	Regiões de ocorrência dos defeitos				
					Fratura	Estricção	Ondulação	Enrugamento	Distorção de forma
Painel Forno	EEP	24	118	Óleo	2	5	7 e 8	1	Não
		25	196	Óleo	2 e 6	5	7	Não	Não
	EEP-PC EG	26	196	Seco	Não	Não	Não	Não	Não
		27	343	Seco	2	6	Não	Não	Não
		28	343	Óleo	Não	Não	Não	Não	Não

Distribuição das deformações do painel forno estampado com o aço EEP, força de sujeição de 118 kN e blank lubrificado com óleo

Na figura 4.15 é mostrada a distribuição das deformações do painel forno estampado com o aço EEP, força de sujeição de 118 kN e *blank* lubrificado com óleo. As medidas de deformação dos círculos selecionados estão agrupadas e identificadas na legenda pela região e localização dos círculos. Estas regiões e localizações estão descritas nas figuras 3.6 e 3.7, respectivamente.

Previsões quanto aos modos de deformação que deveria estar sujeita cada localização podem agora ser verificadas.

Os círculos L3, na sua maioria, se deformaram segundo o modo de deformação de estiramento biaxial, conforme a previsão e não foram encontradas diferenças entre as regiões 1 e 2. Um dos círculos da região 1 apresentou um modo de deformação mais próximo da deformação plana.

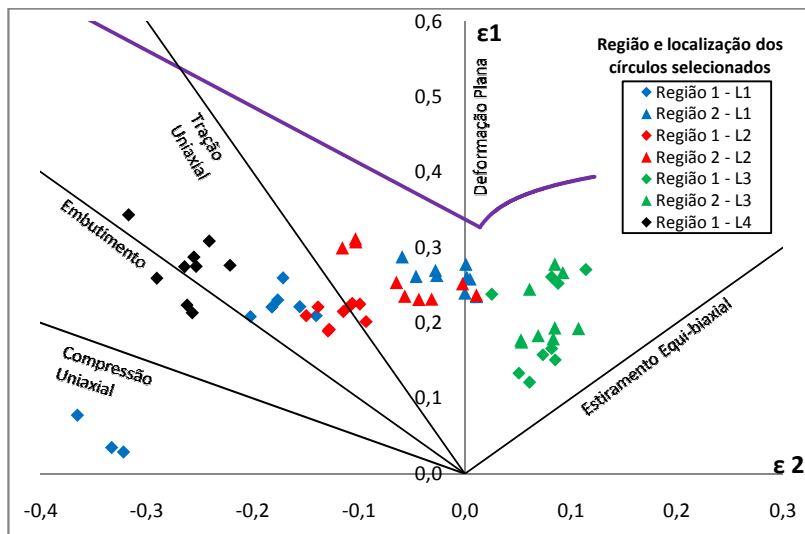


Figura 4.15 – Distribuição das deformações do painel forno estampado com o aço EEP, força de sujeição 118 kN e *blank* lubrificado. Seleção dos círculos por região e localização para avaliação dos modos de deformação presentes.

A distribuição das deformações medidas nas localizações 1 e 2 (L1 e L2) revelou uma diferença nos modos de deformação presentes da região 1 para a região 2. Enquanto na região 1 o modo de deformação predominante foi a tração uniaxial, na região 2 o modo de deformação plana se mostrou mais predominante. Esta diferença tem relação com diferenças presentes no ferramental, seja no raio da matriz, seja na uniformidade da aplicação de força pelo prensa chapas. Em ambos os casos, cria-se uma diferença no controle de fluxo de material que se deforma para dentro da matriz, criando assinaturas deformacionais diferentes para as duas regiões.

A região 2 torna-se mais suscetível a fraturar, pois na deformação plana a formação de estrições localizadas é mais provável

[Marciniak, 2002]. Isto foi observado na inspeção visual da peça conforme mostrado na tabela 4.5 para o tratamento 24, que identificou uma falha por fratura na região 2. Na região 1 ainda foram identificados alguns círculos que apresentaram o modo de deformação de compressão uniaxial, o que justifica o enrugamento detectado na inspeção visual para este tratamento.

Para a localização 4 (L4), a região 1 apresentou predominantemente o modo de deformação de embutimento, confirmando a previsão inicial. Não foi possível compará-la com a região 2 pois devido a um defeito na gravação da rede de círculos nesta região as deformações não puderam ser medidas nesta peça.

Distribuição das deformações do painel forno estampado com o aço EEP, força de sujeição de 196 kN e blank lubrificado com óleo

Na figura 4.16 é mostrada a distribuição das deformações do painel forno estampado com o aço EEP, força de sujeição de 196 kN e *blank* lubrificado com óleo.

Os círculos selecionados da localização 3 (L3) foram sujeitados ao modo de deformação estiramento biaxial, não sendo encontradas diferenças entre as regiões 1 e 2. Comparando com o tratamento anterior, 24, o aumento na força de sujeição parece ter afetado mais a região 1 do que a 2, indicando que existe um provável desbalanceamento de forças no prensa chapas.

