

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Dissertação de mestrado

“Aplicação de Curvas Limite de Conformação na previsão de rupturas em bordas de peças estampadas”

Autor: José Osvaldo Amaral Tepedino
Orientador: Prof. Paulo Roberto Cetlin

Junho/2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

José Osvaldo Amaral Tepedino

**APLICAÇÃO DE CURVAS LIMITE DE CONFORMAÇÃO NA PREVISÃO DE RUPTURAS EM
BORDAS DE PEÇAS ESTAMPADAS**

Dissertação de Mestrado apresentada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais

Área de concentração: Metalurgia Física
Orientador: Prof. Paulo Roberto Cetlin

Belo Horizonte
Escola de Engenharia da UFMG
2014

FOLHA DE APROVAÇÃO

Dedico esse trabalho ao meu
saudoso pai, Osvaldo, e à minha querida mãe, Anete.

AGRADECIMENTOS

À minha querida esposa, Alhandra, pelo incentivo e apoio incondicional.

Aos colegas do Centro de Tecnologia Usiminas, em especial aos pesquisadores Jetson Lemos Ferreira e Marco Antonio Wolff pelas sugestões e discussões técnicas que muito me ajudaram para o desenvolvimento deste trabalho, e à equipe do Laboratório de Comportamento Mecânico, Heitor Cesar da Silva, Graciliano Rodrigues Alves, Márcio Alves Canedo, Nívia Lelis Silva Souza e Hamilton Pereira Barros, que colaboraram diretamente na execução dos ensaios, pelas opiniões e disposição em ajudar.

Ao Professor Paulo Roberto Cetlin, pela orientação, pela permanente disponibilidade e por acreditar neste trabalho.

À Usiminas, em particular aos engenheiros Eduardo Avelar Tonelli, Helber Luiz Oliveira Ribeiro, Carlos Salaroli de Araújo, Ivan de Castro e Túlio Magno Füzessy de Melo, pela oportunidade para realização deste importante passo na minha carreira.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	xii
LISTA DE NOTAÇÕES.....	xiii
RESUMO.....	xv
<i>ABSTRACT</i>	xvi
1. INTRODUÇÃO	17
2. OBJETIVO.....	19
2.1. Geral.....	19
2.2. Específico	19
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1. Curva Limite de Conformação	20
3.1.1. Métodos experimentais para levantamento da CLC	21
3.1.2. Parâmetros que afetam a CLC	22
3.1.3. Aplicações da CLC	24
3.1.4. Limitações da CLC	24
3.2. Conformabilidade de bordas	25
3.2.1. Ensaio de expansão de furo	26
3.2.2. Capacidade de expansão de furo e o desempenho em esforços de estiramento de borda em peça estampada.....	27
3.2.3. Parâmetros que influenciam a capacidade de conformação em bordas	29
3.2.4. Deformações em bordas	36
3.2.5. Métodos de previsão de falhas em bordas e furos.....	40
4. METODOLOGIA.....	46
4.1. Materiais e caracterização	46
4.2. Ensaio de expansão de furo	49
4.3. Métodos avaliados para previsão de deformações em bordas submetidas a esforços de estiramento.....	51
4.3.1. Método da Malha Circular.....	51
4.3.2. Método do Duplo Dobramento.....	56
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
5.1. Capacidade de expansão de furos em corpos de prova submetidos ao ensaio KWI	58
5.2. Método da Malha Circular	60
5.2.1. Aspecto dos corpos de prova estampados	60

5.2.2.	Perfil de distribuição das deformações	61
5.2.3.	Deformações máximas nas adjacências do furo.....	63
5.2.4.	Trajectoria de deformação.....	68
5.2.5.	Diagrama Limite de Conformaçao	70
5.2.6.	Cálculo das deformações críticas a partir da capacidade de expansão de furo.....	73
5.2.7.	Considerações finais sobre o método.....	74
5.4.	Método do Duplo Dobramento	76
5.4.1.	Aspecto dos corpos de prova conformados.....	76
5.4.2.	Deformações máximas nas adjacências da borda com trinca.....	78
5.4.3.	Trajectoria de deformação.....	80
5.4.4.	Diagrama Limite de Conformaçao	80
5.4.5.	Considerações finais sobre o método.....	83
5.5.	Comparação entre os métodos.....	84
6.	CONCLUSÕES	87
7.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	91
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	92

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 3.1 – Aspecto típico da Curva Limite de Conformação.	20
FIGURA 3.2 – Regiões da CLC com e sem propensão à ocorrência de trincas, respectivamente, acima e abaixo da curva.	21
FIGURA 3.3 – Curva Limite de Conformação levantada a partir do método de Nakazima para um aço da classe <i>Interstitial Free</i> . São destacadas no gráfico as nuvens das máximas deformações suportadas até a ruptura do material em cada corpo de prova (1 a 8) (TEPEDINO et al., 2009).....	22
FIGURA 3.4 – Curva Limite de Conformação e a influência do valor r em termos de deformação limite para a ruptura (COL e JOUSSERAND, 2008).	23
FIGURA 3.5 – Influência da dimensão da malha na posição da Curva Limite de Conformação (CONFORMAÇÃO NA PRENSA, 1984).	23
FIGURA 3.6 – Comparação entre valores de CLC_0 calculados e experimentais para diferentes classes de aços avaliados por Bleck et al. (1998).	25
FIGURA 3.7 – Operações que caracterizam a conformabilidade de bordas. As formas básicas de flangeamento (A, B e C) e flangeamento combinado (D, E e F) (SMITH, 2010).	26
FIGURA 3.8 – (a) Aços avaliados. (b) Aspecto da coluna B estampada e detalhe da região com predominância de esforços de estiramento de borda dos aços (b) F (sem ruptura) e (c) G (com ruptura). Distribuição das deformações na região obtida em simulações computacionais para estes materiais: (e) aço F e (f) aço G (ISHIWATARI et al., 2012).	28
FIGURA 3.9 – Comparação dos resultados de capacidade de expansão de furo do modelo com os (a) resultados experimentais e (b) significância de cada variável avaliada (CHATTERJEE e BHADESHIA, 2007).	29
FIGURA 3.10 – Resultados da correlação entre λ experimental e λ previsto pelo modelo de redes neurais antes (a) e após (b) o seu refino. (c) e (d) Níveis de significância das variáveis avaliadas nos dois modelos (CHATTERJEE e BHADESHIA, 2007).	30
FIGURA 3.11 – (a) Tabela com as propriedades mecânicas dos aços avaliados e (b) resultados dos ensaios de expansão de furo (HASEGAWA et al., 2004).	31
FIGURA 3.12 – (a) Propriedades mecânicas, fração de constituintes e (b) comportamento em ensaio expansão de furo dos aços DP800 e CP800 (KARELOVA et al., 2007).	31
FIGURA 3.13 – Desenho esquemático mostrando as zonas características de uma borda de corte por puncionamento (MILOSEVIC e MOUSAY, 1987).	32
FIGURA 3.14 – Deformações e durezas resultantes em bordas de corte de aço laminado a frio (MILOSEVIC e MOUSAY, 1987).	33

FIGURA 3.15 – Efeito de modo de confecção de furo, eletroerosão, usinagem e puncionamento na capacidade de expansão de furo dos aços DP800 e CP800 (KARELOVA et al., 2007).	34
FIGURA 3.16 – Efeito de modo de confecção de furo, usinado, laser e puncionado com diferentes folgas de corte sobre a capacidade de expansão de furo de diversos aços de alta resistência (KONIECZNY e HENDERSON, 2007).	34
FIGURA 3.17 – Efeito da geometria do punção na capacidade de expansão de furo, para diferentes classes de aço (KONIECZNY e HENDERSON, 2007).	35
FIGURA 3.18 – Influência da folga de corte, raio do punção e do processo de confecção de furos na capacidade de expansão de furo do aço <i>Dual Phase</i> (MACKENSEN et al., 2009).	36
FIGURA 3.19 – Diferença do perfil de distribuição de deformação ao longo das bordas de (a) um corpo de prova submetido ao ensaio ECF e (b) de uma peça exposta a estiramento de flange (HIWATASHI e SAKUMA, 2000).....	37
FIGURA 3.20 – Trajetória de deformação obtida em peça durante simulação de esforços de estiramento de borda (adaptado de CHEN et al., 2003).	38
FIGURA 3.21 – Trajetória das deformações obtida no ensaio de expansão de furo do tipo KWI (COL e JOUSSERAND, 2008).....	39
FIGURA 3.22 – Distribuição das deformações ocorridas em região adjacente ao furo para aço TWIP. Na direção radial da amostra os modos de deformação variam desde estiramento até tração uniaxial (adaptado de CHEN et al., 2008).	39
FIGURA 3.23 – Representação esquemática do diagrama combinado da CLC com limites da ECF em função da qualidade de corte (adaptado de McEWAN et al., 2009).	40
FIGURA 3.24 – Variação na CLC devido à deformação ocorrida após operação de corte (adaptado de HELD et al., 2009).....	42
FIGURA 3.25 – Deformação de borda em função da pré-deformação de corte, para diferentes aços (adaptado de HELD et al., 2009).....	43
FIGURA 3.26 – (a) Parâmetros de formato da peça para avaliação do estiramento de flange: altura do flange (H), raio de curvatura (R) e ângulo de abertura da peça (θ) e (b) combinação dos valores de raio e ângulo das seis ferramentas testadas (NITTA et al., 2009).	43
FIGURA 3.27 – Regiões de falhas do material JSC780Y para as combinações entre a altura do flange e (a) o raio de curvatura da peça e (b) o ângulo de abertura da peça (adaptado de NITTA et al., 2009).	44
FIGURA 3.28 – Comparação das regiões de conformação para aços de diferentes limites de resistência (TS), dada a combinação de altura do flange e do raio de curvatura da peça (adaptado de NITTA et al., 2009).	45

FIGURA 4.1 – Aspecto típico da microestrutura dos materiais utilizados neste trabalho. Ampliação original: 500X.	47
FIGURA 4.2 – Aspecto das Curvas Limite de Conformação dos aços utilizados neste trabalho.	48
FIGURA 4.3 – Aspecto típico da superfície de corte gerada pelos processos de fabricação utilizados neste trabalho.	50
FIGURA 4.4 – Desenho ilustrativo do ferramental a ser utilizado nos ensaios de estampagem do método da Malha Circular.	52
FIGURA 4.5 – Aspecto típico do corpo de prova utilizado nesta metodologia (a) antes e (b) após a impressão da malha empregada para a medição das deformações na região da borda do furo expandido.	53
FIGURA 4.6 – Comprimentos das linhas dos elementos da malha de referência. ..	54
FIGURA 4.7 – Geometria dos corpos de prova (a) antes e (b) após o primeiro dobramento.	56
FIGURA 4.8 – Dispositivo utilizado nos ensaios de duplo dobramento.	57
FIGURA 5.1 – Capacidade de expansão de furo dos aços IF e DP600, medida a partir de Ensaio KWI, para as diferentes qualidades de borda de corte.	58
FIGURA 5.2 – Orientação das marcas deixadas pelos processos de fabricação (usinagem e laser) nas bordas de corte trabalhadas (Cinotti et al., 2000).	59
FIGURA 5.3 – Aspecto típico de corpos de prova estampados de acordo com a metodologia proposta e detalhe das trincas observadas. As setas claras indicam, nestes exemplos, os locais de ocorrência de trincas e estrição localizada. As setas escuras tracejadas indicam à direção de laminação das amostras.	61
FIGURA 5.4 – Perfis típicos de distribuição das deformações ao longo do perímetro de furos expandidos dos aços IF e DP600.	63
FIGURA 5.5 – Deformações críticas obtidas na região de trincas e adjacente a elas nas bordas de furo circular expandido a partir de corpos de prova fabricados com aço IF.	64
FIGURA 5.6 – Deformações críticas obtidas na região de trincas e adjacente a elas nas bordas de furo circular expandido a partir de corpos de prova fabricados com aço DP600.	65
FIGURA 5.7 – Deformações médias obtidas para o aço IF plotadas no gráfico $\epsilon_1 \times \epsilon_2$	67
FIGURA 5.8 – Deformações médias obtidas para o aço DP600 plotadas no gráfico $\epsilon_1 \times \epsilon_2$	67

FIGURA 5.9 – Trajetórias de deformações obtidas na região de bordas de furos submetidos aos ensaios físicos, simulação numérica e prevista para ensaios de tração em função do valor r dos materiais.	69
FIGURA 5.10 – Deformações críticas, individuais e médias, obtidas na região de trincas (marcadores vazios) e adjacente a elas (marcadores cheios) nas bordas de furo circular expandido a partir de corpos de prova fabricados com aço IF.....	71
FIGURA 5.11 – Deformações críticas, individuais e médias, obtidas na região de trincas (marcadores vazios) e adjacente a elas (marcadores cheios) nas bordas de furo circular expandido a partir de corpos de prova fabricados com aço DP600.	72
FIGURA 5.12 – Curvas Limite de Conformação original (linha cheia) e a deslocada verticalmente – CLC modificada (linha pontilhada) até a deformação média obtida na fratura, a partir dos ensaios do aço DP600 avaliado.	73
FIGURA 5.13 – Relação entre a deformação média máxima obtida na região de fratura dos corpos de prova e a sua capacidade de expansão de furo, determinada a partir do ensaio KWI.	74
FIGURA 5.14 – Aspecto geral e detalhe do flange dos corpos de prova após o segundo dobramento do aço DP600 avaliado.	77
FIGURA 5.15 – Exemplos do aspecto típico do encurvamento da borda do flange observado durante o ensaio do segundo dobramento. Este comportamento foi observado no aço IF em todas as condições de acabamento de borda e na borda usinada do aço DP600.....	78
FIGURA 5.16 – Deformações máximas obtidas na região de fratura dos corpos de prova do aço DP600 submetidos aos ensaios de dobramento.....	79
FIGURA 5.17 – Deformações médias obtidas em região de trinca de bordas confeccionadas por laser e a partir de esforços de cisalhamento.	79
FIGURA 5.18 – Trajetórias deformações obtidos no ensaio de duplo dobramento e em ensaio de tração do aço DP600 avaliado.	80
FIGURA 5.19 – Diagrama limite de conformação das regiões de trincas dos corpos de prova fabricados a partir do aço DP600 avaliado, submetidos aos ensaios de dobramento até a ocorrência de ruptura.	81
FIGURA 5.20 – Curvas Limite de Conformação original (linha cheia) e a deslocada verticalmente (linha pontilhada) até a deformação média obtida na região de trincas, a partir dos ensaios do aço DP600 avaliado.	82
FIGURA 5.21 – Trajetórias deformações obtidos nos ensaios da Malha Circular, do duplo dobramento e o previsto no ensaio de tração do aço DP600 em bordas puncionadas/cisalhadas.....	84
FIGURA 5.22 – Curvas Limite de Conformação do aço DP600, obtidas a partir da técnica de Nakazima (original) e as modificadas a partir dos resultados dos Métodos da Malha Circular e do Duplo Dobramento.....	85

LISTA DE TABELAS

TABELA IV.1 – Composição química dos aços utilizados (% em peso).....	46
TABELA IV.2 – Propriedades mecânicas dos aços utilizados.....	46
TABELA V.1 – Capacidade de expansão de furo em corpo de prova com e sem a aplicação da malha pelo método da micropercussão.....	60
TABELA V.2 – Deformações máximas (valores médios) obtidas a partir dos ensaios realizados no aço IF avaliado.	66
TABELA V.3 – Deformações máximas (valores médios) obtidas a partir dos ensaios realizados no aço DP600 avaliado.....	67
TABELA V.4 – Deformações máximas (valores médios) obtidas a partir dos ensaios realizados no aço DP avaliado.....	79

LISTA DE NOTAÇÕES

CTU	Centro de Tecnologia Usiminas
CLC	Curva Limite de Conformação
ECF	Expansão cônica de furo
KWI	<i>Kaiser Wilhelm Institut</i>
ε_1	Maior deformação verdadeira no plano da chapa
ε_2	Menor deformação verdadeira no plano da chapa
ε_3	Deformação verdadeira na espessura da chapa
AHSS	<i>Advanced High Strength Steels</i>
IF	<i>Interstitial Free</i>
DP	<i>Dual Phase</i>
DP600	Aço <i>Dual Phase</i> de 600 MPa de limite de resistência mínimo
CP	<i>Complex Phase</i>
TRIP	<i>Transformation Induced Plasticity</i>
TWIP	<i>Twinning-Induced Plasticity</i>
JFS	Japan Iron and Steel Federation Standard
ISO	International Standard Organization
λ	Capacidade de expansão de furo
ZAC	Zona Afetada pelo Corte
HV	Unidade de dureza Vickers
LE	Limite de escoamento
LR	Limite de resistência
Al_u	Alongamento uniforme
Al_t	Alongamento total
n	Expoente de encruamento
r	Coeficiente de anisotropia ou coeficiente de Lankford
\bar{r}	Coeficiente de anisotropia normal
d_f	Diâmetro final do furo expandido
d_o	Diâmetro inicial do furo a ser expandido
ASAME	<i>Automated Strain Analysis and Measurement Environment</i>
EEF-PC	Estampagem Extra Profunda – Peça Crítica
C	Carbono
Mn	Manganês
Si	Silício

P	Fósforo
S	Enxofre
Al	Alumínio
Nb	Nióbio
Ti	Titânio
Mo	Molibdênio

RESUMO

Diversos autores têm investigado a limitação da Curva Limite de Conformação (CLC) para a previsão de rupturas que ocorrem em bordas de peças estampadas a partir de Aços Avançados de Alta Resistência, notadamente dos aços *Dual Phase*. Essa limitação advém do encruamento e dos defeitos gerados na borda durante a operação de corte por cisalhamento, que diminuem a ductilidade do material nessa região, fazendo com que fraturas prematuras possam ocorrer neste local. Uma forma de avaliação da capacidade de deformação de bordas é o ensaio de expansão de furo. No entanto, a maior preocupação neste ensaio é com a porcentagem máxima de expansão do furo, não fazendo menção às deformações máximas da região adjacente ao furo. Este trabalho teve por objetivo desenvolver um método experimental para a previsão de falhas em flanges de peças estampadas. Duas metodologias de ensaio foram avaliadas, denominadas Métodos da Malha Circular e Duplo Dobramento. Foram quantificadas as máximas deformações suportadas por bordas submetidas a esforços de estiramento, em dois tipos de aços, IF e DP600. As duas técnicas avaliadas apresentaram resultados distintos em termos de deformações limite. Em ambas, a CLC não foi capaz de prever o surgimento de ruptura em bordas puncionadas e estiradas do aço DP600. A partir dos resultados obtidos, foi proposta a utilização de uma CLC modificada, deslocada em relação à CLC original.

Palavras-chave: Ruptura em borda, metodologia experimental, Curva Limite de Conformação, expansão de furo, aços avançados de alta resistência.

ABSTRACT

Several authors have studied the Forming Limit Curve limitation for predicting failures on the flanges of Advanced High Strength Steels stamped parts, mainly in the Dual Phase steels. This limitation comes from the work hardening and the edge defects generated during the cutting operation which decreases the material's ductility in this region, causing premature fractures. The hole expansion test is used to evaluating the ability of deformed edges. However, the major concern with this test is the maximum percentage expansion of the hole, not considering the maximum strains in the region adjacent to it. This study aimed to develop an experimental method for predicting edge fracture on stamped parts. Two test methodologies were evaluated, called Circular Mesh and Double Bending Methods. The maximum strain supported by edge during stretching efforts were quantified for two different steels, IF and DP600. The techniques showed different strain limits. In both, the FLC could not predict the edge punching and stretching failure for the DP600 steel. From the results obtained, it was proposed to use a modified FLC, offset from the original FLC.

Keywords: *Edge failure, experimental methodology, Forming Limit Curve, hole expansion, advanced high strength steels.*

1. INTRODUÇÃO

O conceito de Curva Limite de Conformação (CLC) foi introduzido na década de 60 a partir de estudos realizados por Keeler (1965) e por Goodwin (1968). O primeiro limitou o seu trabalho à região de estiramento da curva, enquanto Goodwin, seguindo o trabalho de Keeler, determinou as deformações principais no campo no qual uma dessas deformações era negativa, aproximando-se mais do modo de deformação por embutimento ou tração uniaxial. A CLC é uma ferramenta empregada na caracterização de aços para estampagem, destinados principalmente à indústria automotiva. Ela indica as deformações que provocam a ruptura de um dado material submetido a uma operação de estampagem e, sendo um critério de falha, é amplamente utilizada no desenvolvimento de ferramentas empregadas na confecção de peças estampadas.

Diversos estudos (HELD et al., 2009; MACKENSEN et al., 2009; McEWAN et al., 2009; NITTA et al., 2009) identificaram, contudo, que a aplicação da CLC tem limitações. Ela seria incapaz, por exemplo, de prever a ocorrência de fraturas em bordas de *blanks* submetidas a deformações típicas de estiramento. Neste modo de estampagem, a peça romperia de forma precoce, atingindo deformações na região de falha menores do que a capacidade máxima prevista pela CLC. A principal razão para esse fenômeno é que em processos industriais a fabricação de *blanks* é normalmente realizada por processo de corte por cisalhamento. Esta operação reduz a ductilidade das bordas do material, o que significa que a estampabilidade nesta região torna-se menor do que a do metal base. Este comportamento tem sido observado com frequência nos aços AHSS (*Advanced High Strength Steels*), cuja capacidade de deformação de bordas é mais sensível ao processo de corte do que os aços convencionais (CHEN et al., 2003; MACKENSEN et al., 2009; McEWAN et al., 2009; SHI et al., 2003).

Ensaio de expansão de furo circular, como os ensaios ECF (Expansão Cônica de Furo) e o KWI (desenvolvido pelo *Kaiser Wilhelm Institut*), têm sido utilizados como uma alternativa para a caracterização da conformabilidade de aços quando expostos a estiramento de bordas. Os resultados obtidos no ensaio ECF já estão sendo, inclusive, requisitados por algumas montadoras em especificações de materiais, notadamente dos aços de mais alta resistência mecânica, utilizados em componentes cuja estampagem requer esforços de estiramento de borda. Entretanto, os resultados

obtidos nestes ensaios não são usados como informações de entrada nas simulações numéricas de estampagem, que se limitam ao uso das propriedades mecânicas em tração para descrever o comportamento da chapa durante a estampagem, e da CLC como critério de falha do material quando deformado.

Baseado nesse cenário, o presente estudo teve por objetivo desenvolver, a partir de ensaios experimentais, uma metodologia para a previsão de deformações no momento da ruptura em região de bordas de flanges e de furos submetidas a esforços de estiramento. Estas deformações poderão ser utilizadas como referência para a identificação de falha do material em simulações computacionais, em etapa de desenvolvimento de ferramentas para a confecção de peças onde há esforços de estiramento de flange. Desta forma, acredita-se que os resultados das simulações poderão se tornar mais confiáveis, assim como as geometrias finais das ferramentas delas derivadas. Espera-se reduzir o tempo de retrabalhos feitos na etapa de *tryout* de novas ferramentas, bem como o risco de ruptura de peças quando em rotina normal de produção.

2. OBJETIVO

2.1. Geral

Desenvolver um método experimental para a previsão de rupturas em bordas de peças submetidas a esforços de estiramento durante estampagem, utilizando como critério de fratura as máximas deformações suportadas pelo material.

2.2. Específico

- Avaliar a aplicabilidade da Curva Limite de Conformação na previsão de rupturas em bordas estiradas.
- Avaliar o efeito da qualidade da superfície de corte nas deformações de bordas estiradas até a ruptura.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Curva Limite de Conformação

Para determinar a quantidade máxima de deformação suportada por uma chapa durante a estampagem, é preciso dispor de um critério baseado no limite tolerado pelo material quando submetido aos vários modos de deformação gerados no decorrer do processo. Este critério é fornecido pela Curva Limite de Conformação (CLC), cujo aspecto típico é mostrado na figura 3.1. Trata-se de uma ferramenta que tem sido extensivamente aplicada para a avaliação comparativa do desempenho de materiais utilizados principalmente em componentes automotivos, na análise das causas de falhas durante a fabricação de peças estampadas e também como critério de falha em simulações computacionais do processo de estampagem.

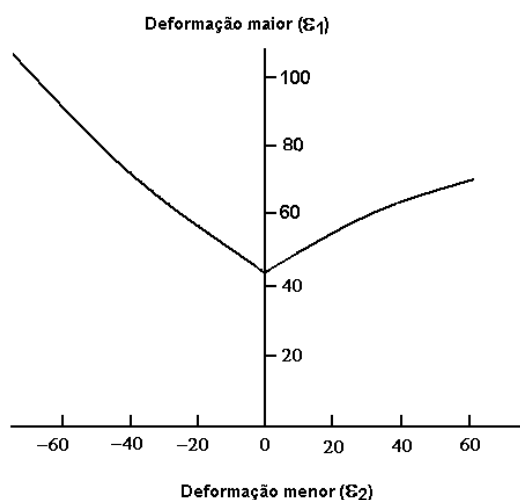


FIGURA 3.1 – Aspecto típico da Curva Limite de Conformação.

A interpretação da CLC é direta. Para produzir uma peça sem rupturas, todas as combinações de deformações ϵ_1 e ϵ_2 na superfície da chapa conformada precisam estar na região de segurança do gráfico, isto é, abaixo da curva. Os pontos acima da CLC expressam deformações que levam à falha do material, figura 3.2. Nessas circunstâncias, existe a necessidade de mudança nas condições de estampagem, como, por exemplo, alteração nas condições de lubrificação, na geometria do ferramental, no formato e tamanho dos *blanks* ou mesmo na matéria prima utilizada.

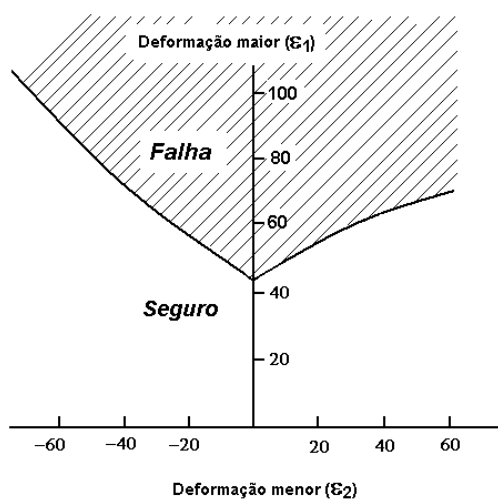


FIGURA 3.2 – Regiões da CLC com e sem propensão à ocorrência de trincas, respectivamente, acima e abaixo da curva.

3.1.1. Métodos experimentais para levantamento da CLC

A CLC pode ser levantada experimentalmente por diversas metodologias. Dentre elas, a mais conhecida e utilizada é a técnica de Nakazima (1968). Neste método, corpos de prova de diferentes formatos são deformados até a estricção ou ruptura, a partir de um punção circular de nariz hemisférico. As deformações críticas, que são posteriormente utilizadas como referência para o levantamento da CLC, são medidas junto às fraturas dos corpos de prova. Caso se utilizem recursos específicos, elas podem ser determinadas no início da estricção dos corpos de prova, ou seja, antes do desenvolvimento da fratura.

