

FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ADRIANO DA SILVA CABO
ALLYSON VIEIRA DA LUZ E SILVA
DOUGLAS PRATTI GUEDES

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO PLÁSTICO DE UMA CHAPA DE AÇO
ZINCADA DE QUALIDADE COMERCIAL PARA ESTAMPAGEM E OUTRA
ZINCADA DE ALTA RESISTÊNCIA PARA ESTAMPAGEM ATRAVÉS DA CURVA
LIMITE DE CONFORMAÇÃO**

VOLTA REDONDA

2018

FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO PLÁSTICO DE UMA CHAPA DE AÇO
ZINCADA DE QUALIDADE COMERCIAL PARA ESTAMPAGEM E OUTRA
ZINCADA DE ALTA RESISTÊNCIA PARA ESTAMPAGEM ATRAVÉS DA CURVA
LIMITE DE CONFORMAÇÃO**

Trabalho apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica do UniFOA como requisito à obtenção de título de bacharel em Engenharia Mecânica.

ADRIANO DA SILVA CABO
ALLYSON VIEIRA DA LUZ E SILVA
DOUGLAS PRATTI GUEDES

Orientador:
Prof. D.Sc. Alexandre Fernandes Habibe

Coorientador:
Prof. D.Sc. Alexandre Alvarenga Palmeira

VOLTA REDONDA

2018

FOLHA DE APROVAÇÃO

Adriano da Silva Cabo

Allyson Vieira da Luz e Silva

Douglas Pratti Guedes

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO PLÁSTICO DE UMA CHAPA DE AÇO ZINCADA DE QUALIDADE COMERCIAL PARA ESTAMPAGEM E OUTRA ZINCADA DE ALTA RESISTÊNCIA PARA ESTAMPAGEM ATRAVÉS DA CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO

Orientador:

Prof. D.Sc. Alexandre Fernandes Habibe

Coorientador:

Prof. D.Sc. Alexandre Alvarenga Palmeira

Banca examinadora:

Prof.D.Sc. Alexandre Fernandes Habibe

Prof.D.Sc. Alexandre Alvarenga Palmeira

Prof. Esp. Antônio de Pádua Sobreira Leal

Dedicamos este trabalho em especial a Deus, nossa fonte inspiradora. Aos nossos tão amados pais, namoradas, irmãos, companheiros e amigos por se fazerem presentes nesta tão longa e importante caminhada de nossas vidas. A instituição e aos professores Alexandre Habibe, Alexandre Palmeira e Antônio de Pádua pelo estímulo, direcionamento e orientação no decorrer de nosso trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Deus por ter nos capacitado e nos direcionado até aqui, frente à conquista de mais um ideal.

Aos nossos pais, namoradas e amigos por serem nossos pilares onde tanto nos sustentamos.

Aos professores do UniFOA, todos em especial, aqueles que nos trouxeram do primeiro ao último período da faculdade, compartilhando não só conhecimento como suas vivências sendo muitas vezes mais que mestres e sim grandes parceiros. Agradecemos ao Paulo Cesar da Silva por dispor boa vontade em nos apoiar com sua vasta experiência e grande conhecimento no assunto proposto e de maneira geral, a todos que vivenciaram nossa árdua jornada em busca da graduação em engenharia mecânica e de alguma forma contribuíram para a realização desse sonho.

Obrigado a todos.

EPÍGRAFE

“E de repente, num dia qualquer, acordamos e percebemos que já podemos lidar com aquilo que julgávamos maior que nós mesmos. Não foram os abismos que diminuíram, mas nós que crescemos”.

Fabíola Simões

RESUMO

O presente trabalho consiste na determinação das Curvas Limite de Conformação por procedimentos experimentais do processo de estampagem.

O conhecimento da estampabilidade dos aços se mostra importante pela necessidade de otimização dos processos e da possibilidade de avaliação do atendimento da matéria prima fornecida, conforme a especificação solicitada pelo produtor das peças estampadas.

Desta forma, a elaboração do estudo de CLC (Curva Limite de Conformação), se mostra importante, pois possibilita a avaliação da interação entre a chapa de aço, ferramentas utilizadas e as condições de processamento das linhas de estampagem.

Na determinação das Curvas Limite de Conformação utilizou-se o ensaio/corpos de prova Nakazima, com os quais consegue-se obter diferentes estados de deformações presentes no processo de conformação utilizando-se um único ferramental. Com este processo se consegue analisar as deformações na direção de laminação na chapa e a variação da força em função do deslocamento do punção, para posterior avaliação dos resultados obtidos a partir do programa ImageJ. Os aços utilizados foram NBR 7008 ZEE grau 2 e EN10346 HX260 YD.

Este trabalho de estudo de conformabilidade, objetiva a avaliação das especificações quanto à estampabilidade das peças, a comparação entre as especificações propostas para o estudo e análise da influência das propriedades físicas e químicas na confecção das peças, de dois tipos de aços, sendo um de baixo carbono para estampagem e o outro aço de baixo carbono e alta resistência microligado ao nióbio para estampagem, utilizando ferramentas teóricas e computacionais (sistema de aquisição de imagens) para levantamento das CLC.

Serão efetuados ensaios mecânicos e Nakazima nos corpos de prova de forma a obter as deformações nas regiões críticas, ou seja, onde se tem as maiores deformações, para o levantamento das CLC teóricas. A seguir efetuar estampagem nas peças e repetir o mesmo procedimento para levantamento das deformações e determinação das curvas CLC.

Palavras-chave: Curva Limite Conformação, Conformação de Chapas, Aço baixo C microligado ao Nb.

ABSTRACT

The present work is concerned in the determination of the Forming Limit Diagram (FLD) by experimental procedures of the forming process.

The knowledge of the stamping of the steels is important due to the need to optimize the processes and the possibility of evaluating the supply of the raw material supplied, according to the specification requested by the supplier of the stamped parts.

In this way, the FLD (Forming Limit Diagram) study is important because it allows the evaluation of the interaction between the sheet metal, tools used and the stamping lines process conditions.

For determination of the FLD, the Nakazima test specimens were used to obtain different strain fields states present in the forming process using a single tool. With this process it is possible to analyze the strain in the lamination direction of the sheet metal and the variation of the force as a function of the punch displacement, for later evaluation of the results obtained from the program ImageJ. The steels used were NBR 7008 ZEE grade 2 and EN10346 HX260 YD.

This work of forming study aims at evaluating the specifications regarding the stamping of the parts, the comparison between proposed specifications for study and analyzing the influence of the physical and chemical properties in the confection of the pieces of two types of steel. One of low carbon for stamping and the other low carbon steel and high strength micro-alloyed for stamping, using theoretical and computational tools (Image acquisition System) to make the FLD.

Mechanical tests and Nakazima tests will be made on the test specimens in order to obtain the strains in the critical regions, in other words, where there are the highest strains, for FLD theoretical determination. The next, to do stamping of the parts and repeat the same procedure to calculate the deformations and determining the practice FLD.