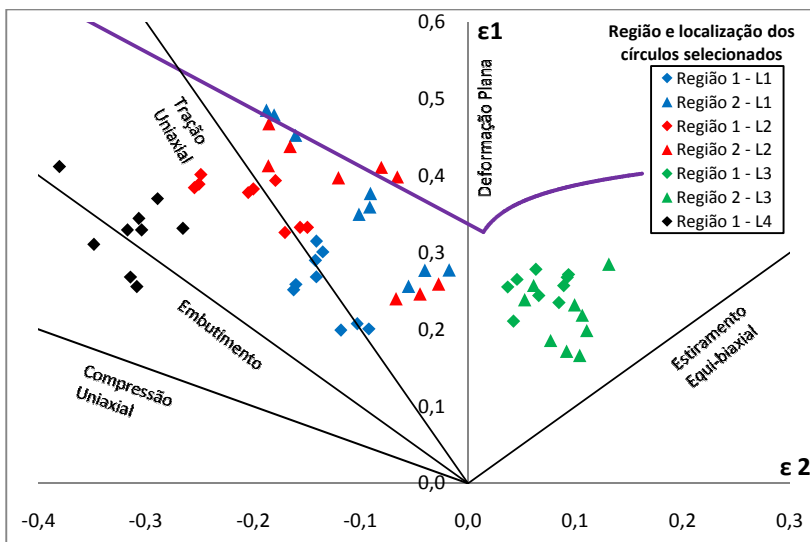


Figura 4.16 – Distribuição das deformações do painel forma estampado com o aço EEP, força de sujeição 196 kN e *blank* lubrificado. Seleção dos círculos por região e localização para avaliação dos modos de deformação presentes.

Como no tratamento 24, no tratamento 25, a distribuição das deformações medidas nas localizações 1 e 2 (L1 e L2) também indicou que a região 1 difere da região 2 quanto ao modo de deformação presente. Com o aumento da força de sujeição do tratamento 24 para o 25 as deformações da região 2 aumentaram em maior intensidade que as deformações da região 1, ultrapassando o limite de conformação delimitado pela CLC. Pode-se comprovar a criticidade das deformações da região 2 através da tabela 4.5 que mostra na região 2 a ocorrência de falha por fratura.

Para a localização 4 (L4), a região 1 também apresentou o mesmo comportamento da primeira peça, diferindo apenas na intensidade das deformações que agora foram um pouco maiores, devido ao aumento da força de sujeição e cujo mecanismo de atuação na distribuição já fora discutido nas análises anteriores.

Distribuição das deformações do painel forno estampado com o aço EEP-PC EG, força de sujeição de 196 kN e blank sem lubrificação

Na figura 4.17 é mostrada a distribuição das deformações do painel forno estampado com o aço EEP-PC EG, força de sujeição de 196 kN e *blank* sem lubrificação.

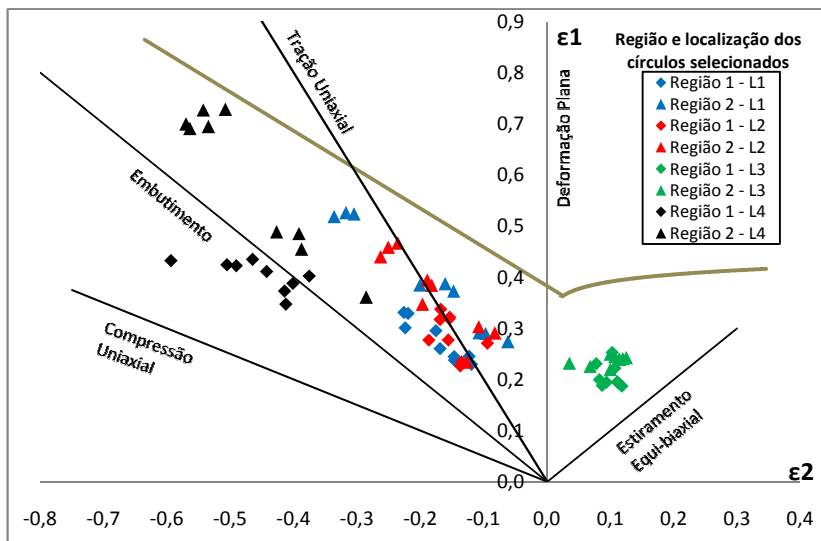


Figura 4.17 – Distribuição das deformações do painel forno estampado com o aço EEP-PC EG, força de sujeição 196 kN e *blank* sem lubrificação. Seleção dos círculos por região e localização para avaliação dos modos de deformação presentes.

A distribuição das deformações medidas na localização 3 (L3), mostrou a ocorrência do modo de deformação estiramento biaxial, e não foram encontradas diferenças entre as regiões 1 e 2.

A distribuição das deformações medidas nas localizações 1 e 2 (L1 e L2) mostrou uma pequena diferença nos modos de deformação presentes da região 1 para a região 2. Enquanto na região 1 a distribuição das deformações se posicionou entre os modos de deformação embutimento e tração uniaxial, para a região 2 a distribuição de deformações se posicionou entre os modos de deformação tração uniaxial e deformação plana. Apesar da maior

proximidade da distribuição das deformações da região 2 em relação à CLC, este afastamento ainda é significativo, pode-se portanto classificar estas deformações como dentro da zona segura.

Para a localização 4 (L4), ambas as regiões apresentaram modo de deformação embutimento como predominante, entretanto, na região 2 a intensidade das deformações foi maior, mais ainda dentro da zona segura.

Distribuição das deformações do painel forno estampado com o aço EEP-PC EG, força de sujeição de 343 kN e blank sem lubrificação

Na figura 4.18 é mostrada a distribuição das deformações do painel forno estampado com o aço EEP-PC EG, força de sujeição de 343 kN e *blank* sem lubrificação.