Na figura 3.3 é mostrado um exemplo de uma CLC de um aço de alta conformabilidade, determinada a partir de pares de deformações obtidas de oito diferentes geometrias de corpos de prova submetidas ao ensaio de Nakazima.

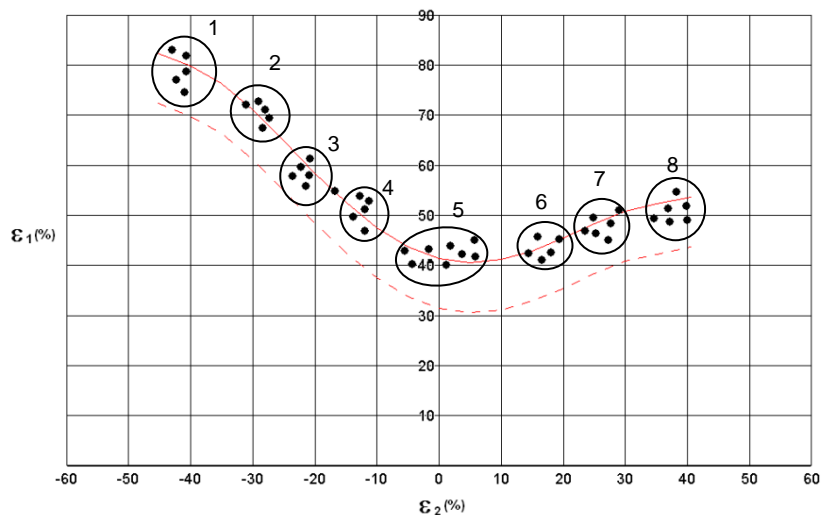


FIGURA 3.3 – Curva Limite de Conformação levantada a partir do método de Nakazima para um aço da classe *Interstitial Free*. São destacadas no gráfico as nuvens das máximas deformações suportadas até a ruptura do material em cada corpo de prova (1 a 8) (TEPEDINO et al., 2009).

A *International Organization for Standardization*, publicou uma norma técnica, a ISO 12004-2 (2008), com recomendações para o levantamento da CLC. Dentre os preceitos da norma, destacam-se recomendações da geometria dos corpos de prova, a utilização de filmes lubrificantes durante os ensaios, a utilização de equipamentos de medição e o método para avaliação das deformações.

3.1.2. Parâmetros que afetam a CLC

A posição e formato da CLC podem ser afetados por diferentes parâmetros, entre os quais se destacam: as propriedades mecânicas e a espessura do material ensaiado, o atrito entre os corpos de prova e as ferramentas de estampagem, o formato e a geometria dos ferramentais de estampagem utilizados, o formato e as dimensões da malha impressa sobre a superfície dos corpos de prova, utilizada como referência para medição das deformações. Em geral, maiores valores de deformações limites são obtidos quando se aumenta a espessura, o valor n e o valor r do material, ou quando se diminui o atrito entre o punção e o corpo de prova.

A influência do valor r do material na trajetória de deformação foi estudada por Col e Jousserand (2008), que obtiveram resultados mostrados esquematicamente na figura 3.4. Quando o valor r aumenta, há uma tendência de se obter deformações mais elevadas, posicionadas mais à esquerda da CLC.

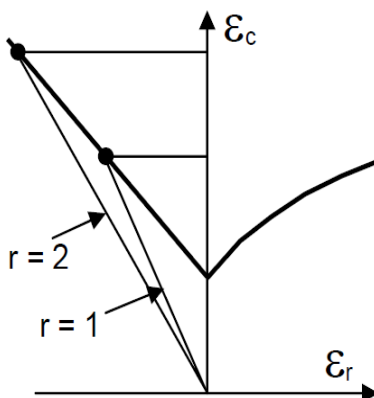


FIGURA 3.4 – Curva Limite de Conformação e a influência do valor r em termos de deformação limite para a ruptura (COL e JOUSSERAND, 2008).

As dimensões das células da malha, seja formada por quadrados ou círculos, também podem influenciar a altura da CLC: quanto menor o tamanho das células, maior a deformação medida e, portanto, maior a área abaixo da CLC (CONFORMAÇÃO NA PRENSA, 1984). Na figura 3.5 tal comportamento é mostrado em avaliações realizadas variando o diâmetro dos círculos que compunham a malha.

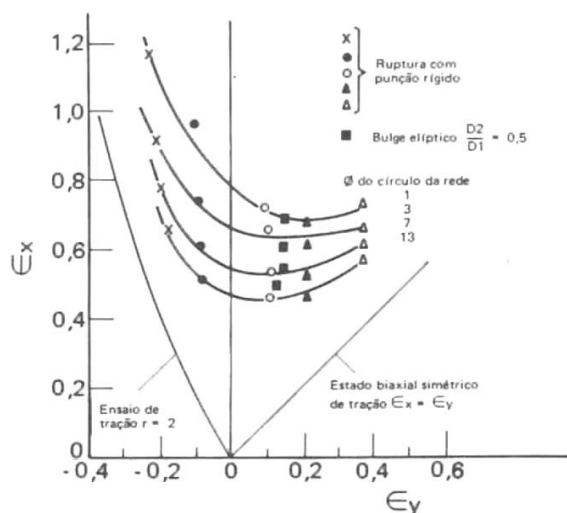


FIGURA 3.5 – Influência da dimensão da malha na posição da Curva Limite de Conformação (CONFORMAÇÃO NA PRENSA, 1984).

3.1.3. Aplicações da CLC

De acordo com Keeler (2003), a Curva Limite de Conformação pode ser aplicada nas seguintes situações:

- levantamento de dados para desenvolvimento de ferramentais de estampagem;
- avaliação de projetos de peças;
- monitoramento do processo de estampagem;
- como critério de falha em simulações que utilizam o método de elementos finitos;
- como limites em cartas de controle de severidade de estampagem;
- como ferramenta de solução de problemas de estampagem.

3.1.4. Limitações da CLC

Uma das limitações da CLC é a dificuldade de sua obtenção a partir de modelos numéricos. Bleck et al. (1998) propuseram diferentes modelos computacionais para a confecção virtual da CLC. Eles concluíram que nenhum dos modelos estudados (Hill-Swift, NADDRG e Hill-Swift Modificado) resultou em boa confiabilidade desta previsão, por não descreverem adequadamente o formato da curva e não permitirem a determinação precisa do valor CLC_0 (deformação limite no estado plano de deformação, o qual normalmente expressa a menor deformação encontrada na CLC). Na figura 3.6 é feita uma comparação entre os resultados experimentais e teóricos obtidos para o valor de CLC_0 dos aços avaliados pelos autores.

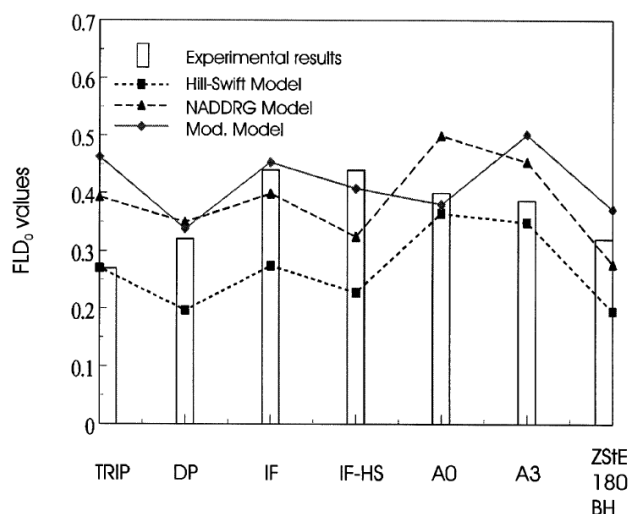


FIGURA 3.6 – Comparação entre valores de CLC_0 calculados e experimentais para diferentes classes de aços avaliados por Bleck et al. (1998).

A aplicação das CLCs também vem sendo questionada, uma vez que elas não conseguem prever rupturas, principalmente nos aços avançados de alta resistência, durante condições de dobramento sob estiramento, conforme mostrado em trabalhos de Sadagopan et al. (2003) e Wu (2006), e em bordas estiradas, assunto estudado por diversos autores (CHEN et al., 2003; HELD et al., 2009; MACKENSEN et al., 2009; McEWAN, 2009; NITTA et al., 2009; SHI et al. 2007) e tema deste trabalho. Em ambos os modos de estampagem, as deformações na região de ruptura tendem a ficar abaixo do limite definido pela CLC.

3.2. Conformabilidade de bordas

As bordas de uma peça estampada podem ser dispostas em diferentes geometrias, com a finalidade de enrijecer o flange formado quando se realiza uma operação de dobramento em linha reta ou curva. Na figura 3.7 são mostradas diferentes operações de flangeamento que afetam a borda de uma peça estampada. Basicamente, são três formas de flangeamento: em linha reta (A), flangeamento côncavo (B) e convexo (C). As outras formas (D, E e F) são combinações destas anteriormente descritas.

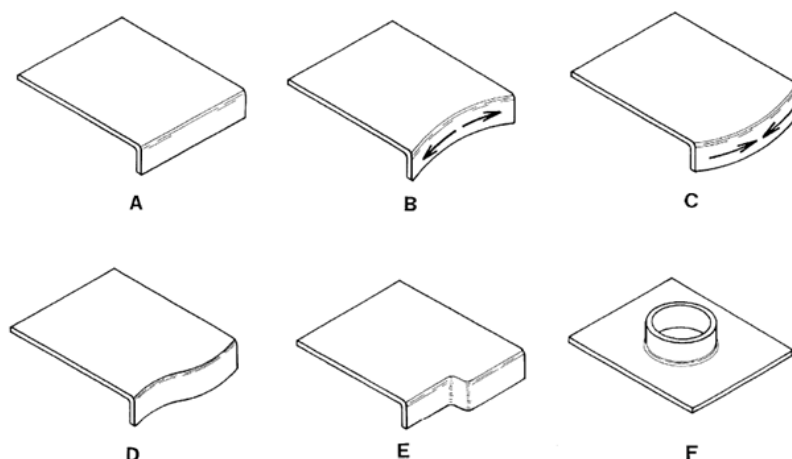


FIGURA 3.7 – Operações que caracterizam a conformabilidade de bordas. As formas básicas de flangeamento (A, B e C) e flangeamento combinado (D, E e F) (SMITH, 2010).

Operações de flangeamento côncavo resultam em estiramento do material, enquanto no flangeamento convexo há encurtamento da borda do material. Para ambos os casos, o gradiente de deformações é tal que seus valores máximos estão na borda da peça, e seus valores mínimos estão no raio de dobramento (SMITH, 2010).

As operações de flangeamento côncavo, por serem frequentes em processos de estampagem e críticas devido à possibilidade de ocorrência de trincas, levaram à criação de ensaios para avaliação da conformabilidade desta região, conhecidos como ensaios de expansão de furo.

3.2.1. Ensaios de expansão de furo

Os ensaios de expansão de furo são os mais utilizados para caracterizar e avaliar o comportamento de chapas quando solicitadas por operações de flangeamento côncavo. As configurações de ensaios mais comuns são: o ensaio KWI, desenvolvido no *Kaiser Wilhelm Institut* (COL e JOUSSERAND, 2009 apud SIEBEL e POMP, 1929), e a expansão cônica de furo (ECF), especificado por uma norma japonesa (JFS T1001, 1996) e pela ISO (ISO 16630, 2003).

Ambos os ensaios consistem em submeter uma chapa plana dotada de um furo circular à penetração de um punção, de nariz cônico, no caso do ensaio ECF, e de cabeça chata, no caso do ensaio KWI. Com o avanço do punção sobre a chapa, a deformação se concentra no furo, que se expande continuamente até o início da ocorrência de trincas a partir da sua borda. Quando a ruptura ocorre e se torna visível

a olho nu, o ensaio é interrompido. A capacidade limite em expansão de furo, normalmente representada pela letra grega λ , é então medida a partir da relação entre os diâmetros final e original do furo.

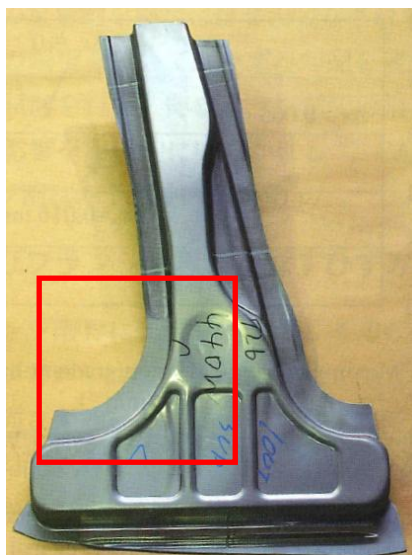
3.2.2. Capacidade de expansão de furo e o desempenho em esforços de estiramento de borda em peça estampada

Em função da equivalência no modo de deformação, a previsão do comportamento de um material em esforços de estiramento de borda durante estampagem de uma peça pode ser feita em laboratório a partir de ensaios de expansão de furo. Ishiwatari et al. (2012) utilizaram dois aços de limite de resistência similar (figura 3.8a) para demonstrar a influência da capacidade de expansão de furo do material na estampagem de uma peça em que há esforços de estiramento de borda. Na figura 3.8b é mostrado o aspecto geral da peça final estampada (base da coluna B de um veículo). Nota-se que a peça estampada com o aço F, que possui maior capacidade de expansão de furo, não apresentou ruptura nesta região (figura 3.8c), ao passo que para o aço G, com menor valor de λ , a ruptura ocorreu (figura 3.8d). Os autores também destacaram a limitação da CLC em prever a ruptura nesta região durante a simulação computacional desses dois materiais. Conforme mostrado na figura 3.8e e figura 3.8f, as simulações de estampagem da peça utilizando os aços foram similares e não reproduziram a ocorrência da ruptura observada na prática no aço G.

Torna-se evidente, portanto, que assim como as propriedades mecânicas em tração, a capacidade de deformação da borda, tem grande importância no projeto de um ferramental de estampagem e na seleção do material da peça.

Aço	LE (MPa)	LR (MPa)	Al _t (%)	λ (%)
F	437	624	34,1	92
G	398	640	32,3	68

(a)



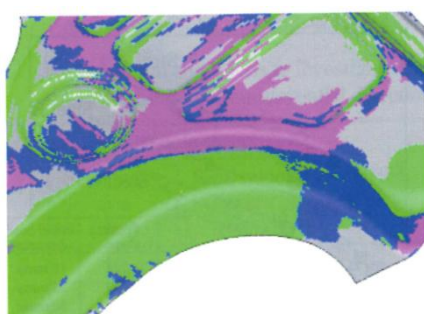
(b)



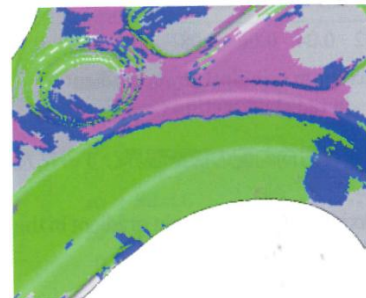
(c)



(d)



(e)



(f)



FIGURA 3.8 – (a) Propriedades mecânicas e capacidade de expansão de furo dos aços avaliados. (b) Aspecto da coluna B estampada e detalhe da região com predominância de esforços de estiramento de borda dos aços (c) F (sem ruptura) e (d) G (com ruptura). Distribuição das deformações na região obtida em simulações computacionais para estes materiais: (e) aço F e (f) aço G (ISHIWATARI et al., 2012).

3.2.3. Parâmetros que influenciam a capacidade de conformação em bordas

As propriedades mecânicas obtidas por ensaio de tração podem ser exploradas e utilizadas para indicar a conformabilidade de flanges. Foi o que fizeram Chatterjee e Bhadeshia (2007) ao desenvolver um modelo de redes neurais para prever a capacidade de expansão de furo de aços multifásicos. Para isso foram utilizados como parâmetros de entrada da rede, as propriedades mecânicas, limite de escoamento (LE), limite de resistência (LR), alongamento uniforme (Al_u), alongamento total (Al_t), razão elástica (LE/LR) e os produtos LR x Al_t e LR x Al_u . Os autores concluíram que o limite de resistência do material é a propriedade que melhor se correlaciona com a capacidade de expansão de furo, após avaliarem a significância de cada um dos fatores avaliados, conforme mostrado na figura 3.9.

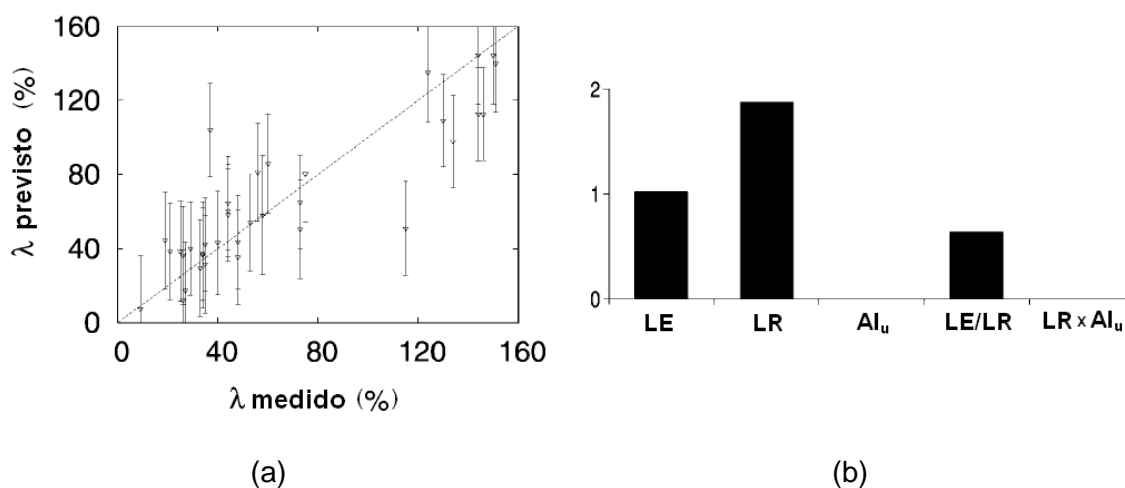


FIGURA 3.9 – Comparação dos resultados de capacidade de expansão de furo do modelo com os (a) resultados experimentais e (b) significância de cada variável avaliada (CHATTERJEE e BHADESHIA, 2007).

Posteriormente, os autores confirmaram a importância do limite de resistência, ao refinar o modelo de rede neural para a qual foram utilizados apenas os parâmetros de entrada LR e o produto LR x Al_t . A modificação do modelo reduziu a incerteza e reafirmou a maior significância do LR, como pode ser observado na figura 3.10.

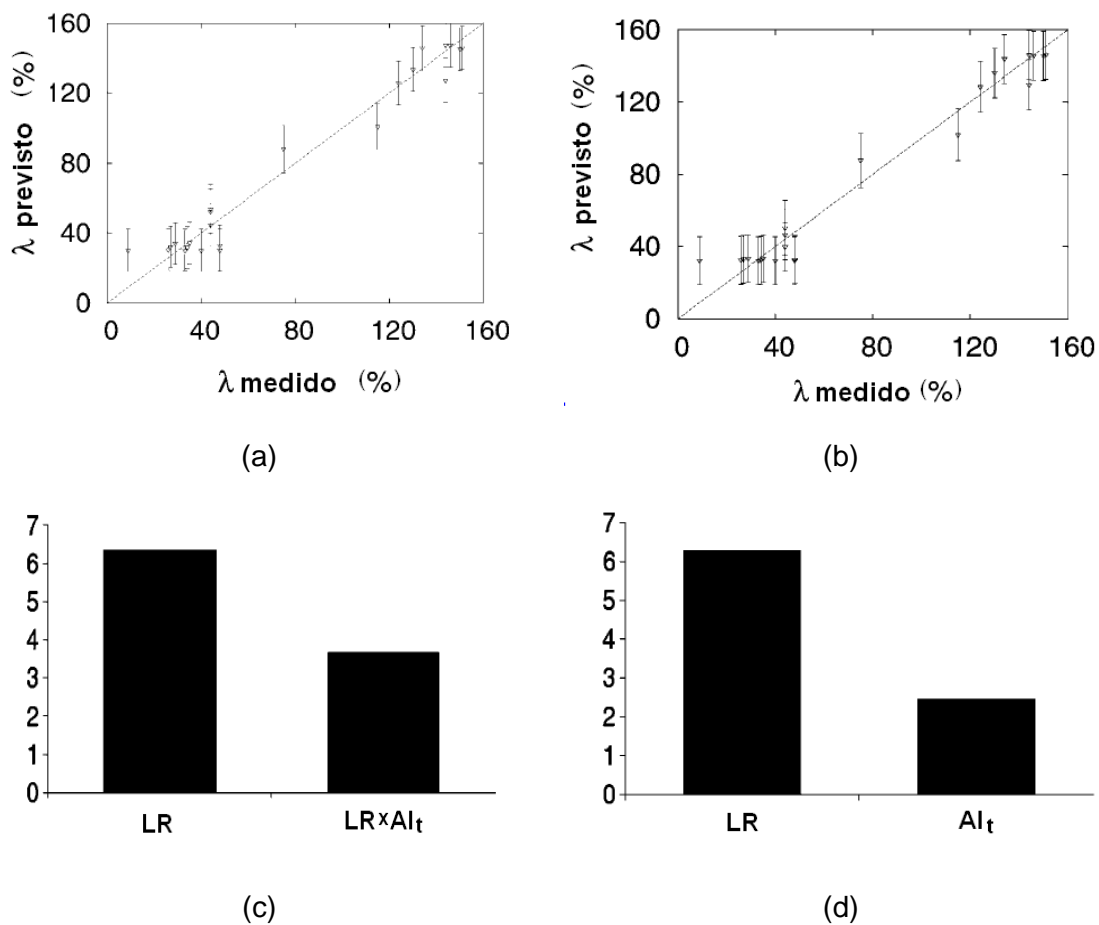


FIGURA 3.10 – Resultados da correlação entre λ experimental e λ previsto pelo modelo de redes neurais antes (a) e após (b) o seu refino. (c) e (d) Níveis de significância das variáveis avaliadas nos dois modelos (CHATTERJEE e BHADSHIA, 2007).

Hasegawa et al. (2004) analisaram o comportamento de aços de ultra-alta resistência mecânica (acima de 980 MPa) em ensaios de expansão de furo. Eles observaram, dentre os aços avaliados (aços A e B, *Dual Phase*, e Aço C, martensítico), que o aço o com maior limite de resistência, apesar do menor valor de alongamento, foi o que apresentou a maior capacidade de expansão de furo, conforme mostrado na figura 3.11.

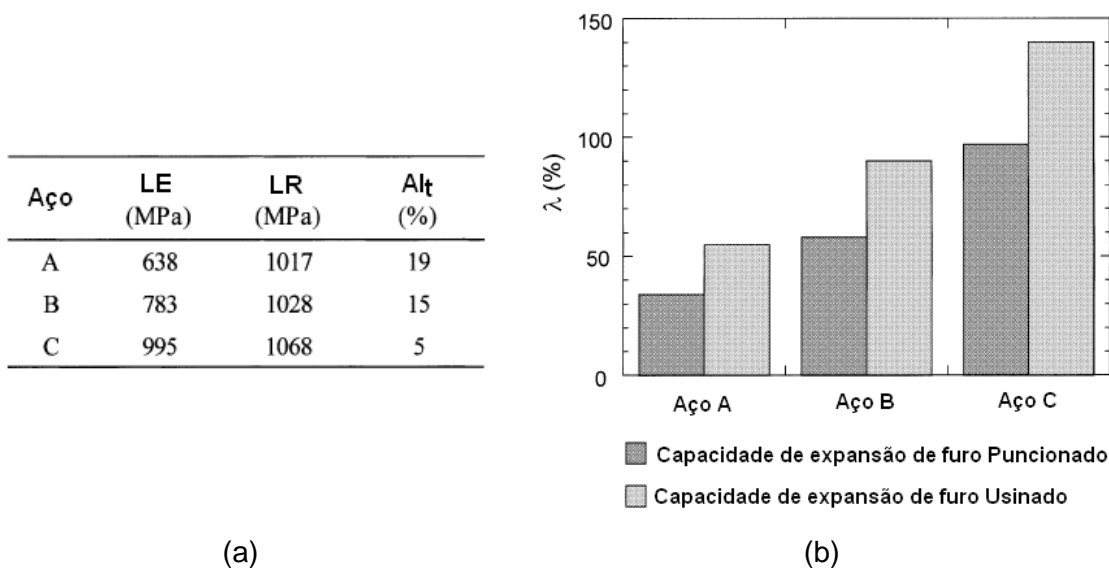


FIGURA 3.11 – (a) Tabela com as propriedades mecânicas dos aços avaliados e (b) resultados dos ensaios de expansão de furo (HASEGAWA et al., 2004).

Em estudo de Karelova et al. (2007), dois aços AHSS de mesmo grau de resistência (800 MPa), *Dual Phase* (DP800) e *Complex Phase* (CP800), foram avaliados quanto à capacidade de expansão de furo. O aço CP800 apresentou maior capacidade de expansão de furos, apesar de apresentar limite de resistência (LR) similar e menor alongamento total (Al_t) do que o aço DP800 (figura 3.12).

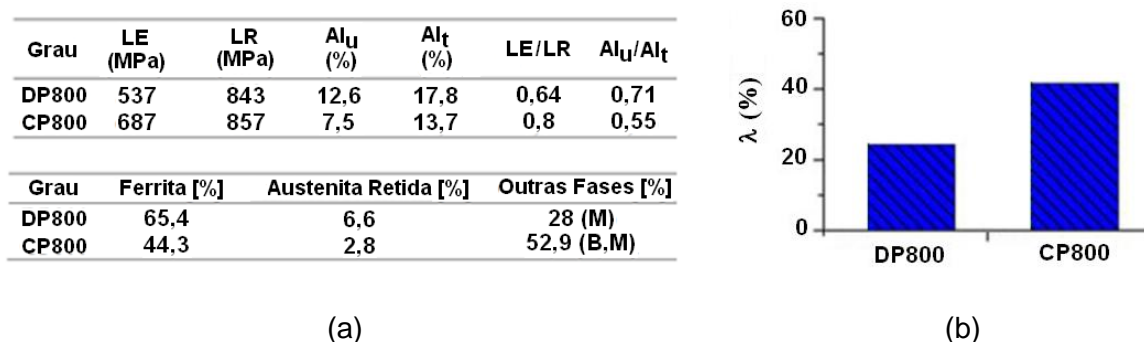


FIGURA 3.12 – (a) Propriedades mecânicas, fração de constituintes e (b) comportamento em ensaio expansão de furo dos aços DP800 e CP800 (KARELOVA et al., 2007).