Key Words: Forming Limit Diagram, Sheet Metal Forming, Low Steel C microligado ao Nb.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo	3
2.1 Conformação de Chapas Metálicas	4
3 FATORES DE INFLUÊNCIA DA CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO	13
4 METODOLOGIA	20
4.1 Procedimento Experimental	20
4.1.1 Materiais	20
4.1.2 Ensaio de tração uniaxial	21
4.1.3 Curva limite de conformação	22

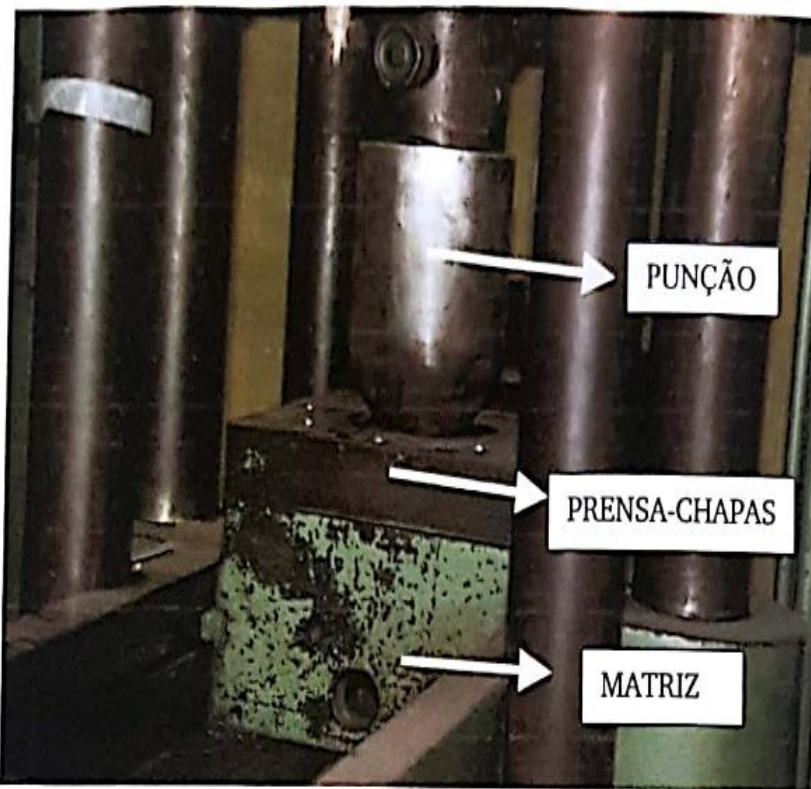
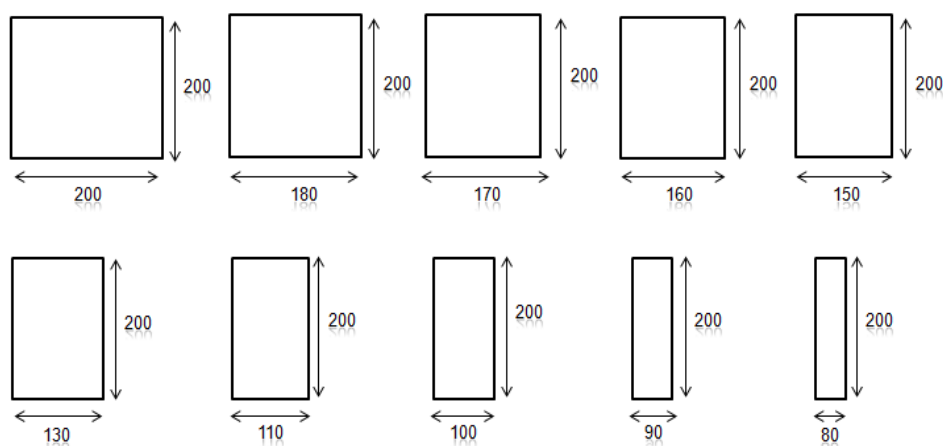


Figura 16 – Ferramental de ensaio com punção hemisférico pelo método de Nakazima. – Indústria siderúrgica

4.1.3.1 Preparação dos corpos de prova	23
---	----



.....	23
4.1.3.2 Impressão das grades circulares nos corpos de prova	24
4.1.3.3 Realização do ensaio de Nakazima nos corpos de prova	24
4.1.4 Obtenção dos valores através do ImageJ	25
4.1.5 Método de obtenção dos dados da CLC	27
Gráfico 5 – Comparação CLC Bagageiro interno – Autores	46
Gráfico 6 – Comparação CLC porta exterior traseira - Autores	47
• 5 CONCLUSÃO	49
Os objetivos propostos foram atendidos de forma que esta pesquisa permitiu evidenciar o melhor material a ser aplicado no processo de estampagem para produção das peças automotivas, bagageiro interno e porta exterior traseira.	49
O desenvolvimento deste trabalho permitiu as seguintes conclusões:	49
✓ Os corpos de prova de Nakazima nos permitem a determinação das CLC teóricas para os aços propostos;	49
✓ As características mecânicas e de composição química dos materiais utilizados no processo de estampagem, atendem aos requisitos solicitados pelas normas NBR 7008 ZEE grau 2 e EN 10346 HX260YD ;	49
✓ Do ponto de vista de estampabilidade, as especificações NBR 7008 ZEE grau 2 e EN 10346 HX260YD atendem plenamente aos requisitos de estampagem.	49
✓ O aço NBR 7008 ZEE grau2apresentou muito melhor estampabilidade em relação ao aço EN 10346 HX260YD principalmente em relação aos coeficientes de encruamento e de anisotropia, o que pode ser mostrado pela grande diferença dos níveis da CLC, quando se compara as duas curvas.....	49
6 REFERÊNCIAS	50

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Desenho esquemático do processo de estiramento – Viana, 2000.....	5
Figura 2 – Desenho esquemático do processo de embutimento – Viana, 2000.....	6

Figura 3 – Desenho esquemático dos estados de tensão do blank – BRESCIANI, 1997.....	7
Figura 4 – Curva Limite de Conformação – apresenta os métodos de deformação para uma malha circular – Viana, 2000.....	8
Figura 5 – Deformações nos domínios de estiramento biaxial ($\xi_1 > 0$ e $\xi_2 > 0$) e embutimento profundo ($\xi_1 > 0$ e $\xi_2 < 0$) para definição da Curva Limite de Conformação (adaptado de Bressan, 1998).....	9
Figura 6 – Tipos de malhas que podem ser usadas para a obtenção da CLC (UFPR Labconf- Laboratório de Conformação Mecânica).....	10
Figura 7 – Ferramental utilizado para o ensaio de Marciniak (adaptado de ISO 12004 – 2:2008).....	11
Figura 8 – Corpos de prova após ensaios segundo metodologia Marciniak de uma chapa de aço. As larguras dos corpos de prova variam entre 60 a 200 mm. (Makkouket al. 2008).....	11
Figura 9 – Ferramental utilizado para efetuar o ensaio Nakazima (adaptado de ISO 12004 – 2:2008).....	12
Figura 10 – Curva Limite de Conformação de acordo com o método proposto por Nakazima (Hecker, et al. 2008).....	13
Figura 11 - Influência da espessura curva limite conformação segundo Powey e Partinière (1980).....	16
Figura 12 - Trajetória de Deformação (Pomey e Partinière, 1980).....	17
Figura 13 - Influência da taxa de deformação nos valores de deformação na zona livre do defeito e na zona defeituosa segundo modelo de localização do tipo Marciniak-Kuczynski (Hosford e Caddell, 1983).....	18
Figura 14 - Influência da espessura. (Plau: 2003).....	19
Figura 15- Corpo de prova para ensaio de tração uniaxial.....	21
Figura 16 – Ferramental de ensaio com punção hemisférico pelo método de Nakazima.....	23
Figura 17 – Dimensões utilizadas nos corpos de prova em milímetros.....	23
Figura 18 – Fotografia da região nº 3 do CP 200x160.....	26
Figura 19 – Fotografia de uma peça automotiva após estampagem com a identificação de cada região a ser estudada.....	27