A distribuição das deformações da localização 3 (L3), novamente mostrou a ocorrência do modo de deformação estiramento biaxial. Em comparação com o tratamento anterior, 26, neste tratamento, 27, com o aumento da força de sujeição, as deformações na região 1 aumentaram significativamente e se aproximaram da CLC, diferentemente da região 2, indicando portanto uma possível diferença entre as regiões 1 e 2 no ferramental.

Com o aumento da força de sujeição, a distribuição das deformações medidas na localização 1 (L1) apresentou valores críticos e acima da CLC para a região 2, diferentemente da região 1 L1 e região 2 L2, que apesar de terem apresentado o mesmo modo de deformação, deformação plana, as deformações foram menores. Já a região 1 L2 manteve o mesmo modo de deformação encontrado no tratamento anterior, com força de sujeição menor.

Para a localização 4 (L4), ambas as regiões apresentaram modo de deformação entre o embutimento e a tração uniaxial, mas as deformações na região 2 foram maiores, ultrapassando o limite de conformação.

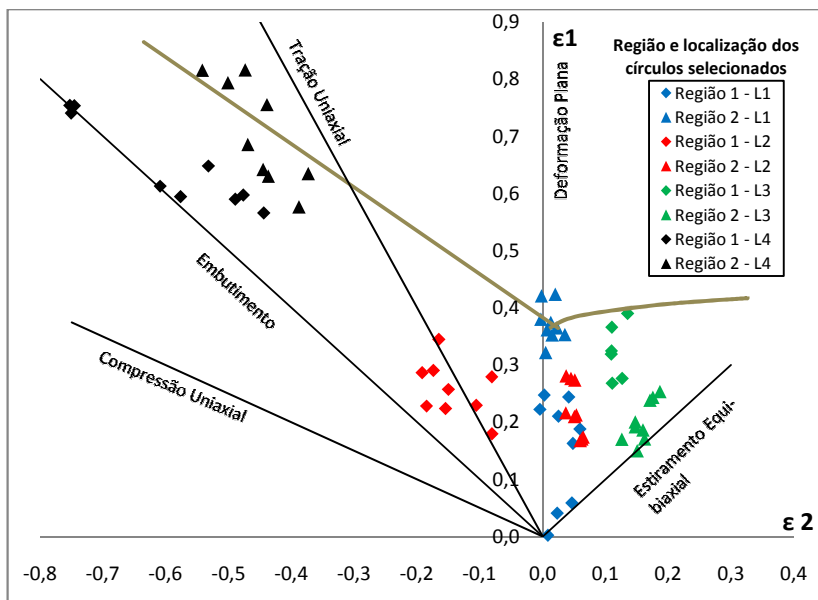


Figura 4.18 – Distribuição das deformações do painel forno estampado com o aço EEP-PC EG, força de sujeição 343 kN e *blank* sem lubrificação. Seleção dos círculos por região e localização para avaliação dos modos de deformação presentes.

Pela tabela 4.5, observa-se que o fato das deformações da região terem ultrapassado a CLC resultou no aparecimento de fratura nesta região. É mais provável que a falha tenha iniciado na L1, devido às menores deformações necessárias para iniciar a estricção, o que ajudou no desenvolvimento das deformações elevadas apresentadas pela L4.

Pode-se verificar que o aumento da força de sujeição potencializou as diferenças entre as regiões 1 e 2, principalmente nos modos de deformação estiramento biaxial e deformação plana. Isto ocorre pois, com o aumento da força de sujeição, maiores tensões são necessárias para vencer o maior atrito entre a chapa e as partes do ferramental.

Distribuição das deformações do painel forno estampado com o aço EEP-PC EG, força de sujeição de 343 kN e blank lubrificado

Pode-se verificar pela tabela 4.5, que a utilização de lubrificação neste tratamento, 28, eliminou os defeitos apresentados no tratamento anterior, 27. Na figura 4.19 é mostrada a distribuição das deformações do painel forno estampado com o aço EEP-PC EG, força de sujeição de 343 kN e *blank* com lubrificação.

A distribuição das deformações medidas na localização 3 (L3) aumentou significativamente para as regiões 1 e 2, ultrapassando a CLC. O aumento nas deformações pode ser explicado pela lubrificação total do *blank*, inclusive da região sob o punção, onde o atrito tem que ser o menor possível, para facilitar o movimento relativo entre as superfícies do punção e da chapa metálica, aumentando as deformações, principalmente ε_2 [Tigrinho, 2005; Hosford, 2007]. Quanto ao fato desta distribuição das deformações ter ultrapassado o limite de conformação dado pela CLC, mas a peça não ter apresentado fraturas nem estrições, pode-se destacar duas prováveis causas, ou algum efeito associado ao revestimento de zinco deste material afetou as deformações para obtenção da CLC, ou uma lubrificação deficiente do punção durante o ensaio Nakazima causou aumento no atrito e consequente deformação localizada reduzindo a quantidade de deformação antes da fratura.

Na distribuição das deformações medidas nas localizações 1 e 2, pode-se observar bem o efeito da lubrificação na redução dos níveis de deformação, mudando inclusive o modo de deformação apresentado, que se aproximou da tração uniaxial, o que fez com que as deformações ficassem abaixo da CLC, dentro da zona segura.