Em ambos os estudos citados, os autores comentam que a fração volumétrica e, principalmente, o tipo dos microconstituintes afetam significativamente a capacidade

de expansão de furo. Os autores atribuem o pior desempenho dos aços *Dual Phase*, comparados aos aços martensítico e ao *Complex Phase*, a maior diferença de dureza entre os seus constituintes, martensita e ferrita, o que leva à concentração das deformações na ferrita e ao aparecimento de microtrincas na interface da ferrita com a martensita. De acordo Karellova et al., o aço CP800 avaliado apresentou um maior volume de bainita, quando comparado ao aço DP. Assim, a microestrutura do aço CP800 teve sua resistência mecânica mais homogênea devido ao menor contraste na dureza dos constituintes bainita, ferrita e martensita, o que levou a uma distribuição uniforme das deformações e a maior capacidade de expansão de furo. O mesmo raciocínio foi utilizado por Hasegawa et al., que atribuíram à fase única martensita, ao melhor desempenho deste aço.

Outro fator que influi na capacidade de expansão de furo é a qualidade da borda do furo (HASEGAWA et al., 2004; KARELOVA et al., 2007; KONIECZNY e HENDERSON, 2007; STRIJOS e BOESENKOOL, 1996), que pode ser confeccionado através de diferentes operações (puncionamento/cisalhamento, usinagem, a laser, eletroerosão). Para cada operação, obtém-se um acabamento final de borda que é um fator crítico durante a solicitação mecânica. Uma operação de corte por puncionamento, por exemplo, resulta em uma borda de corte caracterizada por três zonas características e pela presença de rebarba, conforme mostrado no desenho esquemático da figura 3.13. A extensão de cada uma dessas regiões varia de acordo com as condições de puncionamento e as propriedades mecânicas do material (MILOSEVIC e MOUSAY, 1987).

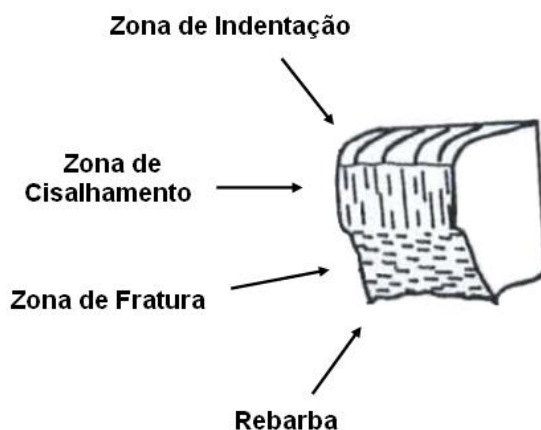


FIGURA 3.13 – Desenho esquemático mostrando as zonas características de uma borda de corte por puncionamento (MILOSEVIC e MOUSAY, 1987).

A deformação gerada devido a uma operação de corte por puncionamento resulta em um gradiente de encruamento, traduzido em gradientes de deformação e de dureza. Na figura 3.14 é apresentado um caso particular das regiões adjacentes à borda de corte, para um aço laminado a frio. A região de maior dureza, A, ocorre entre as zonas de cisalhamento e de fratura, e à medida que se distancia da borda de corte, a dureza e a deformação têm seus valores reduzidos.

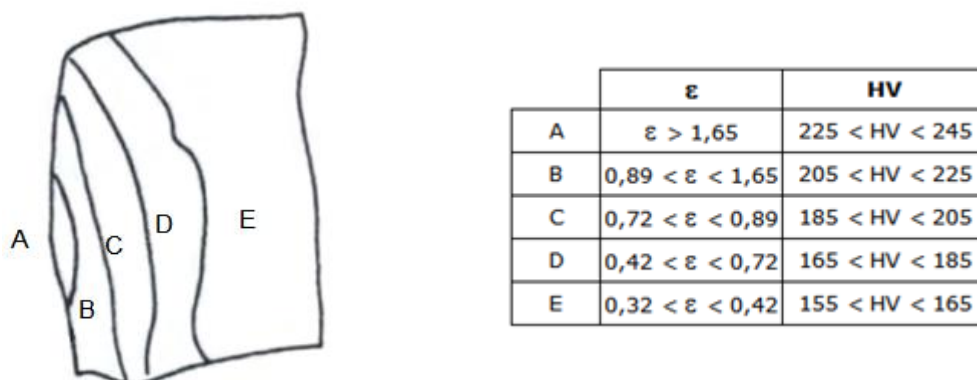


FIGURA 3.14 – Deformações e durezas resultantes em bordas de corte de aço laminado a frio (MILOSEVIC e MOUSAY, 1987).

Para as diferentes condições de confecção de furos são obtidos diferentes valores de λ (HASEGAWA et al., 2004; KARELOVA et al., 2007; MACKENSEN et al., 2009; TEPEDINO et al., 2010). Hasegawa et al. (2004) mostraram que amostras com furos usinados apresentaram capacidade de expansão mais elevada do que com furos puncionados, conforme ilustrado na figura 3.11(b) para diferentes aços.

Karellova et al. (2007) também avaliaram a influência da condição de corte na capacidade de expansão de furo. Para os aços DP800 e CP800 estudados, conforme mostrado na figura 3.15, o valor de λ foi influenciado pelo tipo de corte, tendo sido encontrado o seguinte desempenho, na ordem do melhor para o pior: furos obtidos via eletroerosão, usinagem e puncionamento. Segundo os autores, os furos puncionados são os mais críticos porque a deformação na borda de corte é maior e mais severa do que as deformações resultantes de operações de usinagem e de eletroerosão.

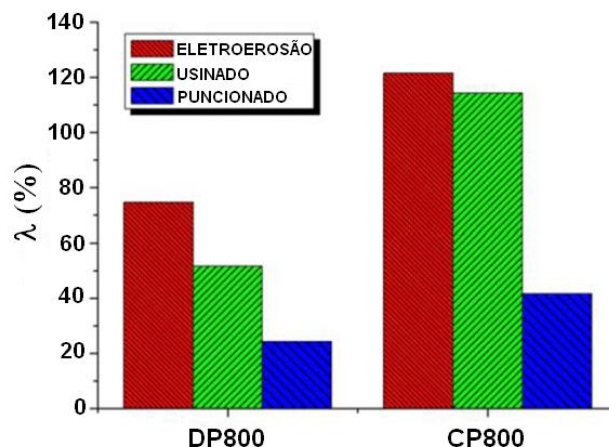


FIGURA 3.15 – Efeito de modo de confecção de furo, eletroerosão, usinagem e puncionamento na capacidade de expansão de furo dos aços DP800 e CP800 (KARELOVA et al., 2007).

Konieczny e Henderson (2007), além de avaliarem as diferentes condições de confecção de furos por usinagem e corte a laser, também avaliaram as condições do corte puncionado com folgas diversas. Conforme pode ser observado na figura 3.16, o furo confeccionado por usinagem apresentou os maiores valores de expansão para a maioria dos aços por eles avaliados. Na comparação entre as diferentes folgas de corte no furo puncionado, as maiores expansões, para alguns dos aços avaliados, ocorreram para folgas de corte mais elevadas, embora em outros aços o desempenho não tenha sido afetado pela sua variação.

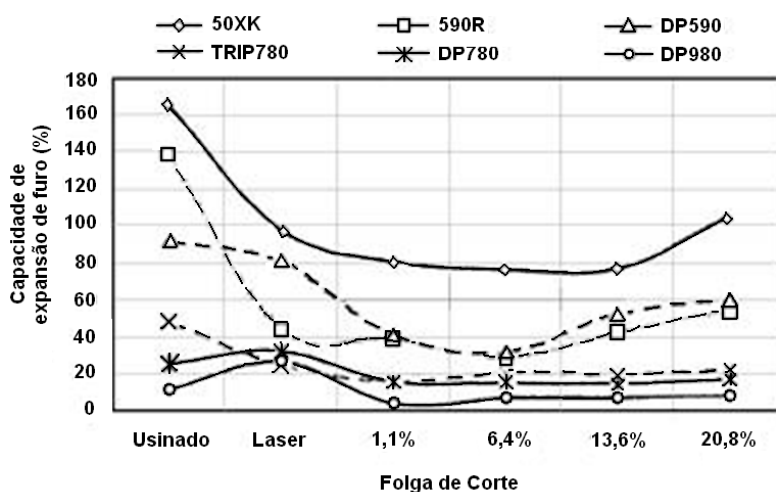


FIGURA 3.16 – Efeito de modo de confecção de furo, usinado, laser e puncionado com diferentes folgas de corte sobre a capacidade de expansão de furo de diversos aços de alta resistência (KONIECZNY e HENDERSON, 2007).

Stribos et al. (1996) verificaram que a capacidade de expansão de furo aumenta com a seguinte ordem de confecção de furos: puncionamento, perfuração com broca e usinagem. Também concluíram que a espessura, para baixas qualidades de borda de corte, não afeta o valor de λ . Além disso, um aumento do diâmetro do punção (de 75 para 293 mm) não influencia a capacidade de expansão para pequenos furos.

A influência da geometria do punção na capacidade de expansão de furo foi estudada por Konieczny e Henderson (2007). Os autores avaliaram diferentes qualidades de aço e verificaram que, apesar de pequena, há uma diferença nos resultados de λ quando usa-se o punção cônico no lugar do esférico. A maioria dos aços investigados demonstrou um valor de expansão de furo um pouco mais elevado quando da utilização de punção cônico frente ao esférico, conforme mostrado na figura 3.17.

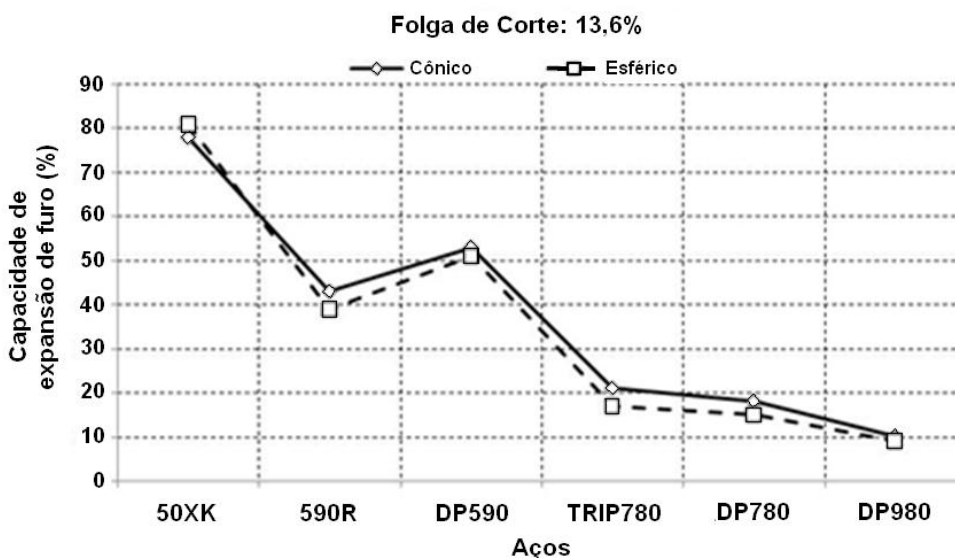


FIGURA 3.17 – Efeito da geometria do punção na capacidade de expansão de furo, para diferentes classes de aço (KONIECZNY e HENDERSON, 2007).

Mackensen et al. (2009) também investigaram o efeito da geometria do punção de corte, em função dos raios de concordância da borda (50 μm e 150 μm), bem como da folga de corte e dos modos de confecção de furos via eletroerosão e via laser, na capacidade de expansão de furo. Na figura 3.18 são mostrados os resultados obtidos para avaliações feitas em um aço *Dual Phase*. Eles verificaram que não houve grande variação de λ com a alteração dos parâmetros citados.

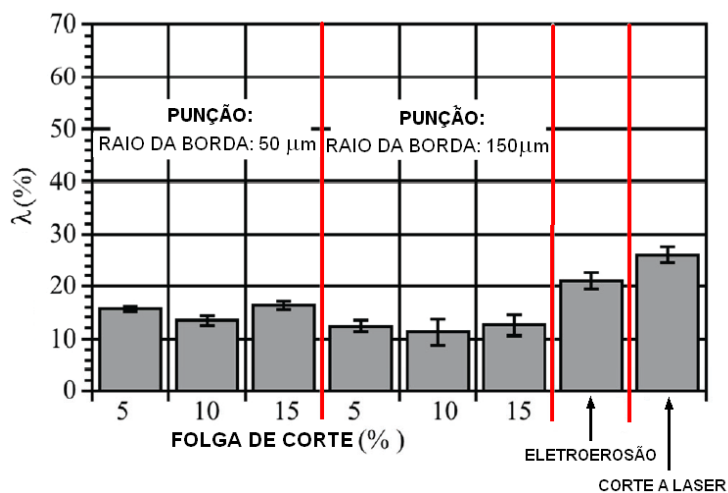


FIGURA 3.18 – Influência da folga de corte, raio de concordância do punção e do processo de confecção de furos na capacidade de expansão de furo do aço *Dual Phase* (MACKENSEN et al., 2009).

3.2.4. Deformações em bordas

Apesar da conformabilidade de bordas e furos de chapas serem avaliadas de acordo com resultados de ensaios de expansão de furos, existem dúvidas se as deformações reais que ocorrem na estampagem de componentes automotivos podem ser diferentes daquelas atuantes durante esses ensaios. Este fenômeno foi estudado por Hiwatashi e Sakuma (2000). Na figura 3.19a pode ser visto que as deformações circunferenciais em regiões adjacentes à borda de um furo expandido por um punção cônico, tal como no ensaio ECF, não variam ao longo do perímetro do furo. Já no caso do flange estirado de uma peça estampada, conforme figura 3.19b, considerando-se a região dobrada como correspondente a um quarto da circunferência, foi observado um gradiente de deformação ao longo do perímetro desta borda. Logo, segundo os autores, a previsão de deformações limites utilizando o ensaio ECF poderia ser incorreta.

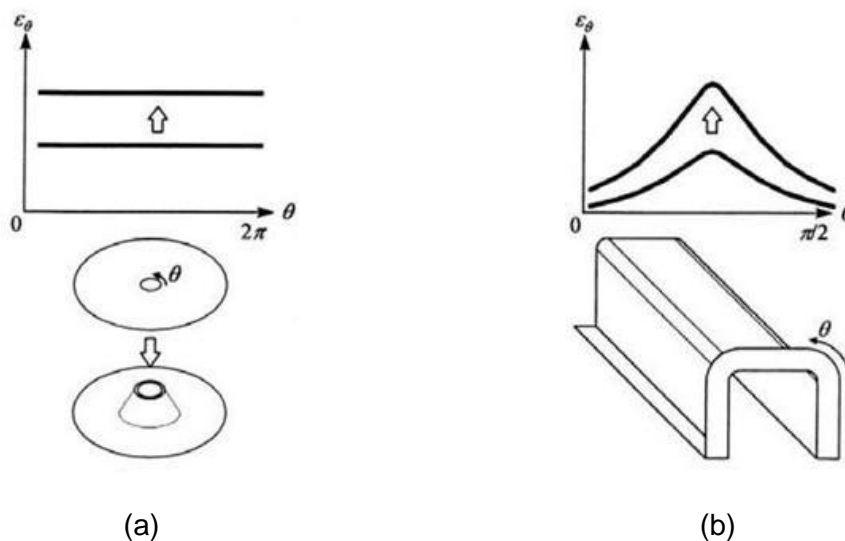


FIGURA 3.19 – Diferença do perfil de distribuição de deformação ao longo das bordas de (a) um corpo de prova submetido ao ensaio ECF e (b) de uma peça exposta a estiramento de flange (HIWATASHI e SAKUMA, 2000).

No entanto, Shi e Chen (2007), utilizando simulação computacional, relataram que a trajetória de deformação observada no ensaio ECF foi a mesma observada quando da estampagem de peças avaliadas por eles. Os autores mostraram que os testes em componentes industriais validaram os resultados obtidos em simulação computacional, na qual foi utilizada a capacidade de expansão de furo percentual, determinada por ensaio ECF normatizado, para a previsão das deformações limites do material sob esforços de estiramento de flange.

Um comportamento característico de bordas submetidas a esforços de estiramento está associado ao modo como as deformações principais no plano da chapa (ϵ_1 e ϵ_2) se relacionam nesta região durante a estampagem. Chen et al. (2003) mostraram que essa relação (trajetória de deformação) é constante e com valores idênticos ao obtidos em esforços uniaxiais de tração, tal qual encontrado em um ensaio de tração. Na figura 3.20 é mostrado o desenho esquemático da peça utilizada pelos autores nesta demonstração e a trajetória das deformações na região da borda do furo expandido.

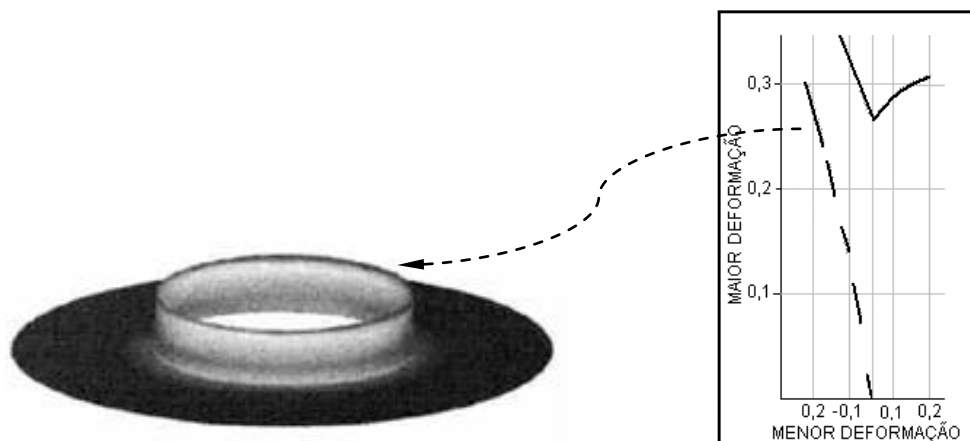


FIGURA 3.20 – Trajetória de deformação obtida em peça durante simulação de esforços de estiramento de borda (adaptado de CHEN et al., 2003).

Na figura 3.21 é mostrado o perfil de deformação obtido em ensaios de expansão de furo realizados por Col e Jousserand (2008). Os autores observaram a existência de um gradiente de deformação na direção radial do furo, sendo que as maiores deformações em ε_1 foram obtidas nas regiões adjacentes à sua borda. Assim como Chen et al. (2003), eles verificaram que o estado de deformação na borda foi típico de tração uniaxial, porém à medida que as deformações se afastaram da borda foram observados estados de deformação plana e estiramento biaxial.

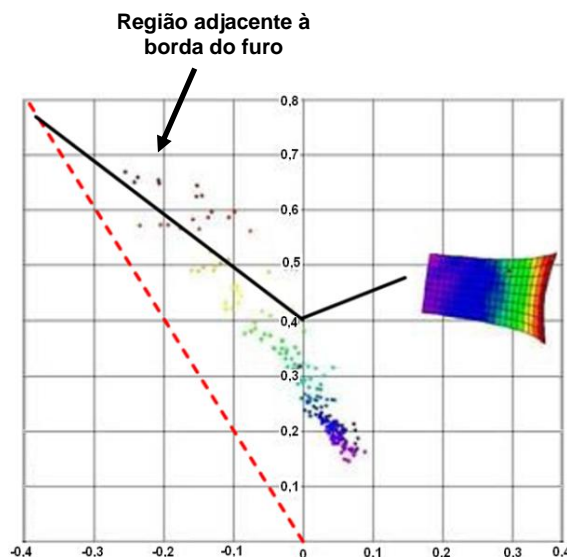


FIGURA 3.21 – Trajetória das deformações obtida no ensaio de expansão de furo do tipo KWI (COL e JOUSSERAND, 2008).

Chen et al. (2008) realizaram ensaios de expansão de furo do tipo KWI em aço TWIP e avaliaram as deformações na vizinhança do furo utilizando um sistema ótico de medições de deformações. Na figura 3.22 é mostrada a trajetória de deformação apresentada em seu estudo, na qual se evidencia que as regiões próximas ao furo foram deformadas por embutimento ou tração uniaxial, com relação de 0,43 entre ε_2 e ε_1 , enquanto a redução de espessura (ε_3) foi de 36%. Já nas regiões planas, mais distantes da borda do furo, o modo de deformação predominante foi por estiramento.

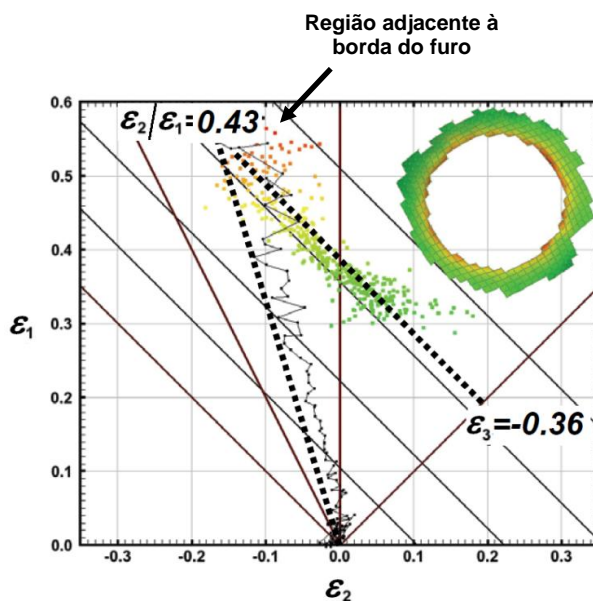


FIGURA 3.22 – Distribuição das deformações ocorridas em região adjacente ao furo para aço TWIP. Na direção radial da amostra os modos de deformação variam desde estiramento até tração uniaxial (adaptado de CHEN et al., 2008).

3.2.5. Métodos de previsão de falhas em bordas e furos

Embora a aplicação da CLC na previsão de rupturas em bordas estiradas de peças venha sendo questionada, ainda não encontradas na literatura muitas técnicas experimentais opcionais a este método. A seguir são apresentadas algumas abordagens desenvolvidas com este intuito.

a) Abordagem de McEwan

Uma técnica proposta para a previsão de trincas em borda estirada utiliza uma CLC modificada, à qual são adicionados os limites de expansão de furos para diversas qualidades de bordas de corte. Segundo os idealizadores do método (MCEWAN et al., 2009), esse diagrama combinado tem sido usado com sucesso na prevenção de falhas e rupturas associadas a furos e flanges estampados. Na figura 3.23 é mostrada uma representação esquemática de resultado obtido neste método, aplicado pela siderúrgica Corus. Na figura é mostrada a CLC e as regiões referentes aos materiais que apresentam valor r (coeficiente de Lankford) entre 0,5 e 2,0, demarcadas pelas linhas pontilhadas. Também são mostradas linhas horizontais, que marcam as deformações limites em região de expansão de furo para diferentes qualidades de corte ou condições de borda. Neste caso, McEwan et al. assumiram que a deformação máxima no perímetro do furo é o próprio valor de λ obtido no ensaio ECF.

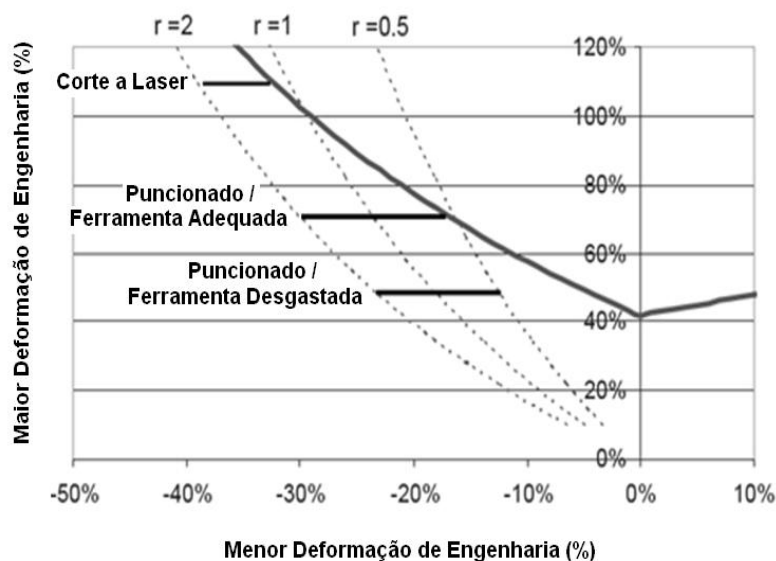


FIGURA 3.23 – Representação esquemática do diagrama combinado da CLC com limites da ECF em função da qualidade de corte (adaptado de MCEWAN et al., 2009).

Este conceito foi proposto após realização de procedimentos experimentais de expansão cônica de furo com os aços de diferentes classes de resistência (XF350 e DP600). Um conjunto de amostras tiveram os furos confeccionados por corte a laser, e outro conjunto seguiu estritamente as recomendações de corte da norma ISO 16630. Por último, amostras cortadas com punção desgastado simularam a situação de corte quando do emprego de ferramenta sem afiação ou com folga de corte muito elevada.

Os autores concluíram que os resultados de capacidade de expansão cônica de furo do aço de alta resistência DP600 foram inferiores aos do aço XF350, de menor resistência. Além disso, as deformações limites dos furos confeccionados a laser foram maiores que aquelas dos furos puncionados, seguidas dos furos confeccionados com ferramenta desgastada.

A vantagem dessa metodologia é a utilização de ensaio de estampagem já normalizado. Contudo, a base de medida (perímetro do furo) utilizada para o cálculo da maior deformação de engenharia é muito maior do que a malha de referência normalmente utilizada no levantamento de CLCs, o que pode levar a resultados imprecisos.

b) Abordagem de Held

Outra abordagem, desenvolvida na Universidade de Stuttgart e aplicada na Audi AG, considera uma Curva Limite de Conformação de Borda (FLC-E *Forming Limit Curve – Edges*). De acordo com esse método, as deformações introduzidas nas bordas de furos e do próprio *blank* pelo processo de corte são descontadas da CLC do material da chapa, gerando uma nova curva limite mais baixa que a curva original (HELD et al., 2009).

Este método parte do princípio de que sempre que uma operação de conformação é aplicada em uma chapa de aço ocorre o encruamento do material, o que diminui sua conformabilidade. Essa redução de conformabilidade pode ser expressa por uma translação da CLC. Assim, após uma operação de corte e considerando a ocorrência de encruamento de borda, sabe-se que a CLC pode ser transladada na vertical com base nas deformações ocorridas nas bordas de corte. Neste método, para medir as deformações de borda os autores utilizaram um sistema ótico.