Figura 20 – Porta exterior traseira.....	41
Figura 21 – Bagageiro interno.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Relação entre conformabilidade e valores de L_e , L_r e n (Col, 2007).....	15
Tabela 2 - Composição química do aço NBR 7008 ZEE grau 2.....	20
Tabela 3 - Composição química do aço EN 10346:2009 HX260YD.....	20
Tabela 4 – Propriedades mecânicas do aço NBR 7008 ZEE grau 2.....	21
Tabela 5 - Propriedades mecânicas do aço EN 10346:2009 HX260YD.....	21
Tabela 5A- Propriedades mecânicas do aço NBR 7008 ZEE grau 2.....	22
Tabela 5B- Propriedades mecânicas do aço EN 10346:2009 HX260YD.....	22
Tabela 6 - Dados para CP 200x80 NBR 7008 ZEE grau 2.....	28
Tabela 7 - Dados para CP 200x90 NBR 7008 ZEE grau 2.....	29
Tabela 8 - Dados para CP 200x100 NBR 7008 ZEE grau 2.....	29
Tabela 9 - Dados para CP 200x110 NBR 7008 ZEE grau 2.....	30
Tabela 10 - Dados para CP 200x120 NBR 7008 ZEE grau 2.....	30
Tabela 11 - Dados para CP 200x150 NBR 7008 ZEE grau 2.....	31
Tabela 12 - Dados para CP 200x160 NBR 7008 ZEE grau 2.....	31
Tabela 13 - Dados para CP 200x170 NBR 7008 ZEE grau 2.....	32
Tabela 14 - Dados para CP 200x180 NBR 7008 ZEE grau 2.....	32
Tabela 15 - Dados para CP 200x200 NBR 7008 ZEE grau 2.....	33
Tabela 16 - Dados para CP 200x80 EN 10346:2009 HX260YD.....	33
Tabela 17 - Dados para CP 200x90 EN 10346:2009 HX260YD.....	34
Tabela 18 - Dados para CP 200x100 EN 10346:2009 HX260YD.....	34
Tabela 19 - Dados para CP 200x110 EN 10346:2009 HX260YD.....	35
Tabela 20 - Dados para CP 200x130 EN 10346:2009 HX260YD.....	35
Tabela 21 - Dados para CP 200x150 EN 10346:2009 HX260YD.....	36
Tabela 22 - Dados para CP 200x160 EN 10346:2009 HX260YD.....	36

Tabela 23 - Dados para CP 200x170 EN 10346:2009 HX260YD.....	37
Tabela 24 - Dados para CP 200x180 EN 10346:2009 HX260YD.....	37
Tabela 25 - Dados para CP 200x200 EN 10346:2009 HX260YD.....	38
Tabela 26A – Valores referentes aos dez CP para a especificação NBR 7008 ZEE grau 2.....	38
Tabela 26B – Valores referentes aos dez CP para a especificação EN 10346:2009 HX260YD.....	39
Tabela 27A – Dados das deformações – Porta exterior traseira.....	41
Tabela 27B – Dados das deformações – Bagageiro interno.....	43

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Valores referentes aos dez CP para a especificação NBR 7008 ZEE grau 2.....	39
Gráfico 2 – Valores referentes aos dez CP para a especificação EN 10346:2009 HX260YD.....	40
Gráfico 3 – Curva Limite Conformação – Porta exterior traseira.....	42
Gráfico 4 – Curva Limite Conformação – Bagageiro interno.....	43
Gráfico 5 – CLC Bagageiro Prática.....	44
Gráfico 6 – CLC Porta Exterior Traseira Prático.....	45

No table of figures entries found.

LISTA DE SIGLAS

CLC – Curva Limite Conformação

CP – Corpo de Prova

LE – Limite de Escoamento

LR – Limite Resistência a Tração

n – Encruamento

r – Anisotropia

F – Força

e_1 – Deformação maior

e_2 – Deformação menor

t – Espessura

d – Diâmetro

l – Comprimento

1 INTRODUÇÃO

O estudo da curva limite de conformação, é uma ferramenta de grande importância para a indústria que fabrica chapas metálicas, podendo obter peças de formas simples ou complexas por meio de deformação plástica de um esboço metálico. É um processo amplamente utilizado e produz uma grande diversidade de peças, como carrocerias de automóveis, utensílios de cozinha, embalagens metálicas e componentes mecânicos.

Essa relação possibilita concluir se o material e o processo são adequados à manufatura da peça desejada. O uso da CLC é uma ferramenta essencial para o desenvolvimento do emprego de produtos, como por exemplo, na fase de teste de estampagem na indústria automotiva.

A curva limite conformação separa o zona de sucesso e falha do material, assim como a maior e menor deformação e o tipo de conformação (estiramento, embutimento).

Segundo Lorentz e Gilapa (1998), a curva limite de conformação (CLC) é utilizada para uma compreensão de chapas metálicas, que é indispensável na fabricação de produtos estampados de qualidade. Projetistas de ferramentas irão determinar o grau da conformabilidade requisitado para cada peça a ser estampada, sendo assim conhecendo o nível de conformação do material que utilizam.

Conforme citações em literaturas, existem vários experimentos para determinação da CLC. Os métodos mais utilizados são Marciniak e Nakazima onde o primeiro usa punção cilíndrico e o segundo usa punção hemisférico, obtendo assim diferentes deformações na CLC.

Há também diferentes curvas para um mesmo material devido a: lubrificação, temperatura, forma e tamanho da ferramenta a serem utilizadas, dentre outros fatores.

Neste projeto foram realizadas diversas etapas até a obtenção dos resultados e comparações finais, tais como:

1. Definições teóricas da CLC;
2. Fatores que influenciam a CLC;
3. Metodologia;
4. Apresentação das propriedades químicas;
5. Obtenção e apresentação das propriedades mecânicas;
6. Forma de elaboração dos corpos de prova;
7. Obtenção dos valores através do ImageJ;

8. Método de obtenção dos dados CLC;
9. Resultados finais e discussões;
10. Conclusão.

1.1 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo, comparar dois tipos de aços, sendo um aço baixo carbono para estampagem, e outro, aço baixo carbono e alta resistência micro-ligado ao nióbio para estampagem, utilizando ferramentas teóricas e computacionais (sistema de aquisição de imagens digitais), para obtenção da CLC.

Efetuar ensaios mecânicos e Nakazima nos corpos de prova de forma a obter as deformações nas regiões críticas, ou seja, onde se tem as maiores deformações, para o levantamento das CLC teóricas. A seguir efetuar estampagem das peças e repetir o mesmo procedimento para levantamento das deformações e determinação das curvas práticas, com o objetivo de comparação entre as mesmas para os dois materiais citados.

2 REVISÃO TEÓRICA

2.1 Conformação de Chapas Metálicas

De acordo com Evangelista (2000), a técnica para um melhor aproveitamento dos processos de conformação de chapas, e a obtenção de peças estipuladas seguindo os padrões do projeto e de fabricação. A conformação é um processo mecânico utilizado na transformação de chapas e consiste em conformar uma chapa (blank) à forma de matriz, através do emprego de uma força que será irradiada por uma ferramenta/punção.