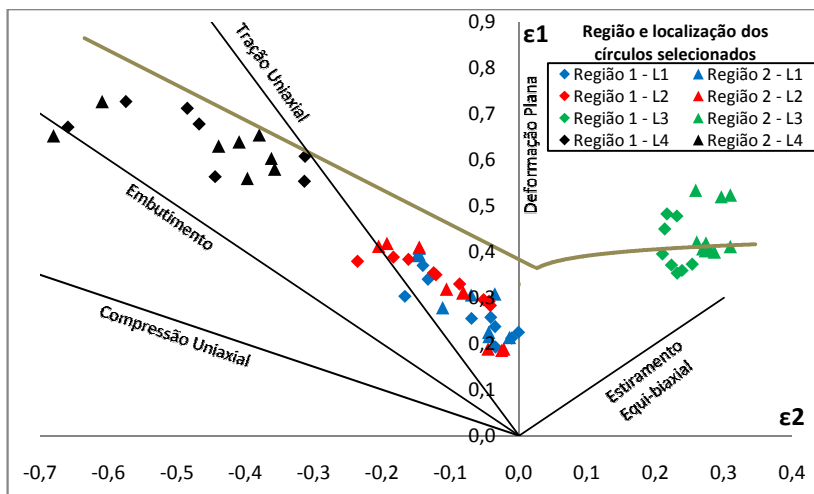


Figura 4.19 – Distribuição das deformações do painel forno estampado com o aço EEP-PC EG, força de sujeição 343 kN e *blank* com lubrificação. Seleção dos círculos por região e localização para avaliação dos modos de deformação presentes.

Para a distribuição das deformações medidas na localização 4, o nível de deformações também foi reduzido, ficando abaixo do limite de conformação.

Nestas condições, praticamente não podem ser identificadas diferenças significativas entre as regiões 1 e 2. Isto faz concluir que o efeito da lubrificação em homogeneizar as deformações e reduzir o atrito pode de certa forma amenizar pequenas diferenças da geometria do ferramental.

4.3.3 Experimento 3 – Efeito do revestimento zinco pelo processo eletrolgalvanização

Para entender o efeito do revestimento de zinco da chapa EEP-PC EG nos modos de deformação apresentados, duas peças do painel forno foram estampadas a partir de dois *blanks* com lubrificação e com aplicação de força de sujeição de 235 kN, sendo um na condição de fornecimento e outro com a camada de zinco removida. No gráfico da figura 4.20 são mostradas as distribuições das deformações obtidas para estas duas peças.

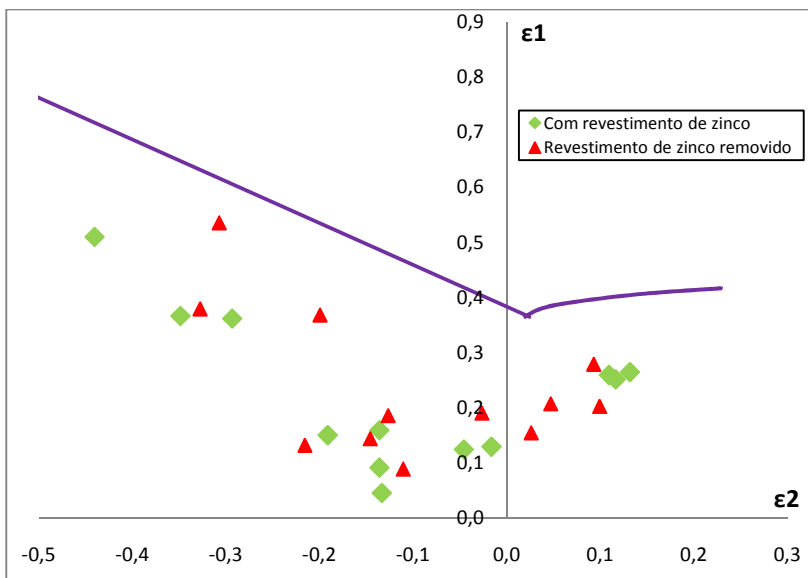


Figura 4.20 – Distribuição das deformações do painel forno estampado a partir de *blanks* do aço EEP-PC EG, com lubrificação e aplicação de força de sujeição de 235 kN para avaliação do efeito do revestimento de zinco.

Para a região do modo de deformação estiramento biaxial pode ser observada uma ligeira tendência do *blank* com revestimento de zinco apresentar maiores deformações que o material com o zinco removido. Isto pode ser devido ao “efeito lubrificante” do zinco, que reduz o atrito entre o punção e o material sob o mesmo, favorecendo o movimento relativo entre ambos e aumentando as deformações.

Para a região de embutimento o efeito do revestimento de zinco foi semelhante ao efeito do óleo identificado e explicado na comparação entre os tratamentos 22 e 23 do experimento 1, afastando as deformações do limite de conformação dado pela CLC.

Na tabela 4.6 são apresentados os resultados da inspeção visual das peças deste experimento 3. Nenhum tipo de defeito foi encontrado.

Tabela 4.6 – Resultados inspeção visual para identificação de defeitos de estampagem no experimento 3.