A figura 3.24 mostra o resultado da translação da CLC, que tem como base a equação 3.1, utilizada para o cálculo do valor de deformação para o estado plano de deformação:

$$\varphi_{1,FLC-E(\varphi_2=0)} = \varphi_{1,FLC(\varphi_2=0)} - (n_E \cdot \varphi_v + \varphi_{E0}) \quad (3.1)$$

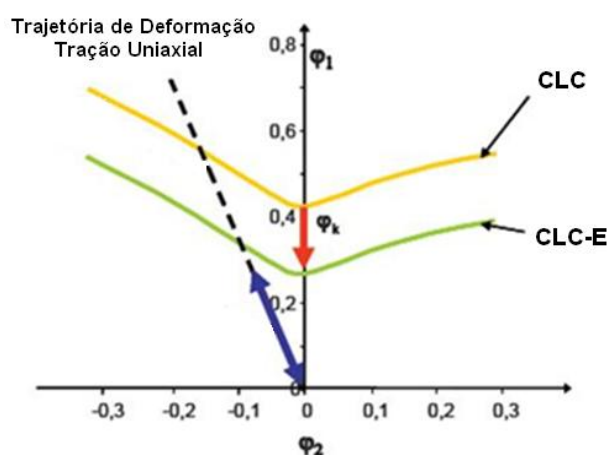


FIGURA 3.24 – Variação na CLC devido à deformação ocorrida após operação de corte (adaptado de HELD et al., 2009).

O termo $\varphi_{1,FLC-E(\varphi_2=0)}$ refere-se ao novo valor de deformação no estado plano, que indica o quanto a CLC vai transladar. Para obtê-lo, parte-se do parâmetro $\varphi_{1,FLC(\varphi_2=0)}$, que se refere à deformação no estado plano para a CLC convencional, e desconta-se o encruamento referente ao corte e pré-deformação anteriores (calculado por $n_E \cdot \varphi_v + \varphi_{E0}$). Segundo o método proposto pelos autores, este último termo de translação da CLC pôde ser obtido da linearização do gráfico da figura 3.25. O gráfico mostra a evolução da deformação de borda (φ_E) em função da pré-deformação (ε_v ou φ_v) para três aços distintos (AA6016, DC06 e DP600). φ_E é obtida da superfície adjacente à borda de corte, região denominada pelos autores de zona afetada pelo corte (ZAC) para diferentes valores de pré-deformação. A partir da regressão linear das retas deste gráfico, pode-se obter os parâmetros n_E e φ_{E0} da equação 3.1.

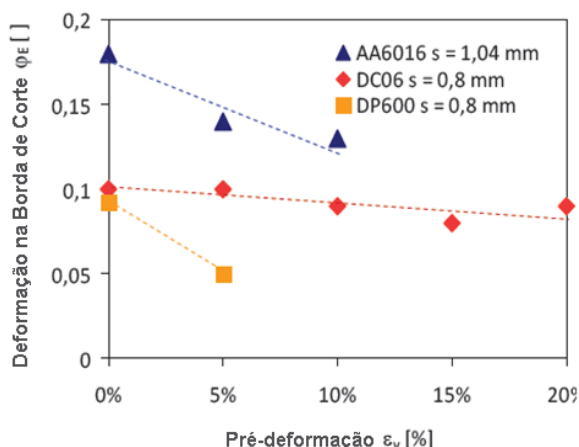


FIGURA 3.25 – Deformação de borda em função da pré-deformação de corte, para diferentes aços (adaptado de HELD et al., 2009).

A vantagem desta técnica consiste é considerar as deformações geradas no corte e possíveis deformações anteriores a ele na capacidade de deformação da borda. Cabe destacar, contudo, que o método não foi validado experimentalmente.

c) Abordagem de Nitta

Nitta et al. (2009) desenvolveram um método para avaliar a conformabilidade de bordas de peças estampadas, que consiste em avaliar campos de deformações variando três parâmetros da peça: o raio de curvatura (R – 10 mm, 30 mm, 60 mm e 100 mm), o ângulo de abertura (θ – 90°, 120° e 150°) e a altura do flange (H – 10 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm e 30 mm), conforme mostrado na figura 3.26a. Para isso, foram criados seis formatos de ferramentas com a combinação dos fatores R e θ (figura 3.26b).

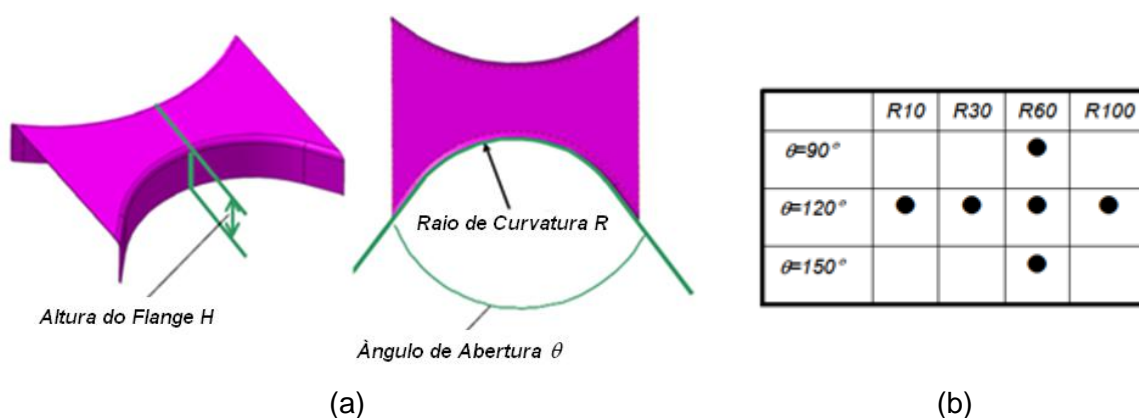
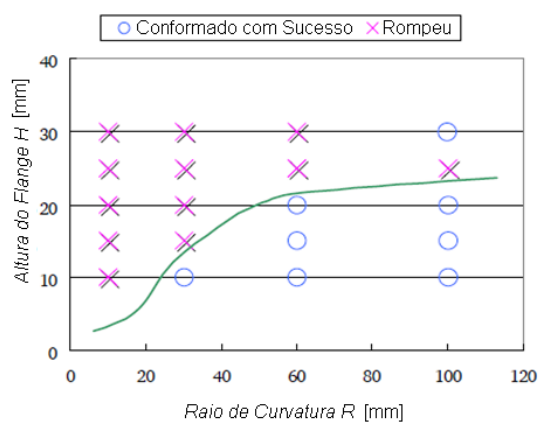
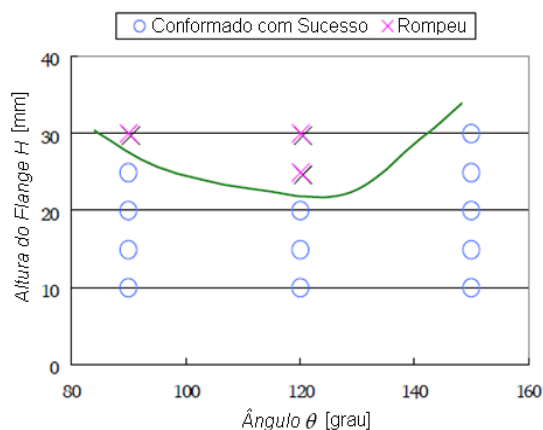


FIGURA 3.26 – (a) Parâmetros de formato da peça para avaliação do estiramento de flange: altura do flange (H), raio de curvatura (R) e ângulo de abertura da peça (θ) e (b) combinação dos valores de raio e ângulo das seis ferramentas testadas (NITTA et al., 2009).

Os aços utilizados para avaliação destes fatores foram o JSC270D, o JSC590Y e o JSC780Y. A influência dos fatores R , θ e H foi investigada para traçar os mapas de avaliação de conformabilidade destes materiais em função da variação destes fatores em estiramento de flange. A figura 3.27 mostra as regiões de rupturas (marcadas por “x”) e sem ruptura (marcado por “o”) para a combinação entre a altura do flange H , o raio R e o ângulo θ , para o aço JSC780Y. Foi obtido um mapa comparativo para os aços estudados, mostrado na figura 3.28, a partir de gráficos similares para os outros materiais. De acordo com os resultados obtidos, os aços com maior resistência tenderam a apresentar uma menor região de boa conformabilidade (“Conformação Ok”). Segundo os autores, como a linha do gráfico representa a fronteira entre regiões de sucesso e de ruptura do material quando sob estiramento de borda, ela pode ser utilizada como referência para o projeto de peças reais. Contudo, assim como no método de Held, não há informações se o método não foi validado em aplicações industriais.



(a)



(b)

FIGURA 3.27 – Regiões de falhas do material JSC780Y para as combinações entre a altura do flange e (a) o raio de curvatura da peça e (b) o ângulo de abertura da peça (adaptado de NITTA et al., 2009).

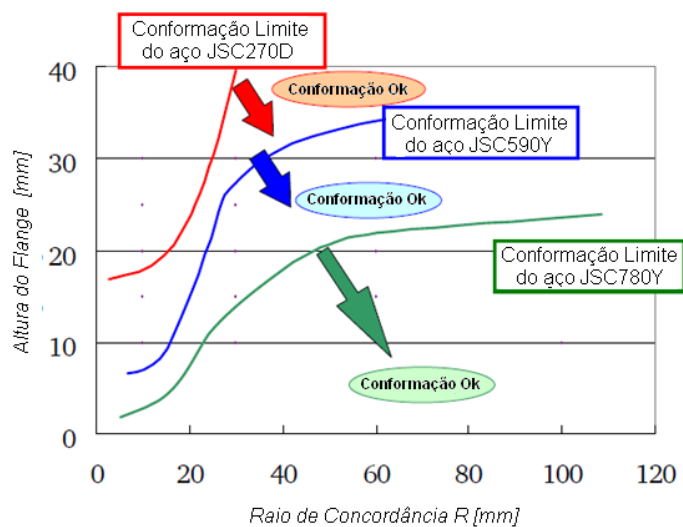


FIGURA 3.28 – Comparação das regiões de conformação para aços de diferentes limites de resistência (TS), a partir da combinação da altura do flange e do raio de curvatura da peça (adaptado de NITTA et al., 2009).

4. METODOLOGIA

4.1. Materiais e caracterização

O estudo compreendeu a avaliação de metodologias para a quantificação das máximas deformações suportadas por bordas/furos submetidos a esforços de estiramento. Para isso, foram utilizados dois aços de classes de resistências diferentes, um de alta resistência, da classe *Dual Phase*, de 600 MPa de limite de resistência mínimo (DP600), e um aço *Intersticial Free* (IF), de alta conformabilidade e baixa resistência mecânica (EEP-PC). Ambos com 1,20 mm de espessura. As amostras foram retiradas de bobinas processadas em escala industrial, destinadas à indústria automobilística. Na tabela IV.1 é apresentada a composição química e na tabela IV.2 as propriedades mecânicas dos aços analisados.

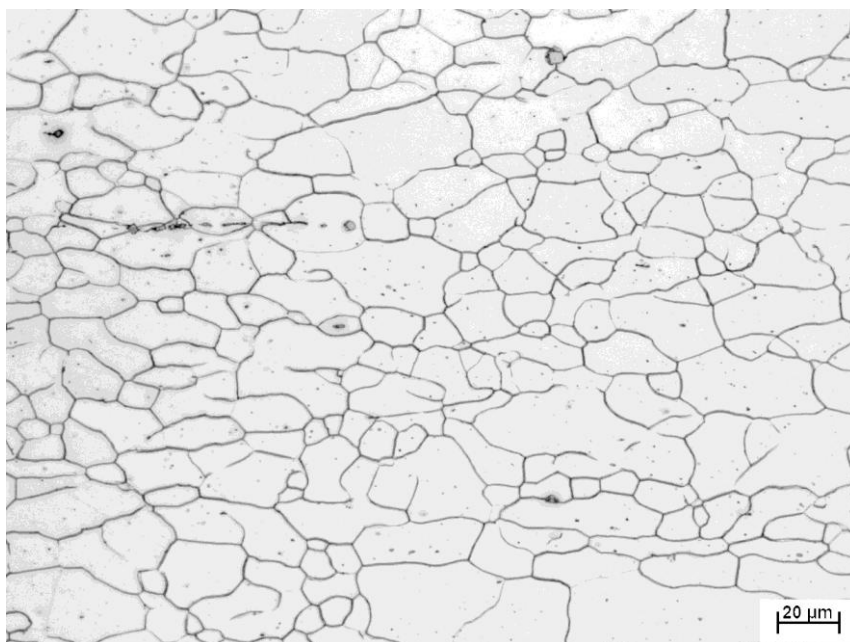
TABELA IV.1 – Composição química dos aços utilizados (% em peso).

	C	Mn	Si	P	S	Al	Nb	Ti	Mo
IF	0,0031	0,091	<0,005	0,013	0,014	0,027	<0,005	0,056	-
DP600	0,098	1,70	0,014	0,017	0,006	0,036	0,008	< 0,005	0,17

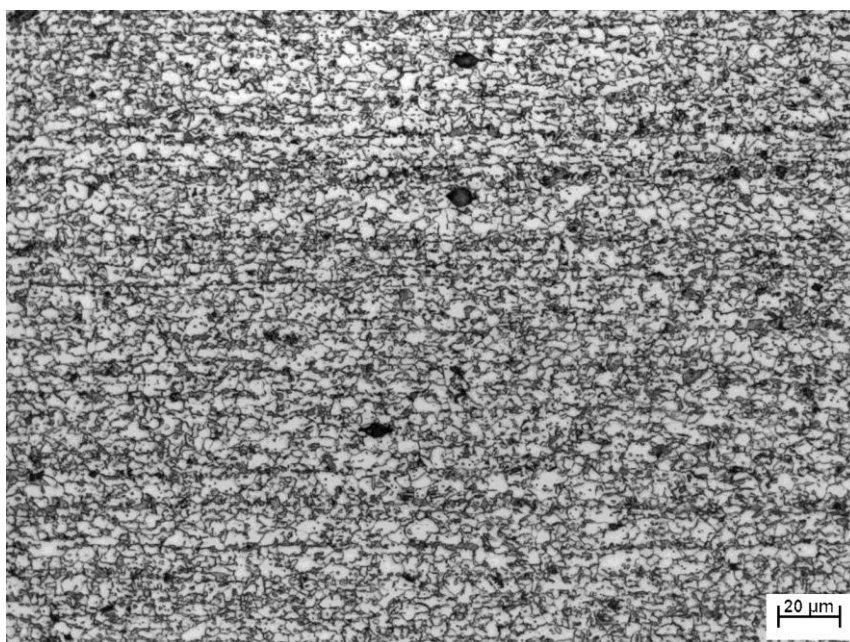
TABELA IV.2 – Propriedades mecânicas dos aços utilizados.

	Orientação em relação à direção de laminação	LE (MPa)	LR (MPa)	Al _t (%) BM: 50 mm	r _(15%)	n _(4% - 6%)	\bar{r}
IF	0°	166	291	50,4	2,158	0,240	2,072
	45°	181	301	46,2	1,773	0,234	
	90°	176	286	49,2	2,584	0,242	
DP600	0°	368	633	24,5	0,736	0,209	0,941
	45°	359	621	28,5	1,037	0,206	
	90°	377	646	26,0	0,954	0,207	

O aspecto típico da microestrutura observada nestes aços é mostrado na figura 4.1. As micrografias foram obtidas via microscopia ótica, após preparação metalográfica convencional e ataque com reagentes químicos apropriados, em seção paralela ao sentido de laminação das amostras de chapa avaliadas. O aço IF tem microestrutura totalmente ferrítica, enquanto o aço DP é composto por matriz ferrítica e aproximadamente 23% de segundo constituinte de alta resistência (martensita e bainita), além de uma pequena fração de perlita fina e carbonetos.



(a) Aço IF



(b) Aço DP600

FIGURA 4.1 – Aspecto típico da microestrutura dos materiais utilizados neste trabalho. Ampliação original: 500X.

Foram realizados ensaios de estampagem para a determinação da Curva Limite de Conformação dos aços avaliados. Esses ensaios foram conduzidos de acordo com a metodologia proposta por Nakazima (1968). Foi utilizado um punção com nariz hemisférico, com 100 mm de diâmetro, e uma matriz circular, com 106 mm de diâmetro interno e raio de concordância de 8 mm, dotada de um friso de retenção também circular, com 160 mm de diâmetro. Foram ensaiados corpos de prova com diferentes geometrias, de forma a expor os materiais a diferentes trajetórias de deformação até a ruptura. O procedimento de medição das deformações foi realizado em reproduções, por intermédio do *software ASAME (Automated Strain Analysis and Measurement Environment)*, da malha na região fraturada dos corpos de prova após a sua retirada da prensa. Os resultados das deformações principais medidas em cada corpo de prova foram plotados em um gráfico $\epsilon_1 \times \epsilon_2$. Uma linha de tendência foi então ajustada aos pontos obtidos, gerando-se as Curvas Limite de Conformação. As CLCs obtidas para os aços avaliados de acordo com a metodologia citada são apresentadas na figura 4.2.

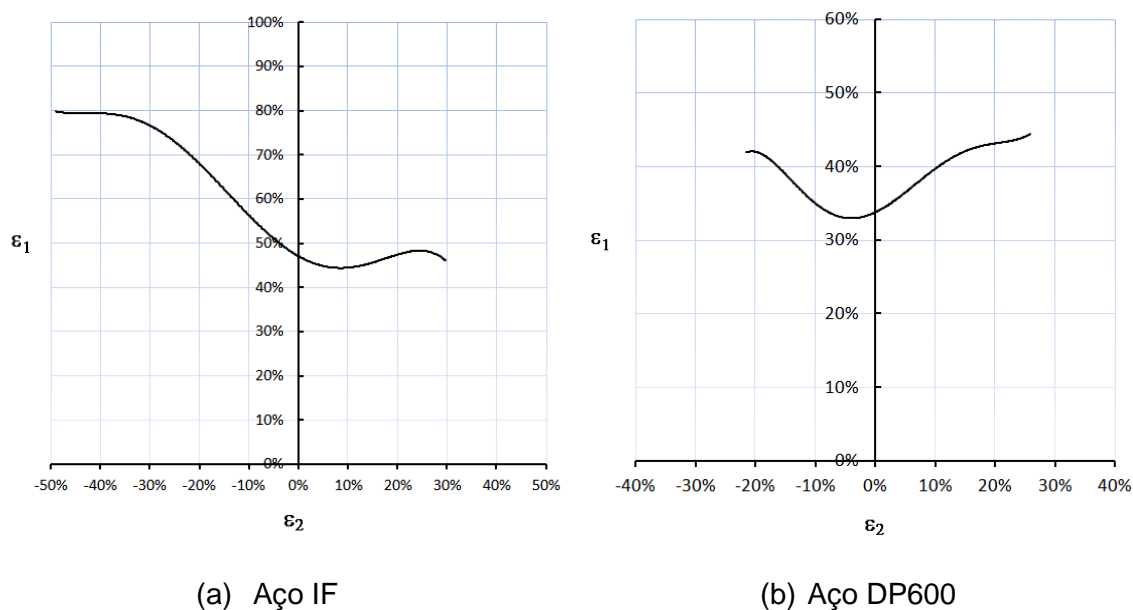


FIGURA 4.2 – Aspecto das Curvas Limite de Conformação dos aços utilizados neste trabalho.

4.2. Ensaio de expansão de furo

Para caracterizar os aços avaliados quanto à capacidade de expansão de furo, utilizou-se o ensaio KWI. Este ensaio é caracterizado pela utilização de um punção de nariz plano. Nesta configuração, as deformações se desenvolvem não somente na região periférica ao furo, mas também em toda a região de contato do corpo de prova com o punção, sendo necessária, portanto, lubrificação com filme fino de plástico entre a chapa ensaiada e o punção, de forma que a ruptura ocorra a partir das bordas do furo central.

Os corpos de prova utilizados tiveram formato quadrado (100 x 100 mm) dotados de um furo circular no centro do *blank*. O diâmetro inicial do furo foi de 10 mm. Durante os ensaios, a deformação se concentrou na região do furo central do corpo de prova que se expandiu continuamente com o avanço da ferramenta, até a ocorrência de trincas a partir da borda do furo. O ensaio foi interrompido quando a ruptura ocorreu e atravessou toda espessura do material.

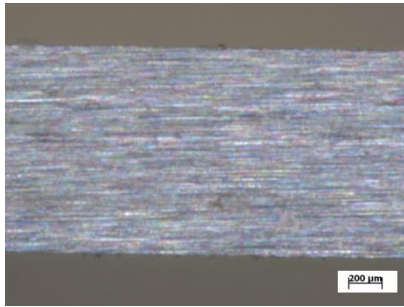
O resultado do ensaio (λ) foi definido como a diferença entre o diâmetro do furo central após a expansão (d_f) e o diâmetro inicial (d_o), dividida pelo diâmetro inicial do furo, conforme equação 4.1.

$$\lambda = \frac{d_f - d_o}{d_o} * 100 \quad (4.1)$$

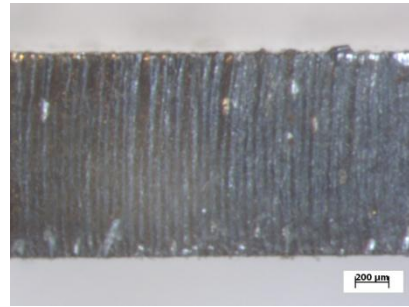
O diâmetro interno do furo rompido foi medido com um paquímetro digital de 0,01 mm de precisão em duas direções perpendiculares entre si, evitando o local da trinca. Usando estas medições foi calculado o diâmetro médio do furo rompido para cada corpo de prova.

Foram realizados cinco ensaios por condição de acabamento do furo avaliada, sendo considerados três valores intermediários para o cálculo do valor médio de λ , ou seja, foram descartados aqueles ensaios que apresentaram o maior e o menor valor de λ .

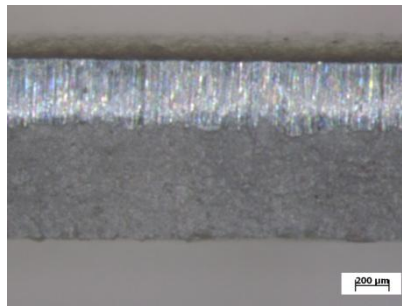
Prevendo-se que o desempenho do material neste ensaio depende da condição da superfície das bordas estiradas, os corpos de prova utilizados foram confeccionados por três técnicas distintas: usinagem, laser e puncionamento/cisalhamento. O aspecto típico das superfícies de corte geradas por estas técnicas é mostrado na figura 4.3.



(a) Usinagem



(b) Laser



(c) Puncionamento/Cisalhamento

FIGURA 4.3 – Aspecto típico da superfície de corte gerada pelos processos de fabricação utilizados neste trabalho.

4.3. Métodos avaliados para previsão de deformações em bordas submetidas a esforços de estiramento

Duas metodologias de ensaio foram avaliadas, aqui denominadas Método da Malha Circular e Método do Duplo Dobramento. Em ambas as técnicas, os ensaios de estampagem consistiram em submeter os corpos de prova a esforços de estiramento até a ruptura a partir de região de bordas de flange e medir as deformações principais ε_1 e ε_2 neste local. A descrição dos ensaios será apresentada nas seções a seguir.

A condição da superfície das bordas estiradas também foi avaliada. As bordas dos corpos de prova submetidos a estiramento foram confeccionadas por usinagem, laser e puncionamento/cisalhamento.

A folga de corte visada na operação de puncionamento foi de 12% da espessura das chapas dos aços analisados. Esta distância pode ser considerada apropriada para um ferramental industrial de corte em boas condições.

A utilização de bordas usinadas, embora não seja usual em escala industrial, permitiu avaliar exclusivamente o comportamento do material, sem qualquer influência de defeitos na superfície de corte. O corte a laser, por sua vez, é regularmente empregado em etapas de *tryout* de ferramentas devido ao fato de a ferramenta de corte por puncionamento do *blank* ser geralmente a última a ser fabricada durante o desenvolvimento de um novo componente estampado, o que tornou importante a sua avaliação.

4.3.1. Método da Malha Circular

Nesta metodologia, cujo desenvolvimento foi inspirado em estudos publicados por Takuda et al. (2009) e Ito e Nakazawa (2010), foram utilizados corpos de prova quadrados (100 x 100 mm), contendo em seu centro um furo de formato circular de 10 mm de diâmetro.

a) Ensaio de estampagem

O ensaio consistiu em submeter o furo circular a esforços de expansão, através de um punção cilíndrico de nariz plano, com 76 mm de diâmetro, e matriz circular sem friso de retenção. O ferramental de estampagem utilizado, idêntico ao empregado no ensaio KWI, é mostrado de forma esquemática na figura 4.4.

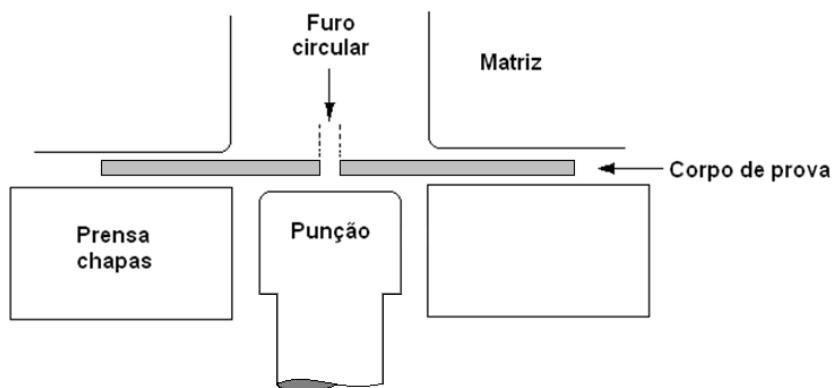


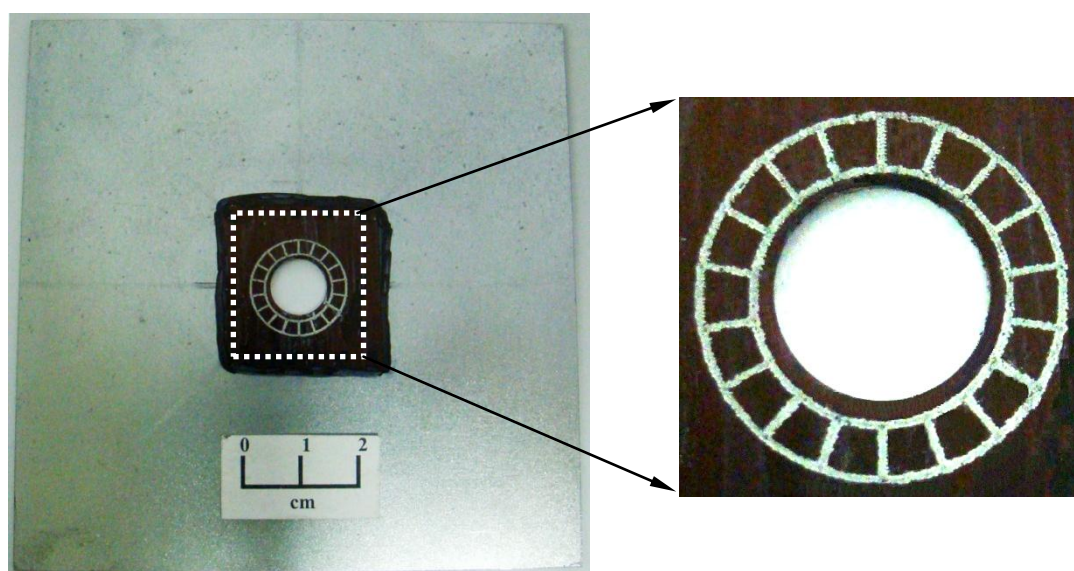
FIGURA 4.4 – Desenho ilustrativo do ferramental a ser utilizado nos ensaios de estampagem do método da Malha Circular.