A conformabilidade, é caracterizada como a capacidade que um material tem em ser deformado com êxito em uma geometria almejada, é uma qualidade complexa, difícil de ser definida ou avaliada. Alguns fatores poderão influenciar nos processos de estampagem, os quais devem ser considerados, visto que a conformabilidade é a resultância da combinação de diversos fatores, tais como:

- atrito;
- geometria da ferramenta;
- propriedades mecânicas;
- taxa de deformação;
- trajetória de deformação;
- temperatura.

No processo de conformação de chapas metálicas, existem várias condições que podem afetar negativamente os resultados de um determinado material devido a complexibilidade de cada tipo de processo de conformação. Dentre eles destaca-se o processo de estampagem profunda que adquire maior complexidade nas análises de tensões e deformações, tais como velocidade do equipamento, atrito no processo, rigidez da matriz dentre outros fatores, limitando a aplicação de métodos analíticos.

Os conceitos de Kobayashi et.al. (1989), nos demonstram que os processos de conformação de chapas metálicas tendem a ser divididos em:

- embutimento;
- dobramento de chapas e calandragem;
- estiramento de chapas;
- estiramento no plano da chapa;
- hidro conformação e conformação por elastômeros;

- conformação a vácuo, eletromagnética ou por explosão e outros.

Para Dieter (1981), a técnica do estiramento é um dos processos de conformação que compreende em aplicar uma força de tração, de tal forma a alongar o material a ser trabalhado sobre a ferramenta ou mesmo um bloco-modelo. Assim como neste método de deformação prevalecem tensões de tração, porém em se tratando de materiais de alta ductilidade poderemos obter maiores deformações.

Segundo Dieter (1981), grande parte das estampagens de alta complexidade encontradas na indústria automotiva engloba um componente de estiramento. A figura 1 mostra uma representação simples de uma operação de estiramento.

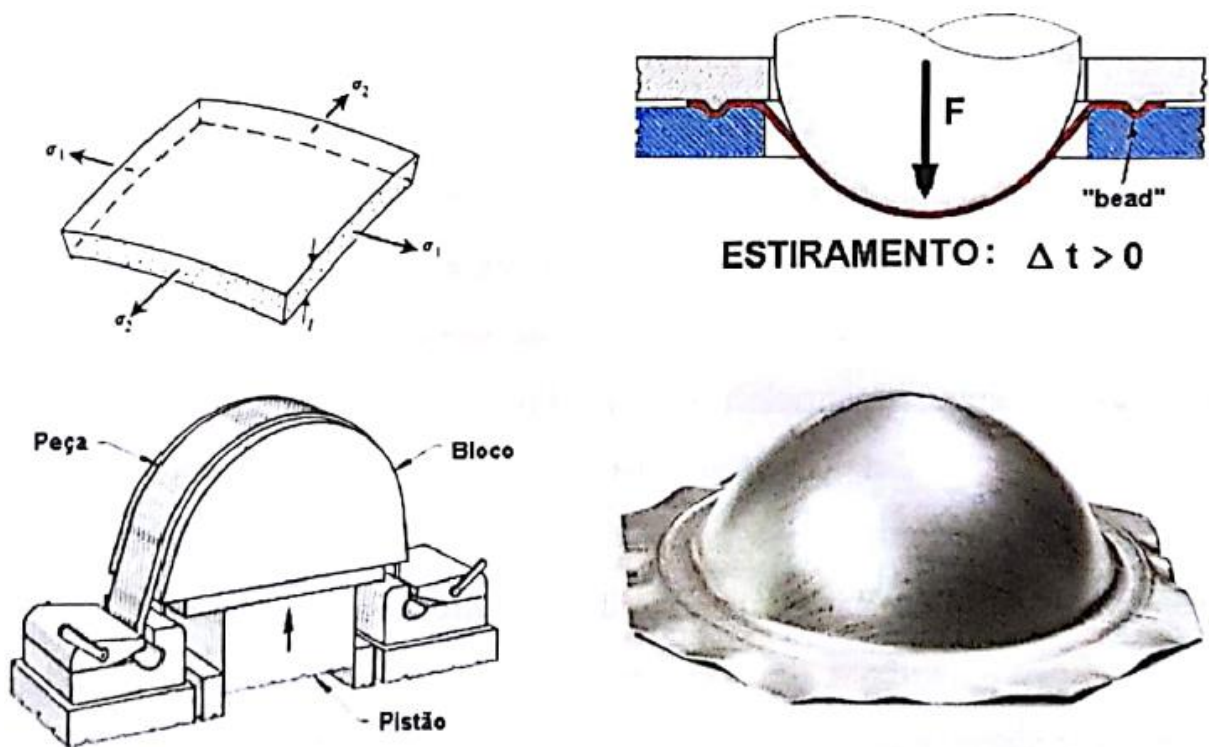


Figura 1 – Desenho esquemático do processo de estiramento – Viana, 2000.

A estampagem profunda ou embutimento baseia-se no processo de fabricação no qual é usado para modelar chapas planas no formato de um copo. Ainda segundo Dieter (1981), uma grande parte dos experimentos teóricos e demais estudos foram obtidos através da realização da estampagem profunda de um copo cilíndrico de fundo plano (teste de Swif), tendo como base um disco plano (blank). A Figura 2 mostra a representação de uma operação de embutimento.

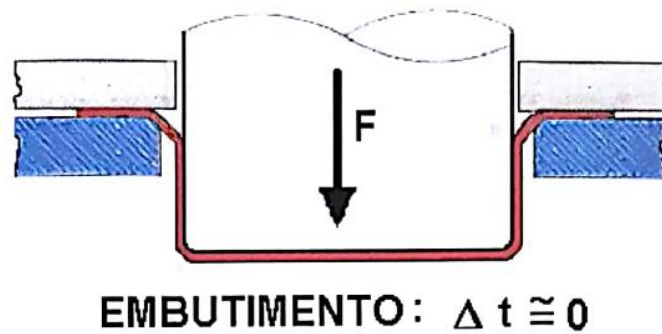


Figura 2 – Desenho esquemático do processo de embutimento – Viana, 2000.

A estampagem profunda salienta diferentes tipos de deformação (seja ela trativas ou então compressivas), de tal forma que o embutimento seja aperfeiçoado aumentando assim as deformações em relação a largura e ao comprimento e minimizando as deformações pela espessura. Para tal processo o metal será submetido aos três diferentes métodos de deformação. O metal que está localizado no centro do disco, fica em cima da cabeça do punção, onde é acomodado em volta do perfil do punção, com isso reduzindo a sua espessura. Nesta região, o material metálico estará sujeito a uma condição biaxial de tração correspondente à ação do punção. O metal que se localiza na região interna do *blank* será deformado radialmente em direção ao interior da garganta da matriz e, à medida que isto acontece, a circunferência externa deve decrescer incessantemente desde a dimensão do disco original até aquela correspondente à peça final. Isto significa que o metal tem que estar submetido a uma deformação compressiva na direção da circunferência e a uma deformação por tração na direção radial.

A medida que o metal ultrapassa o raio da matriz, ele será inicialmente dobrado e depois endireitado, sofrendo um esforço de tração. Este dobramento plástico sob tração tem como consequência uma considerável redução de espessura, que altera o aumento da mesma, produzido pela contração circunferencial. Entre a zona interna tracionada e a zona externa contraída, encontra-se um estreito anel do metal não dobrado, seja sobre a matriz ou sobre o punção. Com isso o metal desta região foi submetido a somente um carregamento de tração por toda a operação de estampagem.