Peça	Aço	Tratamento	Força sujeição (kN)	Tipo de lubrificação	Revestimento Zn	Regiões de ocorrência de defeitos				
						Fratura	Estricção	Ondulação	Enrugamento	Distorção de forma
Painel Forno	EEP-PC	29	343	Óleo	Revestido	Não	Não	Não	Não	Não
	EG	30	343	Óleo	Zn removido	Não	Não	Não	Não	Não

4.3.4 Experimento 4 - Efeito da geometria do *blank*

Visando entender o efeito na distribuição das deformações da geometria do *blank*, foi elaborado um novo experimento, onde foram estampadas com o aço EEP, duas peças do painel forno com lubrificação e aplicação de força de sujeição de 196 kN, sendo uma com o *blank* com cantos retos e outra com os cantos chanfrados. Na figura 4.21, estão apresentadas as distribuições das deformações para estes dois tratamentos, 31 e 32.

Foi conseguida uma redução significativa dos níveis de deformação com a utilização do *blank* com cantos chanfrados, principalmente na zona mais crítica, do modo de deformação plana. A razão para esta redução dos níveis de deformação é que a eliminação do material excedente nos cantos da peça facilita o fluxo de material reduzindo os níveis de deformação [Lange, 1993].

Isto pode ser observado também na tabela 4.7, quando a ocorrência de fraturas e estricções foi reduzida com a utilização do *blank* com os cantos chanfrados. Como nenhum estudo prévio foi realizado para encontrar a melhor geometria de *blank*, a região 1 apresentou enrugamento devido a baixa força de sujeição nesta região causada pela ausência de material sob o prensa chapas.

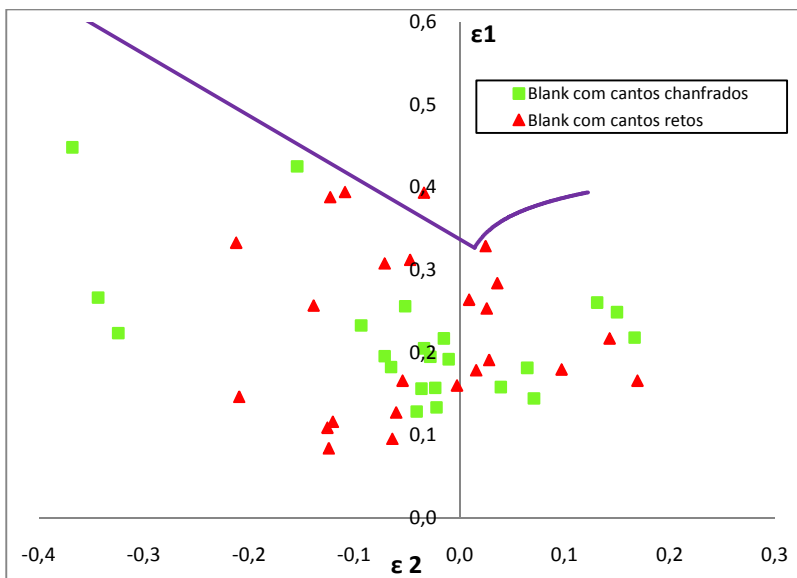


Figura 4.21 – Distribuição das deformações do painel forno estampado a partir de *blanks* do aço EEP com lubrificação e aplicação de força de sujeição de 196 kN para avaliação do efeito da geometria do *blank*.

Tabela 4.7 – Resultados inspeção visual para identificação de defeitos de estampagem no experimento 4.

Peça	Aço	Tratamento	Força sujeição (kN)	Tipo de lubrificação	Cantos do blank	Regiões de ocorrência de defeitos				
						Fratura	Estricção	Ondulação	Enrugamento	Distorção de forma
Painel Forno	EEP	31	196	Óleo	Retos	2 e 6	5	7	Não	Não
		32	196	Óleo	Chanfrados (40x40 mm)	4	Não	Não	1	Não

5. CONCLUSÕES

- Foi confirmado que o ponto em que a CLC intercepta o eixo das deformações ε_1 é proporcional ao coeficiente de anisotropia.
- No procedimento para a obtenção da CLC, a posição do cotovelo e a inclinação do lado direito da CLC mostraram-se bastante sensíveis às condições de lubrificação do punção, que pode causar mudanças no caminho das deformações e consequentemente alterações nos limites de conformação.
- A avaliação da operação de estampagem através da distribuição das deformações da peça versus CLC do material utilizado mostrou-se realmente capaz de identificar estricções e fraturas, desde que estas últimas sejam de pequenas proporções.
- A aplicação do aço QC na estampagem do painel estufa não é recomendada devido à não caracterização da janela de conformação com os fatores e níveis experimentados. A utilização deste material na estampagem do painel forno é ainda menos viável, pois o nível de deformações impostas pela geometria da peça painel forno está muito além da capacidade de deformação apresentada pelo aço QC.
- O aço EEP, quando utilizado na estampagem do painel estufa, apresentou resultados satisfatórios quanto ao não aparecimento de defeitos, pois numa faixa intermediária de força de sujeição, foi possível a obtenção de peças sem qualquer defeito, sendo caracterizada uma “janela de conformação”. Já quando utilizado na estampagem do painel forno, com os níveis de força de sujeição e condições de lubrificação experimentadas, a “janela de conformação” não foi caracterizada.
- Para o aço EEP-PC EG, na estampagem do painel estufa e painel forno, foram caracterizadas as “janelas de conformação” mais abrangentes, pois em diversas condições de lubrificação e força de sujeição experimentadas, a

conformação da peça foi bem sucedida e sem a ocorrência de defeitos.