A velocidade de deslocamento do punção durante o ensaio foi constante, 30 mm/min, e a carga de prensa chapas foi de 500 kN, elevada o suficiente para evitar o escoamento das bordas externas do corpo de prova para o interior da matriz. Como lubrificante foram utilizados um filme de PTFE (Politetrafluoretileno) e vaselina, colocados entre a chapa e o punção para facilitar a deformação apenas do furo e evitar a ocorrência de falhas na região do corpo de prova em contato com o ombro da matriz ou o raio de concordância do punção. O ensaio foi interrompido no momento em que trincas forem identificadas visualmente na borda do furo e atravessarem toda a espessura do material.

Para que as deformações nas adjacências do furo expandido fossem determinadas, em uma das faces do corpo de prova, em região próxima ao furo, foi previamente confeccionada uma malha, formada por dois círculos concêntricos de diâmetro de 12 e 17 mm, unidos por 18 linhas radiais, de 2,50 mm de comprimento, com espaçamento constante de 20°. As linhas tinham aproximadamente 0,3 mm de espessura. O aspecto de um corpo de prova sem e com a malha impressa é apresentado na figura 4.5. As dimensões visadas das linhas que formaram os elementos da malha são mostradas em detalhe na figura 4.6. Estas dimensões foram utilizadas como referência para o cálculo das deformações principais ε_1 e ε_2 , conforme será mostrado.



(a) Corpo de prova sem malha



(b) Corpo de prova após impressão da malha circular, apresentada em detalhe.

FIGURA 4.5 – Aspecto típico do corpo de prova utilizado nesta metodologia (a) antes e (b) após a impressão da malha empregada para a medição das deformações na região da borda do furo expandido.

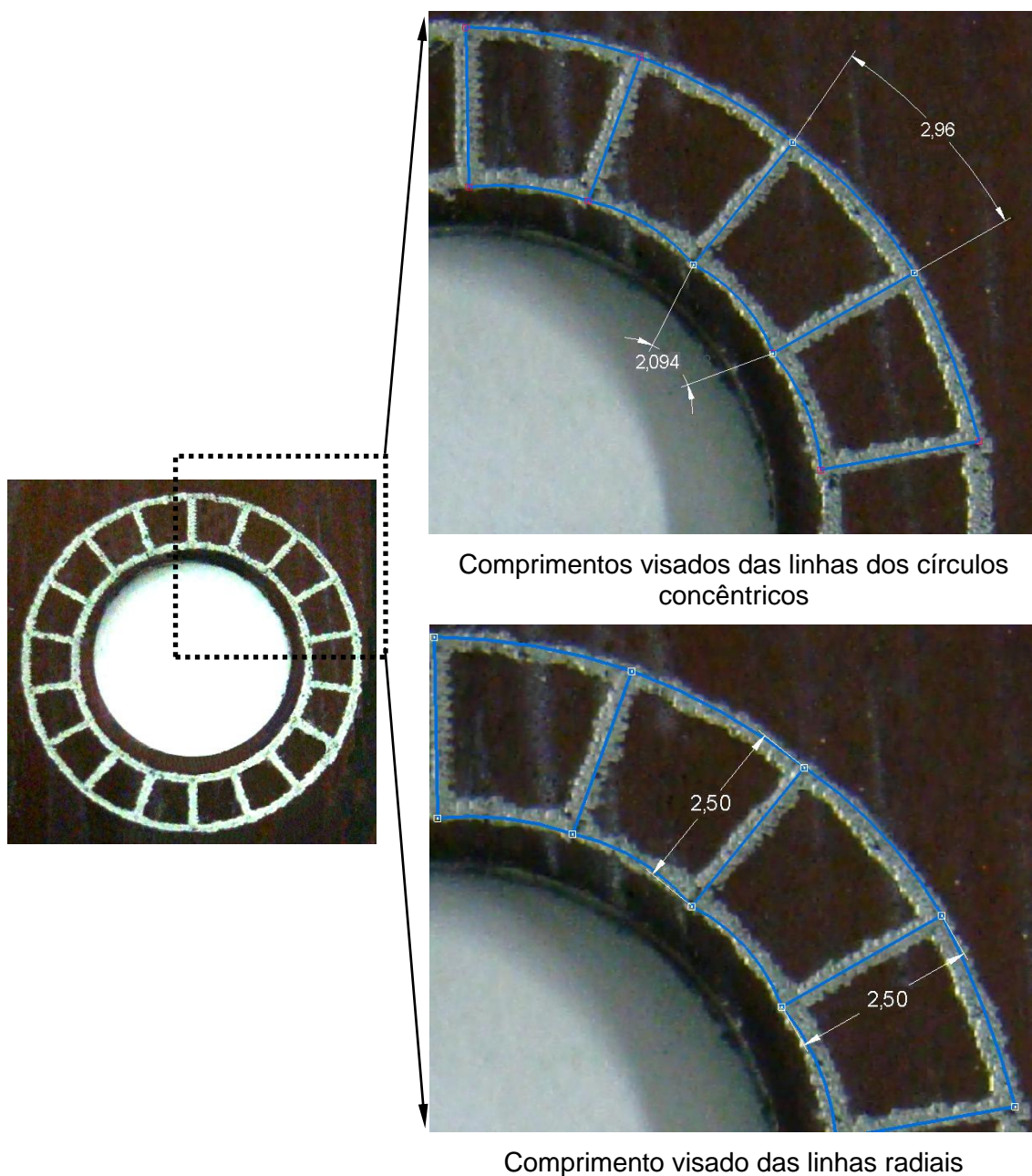


FIGURA 4.6 – Comprimentos das linhas dos elementos da malha de referência.

A malha foi confeccionada utilizando equipamento de gravação por micropercussão ou micropuncionamento, modelo XF500, fabricado pela Technifor, disponível no CTU. A gravação foi realizada por um punção com ponteira cônica, acionado por um *software* integrado ao equipamento. A partir de movimentos previamente definidos por linhas de programação, essa ferramenta se desloca em três dimensões e, em função do seu contato com a chapa, ela promove ranhuras na superfície do corpo de prova. Para evitar que ocorresse uma penetração mais profunda da ferramenta no material, o que

poderia promover a formação de concentradores de tensão, foi utilizada uma pressão mínima aplicada pelo punção que, contudo, permitisse a visualização nítida da malha impressa. Para destacar as ranhuras, a superfície do corpo de prova na região do furo foi pintada com tinta preta anteriormente à aplicação da malha.

b) Análise das deformações dos corpos de prova conformados

Para a medição das deformações, o corpo de prova estampado foi retirado da prensa e, a partir de uma câmera fotográfica, posicionada a 90° em relação à superfície do corpo de prova, foram registradas imagens do furo expandido e da malha deformada, juntas a um traço de escala de 10 mm de comprimento colocado no mesmo plano da superfície da chapa na região do furo expandido. Estas imagens foram então enviadas para o *software* SolidEdge versão ST3, onde as linhas da malha foram identificadas com ferramentas do *software* e, finalmente, medidas após correção da escala. A determinação das deformações principais (ε_1 e ε_2) foi feita por célula da malha, a partir dos comprimentos de cada linha que a formava. Para a determinação de ε_1 , foram medidos os comprimentos finais das linhas que pertenciam aos círculos concêntricos. Destas dimensões, subtraídas das dimensões das trincas, foi calculado o valor de ε_1 a partir da equação 4.2.

$$\varepsilon_1 = \ln\left(\frac{f_1}{i_1}\right) \quad (4.2)$$

onde f_1 , corresponde ao comprimento final da linha por célula da malha e i_1 é o comprimento inicial (no círculo mais adjacente ao furo as linhas tinham inicialmente 2,094 mm e no círculo mais externo 2,96 mm de comprimento).

A partir das dimensões finais das linhas radiais foram calculados os valores de ε_2 , usando a equação 4.3.

$$\varepsilon_2 = \ln\left(\frac{f_2}{i_2}\right) \quad (4.3)$$

onde f_2 , corresponde ao comprimento final da linha radial por célula da malha e i_2 é o comprimento inicial, de 2,50 mm de comprimento.

Em cada uma das células foram obtidos dois valores de ε_1 e dois de ε_2 . Destes valores foram determinados os valores médios de ε_1 e ε_2 , que representam os resultados do ensaio. Tais deformações foram plotadas no gráfico ε_1 x ε_2 e comparadas à CLC do

material ensaiado. Para este método, foram realizados quatro ensaios por condição de acabamento de superfície do flange avaliada.

4.3.2. Método do Duplo Dobramento

A utilização desta metodologia baseou-se no ensaio proposto por Bouaziz et al. (2010). O princípio do ensaio consistiu em aplicar esforços de dobramento a um corpo de prova de formato retangular (figura 4.7a), onde um dos lados de maior comprimento do corpo de prova foi previamente dobrado por 90° a partir de linha de dobramento paralela à sua borda, para a formação de um flange (figura 4.7b).

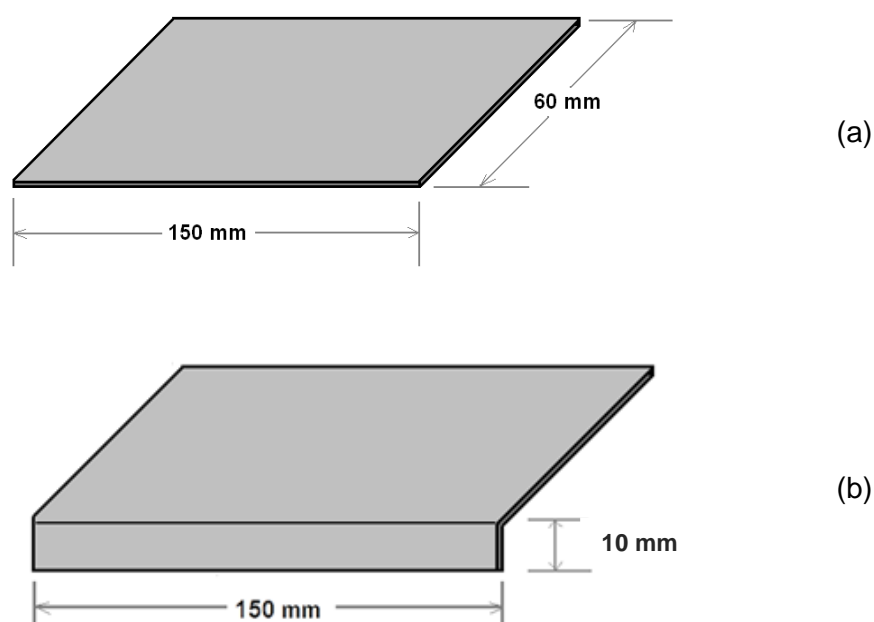


FIGURA 4.7 – Geometria dos corpos de prova (a) antes e (b) após o primeiro dobramento.

a) Ensaios de dobramento

Na metodologia aqui utilizada, o primeiro dobramento dos corpos de prova foi realizado em uma dobradeira manual. Diversos testes foram ser realizados para determinação da altura de flange gerada que promovesse a ocorrência de trinca durante o segundo dobramento, sendo que os melhores resultados foram obtidos para a altura de 10 mm. Os ensaios do segundo dobramento foram realizados em uma máquina de ensaios universal Instron (modelo 5882), utilizando o conjunto de ferramentas mostrado na figura 4.8. A ponta do cutelo utilizado tinha comprimento de 77 mm e perfil cilíndrico, com 5 mm de raio. O corpo de prova foi assentado entre dois

rolos de apoio com um ombro de contato com a chapa com 5 mm de raio. Testes foram realizados para determinar a distância ideal entre rolos de forma a favorecer a ocorrência de trinca durante o ensaio.

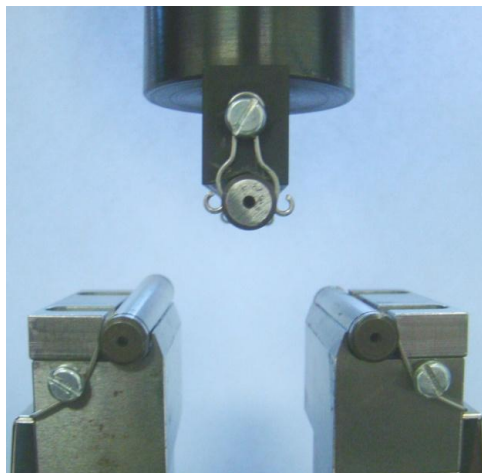


FIGURA 4.8 – Dispositivo utilizado nos ensaios de duplo dobramento.

A velocidade de deslocamento do cutelo durante o ensaio foi constante, em 15 mm/min. Durante o ensaio, com o avanço do punção, a ponta do cutelo entrava em contato com a face externa do corpo de prova, aplicando um esforço progressivo de flexão no seu centro. O ensaio prosseguia até que na região da borda do flange, exposta a esforços de estiramento, houvesse a formação e propagação de uma trinca, cuja detecção foi feita a olho nu.

Para realização dos ensaios, os corpos de prova retangulares foram retirados com a maior dimensão orientada transversalmente ao sentido de laminação. As bordas submetidas aos esforços de estiramento foram confeccionadas por técnicas de usinagem, laser e cisalhamento por tesoura guilhotina.

b) Análise das deformações dos corpos de prova conformados

Para a medição das deformações foi utilizada como referência uma grade de quadrados de 2,5 mm x 2,5 mm, impressa por processo eletroquímico sobre a superfície dos corpos de prova planos. O procedimento de determinação das deformações consistiu em se reproduzir, por intermédio do *software* ASAME a região da malha na região da ruptura do corpo de prova após a sua retirada do equipamento de dobramento. Os resultados obtidos, referentes às deformações da região crítica em três corpos de prova ensaiados, foram plotados em um gráfico $\varepsilon_1 \times \varepsilon_2$ e comparados às CLCs dos materiais.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Capacidade de expansão de furos em corpos de prova submetidos ao ensaio KWI

As capacidades de expansão de furos dos aços analisados, obtidas pelo ensaio KWI para diferentes condições de acabamento do furo, são mostradas na figura 5.1.

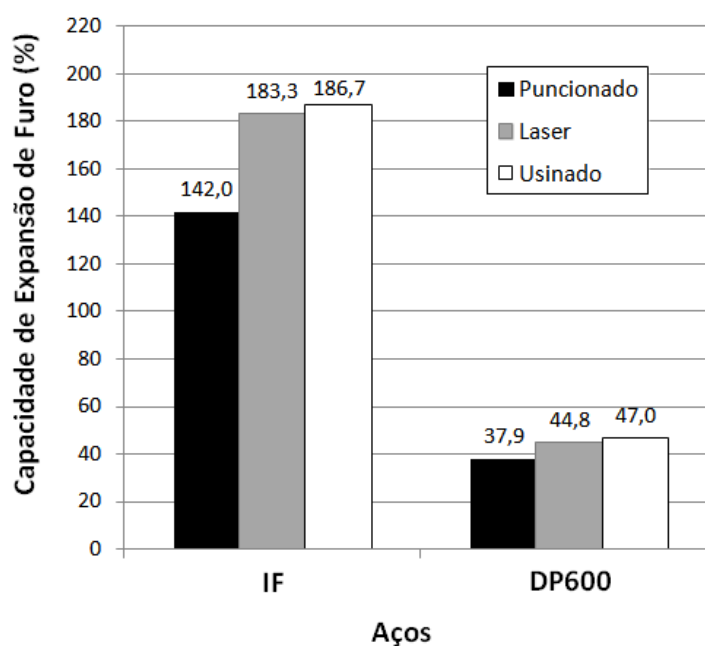


FIGURA 5.1 – Capacidade de expansão de furo dos aços IF e DP600, medida a partir de Ensaio KWI, para as diferentes qualidades de borda de corte.

Os resultados mostram uma tendência, já apontada em outros estudos (STRIJBOS, et al, 1996; HASEGAWA, et al., 2004; KARELOVA et al., 2007; KONIECZNY et al., 2007), de que furos com paredes usinadas tendem a apresentar maior capacidade de estiramento do que os demais métodos de fabricação de furos. Esse desempenho é consequência da menor agressão à superfície de corte gerada pelo processo de fresagem durante a usinagem, se comparado aos demais processos de fabricação. De acordo com Cinotti et al. (2000), um fator que pode explicar a diferença de desempenho entre a capacidade de expansão dos furos fabricados por usinagem em relação aos furos fabricados a laser é a orientação do acabamento deixado nos mesmos por cada técnica de fabricação. Enquanto a orientação das marcas de fabricação é paralela à superfície da chapa nos furos fabricados por usinagem, ela é

perpendicular à superfície das chapas para os furos realizados a laser, conforme destaca a figura 5.2. Isto faz com que a concentração de tensões, favorável à abertura e propagação de trincas, seja maior nos furos fabricados por puncionamento e laser, reduzindo a capacidade de expansão dos mesmos, quando comparados aos furos usinados. Ainda em relação aos furos cortados a laser, outro agravante sugerido como um dos fatores que pode deteriorar a capacidade de estiramento de flanges dos aços de alta resistência é o mais elevado teor do carbono equivalente desses aços (NAGASAKA et al., 2002). Ele promove a formação de constituintes de elevada resistência na camada adjacente à borda, resultante do elevado aporte térmico aplicado durante a separação física. A presença destes constituintes induz a redução da ductilidade local, se comparado ao restante do material.

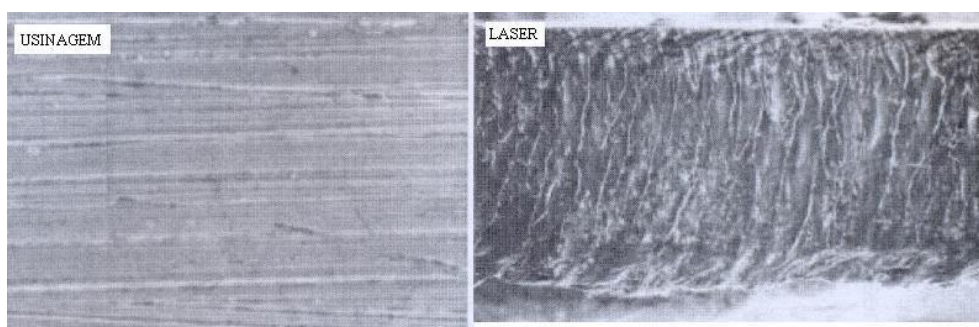


FIGURA 5.2 – Orientação das marcas deixadas pelos processos de fabricação (usinagem e laser) nas bordas de corte trabalhadas (CINOTTI et al., 2000).

Em relação aos furos/flanges confeccionados por puncionamento, durante este processo ocorre um elevado grau de deformação na adjacência da superfície da borda cortada, proveniente da carga necessária para a realização da separação do material. Esse encruamento localizado deteriora a possibilidade de deformação do material sob esforços de estampagem. Em aços *Dual Phase*, há ainda o agravante de que durante o corte por puncionamento haveria, na adjacência da superfície cortada, a formação de microtrincas, que encontrariam pouca resistência à propagação ao longo da interface entre a ferrita e os constituintes de mais elevada resistência, durante os esforços de expansão do furo.

Observa-se que, embora a utilização do ensaio KWI permita que se faça uma avaliação da capacidade de deformação da borda, a maior preocupação neste ensaio é com a porcentagem máxima de expansão do furo, não sendo medida as

deformações máximas da região adjacente ao furo. A seguir são apresentados os resultados obtidos das duas metodologias avaliadas no presente estudo para a quantificação das máximas deformações suportadas por bordas/furos submetidos a esforços de estiramento.

5.2. Método da Malha Circular

Uma preocupação inicial, que limitaria a aplicação dessa metodologia, seria uma possível redução na capacidade de expansão de furo dos aços analisados devido a uma intensificação localizada de tensão proveniente das linhas da grade impressas pelo processo de micropercussão. Para avaliar essa hipótese, a capacidade de expansão de furos utilizando o ensaio KWI em corpos de prova com a malha impressa foi comparada à de corpos de prova ensaiados sem a malha. Os resultados obtidos são apresentados na tabela V.1. Constatou-se que a utilização da malha não refletiu em alterações significativas na conformabilidade dos furos dos aços analisados, visto que os resultados foram bastante similares entre os corpos de prova com e sem a malha. O mesmo comportamento foi observado para furos tanto usinados quanto puncionados.

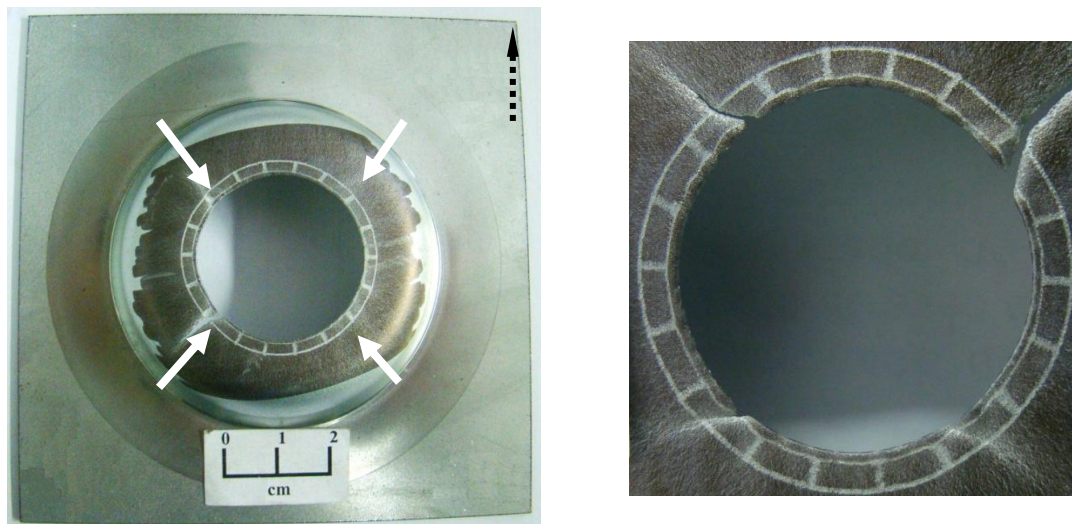
TABELA V.1 – Capacidade de expansão de furo em corpo de prova com e sem a aplicação da malha pelo método da micropercussão.

Material	Processo de confecção do furo	λ , sem malha		λ , com malha	
		Valor médio	Desvio Padrão	Valor médio	Desvio Padrão
IF	Usinagem	186,7%	5,2	187,8%	13,2%
	Puncionamento	142,0%	6,9	148,6%	3,6%
DP600	Usinagem	47,7%	0,9	44,8%	2,9%
	Puncionamento	37,9%	0,4	33,6%	2,6%

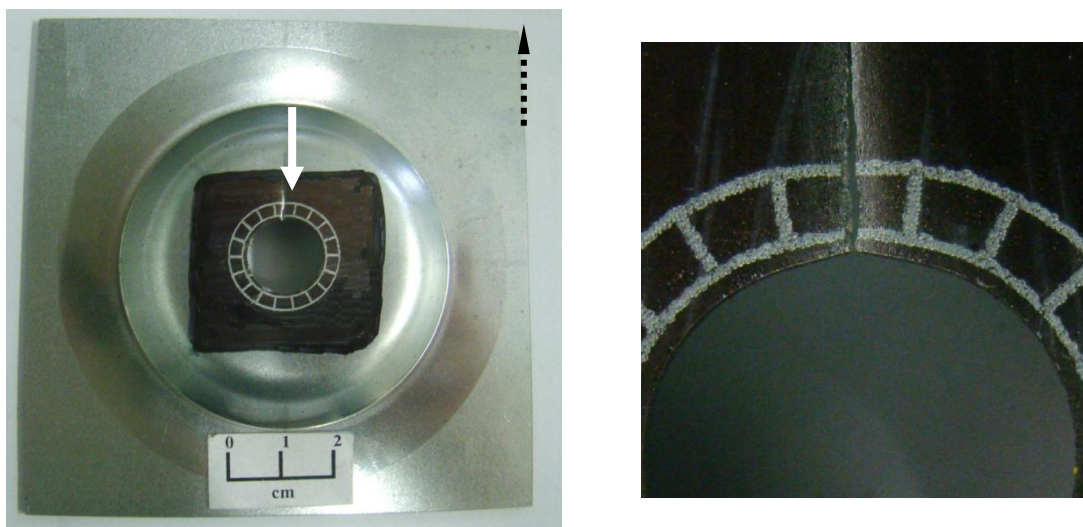
5.2.1. Aspecto dos corpos de prova estampados

Na figura 5.3 é mostrado o aspecto típico de corpos de prova estampados até a ruptura utilizando a metodologia proposta. Nota-se nestes corpos de prova, assim

como na maioria dos demais ensaiados, que as rupturas ocorreram a partir da borda dos furos em pontos de nucleação diferentes para cada um dos aços avaliados.



(a) Aço IF



(b) Aço DP600

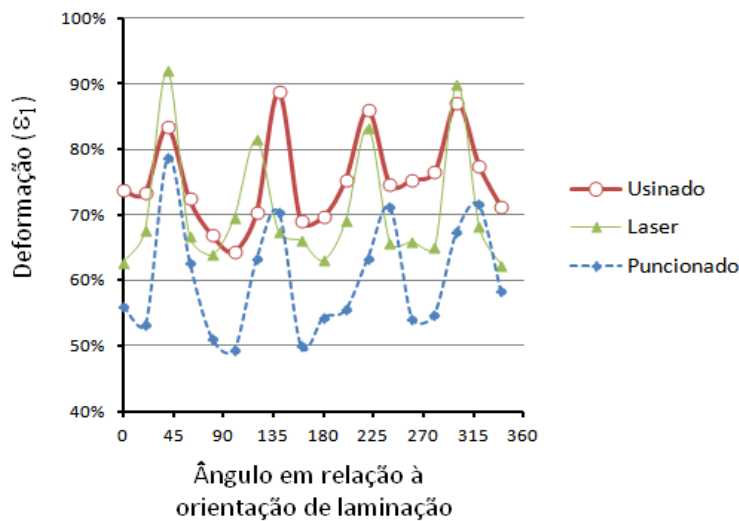
FIGURA 5.3 – Aspecto típico de corpos de prova estampados de acordo com a metodologia proposta e detalhe das trincas observadas. As setas claras indicam, nestes exemplos, os locais de ocorrência de trincas e estricção localizada. As setas escuras tracejadas indicam à direção de laminação das amostras.