De acordo com Bresciani et. al. (1997) para se realizar o processo de embutimento deve-se submeter uma chapa plana a uma condição de tensão e deformação que consiga alterar sua espessura no decorrer do processo. O estado típico da tensão pode variar conforme a posição de retirada do elemento de análise da peça que está sendo conformada.

Já nas peças cilíndricas, existem outros três diferentes estados de tensão: uma para a flange, uma para a parede lateral e outro no fundo do copo, como podemos analisar na figura 3.

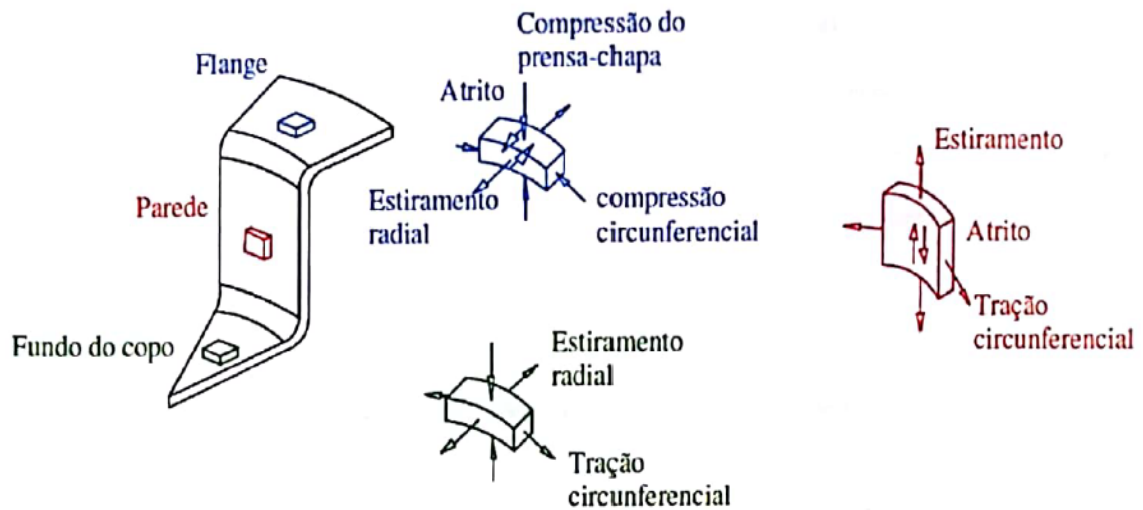


Figura 3 – Desenho esquemático dos estados de tensão do blank – BRESCIANI, 1997.

2.2 Curva Limite de Conformação

A curva limite conformação é um método vastamente utilizado na indústria produtora de chapas metálicas em especial chapas finas para determinar parâmetros de deformação de materiais ensaiados. Obtendo assim as zonas de trabalho e zona de falha do corpo de prova.

Conforme Sampaio et. al. (1998), é comumente usual um método para determinar o limite de conformação do material através de escala experimental, com deformações de caráter industrial, denominado curva limite de conformação (CLC). Essa associação nos proporciona concluir se o material e o processo estarão aptos à manufatura da peça planejada. A utilização da CLC é uma ferramenta de suma importância para o desenvolvimento da aplicação de um estipulado produto, como por exemplo, no "tryout" da indústria automobilística.

O conceito de Keeler (1965) nos apresenta os valores positivos da menor deformação principal até no plano da chapa, sendo complementado por Goodwin (1968) e Woodthorpe et. al. (1969) para o domínio da deformação compreendido entre os métodos de tração uniaxial e o estiramento biaxial. Desde então diversas pesquisas foram direcionadas à determinação experimental e ao modelamento teórico proveniente das deformações limite em chapas.

Já Richter (2003), estabelece que a curva limite de conformação fica sendo uma representação comportamental de uma chapa metálica quando é deformada em um processo de conformação mecânica no qual é traçado um diagrama que representa os parâmetros de deformação verdadeira maior x deformação verdadeira menor.

Segundo Keeler (1968) e Kuzman (2000), podemos avaliar uma chapa de metal se ela poderá ou não ser conformada sem falhas de acordo com as propriedades do material, condições superficiais, tamanho e forma do “blank”, lubrificação, velocidade da prensa, pressão do prensa chapas, “design” do punção e da sua matriz, e muitos outros fatores que são conhecidos e outros desconhecidos. Na figura 4 temos a ilustração das zonas de comportamento para um determinado material (falha, marginal e sucesso).

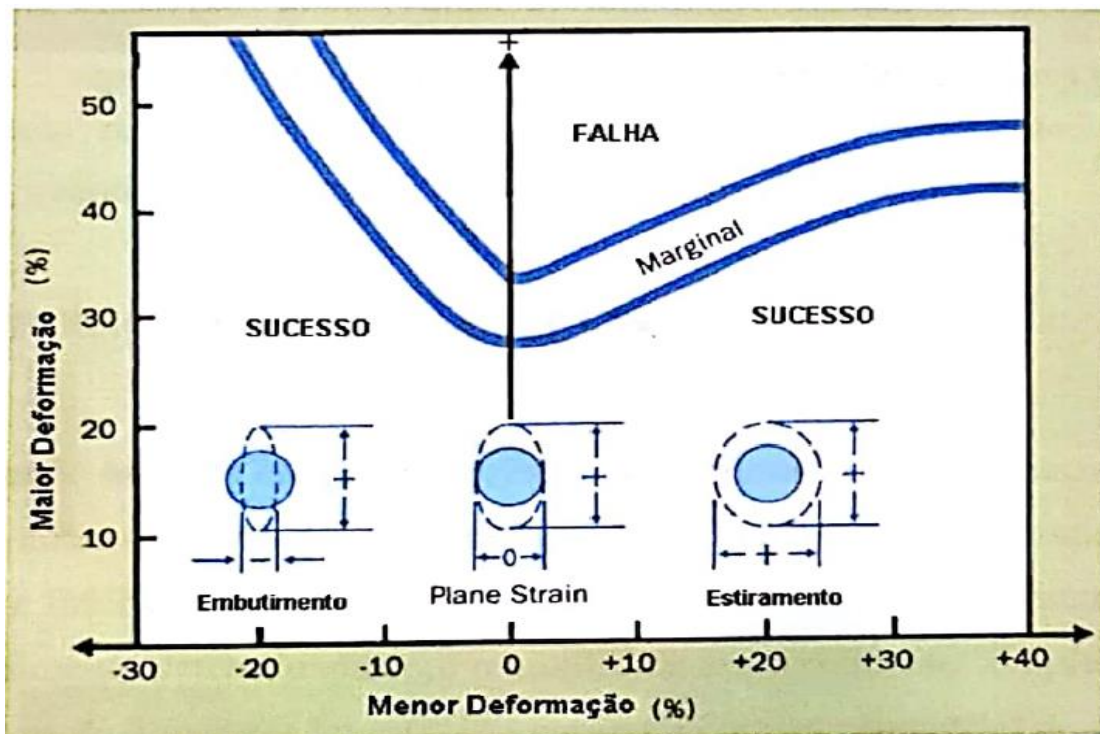


Figura 4 – Curva Limite de Conformação – esta ilustrado os métodos de deformação para uma malha circular – Viana, 2000.