- A geometria do ferramental do painel forno apresentou um efeito sistemático entre as regiões 1 e 2, sendo que na região 2 as deformações foram maiores. Diferenças entre os raios da matriz, do punção e diferenças na aplicação da força de sujeição pelo prensa chapas precisam ser investigadas para encontrar as causas do efeito observado nas distribuições de deformação.
- O efeito da lubrificação com óleo emulsionável foi observado, bem como a dependência deste com o modo de deformação apresentado. Para o embutimento o efeito desta lubrificação foi reduzir a criticidade das deformações tornando a distribuição mais homogênea, afastando-as da CLC em direção ao modo de deformação embutimento, $\varepsilon_1 = -\varepsilon_2$. Para o estiramento, o efeito visualizado foi o aumento da deformação na direção principal 2, tendendo aproximar as deformações ao modo de deformação estiramento equi-biaxial, ou seja, $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$, mas mantendo o afastamento da CLC. No modo de deformação plana, com a lubrificação as deformações reduziram nas duas direções principais, afastando-as da CLC.
- O filme de polietileno apresentou boa capacidade de lubrificação, tendo um comportamento semelhante ao óleo emulsionável, quando submetido ao modo de deformação embutimento.
- A força de sujeição mostrou-se bastante efetiva no controle do fluxo de material, reduzindo as ondulações e enrugamentos, mas por outro lado, aumentando os níveis de deformação, aumentando a probabilidade do surgimento de estricções e fraturas.
- Foi observada uma interação da força de sujeição com a condição de lubrificação, fato já esperado, pois ambas afetam diretamente o atrito entre a chapa e o prensa chapas.
- O revestimento de zinco apresentou um possível “efeito lubrificante”, reduzindo o atrito entre a chapa e o ferramental, favorecendo a estampagem do painel forno com o aço EEP-

PC EG tanto no modo de deformação embutimento quanto estiramento biaxial.

- Foi confirmada a redução significativa nos níveis de deformação com a utilização do *blank* com cantos chanfrados na estampagem do painel forno com o aço EEP-PC EG, principalmente na zona mais crítica do modo de deformação plana.

6. SUGESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

- Estudar o efeito da lubrificação através dos caminhos da deformação tanto na obtenção da CLC quanto da distribuição das deformações de uma peça qualquer.
- Fazer uso da simulação numérica para prever a CLC e a distribuição das deformações de uma peça qualquer, comparando estas previsões com os valores obtidos nos ensaios.
- Obter as distribuições das deformações com o auxílio de hardware e softwares específicos, como ASAME ilustrado na figura 4.22, permitindo a leitura de um número maior de elementos. Desta forma, um maior número de ensaios se tornaria viável, o que possibilitaria abranger uma maior faixa de modos de deformação, estudar novos fatores e realizar repetições, aumentando o grau de confiança nos resultados.

REFERÊNCIAS

AL-QURESHI, H.A. **Apostila de conformação e instabilidade plástica de chapas metálicas e vasos de pressão**, 2003.

AMERICAN GALVANIZERS ASSOCIATION – *Suitable Development & Hot Dip Galvanizing: Committed to a Better Environmental Social Economic Future*. USA, p.1-7, 2002. Disponível em: www.galvanizeit.org.

ARAÚJO NETO, J.B. **Elevação do Nível de Estampabilidade em Aço Laminado a Frio com Recozimento em Forno Caixa, 60° Congresso Anual ABM**, pp 75-82, 2005.

AYRES, R.A.; BRAZIER, W.G.; SAJEWSKI, V.F. *Evaluating the Limiting Dome Height Test as a New Measure of Press Formability*, J. Appl. Metalwork., Vol 1 (No. 1), 1979, p 41-49.

BACKOFEN, W.A. *Massachusetts Institute of Technology Industrial Liaison Symposium, Chicago*, 1974.

BLICKWEDE, D.J. *Micrometallurgy by the Millions*. ASM, Vol 61, 1968, p 653-679

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

BRAGARD, A.; BARET, J.C.; BONNARENS, H. *A simplified technique to determined the FLD at the onset of necking*, CRM, Vol. 33, pp. 53-63,1972.

BUTUC, M.C. *Forming Limit Diagram. Definition of Plastic Instability Criteria*. *Dissertation for the accomplishment of Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering*, Porto, 2004, p. 4.

CARLSSON, P. *Surface Engineering in Sheet Metals Forming*, *Dissertation presented at Uppsala University for the degree of Doctor of Philosophy*, Teknikdalen, Borlänge, 2005.

COLL, A. ***Forming Limit Diagrams: A Survey. 7th national conference on Technologies and Machine-Tools for Cold Metal Forming TPR2000.*** Cluj-Napoca, Romania, pp. 29-51, 2000.

CONI, N.H.S. **Estudo das Propriedades Mecânicas do Aço Zincado por Imersão à Quente e a Galvalume® Produzidos na CSN-PR.** Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

D’HAEYER, R.; BRAGARD, A. ***La courbe limite de formage;*** Raport n° 6210/77, CRM Liege, 1974.

EARY, D.F. & REED, E.A. ***Techniques of Pressworking Sheet Metal,*** 2nd ed., Prentice-Hall, 1974, p 136-172.

FERNANDES, J.M. **Estudo da Fabricação de Latas em Folhas-de-Flandres pelos Processos de Embutimento Profundo e Estiramento.** Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Unicamp, Campinas, 1998.

FERRARINI, J.L. **Caracterização de Materiais para o processo de Estampagem.** Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e Materiais, UFRGS, Porto Alegre, 2004.