5.2.2. Perfil de distribuição das deformações

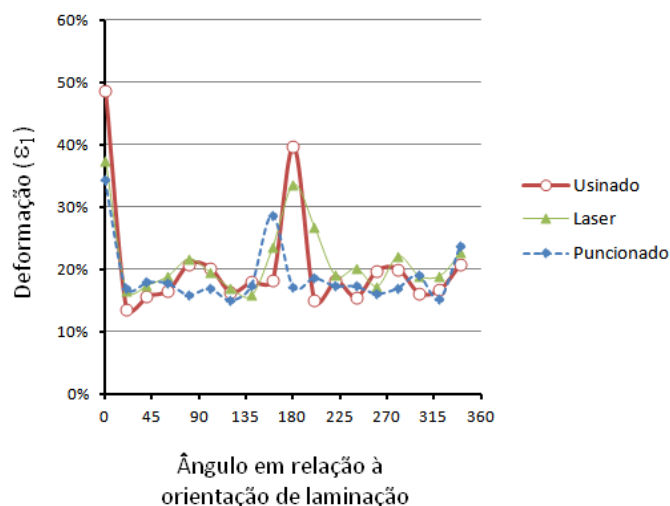
A utilização da malha circular permitiu a determinação do perfil de distribuição das deformações principais na região do furo expandido. Na figura 5.4, a maior

deformação principal (ε_1) foi plotada em função da sua posição no perímetro do furo, representada pelo ângulo relativo à orientação de laminação do corpo de prova. A distribuição heterogênea das amplitudes das deformações reproduziu o comportamento anisotrópico dos materiais avaliados. As posições das deformações mais elevadas, onde as rupturas ocorreram, no aço IF estavam mais frequentemente próximas às orientações 45° , 135° , 225° e 315° em relação à direção de laminação. No aço *Dual Phase*, essas direções foram 0° e 180° . Estas orientações coincidiram exatamente com aquelas onde o valor r dos aços foi mínimo (ver tabela IV.2), demonstrando concordância com correlação já descrita na literatura (ASANO, et al., 1994).

Um aspecto interessante verificado nestes resultados foi que no aço IF, embora as deformações em furos puncionados tenham sido inferiores às dos furos cortados a laser e usinados, a diferença entre as deformações nas regiões de ruptura e naquelas sem ruptura foi bastante similar, independentemente do processo de fabricação dos furos. Já no aço DP, esse gradiente de deformações no perímetro do furo é nitidamente influenciado pelo processo utilizado na fabricação do furo. No furo puncionado, as deformações nas regiões de rupturas não foram tão superiores às das regiões onde a ruptura não ocorreu como nos furos usinados e confeccionados por laser, sugerindo que, neste caso, o material não apresentou grande estricção localizada anteriormente à fratura.



(a) Aço IF



(b) Aço DP600

FIGURA 5.4 – Perfis típicos de distribuição das deformações ao longo do perímetro de furos expandidos dos aços IF e DP600.

5.2.3. Deformações máximas nas adjacências do furo

Os resultados das deformações principais (ε_1 e ε_2) na adjacência dos furos expandidos são mostrados nas figuras 5.5. e 5.6, relativos aos aços IF e DP600, respectivamente. Tais resultados foram obtidos de ensaios de quatro corpos de prova para cada método de fabricação do furo avaliado. A maior quantidade de pontos exibida pelos gráficos do aço IF é atribuída a este material ter apresentado, em geral, quatro sítios de aparecimento de trincas ao longo do perímetro do furo expandido, enquanto no aço

Dual Phase, a maioria dos corpos de prova apresentou duas regiões de iniciação e propagação de trinca. A partir dos resultados obtidos, nota-se claramente que as deformações medidas na fratura superaram as deformações adjacentes a elas.

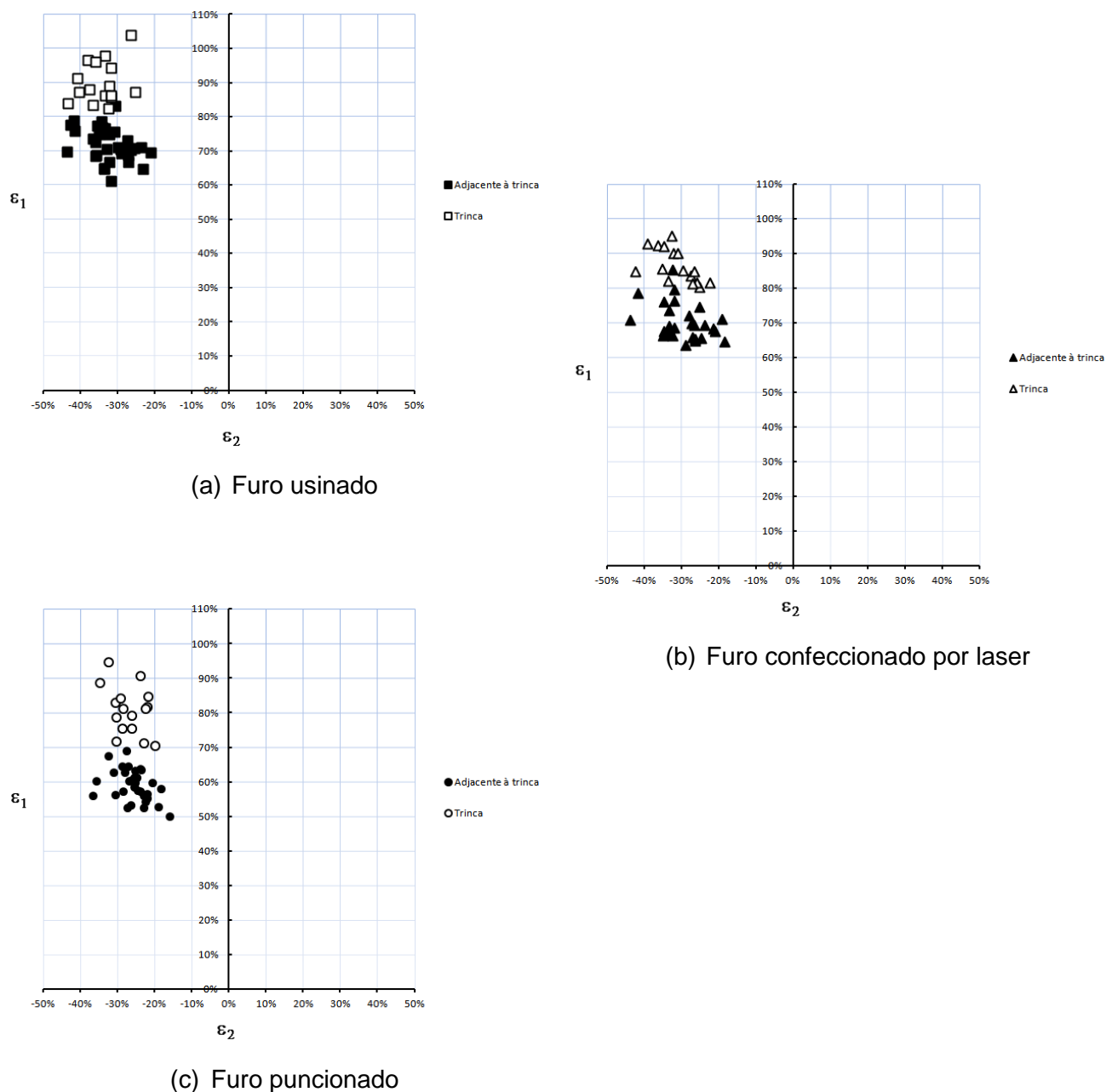
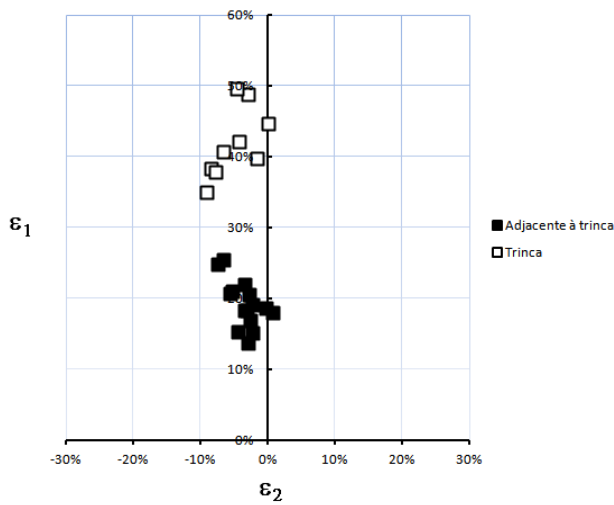
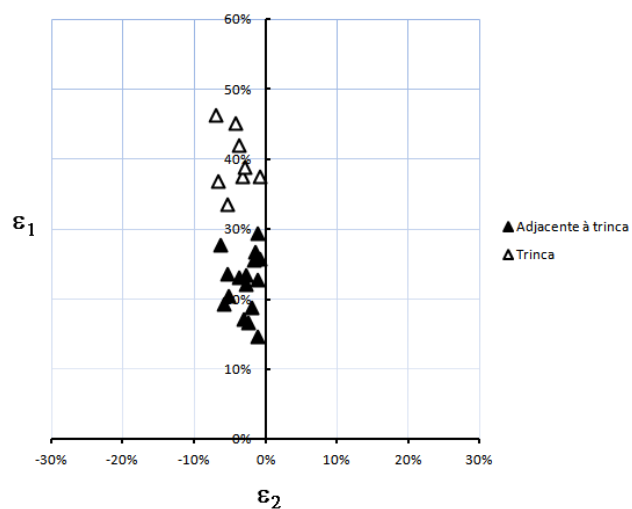


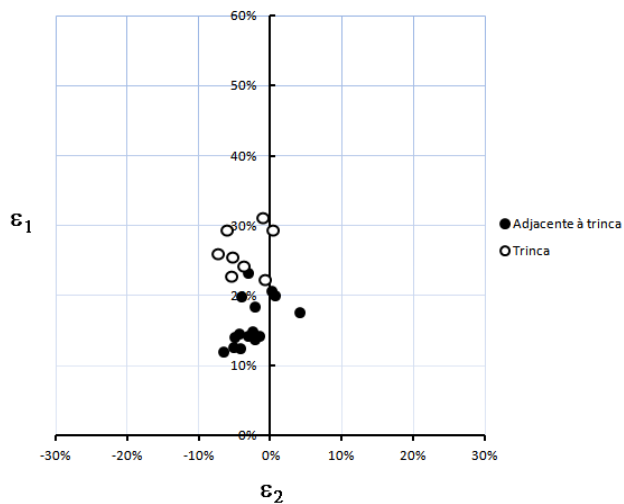
FIGURA 5.5 – Deformações críticas obtidas na região de trincas e adjacente a elas nas bordas de furo circular expandido a partir de corpos de prova fabricados com aço IF.



(a) Furo usinado



(b) Furo confeccionado por laser



(c) Furo puncionado

FIGURA 5.6 – Deformações críticas obtidas na região de trincas e adjacente a elas nas bordas de furo circular expandido a partir de corpos de prova fabricados com aço DP600.

Nas tabelas V.2 e V.3 e graficamente nas figuras 5.7 e 5.8 são mostrados os resultados médios das deformações exibidas anteriormente. Observou-se que, dentre os três processos de fabricação empregados, os furos com paredes usinadas tendem a suportar as maiores deformações até a ruptura, enquanto os furos puncionados resultam no pior desempenho, conforme seria esperado se compararmos com as capacidades de expansão de furo apresentadas na figura 5.1. Os furos produzidos por laser tiveram comportamento bastante similar às bordas usinadas, também repetindo o desempenho exibido nos ensaios de expansão de furo. Para o aço *Dual Phase*, nos furos puncionados foi observada uma menor diferença entre as deformações em ε_1 obtidas nas regiões de trincas e adjacente a elas (coluna $\Delta\varepsilon_1$ na tabela V.3) comparativamente aos furos usinados e cortados a laser, conforme já havia sido verificado na análise do perfil das deformações. No aço IF, tabela V.2, as diferenças entre as deformações em ε_1 na trinca e fora dela foram similares para os três métodos de acabamento de furos avaliados, bem como a dos furos usinados e cortados a laser do aço DP.

TABELA V.2 – Deformações máximas (valores médios) obtidas a partir dos ensaios realizados no aço IF avaliado.

Processo de confecção do furo	Posição do elemento da malha	ε_1	ε_2	$\Delta\varepsilon_1^{(1)}$
Usinagem	Trinca	89,8%	-34,3%	18,2%
	Adjacente à trinca	71,6%	-32,1%	
Laser	Trinca	86,2%	-31,2%	16,3%
	Adjacente à trinca	69,9%	-29,4%	
Puncionamento	Trinca	80,7%	-26,8%	21,7%
	Adjacente à trinca	59,0%	-25,5%	

⁽¹⁾ $\Delta\varepsilon_1$ – Diferença entre ε_1 obtidos na trinca e adjacente a ela.

TABELA V.3 – Deformações máximas (valores médios) obtidas a partir dos ensaios realizados no aço DP600 avaliado.

Processo de confecção do furo	Posição da célula	ε_1	ε_2	$\Delta\varepsilon_1$
Usinagem	Trinca	42,0%	-4,7%	22,9%
	Adjacente à trinca	19,1%	-3,4%	
Laser	Trinca	39,6%	-4,2%	17,4%
	Adjacente à trinca	22,2%	-2,8%	
Puncionamento	Trinca	26,3%	-3,6%	10,1%
	Adjacente à trinca	16,2%	-2,5%	

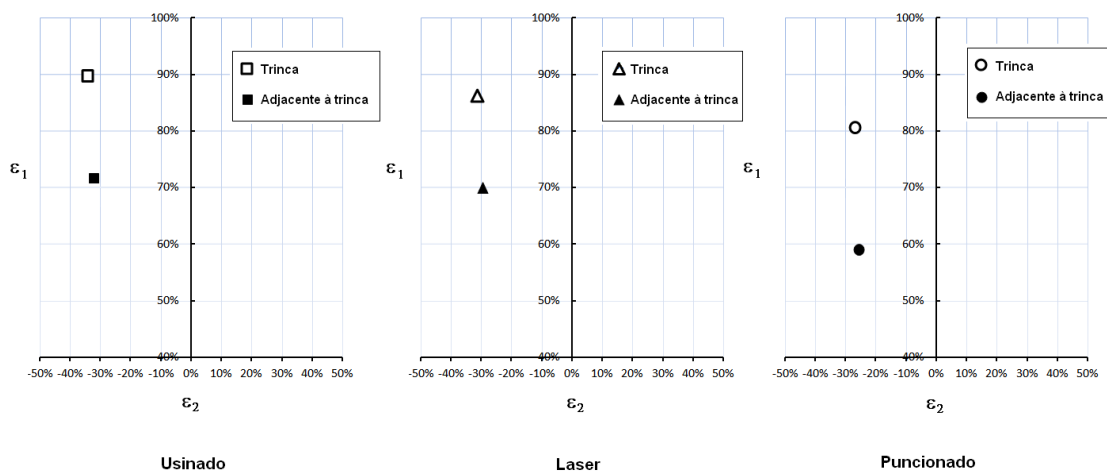


FIGURA 5.7 – Deformações médias obtidas para o aço IF plotadas no gráfico ε_1 X ε_2 .

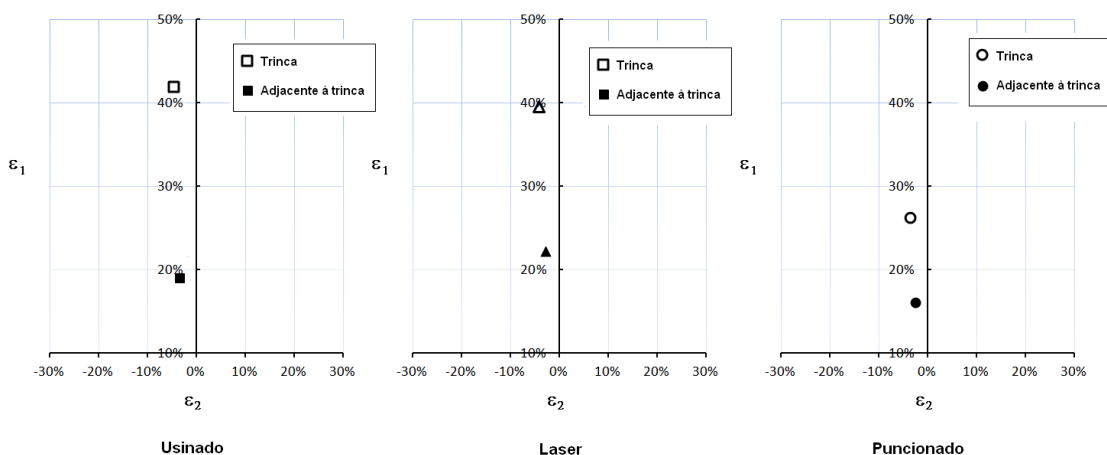


FIGURA 5.8 – Deformações médias obtidas para o aço DP600 plotadas no gráfico ε_1 X ε_2 .

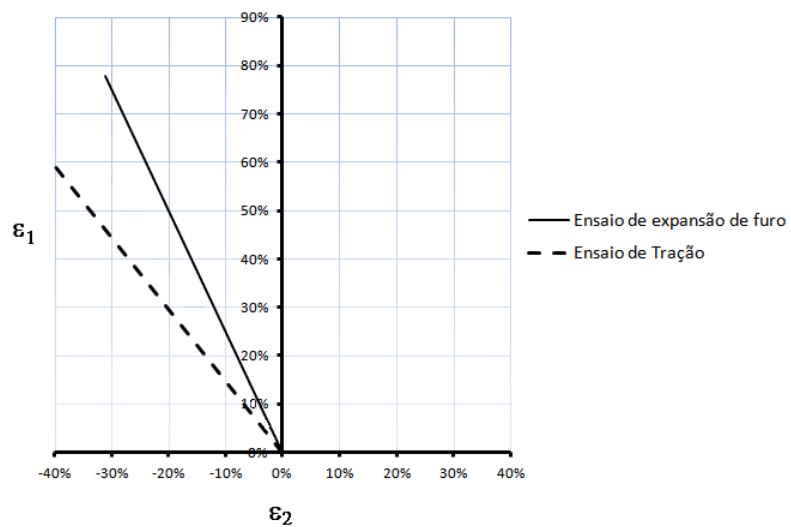
5.2.4. Trajetória de deformação

A partir das deformações principais obtidas no momento da ruptura constatou-se que a borda do furo seguiu, durante o ensaio, um caminho de deformações diferente para cada um dos aços avaliados. O aço IF exibiu relação entre ε_2 e ε_1 de aproximadamente 0,40, enquanto para o aço DP a razão entre as deformações principais foi entre 0,15 e 0,20, ou seja, as bordas dos furos do aço IF seguiram modos de deformação mais próximos de tração uniaxial do que o aço DP600, que se aproximou mais do estado plano de deformação.

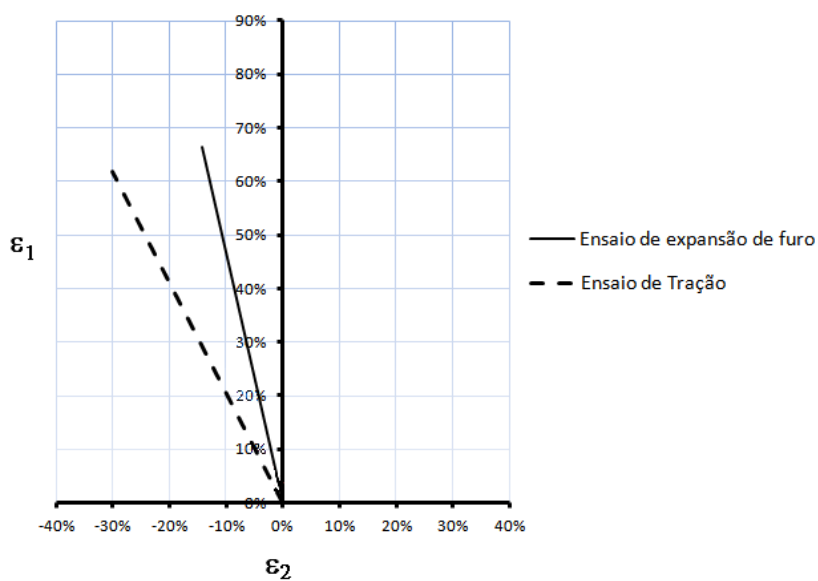
Nitta et al. (2009) e Col et al. (2008) citam que a trajetória de deformação típica em regiões submetidas a estiramento de flange deve ser similar àquela encontrada em ensaios em tração, ou seja, o estado uniaxial de tração, onde ε_2 se relaciona com ε_1 de acordo com a equação 5.1, sendo o valor r o coeficiente de anisotropia do material.

$$\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = -\frac{r}{r+1} \quad (5.1)$$

Utilizando-se os coeficientes de anisotropia normal (\bar{r}) dos aços analisados (ver tabela IV.2), a razão entre as deformações calculada seria de 0,67 e 0,48, respectivamente para os aços IF e DP600. A figura 5.9 ilustra a trajetória de deformação, estimada a partir das deformações medidas na região de fratura, na adjacência do furo dos aços submetidos aos ensaios físicos e, para comparação, o caminho de deformação seguida em ensaios de tração, determinado de acordo com a equação acima. Conforme se observa, em nenhum dos aços avaliados foi verificada a mesma relação das deformações encontrada no ensaio de tração. De acordo com Col et al. (2008) e Chen et al. (2008), em ensaios de expansão de furos em que o punção plano é utilizado, conforme a região analisada se afasta da periferia do furo o modo de deformação vai gradualmente do estado de tração uniaxial para o plano de deformação. No presente estudo, é possível que a posição da malha impressa em relação ao furo (distante por aproximadamente 1,0 mm da borda) não tenha ficado próxima o suficiente para representar as deformações realmente vigentes na borda do material. Além disso, pode ser que o tamanho da malha na direção radial, 2,50 mm, tenha sido muito elevado e, conseqüentemente, pouco sensível ao gradiente de deformação local.



(a) Aço IF



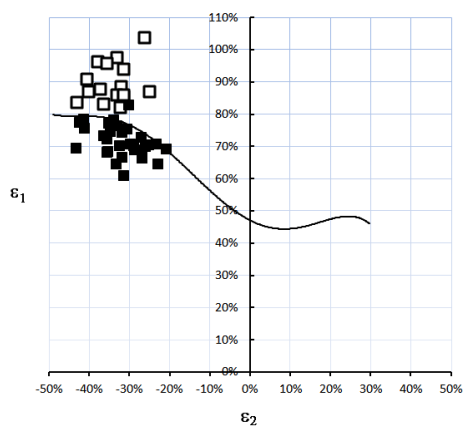
(b) Aço DP600

FIGURA 5.9 – Trajetórias de deformações obtidas na região de bordas de furos submetidos aos ensaios físicos, simulação numérica e prevista para ensaios de tração em função do valor r dos materiais.

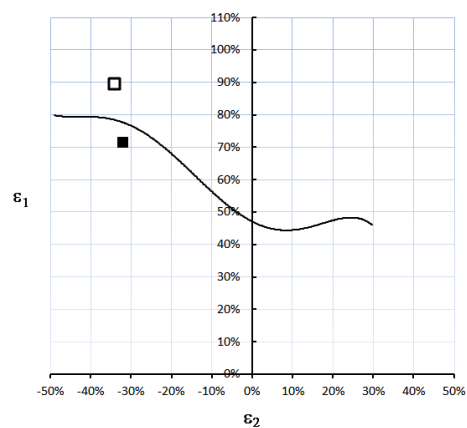
5.2.5. Diagrama Limite de Conformação

Nas figuras 5.10 e 5.11 os pares de deformações individuais e médio são plotados junto às CLCs dos aços IF e DP600. Nestes gráficos, os marcadores vazios correspondem às deformações em regiões de trincas e os marcadores cheios em regiões adjacentes a elas. Em relação ao aço IF, pode-se inferir que a CLC está prevendo corretamente a ruptura para as três condições de acabamento de furo avaliado. Nota-se que a curva passa entre as deformações onde a rupturas ocorreram e a região adjacente a elas. Para o aço DP600, um comportamento similar foi observado nos furos usinados e fabricados a laser. No furo puncionado, entretanto, as deformações médias na trinca e próxima a ela ficaram aproximadamente 7,0% e 17,4%, respectivamente, abaixo da CLC em relação ao eixo ε_1 . A perda na ductilidade local em função do corte por puncionamento, calculada a partir da relação com a deformação média obtida nos furos usinados, foi de aproximadamente 37%.

Uma possível solução para considerar a perda da ductilidade ao corte na CLC, e possibilitar o seu uso como critério de falha para este modo de estampagem, seria deslocá-la verticalmente para baixo no gráfico $\varepsilon_1 \times \varepsilon_2$, até que coincidissem com a deformação média obtida na região da fratura, conforme mostrado na figura 5.12. Deve-se salientar, contudo, que a CLC modificada somente poderia ser utilizada em avaliações de regiões de bordas da peça quando elas são submetidas a esforços de estiramento, sendo a CLC original empregada para os outros modos de estampagem.

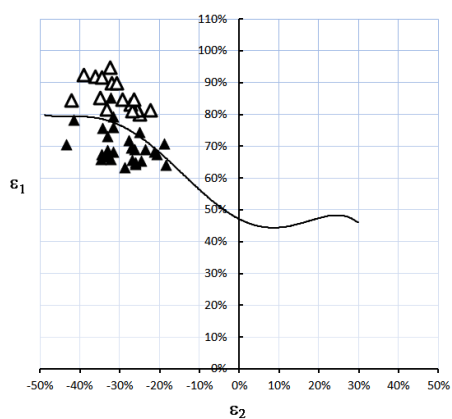


Resultados Individuais

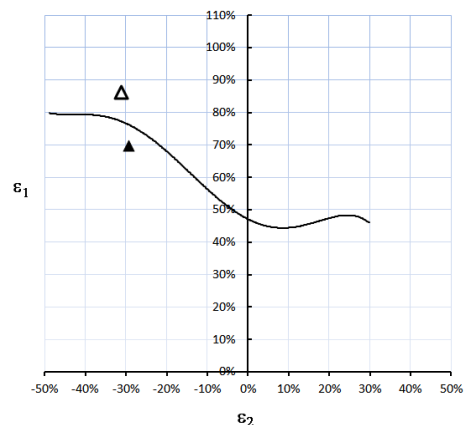


Valor médio

(a) Furo usinado

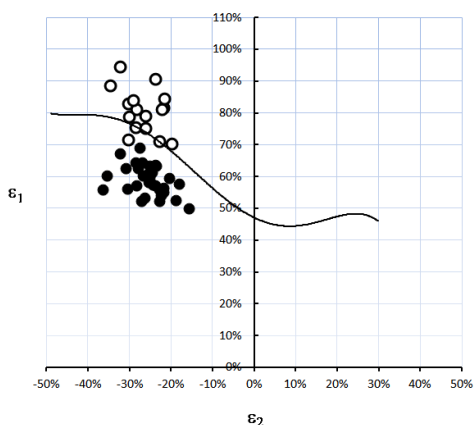


Resultados Individuais

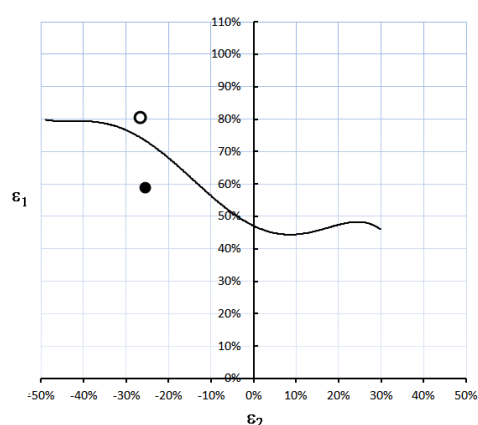


Valor médio

(b) Furo confeccionado por laser



Resultados Individuais



Valor médio

(c) Furo puncionado

FIGURA 5.10 – Deformações críticas, individuais e médias, obtidas na região de trincas (marcadores vazios) e adjacente a elas (marcadores cheios) nas bordas de furo circular expandido a partir de corpos de prova fabricados com aço IF.