O Conceito de Lange (1993), nos mostra uma ilustração do Diagrama Limite Conformação, o qual nos demonstra os tipos de deformações que o material sofreu para uma malha circular impressa na chapa, tanto no processo de embutimento profundo ou no estiramento. Este diagrama está apresentado na figura 5.

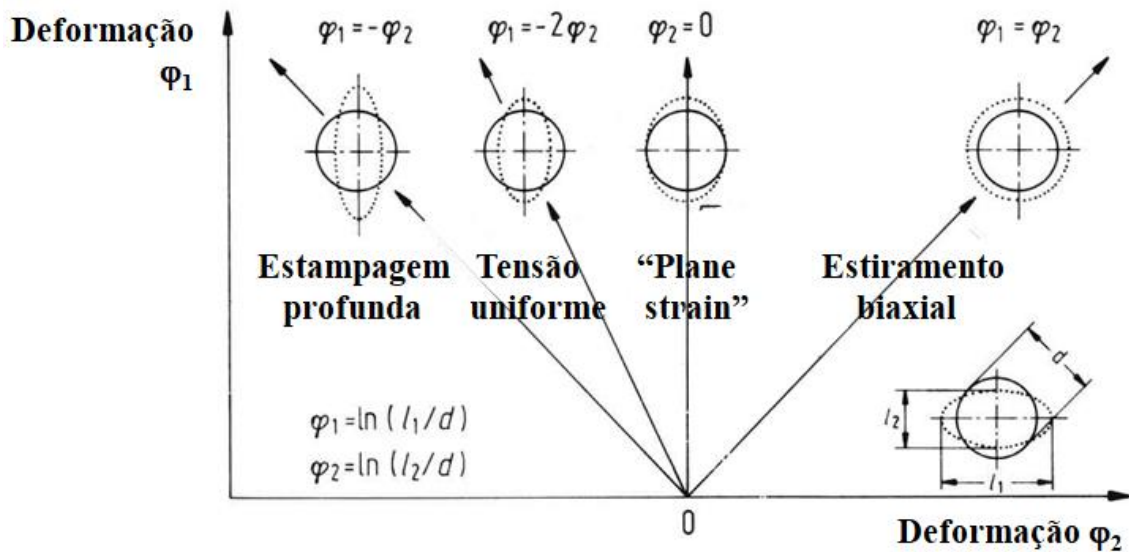


Figura 5 – Deformações nos domínios de estiramento biaxial ($\xi_1 > 0$ e $\xi_2 > 0$) e embutimento profundo ($\xi_1 > 0$ e $\xi_2 < 0$) para definição da Curva Limite de Conformação (adaptado de Bressan, 1998)

A figura 5 exemplifica as diferentes regiões de deformação presentes na curva CLC. A curva apresenta regimes básicos de maior deformação: estiramento, quando $\varepsilon_2 > 0$, estampagem; quando $\varepsilon_2 < 0$, tração $\varepsilon_1 = -2\varepsilon_2$ e deformação plana $\varepsilon_2 = 0$.

2.3 Métodos para Obtenção da CLC

Segundo Moreira et al., (2003), encontra-se na literatura diversos ensaios experimentais destinados à determinação da CLC, seguindo como parâmetros testes uniaxiais e, os ensaios que são propostos por Swift, Fukui e Erichsen, nos possibilitam o levantamento da CLC. Na atualidade, entretanto, a CLC é normalmente determinada com o auxílio de uma ferramenta simples que utiliza corpos de prova com diferentes larguras agregadas com as geometrias de punção que são impostas por Nakazima (1968) e Marciniak (1969), sendo que nesse contexto as chapas serão bloqueadas em sua periferia e em seguida deformadas por um punção hemisférico (Nakazima) tendo também o de fundo de plano (Marciniak).

Para obtenção das análises, são efetuados gradeamentos circulares ou quadrangulares que nós proporcionam, após a conformação dos corpos de prova, uma análise das deformações impostas após o ensaio, onde é possível calcular essas variações do gradeamento em relação ao estado inicial. A figura 6 evidencia os tipos de malhas que podem ser usadas para a obtenção da CLC.

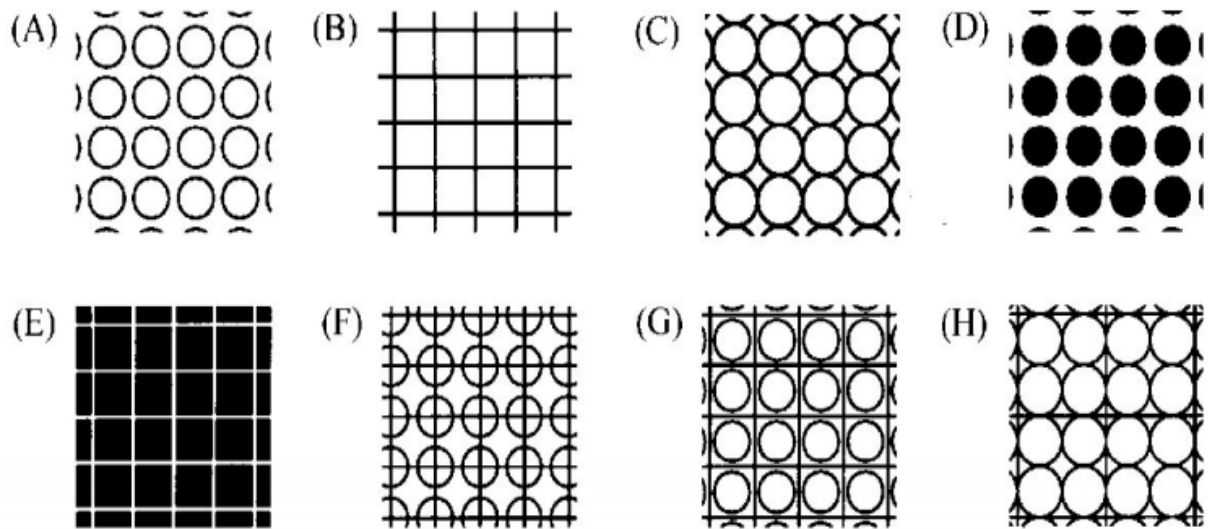


Figura 6 – Tipos de malhas que podem ser usadas para a obtenção da CLC (UFPR Labconf- Laboratório de Conformação Mecânica).

As deformações principais e secundárias podem ser calculadas a partir dos valores dos diâmetros inicial e final dos círculos impressos através das Equações de ϵ_1 e ϵ_2 .

$$\epsilon_1 = \ln (l_1 \div d) \quad (1)$$

$$\epsilon_2 = \ln (l_2 \div d) \quad (2)$$

Considerando que a deformação na espessura é capaz de ser definida a partir de métodos realizados com o auxílio de um micrômetro de ponta, ou assumindo-se conservação de volume no regime plástico de deformações, através da Equação de ϵ_3 , onde t e t_0 são, respectivamente, espessura final e espessura inicial:

$$\epsilon_3 = \ln (t \div t_0) \quad (3)$$

2.4 Ensaio Marciniak

Segundo a norma ISO 12004-2:2008 o ensaio proposto pelo método de Marciniak (1969) é executado utilizando um ferramental composto por um punção cilíndrico de fundo plano com diâmetro de 100 +/- 25 mm, uma matriz e um prensa-chapas, conforme Figura 7.