FERREIRA FILHO, A.; LIMA, L.M. G.; PADILHA, A.F.; LIMA, N.B. **Controle da microestrutura e da textura de chapas de aço baixo carbono para estampagem.** II Workshop sobre textura e relações de orientação. 2^a. ed., São Paulo, 2003, p. 248-260.

FERREIRA FILHO, A.; PLAUT, R.L.; BOMFIM, M.F.; LIMA, M.B. **Efeito da Textura Cristalográfica na Anisotropia Plástica Planar em Aços para Estampagem Profunda.** 42º Seminário de Laminação, ABM, pp 153-163, 2005.

FOLLE, L.F. **Metodologia de Medição do Coeficiente de Atrito em Estampagem e Avaliação da Influência da Lubrificação e Condições Superficiais Via Simulação Numérica.** Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e Materiais, UFRGS, Porto Alegre, 2008.

FRIEDMAN, P.; HOUSTON, D. *Effects of prestraining on the formability of Al-Mg sheet alloys*, Research Report SRR-1999-0091, Ford Research Laboratories.

FROMMANN, K.M. *The Prediction of Metal Stamping Behavior*, in *Proceedings of the American Metal Stamping Association Conference* (Detroit), 1968, p 1-55.

GALLEGO, J. **Efeito da Composição Química e da Temperatura de Transformação sobre o Endurecimento por Precipitação Interfásica em Aços Microligados**. Tecnologia em Metalurgia e Materiais, São Paulo, p 50-57, 2005.

GRAF, A.; HOSFORD, W.F. *Calculations of forming limit diagram for changing strain paths*, *Metall. Trans.* 24, 1993.

GRAF, A.; HOSFORD, W.F. *Metallurgical and Materials Transactions*. v. 21A, 1990, p. 87-94.

GRANZOW, W.G.; HECKLER, A.J. *Crystallite Orientation Distribution Analysis of the Cold Rolled and Recrystallization Textures in Low-Carbon Steels*. Armco Steel Corp., Middletown, Ohio, 1970.

GHOSH, A.K. *The Effect of Lateral Drawing-in on Stretch Formability*, *Metals Eng. Quarterly*, Vol. 15, no. 3, pp. 53-61, 64. 1975.

GOODWIN, G.M. *Formability Index*, Paper MF 71-165, *Society of Manufacturing Engineers*, 1971.

GRONOSTAJSKI, J. e DOLNY, A. *Determination of Forming Limit Curves by Means of Marciniak Punch*, *Memoires Scientifiques Rev.Met.*, p.570-578, Apr.(1980).

HAVRANEK, J. *The Effect of Mechanical Properties of Sheet Steels on the Wrinkling Behavior During Deep Drawing of Conical Shells*, in *Sheet Metal Forming and Energy Conservation, Proceedings of the 9th Biennial Congress of the International Deep Drawing Research Group*, Ann Arbor, MI, American Society for Metals, 1976, p 245-263.

HECKER, S.S. *A Simple Forming Limit Curve Technique and Results on Aluminium Alloys*, Proc. 7th IDDRG Congress, Amsterdam, pp.51-62, 1972.

HOLMBERG, S.A et al. **Evaluation of Sheet Metal Formability by Tensile Tests**, Department of Structural Mechanics, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden 2003.

HOSFORD, W.F.; CADDELL, R.M. *Metal Forming - Mechanics and Metallurgy*, Cambridge University Press, Third Edition, 2007.

ISO/WD 12004, *Metallic Materials – Determination of forming limit curves*, 2004.

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

KASPER, A.S.; GEORGE, R.A.; DINDA, S. *Estimating Yield Strength From Hardness Data*, Met. Prog., 1976, p 30-35.

KEELER, S.P. *Determination of Forming Limits in Automotive Stampings*, Society of Automotive Engineers, 1965.

KEELER, S.P. *The Science of Forming, Vol. 1, Precision Metalforming Association*, 2003.

KEELER, S.P. *The Science of Forming, Vol. 2, Precision Metalforming Association*, 2005.

KLEIN, L.N.T. et al. **Curvas Limite de Conformação (CLC)**, Centro de Pesquisa da Usiminas, RV7827, 1981.

KOBAYASHI, I.; ISHIGAKI, M.; ABE T. *Effects of the Strain Ratio on the Deforming Limit of Steel Sheets and Its Application to Actual Press Forming*, Proc. 7th International Deep Drawing Research Group Congress, Amsterdam, pp. 52-60, 1972.

LANGE, K. *Forming Handbook*. Ed. McGraw Hill and SME, New York, 1993.

LEITZKE, T.C.G. **Estudo da Influência das Características de Chapas Galvanizadas e das Condições de União por Brasagem MIG Sobre as Propriedades Mecânicas e Resistência à Corrosão.** Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Materiais, UFSC, Florianópolis, 2008.

LOBÃO, M.C. **Determinação de Curvas Limite de Conformação por Procedimentos Experimentais e Simulação Numérica do Processo de Estampagem.** Dissertação (Mestrado em Eng. Mecânica), UFSC, Florianópolis, 2003. 133 f.

MAGALHÃES, F.C. **Estudo Numérico e Analítico das Evoluções da Força e da Espessura em Chapas de Aço Livre de Intersticiais Durante Processamento por Embutimento e Ironing.** Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, UFMG, 2005.