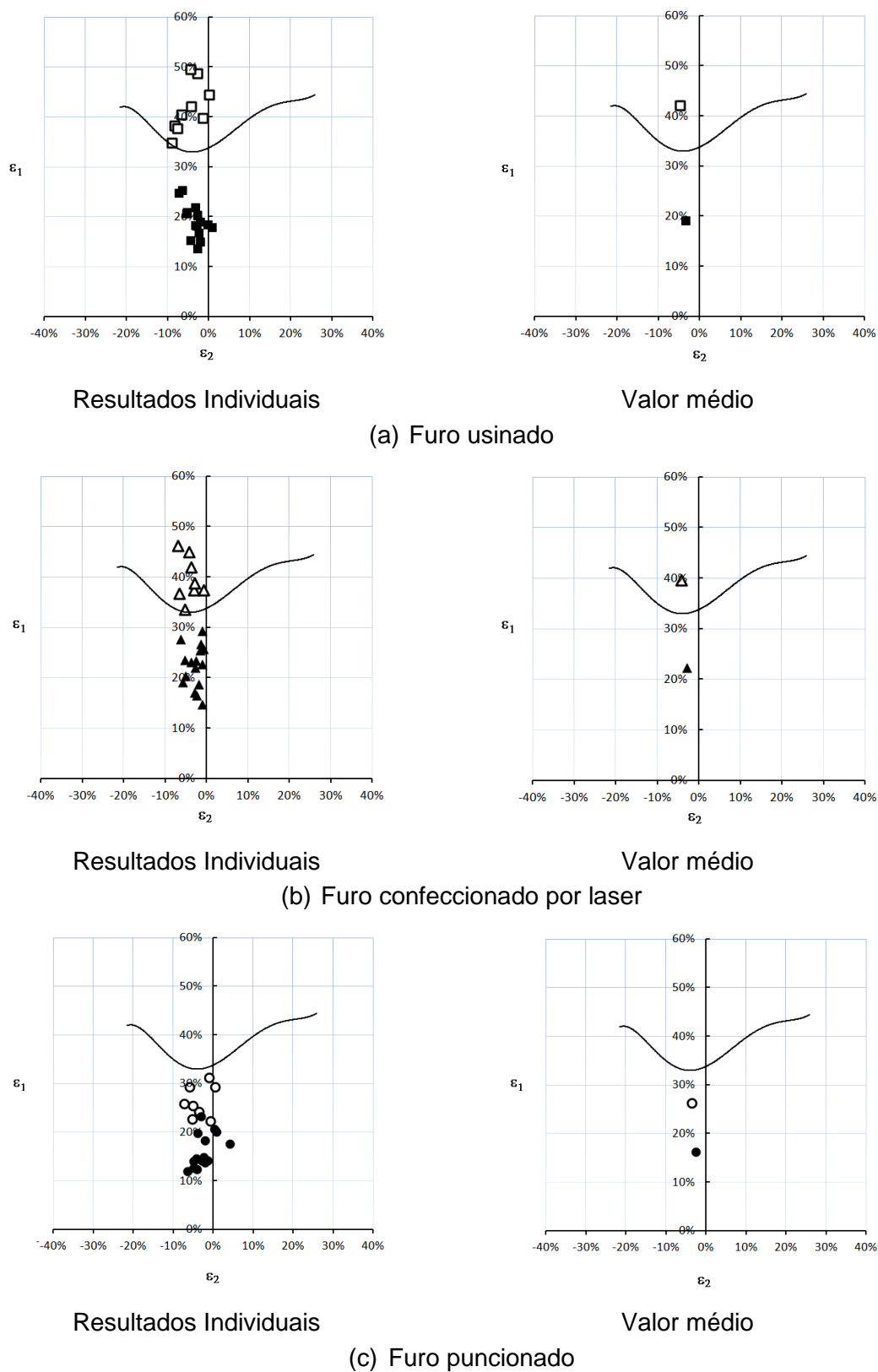


FIGURA 5.11 – Deformações críticas, individuais e médias, obtidas na região de trincas (marcadores vazios) e adjacente a elas (marcadores cheios) nas bordas de furo circular expandido a partir de corpos de prova fabricados com aço DP600.

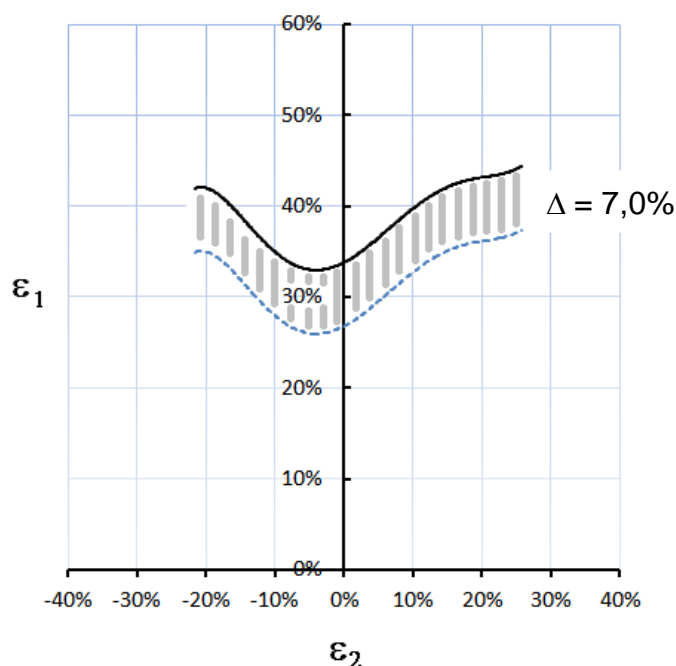


FIGURA 5.12 – Curvas Limite de Conformação original (linha cheia) e a deslocada verticalmente – CLC modificada (linha pontilhada) até a deformação média obtida na fratura, a partir dos ensaios do aço DP600 avaliado.

5.2.6. Cálculo das deformações críticas a partir da capacidade de expansão de furo

Supondo que a capacidade de expansão do furo (λ) no ensaio proposto é uma medida direta da deformação circunferencial da borda no momento da fratura (ϵ_1), no gráfico da figura 5.13 são plotadas as deformações médias na região de fratura, em função da sua capacidade de expansão de furo dos corpos de prova ensaiados. A nuvem de pontos é composta por resultados individuais dos corpos de prova dos aços IF e DP600, obtidos de ensaios de furos puncionados. No início do ensaio os valores das variáveis são iguais a zero.

Embora a quantidade de pontos no gráfico possa ser, a princípio, considerada insuficiente para legitimar a relação linear apresentada, nota-se que é possível, realizando uma maior quantidade de ensaios em diferentes tipos de aços e espessuras, identificar a máxima deformação no momento da fratura da borda estirada somente conhecendo o valor de λ , medido de acordo com o ensaio KWI. Neste caso, essa deformação poderia ser utilizada para o levantamento da CLC modificada, similar à mostrada na figura 5.12.

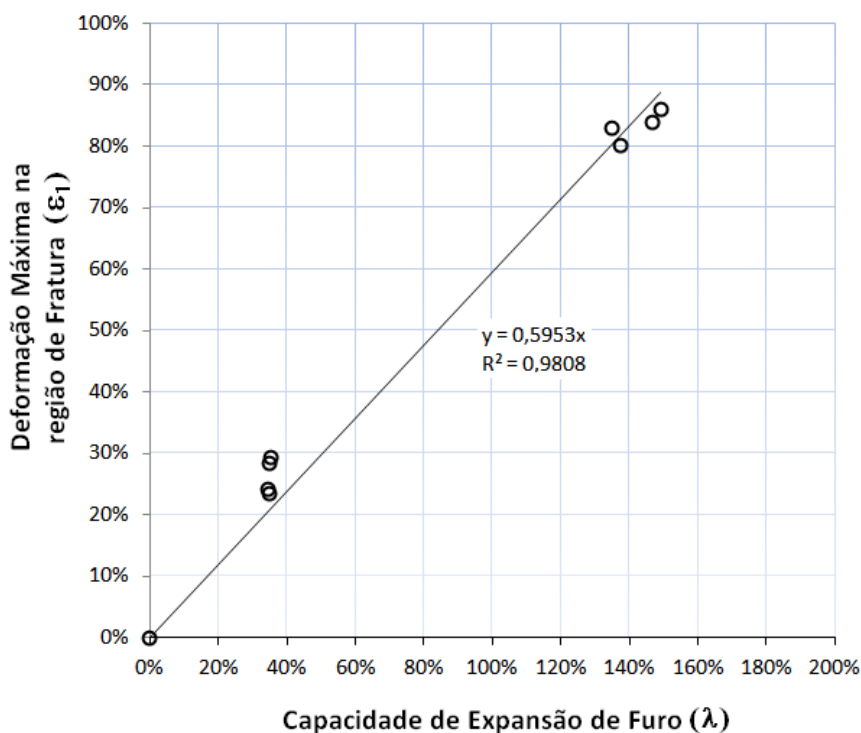


FIGURA 5.13 – Relação entre a deformação média máxima obtida na região de fratura dos corpos de prova e a sua capacidade de expansão de furo, determinada a partir do ensaio KWI.

5.2.7. Considerações finais sobre o método

A seguir são mencionadas algumas vantagens e desvantagens observadas na metodologia de ensaio desenvolvida.

a) Vantagens

- A utilização da malha circular permite que seja determinado o perfil de distribuição das deformações circunferenciais na periferia do furo expandido. Tais informações podem ser utilizadas para melhor entendimento do comportamento dos aços AHSS quanto ao desempenho abaixo do previsto pelas CLCs desses materiais.

- As deformações obtidas para o aço DP600 avaliado apresentaram resultados esperados, condizentes com a literatura, ou seja, a CLC convencional não conseguiu prever rupturas em bordas preparadas por processo de puncionamento. Para os demais métodos de fabricação de furos, usinagem e laser, bem como para o aço IF avaliado, a CLC representou precisamente a transição entre as regiões com e sem trincas em bordas estiradas.

- A metodologia permitirá a determinação da deformação máxima no instante da fratura a partir do valor de λ obtida no ensaio KWI, uma vez que, sendo estas variáveis obtidas no mesmo ensaio, verificou-se ser possível estabelecer uma correlação existente entre os resultados obtidos no ensaio da metodologia proposta e a capacidade de expansão do furo.

b) Desvantagens

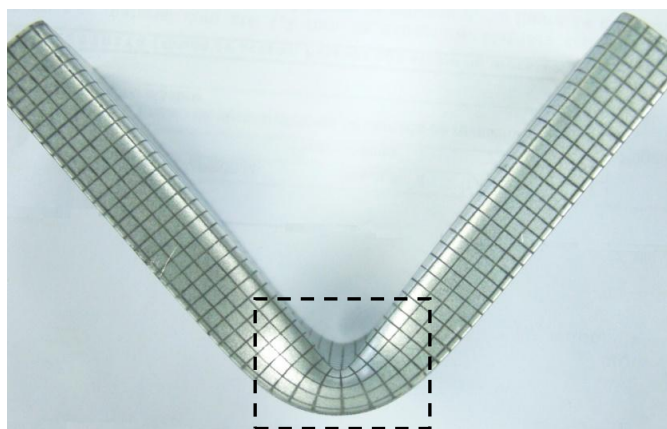
- Como a medição das deformações foi feita sem utilizar recursos dos sistemas óticos de medição, tais como o ASAME e o AutoGrid, reconhecidos por sua excelente precisão, é possível que a subjetividade do operador na definição do tamanho final das linhas da malha deformada possa influenciar os resultados obtidos.

- Suspeita-se que as linhas da grade ligeiramente afastadas da periferia do furo possam não reproduzir o caminho de deformação esperado do material sob esforços de estiramento de borda (estado uniaxial de tração). É provável que, utilizando uma malha mais ajustada à periferia do furo ou um tamanho de malha reduzido, os resultados obtidos possam expressar mais precisamente a deformação local do material. Sob esta ótica, ajustes precisarão ser feitos na metodologia para que os resultados do ensaio possam se tornar mais confiáveis.

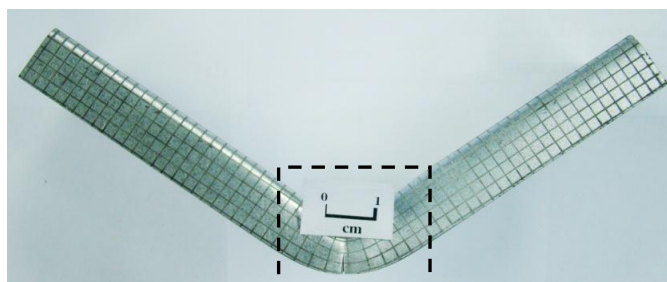
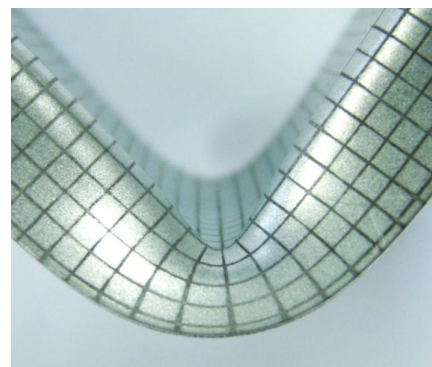
5.4. Método do Duplo Dobramento

5.4.1. Aspecto dos corpos de prova conformados

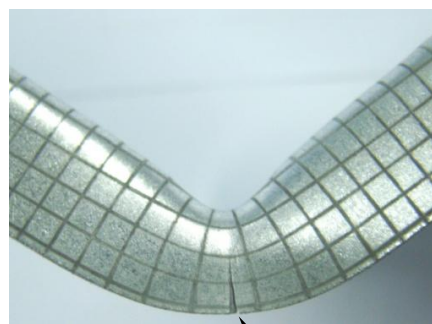
O aspecto típico ao final do segundo dobramento dos corpos de prova do aço DP600, para as três condições utilizadas de fabricação da borda, bem como o detalhe da região submetida aos maiores esforços de estiramento são mostrados na figura 5.14. Neste aço, só surgiram trincas nos corpos de prova com bordas puncionadas ou cortadas a laser, não tendo ocorrido em bordas confeccionadas por usinagem. Para o aço IF, os corpos de prova preparados a partir das três condições de acabamento não apresentaram trincas nem estrições. Porém, nestes casos foi observado que nos instantes finais do ensaio, quando o ângulo de dobramento do corpo de prova já era mais acentuado, a borda do flange sofria um encurvamento lateral e não ocorria mais nenhuma deformação da malha na região adjacente à borda e, portanto, nenhuma trinca, tal qual mostrado nos exemplos da figura 5.15. Vários experimentos foram realizados para que este comportamento fosse evitado. Foram feitas alterações no tamanho do flange, na distância entre os rolos de apoio, no ângulo de dobramento da chapa no primeiro dobramento do corpo de prova e alterações no diâmetro do punção. Em nenhuma das experiências realizadas, contudo, houve ocorrência de trincas nos corpos de prova.



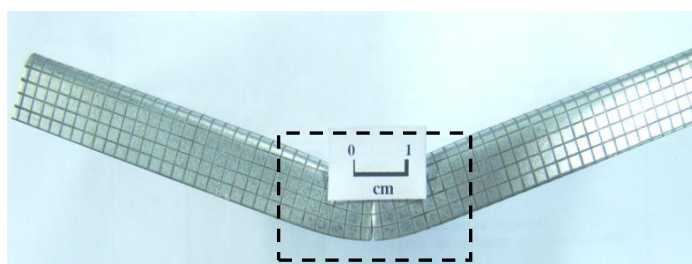
(a) Borda usinada



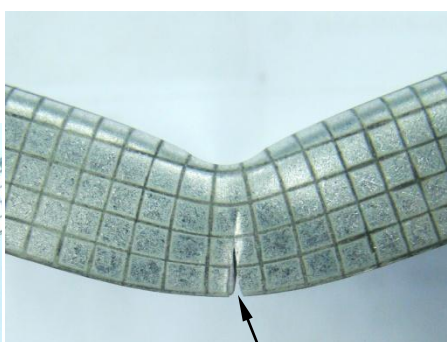
(b) Borda cortada por laser



Trinca



(c) Borda puncionada



Trinca

FIGURA 5.14 – Aspecto geral e detalhe do flange dos corpos de prova após o segundo dobramento do aço DP600 avaliado.

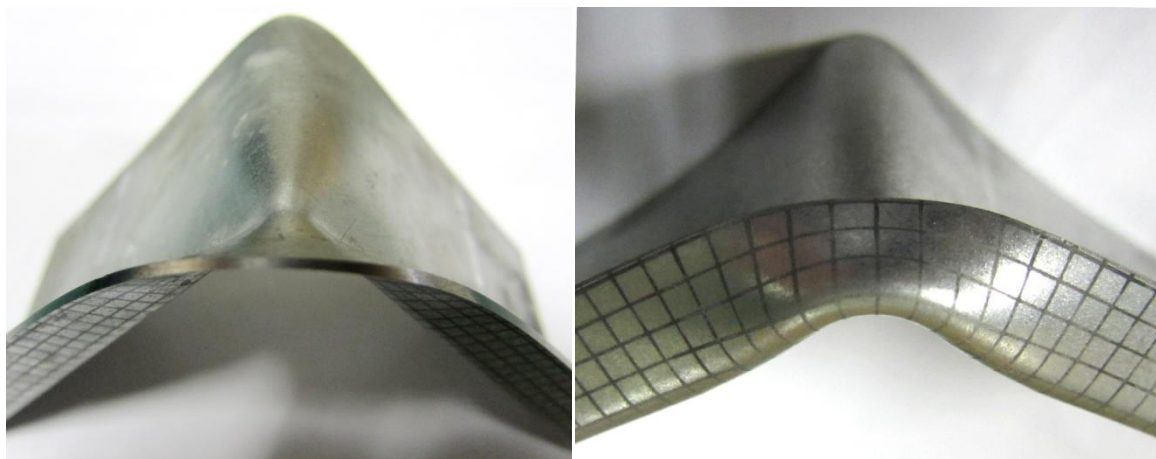


FIGURA 5.15 – Exemplos do aspecto típico do encurvamento da borda do flange observado durante o ensaio do segundo dobramento. Este comportamento foi observado no aço IF em todas as condições de acabamento de borda e na borda usinada do aço DP600.

5.4.2. Deformações máximas nas adjacências da borda com trinca

Os resultados dos ensaios realizados até a ruptura, representados pelas maiores e menores deformações dos corpos de prova de aço *Dual Phase*, com bordas puncionadas e cortadas a laser, são apresentados na figura 5.16. Os resultados apresentados são referentes a três corpos de prova por condição de acabamento de borda utilizada. É importante destacar que o sistema de medição das deformações adotado neste método foi o ASAME. Este sistema permite que a fratura do corpo de prova seja identificada durante o processo de definição da região da malha a ser avaliada e, posteriormente, as suas dimensões sejam eliminadas para o cálculo das deformações.

Nota-se que, em comparação com o Método da Malha Circular, as deformações em ε_2 foram maiores, deslocando a nuvem de pontos mais para a esquerda do gráfico $\varepsilon_1 \times \varepsilon_2$. Comparando o desempenho das bordas preparadas pelas duas técnicas de fabricação, observa-se que os flanges cortados a laser apresentaram maior capacidade de deformação até a ruptura do que aqueles com bordas cortadas por tesoura guilhotina, reproduzindo o mesmo comportamento observado na outra metodologia estudada. Notou-se ainda uma maior dispersão nas deformações críticas, tanto em ε_1 como em ε_2 das bordas cortadas a laser em relação à borda cisalhada. Os resultados médios das deformações exibidas na figura 5.16 são mostrados na tabela V.4 e graficamente na figura 5.17.

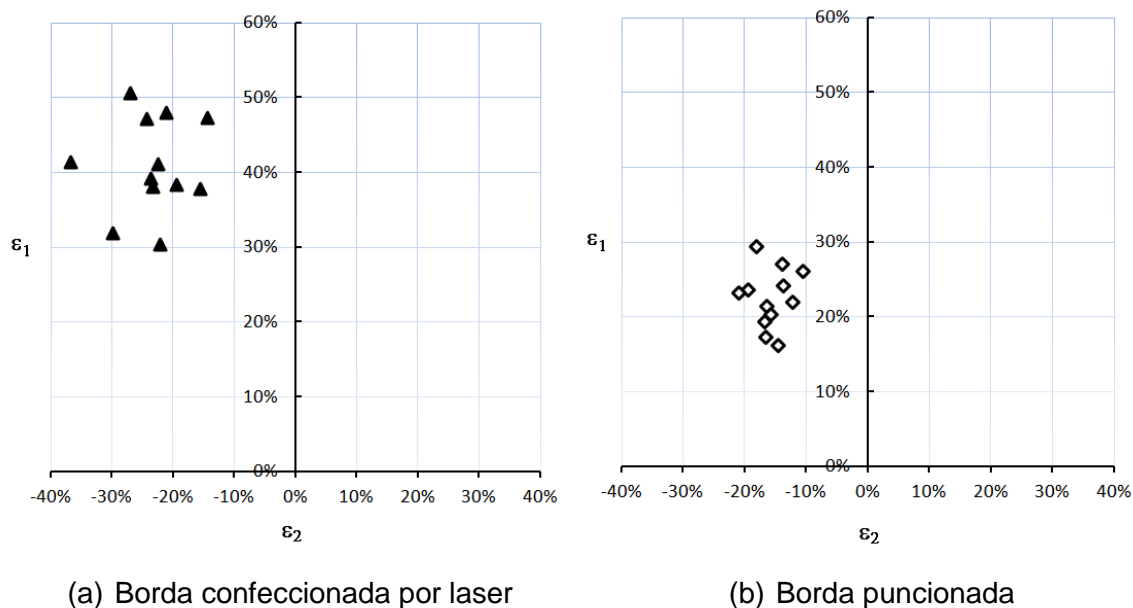


FIGURA 5.16 – Deformações máximas obtidas na região de fratura dos corpos de prova do aço DP600 submetidos aos ensaios de dobramento.

TABELA V.4 – Deformações máximas (valores médios) obtidas a partir dos ensaios realizados no aço DP avaliado.

Processo de confecção da borda	ϵ_1	ϵ_2
Laser	40,9%	-23,4%
Puncionamento	22,5%	-15,7%

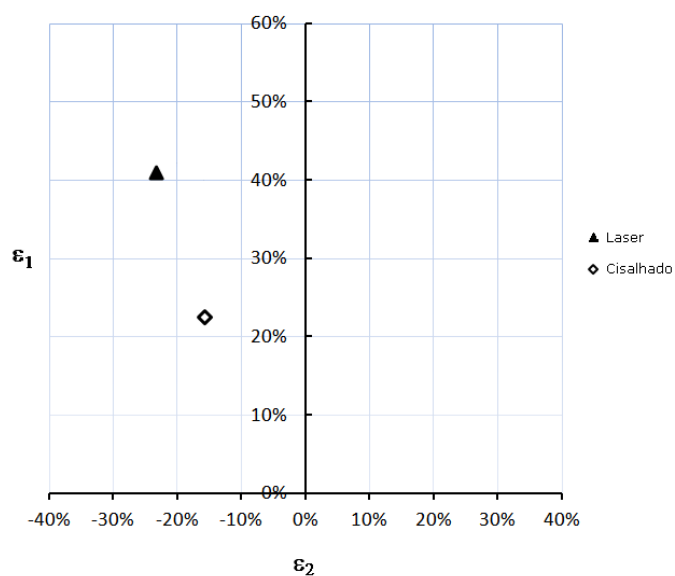


FIGURA 5.17 – Deformações médias obtidas em região de trinca de bordas confeccionadas por laser e a partir de esforços de cisalhamento.

5.4.3. Trajetória de deformação

A trajetória de deformação obtida no ensaio de duplo dobramento é mostrada na figura 5.18, comparando-a ao caminho de deformação estimado do aço DP600 durante o ensaio em tração. Dos métodos de ensaios avaliados, este foi o que apresentou relação entre ε_2 e ε_1 mais próxima do estado uniaxial de tração. Acredita-se que nos ensaios de expansão de furos com a utilização de punção de cabeça chata, como nos ensaios com furos circular, as deformações em ε_2 na região da borda são limitadas pelas regiões mais afastadas do corpo de prova, que também estão sendo deformadas durante o ensaio, porém sob outros modos de deformação.

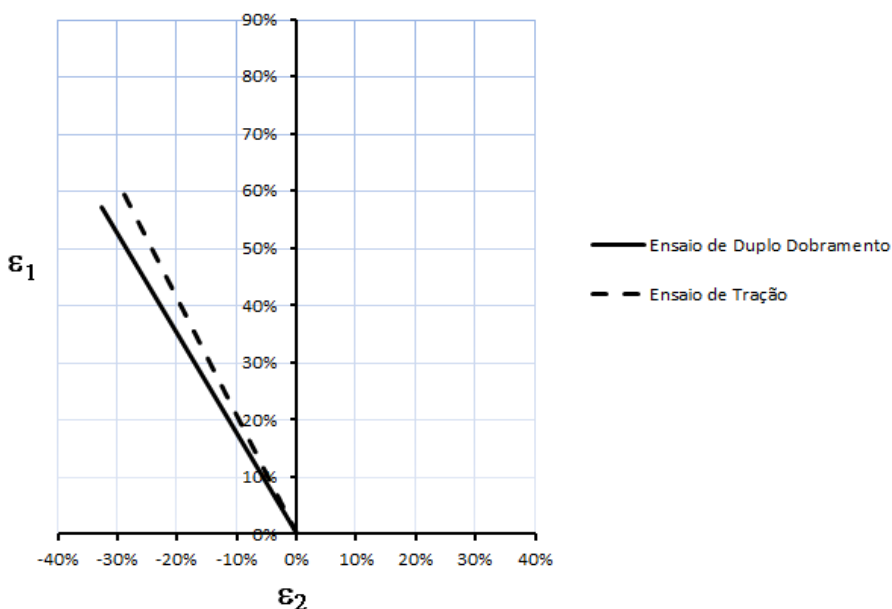
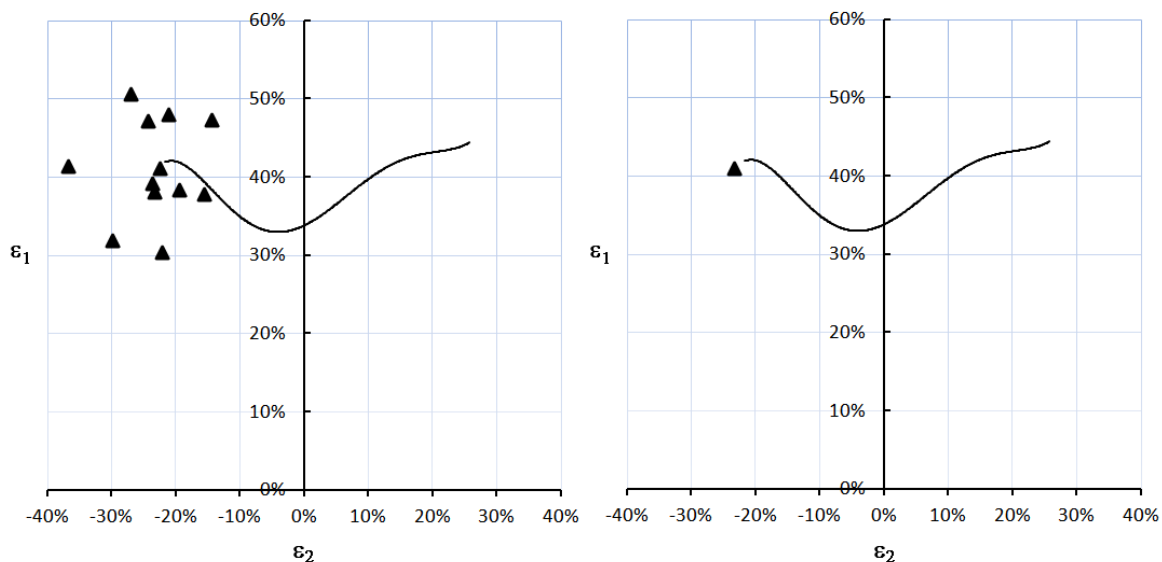


FIGURA 5.18 – Trajetórias deformações obtidos no ensaio de duplo dobramento e em ensaio de tração do aço DP600 avaliado.