Os corpos de prova são confeccionados com variações na largura a fim de reproduzirem o modo de deformação, e sobre a superfície da chapa dos corpos de prova é feita uma gravação em forma de grade, seja circular ou quadrada, para serem feitas as avaliações das deformações sofridas durante ou após o ensaio. Esses corpos de prova são levados até a fratura conforme mostrado na figura 8 e imediatamente após a fratura o deslocamento do punção é interrompido. Para o ensaio ser válido, a fratura tem que estar localizada na região central do punção. O punção e o corpo de prova ficam separados através de uma chapa a qual é furada na parte central, com isso não há atrito entre a face do punção e o corpo de prova. A chapa é denominada “dummy blank” ou mesmo “driving blank” em inglês, ou “máscara” em português. Entre o corpo de prova e a máscara há lubrificação com óleo lubrificante, por exemplo, para diminuir o atrito e facilitar o escoamento.

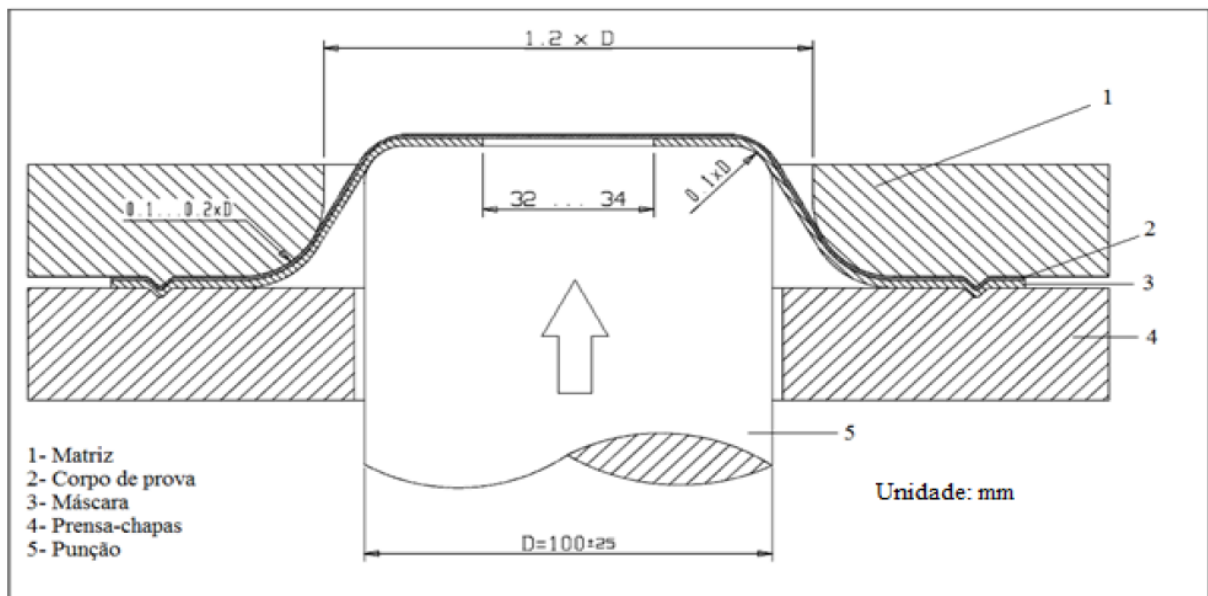


Figura 7 – Ferramental utilizado para realizar o ensaio de Marciniak (adaptado de ISO 12004 – 2:2008).



Figura 8 – Corpos de prova após ensaios segundo metodologia Marciniak de uma chapa de aço. As larguras dos corpos de prova variam entre 60 a 200 mm. (Makkouket al. 2008).

2.5 Ensaio Nakazima

Conforme padronizado na norma ISO 12004-2:2008, o ferramental tem que ser composto por um punção hemisférico, uma matriz e um prensa-chapas conforme Figura 9. A força aplicada no prensa chapas evita qualquer escorregamento do material do flange até a parte central do corpo de prova, o qual está sendo deformado no decorrer do ensaio. Diferentemente do ensaio Marciniak, o corpo de prova entra em contato direto com o punção, proporcionando um atrito direto entre o punção e o corpo de prova; a lubrificação é feita por óleo lubrificante, por exemplo, que pode conter uma almofada elástica, colocada com o objetivo de melhorar a distribuição das deformações. Os corpos de provas e as técnicas de depuração de resultados são idênticos à do ensaio de Marciniak. A figura 10 representa uma Curva Limite de Conformação que foi determinada através do ensaio proposto por Nakazima e realizado por Hecker, et al. 2008, o qual está apresentado na Figura 9.

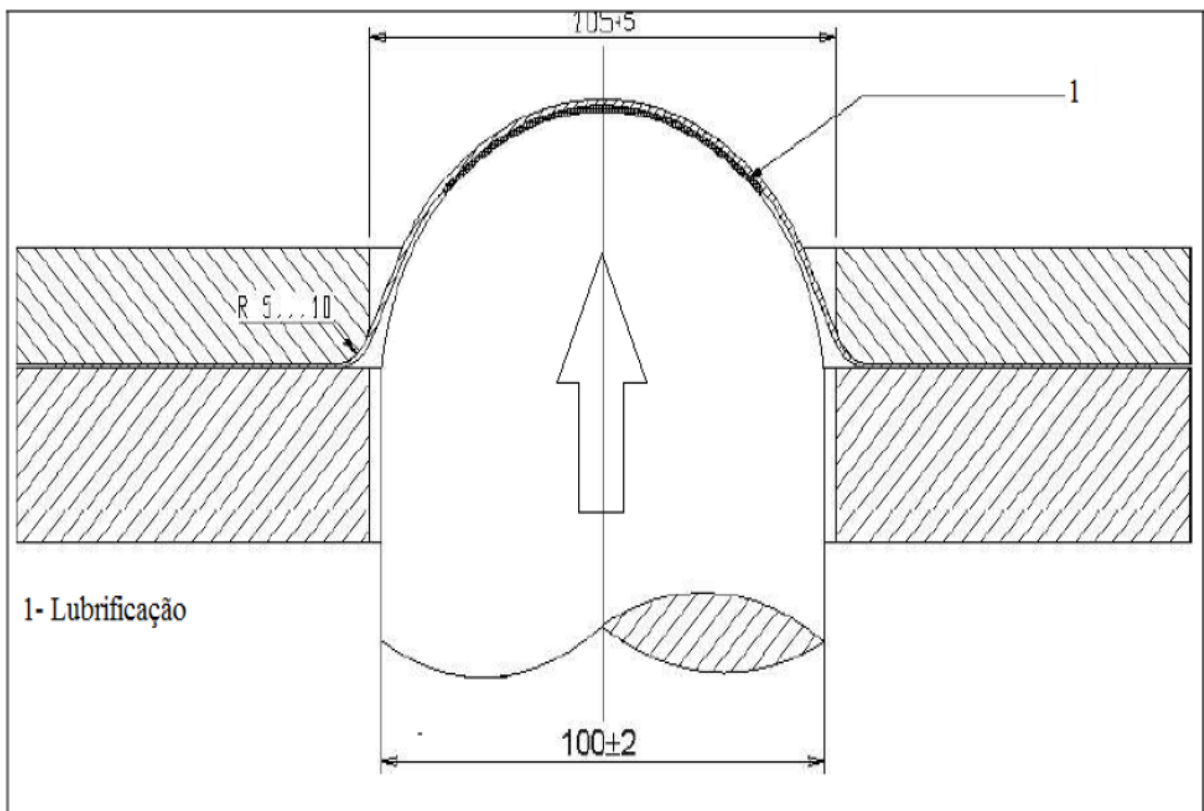


Figura 9 – Ferramental utilizado para efetuar o ensaio Nakazima (adaptado de ISO 12004 –2:2008).