MAGNABOSCO, A.S. **Caracterização da Estampabilidade dos Aços COSIPA Laminados a Frio,** Projeto LME LTFA01 - COSIPA, 1994.

MARCINIAK, Z.; DUNCAN, J.L.; HU, S.J. *Mechanics of sheet metal forming.* Butterworth-Heinemann, 2002.

MARCONDES, P.V.P. **Conformação de Chapas Metálicas,** 2003.

Metal forming handbook / Schuler, Springer, 1998.

Metals Handbook ASM, vol. 14 – *Forming and Forging,* ASM International, 1993.

MIELNIK, E.M.; *Metalworking Science and Engineering,* McGraw-Hill, USA, 1991.

MOREIRA, L.P., et al. **Análise numérica e experimentação da influência da espessura inicial nas deformações limites em chapas.** VI Conferência Nacional de Conformação de Chapas, pp. 39-49, 2003.

NAKAZIMA, K.; KIKUMA, T.; HASUKA, K. *Study on Formability of Steel Sheets.* Yawata Tech. Rep., pp141, 1968.

NBR 5915 - Chapas finas a frio de aço-carbono para estampagem, ABNT, 2003.

NBR 6655 Chapas de aço com características melhoradas de propriedades mecânicas, conformabilidade e soldabilidade , ABNT, 2003.

NEWBY, J.R. *Formability of steel sheet; Metals handbook; Forming and forging*. 9^a ed., v. 14, 1988, p. 545-560.

PARNIER, P.; SANZ, G. *Appréciation dea Caractéristique d'emboutissabilité des Tôles minces - Mise en forme des métaux et alliages*, in B. Baudalet (Ed.), Editions CNRS, 1976, p. 305-329, 1976.

PEREIRA, J.F.B.; ALVARENGA, E.A.; BARCELOS, H. **Influência de revestimentos metálicos no valor “r” de Lankford de aços laminados a frio**. In: Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 1995, Curitiba. Anais... São Paulo: ABM, 1995. p. 443-448.

PLAUT, R.L et al. **Efeito da Textura Cristalográfica na Anisotropia Plástica Planar em Aços para Estampagem Profunda**, Congresso Laminação ABM, 2005.

PLAUT, R.L. **Estampabilidade de chapas: ensaios e aplicações**. II Workshop sobre textura e relações de orientação. 2^a ed., São Paulo, 2003, p. 266 - 297.

PLAUT, R.L. **Estampagem dos Aços ao Carbono**, Apostila ABM, 2005

REPAS, P.E. *Metallurgical fundamentals for HSLA steels. World Materials Congress – Microalloyed HSLA Steels*, 1988, p. 3- 8.

ROCHA, M.R. **Aço ABNT 1045 esferoidizado: estudo da cinética de coalescimento e correlações entre microestruturas e propriedades mecânicas**. Dissertação de Mestrado – PGMAT – UFSC, Florianópolis, 2003.

ROCHA, M.R. **Avaliação do efeito das transformações martensíticas na conformabilidade dos aços 304N e 304H.** Tese de doutorado, PGMAT, UFSC, Florianópolis, 2006

ROSSI, M. **Estampo en Frio de la Chapa**, Dossat, Madri, 1971.

SANTOS, R.A. Avaliação de Estampabilidade do Aço DC05 (DIN 10152) e **Validação das Deformações Verdadeiras Obtidas via Simulação Numérica.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Fabricação), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica-UFPR, Curitiba, 2007.

SEMIATIN, S.L.; JONAS, J.J. ***Formability and Workability of Metals: Plastic Instability and Flow Localization.*** *ASM Series in Metal Processing*, v. 2, 1984. 299 p.

SILVEIRA NETTO, S.E.. **Desenvolvimento do Processo de Construção de Curvas Limite de Conformação.** Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e Materiais, UFRGS, Porto Alegre, 2004.

SOUZA, S.A. **Ensaio Mecânicos de Materiais Metálicos.** Edgard Blucher, 1974.

SROUR, E.H.Jr. **Determinação do grau de conformabilidade de chapa de aço para suporte de coluna de direção e identificação de similar nacional.** Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2002.

TAYLOR, B. ***Formability Testing of Sheet Metals***, General Motors Corporation, 1988.

TIGRINHO, L.M.V. **Influência da Lubrificação na Estampagem Via Análise das Deformações Obtidas em uma Chapa de Aço de Alta Estampabilidade.** Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

TURAZI, A. **Estudo de Novas Rotas de Processamento para Refino de Grão e seu Efeito na Estampabilidade de Aços ARBL.** Dissertação de Mestrado – PGMAT – UFSC, Florianópolis, 2008.

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

VEERMAN, C.C., et al. *Determination of appearing and admissible strains in cold reduced sheets*, *Sheet Metal Industries*, Vol. 48, 1971.

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

XU, S.; WEINMANN, K.J.; CHANDRA, A. *Analysis of Forming Limits Using the Hill Yield Criterion.* *Journal of Engineering Materials and Technology*, v. 120, p.236-238, 1998.

XUA, S.; WEINMANNB, K.J. *On Predicting Forming Limits Using Hill's Yield Criteria.* *Journal of Materials Engineering and Performance*, v. 9, n. 2, p. 174-182, 2000.

YOSHIDA K.; ABE K.; MIYAUCHI, K.; NAKAGAWA, T. *Instability and fracture behaviour in sheet metal forming*, *IDDRG*, Turin, La Metallurgia Italiana n° 8, 1968.