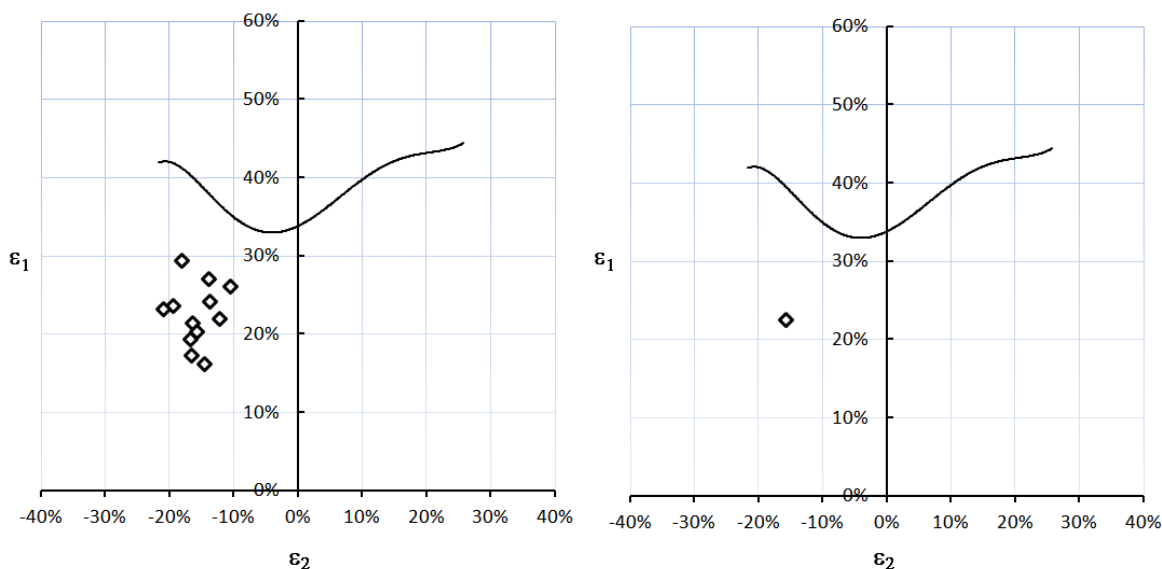
5.4.4. Diagrama Limite de Conformação

Na figura 5.19 é mostrada a posição dos pares de deformações na região de ruptura em relação à CLC do aço *Dual Phase* avaliado. Nota-se que as deformações máximas na borda cortada a laser, embora tenham oscilado entre a CLC, apresentaram um valor médio praticamente coincidente com a curva. No tocante à borda puncionada, as deformações obtidas ficaram consideravelmente abaixo da CLC, aproximadamente 17% distantes da capacidade máxima prevista em termos de ε_1 . Em relação ao desempenho da borda cortada a laser, o material exibiu uma perda de ductilidade de

cerca de 50% devido ao corte por puncionamento. Na figura 5.20 é mostrado o aspecto da CLC original e após ela ter sido deslocada verticalmente até a deformação média obtida na região de ruptura de bordas puncionadas.



(a) Borda confeccionada por laser



(b) Borda puncionada

FIGURA 5.19 – Diagrama limite de conformação das regiões de trincas dos corpos de prova fabricados a partir do aço DP600 avaliado, submetidos aos ensaios de dobramento até a ocorrência de ruptura.

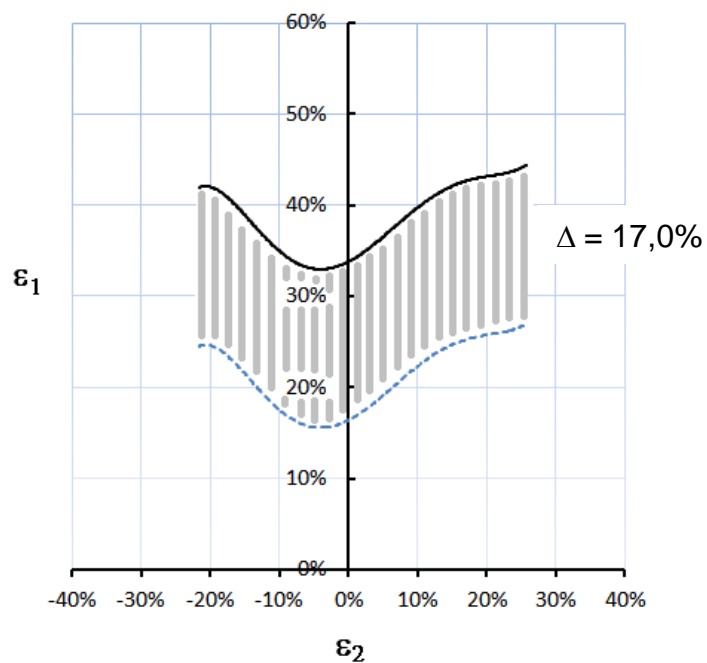


FIGURA 5.20 – Curvas Limite de Conformação original (linha cheia) e a deslocada verticalmente (linha pontilhada) até a deformação média obtida na região de trincas, a partir dos ensaios do aço DP600 avaliado.

5.4.5. Considerações finais sobre o método

As principais vantagens e desvantagens identificadas para a metodologia de ensaio desenvolvida foram as seguintes:

a) Vantagens

- Comparado ao Método da Malha Circular, a trajetória das deformações na borda estirada obtida nesta metodologia foi mais similar à do estado uniaxial de tração;
- A medição das deformações foi realizada utilizando o sistema ASAME, que possui boa precisão.

b) Desvantagens

- Aparentemente, o surgimento de trincas nos corpos de prova ensaiados, que é um indicativo de que o ensaio foi bem sucedido na determinação da capacidade de estiramento de flange do material, somente irá ocorrer em aços de mais baixa conformabilidade e em bordas confeccionadas por puncionamento ou laser, o que restringe a utilização do método. Contudo, ele atenderá ao objetivo, visto que a limitação de utilização da CLC ocorre somente em aços de mais elevada resistência mecânica e baixa estampabilidade em peças com bordas puncionadas.

5.5. Comparação entre os métodos

Os dois métodos experimentais utilizados neste estudo para a avaliação da capacidade de estiramento do aço DP600 resultaram em distintas trajetórias de deformação na região das bordas puncionadas/cisalhadas. Conforme se observa na figura 5.21, a trajetória observada nos ensaios de Duplo Dobramento foi a que mais se aproximou da linha teórica para o material submetido ao estado de tração uniaxial. Esse comportamento sugere que os resultados obtidos por esse método devem ser mais confiáveis do que os da Malha Circular, considerando o consenso existente na literatura de que em bordas estiradas o estado de deformações é o mesmo da tração uniaxial.

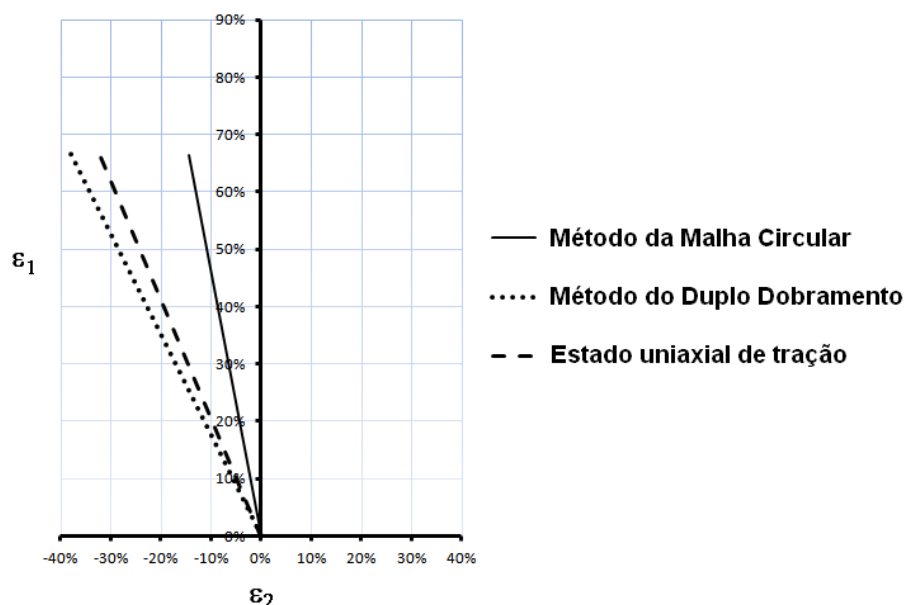


FIGURA 5.21 – Trajetórias de deformações obtidas nos ensaios da Malha Circular e do Duplo Dobramento, para a condição de bordas puncionadas/cisalhadas, comparadas com a condição teórica de tração uniaxial para o aço DP600 avaliado.

A exemplo das trajetórias de deformação, as Curvas Limite de Conformação modificadas com base nos resultados obtidos pelos dois métodos utilizados também não coincidiram, como pode ser visto na figura 5.22. Considerando que os valores de deformação obtidos nos dois métodos não tenham sido influenciados pelas técnicas de medição utilizadas, a diferença na posição das CLCs obtidas pode estar ligada ao fato de o gradiente de deformação no perímetro da borda do flange no corpo de prova submetido ao ensaio do Duplo Dobramento ser mais severo em relação à borda do

furo circular no ensaio da Malha Circular. Segundo alguns autores (HIWATASHI e SAKUMA, 2000; NITTA et al., 2009), a distribuição das maiores deformações (ϵ_1) tende a ser homogênea ao longo da borda de um furo em expansão. Já no estiramento de um flange, as maiores deformações concentram-se em uma única região, o que pode favorecer a ocorrência precoce da ruptura. Portanto, a CLC modificada com base nos resultados do ensaio da Malha Circular tende a ser mais conservadora, ficando abaixo da CLC modificada a partir dos resultados do método de Duplo Dobramento, como se viu na figura 5.22. Apesar dessa tendência, acredita-se que a seleção do método mais adequado para a previsão de rupturas em bordas de peças reais, com geometrias mais complexas, deve ser feita a partir de testes realizados nas próprias peças.

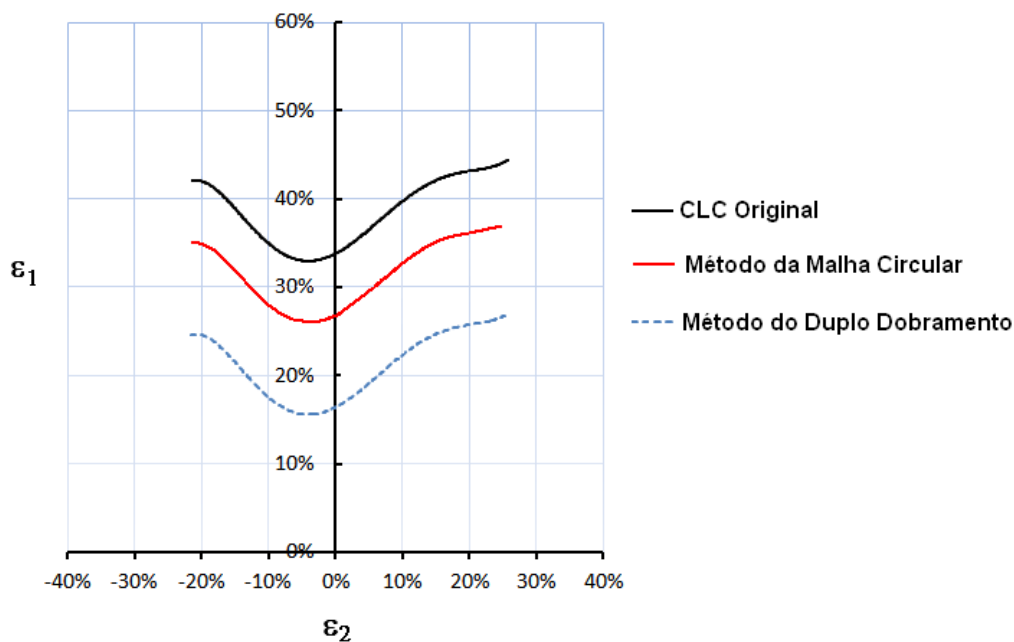


FIGURA 5.22 – Curva Limite de Conformação (CLC) original do aço DP600, obtida a partir da técnica de Nakazima, comparada com as CLCs modificadas com base nos resultados dos métodos da Malha Circular e do Duplo Dobramento.

6. CONCLUSÕES

Método da Malha Circular

- A utilização da malha circular contornando o furo conformado permitiu que o perfil de distribuição das deformações principais na região da sua borda fosse determinado. Os locais das deformações mais elevadas, onde as rupturas ou estricções ocorreram, coincidiram, de uma forma geral, com a orientação do material que apresentou o menor valor r .
- O ensaio de estampagem e o método de medição das deformações utilizados mostraram-se adequados, visto que para o aço IF a CLC previu corretamente a ruptura a partir da borda do furo para as três condições de acabamento avaliadas. No aço DP600 avaliado, comportamento similar foi observado para os furos usinados e fabricados por laser. No furo puncionado, contudo, as deformações médias na região de trincas e adjacentes a elas ficaram entre 7,0% e 17,4% abaixo das deformações previstas pela CLC.
- No aço DP600, dentre os processos de fabricação de furos avaliados, o furo puncionado apresentou uma diferença de cerca de 10% entre as deformações em ϵ_1 obtidas na região de trincas e adjacente a elas, valor consideravelmente menor do que para furos usinados e cortados a laser (23% e 17%, respectivamente). Estes resultados sugerem que neste aço, em furos puncionados, não há estricção anterior à fratura ou, se ela ocorre, a redução localizada de espessura na região da trinca é menor do que nos furos usinados e fabricados a laser. Para o aço IF este comportamento não foi observado e o gradiente das deformações foi praticamente o mesmo nos furos confeccionados pelos três processos de fabricação utilizados.
- O processo de micropercussão, aplicado na impressão da malha circular utilizada para a medição das deformações em bordas de furos, não teve efeito no comportamento em estampagem dos aços avaliados. A capacidade de expansão de furos em corpos de prova ensaiados sem a aplicação da malha foi similar à obtida em ensaios de corpos de prova em que ela foi aplicada.
- Verificou-se ser possível estabelecer uma correlação entre os resultados obtidos no ensaio proposto e a capacidade de expansão de furo. Desta forma, há a possibilidade de determinação da máxima deformação no momento da fratura conhecendo-se somente a capacidade de expansão de furo, medida a partir do ensaio KWI.

Método do Duplo Dobramento

- A realização bem sucedida do ensaio de dobramento, ou seja, o desenvolvimento de deformações até atingir a ruptura, somente ocorreu no aço DP600, em corpos de prova cujas bordas foram confeccionadas por laser e por cisalhamento. Em corpos de prova deste aço com bordas usinadas e para as três condições de acabamento de borda avaliadas para o aço IF, os corpos de prova não exibiram trincas ou estricção localizada durante o ensaio.
- Em comparação com o Método da Malha Circular, as deformações em ε_2 do aço DP600 foram maiores em módulo e, conseqüentemente, mais próximas da região do estado uniaxial de tração do gráfico $\varepsilon_1 \times \varepsilon_2$.
- Conforme esperado, as bordas cortadas com laser apresentaram maior capacidade de deformação até a ruptura do que as bordas cortadas por tesoura guilhotina (cisalhamento).
- As deformações obtidas na região de fratura das bordas cortadas por laser ficaram próximas da CLC, tendo o valor médio praticamente coincidido com ela. Já as deformações máximas obtidas nas bordas cisalhadas ficaram 17% abaixo da CLC.

Considerações finais

- As duas metodologias de ensaio avaliadas permitiram a previsão de falha em bordas a partir de análise das deformações medidas, levando em consideração a qualidade da borda submetida aos esforços de estampagem.
- O Método do Duplo Dobramento gerou deformações cuja relação entre as deformações principais foi similar à do estado uniaxial de tração, conforme seria esperado para esforços típicos de estiramento de flange de acordo com citações da literatura. Porém, a utilização do método está, a princípio, limitada aos aços AHSS e mesmo assim somente em avaliações de corpos de prova com bordas puncionadas e fabricadas com laser.
- Acredita-se que nos ensaios de expansão de furos utilizados pelo Método da Malha Circular, as deformações em ε_2 na região da borda são limitadas pelas regiões mais afastadas do corpo de prova, pois elas também estão sendo deformadas durante o ensaio, porém sob outros modos de deformação. Desta forma, é possível que reduzindo o tamanho das células da malha e ajustando a sua linha mais externa à borda dos furos sejam obtidas trajetórias de deformações próximas do estado uniaxial de tração, atribuindo a este ensaio a confiabilidade necessária para a utilização dos resultados obtidos.
- A diferença encontrada das posições das CLCs modificadas a partir dos resultados das técnicas avaliadas pode estar associada aos distintos gradientes de deformação na região da borda submetida aos esforços de estiramento. No caso da Malha Circular a distribuição das deformações no perímetro do furo expandido é mais homogênea, o que prolonga a capacidade

de estampagem da borda quando comparado ao flange estirado no método do Duplo Dobramento.

- A aplicabilidade dos resultados obtidos por estas metodologias precisa ser feito a partir de testes em peças produzidas em escala industrial. Somente desta forma poderá ser definido o método mais adequado e preciso para a previsão de rupturas em bordas de peças conformadas.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Desenvolver projetos de pesquisa e desenvolvimento que visem:

- Estudar a influência do tamanho da malha e da distância da linha mais externa da malha à borda dos furos na trajetória de deformação obtida pelo Método da Malha Circular. É possível que alterações nestes parâmetros permitam a reprodução de caminhos de deformações em bordas deformadas similares ao estado uniaxial de tração.
- Avaliar a aplicabilidade das metodologias de ensaios desenvolvidas na previsão de rupturas em peças estampadas em escala industrial.
- Avaliar a aplicabilidade do critério de fratura dúctil para a previsão de trincas em bordas de aços quando submetidas a esforços de estiramento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASANO, H.; MATSUZU, N.; ITAMI, A. KOYAMA, K. Development of high strength steel sheet with excellent stretch flange formability for automobile application – SAE Technical Paper Series 940943, 1994.

BLECK, W. et al. A comparative study of forming limit diagram models for sheet steels. *Journal of Materials Processing Technology*, 83, 223-230, 1998.

BOUAZIZ, O et al. The double bending test: a promising new way for an optimal characterization of cut-edges ductility, IDDRG 2010 International Conference, Graz, Austria, 575-528, 2010.

CHATTERJEE, S.; BHADRESHIA, K. D. H. Stretch-flangeability of strong multiphase steels. *Materials Science and Technology*. Vol. 23, Nº5, 606-609, 2007.

CHEN, X. M.; MCKUNE, P. M.; PRINCE, D. G. Automotive Applications of Stretch Flange High-Strength Steel. SAE World Congress & Exhibition, Detroit, march, 2003.

CHEN, L.; VOSWINCKEL, H.; KIM, H. S.; KIM, S. K., KIM, G. S., DE COOMAN, B. C. Stretch-flangeability of TWIP Steel. *Int. Conf. on New Dev. in AHSS*, 349-360, 2008.

CINOTTI, H.; SHAKERI, H.; WORSWICK, M. J.; TRUTTMAN, S.; FINN, JAINN, M.; LLOYD, D. J. Numerical and Experimental Investigation of Stretch-Flange Forming. *Mathematical Modeling in Metal Processing and Manufacturing*, 2000: 1-14.

COL, A.; JOUSSERAND, P. Mechanisms involved in the hole expansion test. IDDRG 2008 International Conference, Olofström, Suécia 197-205, 2008.

CONFORMAÇÃO NA PRENSA. Fascículo de informação técnica, Centro de Pesquisa da Usiminas. Ipatinga, MG, Outubro, 1984.

GOODWIN, G. M. Application of strain analysis to sheet metal forming problems in the press shop, *La Metallurgia Italiana*, 60, p. 767-774, 1968.

HASEGAWA, K. et al. Effects of microstructure on stretch flange formability of 980MPa Grade cold rolled ultra high strength steel sheets. *ISIJ International*, vol 44, Nº3, 603-609, 2004.

HELD, C. et al. Investigation on advanced forming limit prediction techniques for high strength steels. IDDRG 2009 International Conference, Golden, CO, USA, 461-470, 2009.

HIWATASHI, S.; SAKUMA, Y. Stretch flanging limits of high strength steels for crashworthiness. *Proceedings of Japan SAE*, 53, 2000.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. *ISO 16630: Metallic materials – Method oh hole expanding test*. First Edition 2003.

INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION. *ISO 12004-2: Metallic materials — Sheet and strip — Determination of forming limit curves — Part 2: Determination of forming-limit curves in laboratory*, First Edition, Outubro, 2008.

ISHIWATARI, A.; URABE, M.; INAZUMI, T. – Press forming analysis contributing to the expansion of high strength steel sheet applications. *JFE GIHO*, No. 30, august 2012, p. 19-24.

ITO, Y. and NAKAZAWA, Y. Effects of the initial diameter of bore and the planar anisotropy of n value and r value on fracture behavior of HSS by flat-bottomed cylindrical punch forming. *IDDRG 2010 International Conference*, Austria, p. 157 - 166, 2010.

JAPAN IRON AND STEEL FEDERATION STANDARD. *JFS T1001: Method of hole expansion test*. 1996.

KARELOVA, A. et al. Influence of the edge conditions on the hole expansion property of dual-phase and complex-phase steels. *Science and Materials Technology*, 159-169, 2007.

KEELER, S. P. Determination of forming limits in automotive stampings, *Sheet Met. Ind.*, 42, p. 683-691, 1965.

KEELER, S. P. The Enhanced FLC Effect. Project Team Technology Report, The Auto/Steel Partnership, Southfield, MI, EUA, 2003. Disponível em: <<http://www.a-sp.org/~media/Files/ASP/Lightweight%20Programs/Technology%20Report-Final.pdf>>. Acesso em: 23 de julho de 2013.

KONIECZNY, A.; HENDERSON, T. On Formability Limitations in Stamping Involving Sheared Edge Stretching. *SAE World Congress*, Detroit, 2007, 41-50, 2007.

MACKENSEN, A. et al. Determination of the hole expansion properties of AHSS using an optical 3D deformation system. *IDDRG 2009 International Conference*, Golden, CO, USA, 547-558, 2009.

McEWAN, C. et al. A new approach to predicting edge splits – the combined FLC/HEC diagram. *IDDRG 2009 International Conference*, Golden, CO, USA, 65-72, 2009.

MILOSEVIC, Z.; MOUSAY, F. Simulation of sheared edge behaviour in stretch flange by a modified Fukuy test. *Advanced Technology of Plasticity*, Vol 2, 697-702, 1987.

NAGASAKA, A. et al. Effect of YAG Laser Cutting on Stretch-flangeability of TRIP-aided Dual-phase Steel Sheets ; *ICOMAT'02 International Conference on Martensitic Transformations No10*, Espoo, 2002, vol. 112 (1) p. 465-468.

NAKAZIMA K. et al. Study on the formability of Steel Sheets, *Technical Reports n° 264*, 1968.

NISHIMOTO, A.; HOSOYA, Y.; NAKAOKA, K. Relation between Hole Expansion Formability and Metallurgical Factor in Dual-Phase Steel Sheet – *Fundamentals of Dual phase Steels*, The Metallurgical Society of AIME, Warrendale, PA, (1981), 447.

NITTA, J. et al. Development of the practical evaluation test and a study of a numerical evaluations of edge fracture for stretch flangeability of sheet metal forming. IDDRG 2009 International Conference, Golden, CO, USA, 461-470, 2009.

TAKUDA, H et al. Forming limit prediction in Bore Expansion by combination of finite element simulation and ductile fracture criterion. Materials Transactions, Vol. 50. No. 8 (2009) pp. 1930 - 1934.

TEPEDINO, J. O. A.; LEMOS, J. F. Avaliação de metodologias para determinação de CLC de aços de alta resistência. Congresso SAE BRASIL, São Paulo, 2009.

TEPEDINO, J. O. A.; FERREIRA, J. L.; PEREIRA, J. F. B. Efeito da qualidade da superfície de bordas de corte nas propriedades de expansão de furo de aços Dual Phase das classes 590 e 780 MPa de limite de resistência. 13ª Conferência Nacional de Conformação de Chapas, Porto Alegre, outubro, 2010.

SADAGOPAN, S. et al. Stretch Bendability of AHSS. SAE Paper 2003-01-1151, 2003.

SHI, M.; CHEN, X. Prediction of Stretch Flangeability Limits of AHSS using Hole Expansion Test. SAE World Congress, Detroit, 2007.

SIEBEL, E.; POMP, A. Mitt K. W. I Fur Eisenforschung, 1929, pp. 287-291.

SMITH & ASSOCIATES. Forming Flanges and Process Limitations. Disponível em: <<http://www.smithassoc.com/copyrighted-white-papers/papers/C041.pdf>>. Acesso em: 23 de julho de 2013.

STRIJBOS, G. H.; BOESENKOOL, R. Hole expansion in hot rolled steels, IDDRG 1996 Biennial Congress, Eger, Hungria, pp.459-466, 1996.

WU, J. A. failure criterion for stretch bendability of advanced high strength steels. SAE World Congress, 2006, Detroit, 2006.