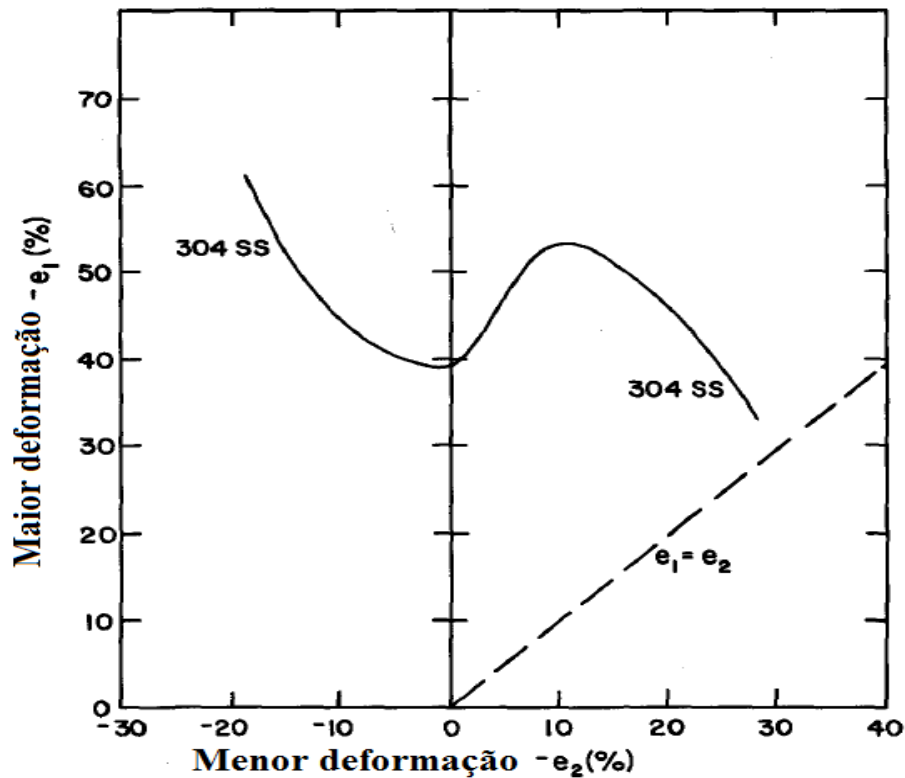


Figura 10 – Curva Limite de Conformação de acordo com o método proposto por Nakazima (Hecker, et al. 2008).

3 FATORES DE INFLUÊNCIA DA CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO

Para determinação da Curva Limite de Conformação, vários fatores podem influenciar nos seus resultados, contribuindo positivamente ou não no resultado do processo de conformação mecânica, como expoente de encruamento (n), índice de sensibilidade a taxa de deformação (m), coeficiente de anisotropia (R), espessura e orientação do esboço, efeito geométrico, atrito, temperatura, inclusões, impurezas, composição química, trajetória de deformação e revestimentos. Muitos destes fatores serão comentados a seguir.

Alguns fatores metalúrgicos influenciam de grande forma nos processos de conformação, pois eles irão determinar as condições de fabricação das peças, temperatura de trabalho, acabamento e tolerâncias dimensionais. Segundo Col (2007) a conformabilidade dos metais é determinada por uma combinação de quatro componentes:

- cristalografia;
- estrutura e tamanho do grão;
- qualidade da superfície;

- a heterogeneidade do material.

3.1 Influência do Coeficiente de Anisotropia Plástica

Segundo Freitas (2008) as chapas finas utilizadas nos processos de conformação são obtidas através da laminação a frio, o que provoca um comportamento anisotrópico nas propriedades mecânicas. Esta anisotropia plástica acontece devido a uma distribuição preferencial de selecionadas direções cristalográficas dos grãos do policristal alinhados paralelamente à direção de laminação e associados a estas, determinamos os planos cristalográficos paralelos ao plano normal da chapa, que são grandiosamente influenciados a se desenvolverem no decorrer da laminação. Col (2007) observa que o coeficiente de anisotropia R mostra a tendência do material a se deformar em uma determinada direção, como, por exemplo, em um ensaio de tração o coeficiente de anisotropia irá nos mostrar se o material poderá deformar mais em sua largura do que em sua espessura.

3.2 Influência do Expoente de Encruamento

O encruamento tem influência direta sobre a ductilidade do material, aumentando-a sob condições de tração uniaxial, já a tensão de escoamento do material faz com que se reduza a capacidade de deformação plástica. Este fenômeno exerce um duplo papel nos processos de conformação mecânica. Eles aumentam o nível de deformação que o material pode absorver e permite uma melhor eficiência na distribuição da deformação. Já no que diz respeito à curva limite de conformação, estudos revelam que quanto maior o valor do expoente de encruamento n , mais elevada será a curva limite de conformação.

Hosford (1999) investigou a influência na redução no valor de n (por exemplo, por redução a frio, diminuição no tamanho de grão, aumento dos teores de carbono, nitrogênio e manganês), nas deformações biaxiais foi constatado uma redução acentuada na posição da CLC. Observou também que na Curva Limite de Conformação, no estado plano de deformação ($\epsilon_2=0$), o valor de ϵ_1 tem um valor igual ao valor de n (Exponencial de Encruamento).

3.3 Influência da Resistência a Tração

O parâmetro que tem maior importância é a relação do limite de escoamento e a resistência à tração (L_e/L_{rt}). Para os tipos de expansão e tração plana, esta relação nos dará uma boa prévia da capacidade de conformação do material. Este valor tem um gradiente inversamente com o valor de n (expoente de encruamento). A Tabela 1 mostra que com aumento da relação entre o limite de escoamento e a resistência a tração haverá uma diminuição dos valores de n .

Tabela 1 – Relação entre conformabilidade e valores de L_e , L_{rt} e n (Col, 2007).

Conformabilidade em expansão	LE/LR	n
Excelente	0,4 a 0,5	0,24 a 0,27
Bom	0,5 a 0,6	0,20 a 0,24
Médio	0,6 a 0,7	0,18 a 0,20
Ruim	0,7 a 0,9	0,12 a 0,18

3.4 Influência da Espessura

Uma das soluções comumente utilizadas para a técnica de embutimentos difíceis é de aumentar a espessura da chapa metálica. Pomey e Partinière (1980) citam algumas conclusões importantes e que devem ser consideradas a respeito da relação entre a espessura da chapa, a saber:

- a curva limite de conformação depende da espessura da chapa metálica;
- a curva limite de conformação aumenta para maiores valores da espessura do esboço;
- a variação da espessura é importante em expansão, mas é quase-nula em estampagem;
- nos casos intermediários o efeito da espessura aumenta lineamente com a relação ϵ_1/ϵ_2 .

A Figura 11 apresenta a variação da curva limite de conformação para dois diferentes valores de espessura do esboço metálico, onde é possível analisar o aumento significativo no domínio de expansão ou estiramento biaxial segundo Pomey e Partinière (1980).

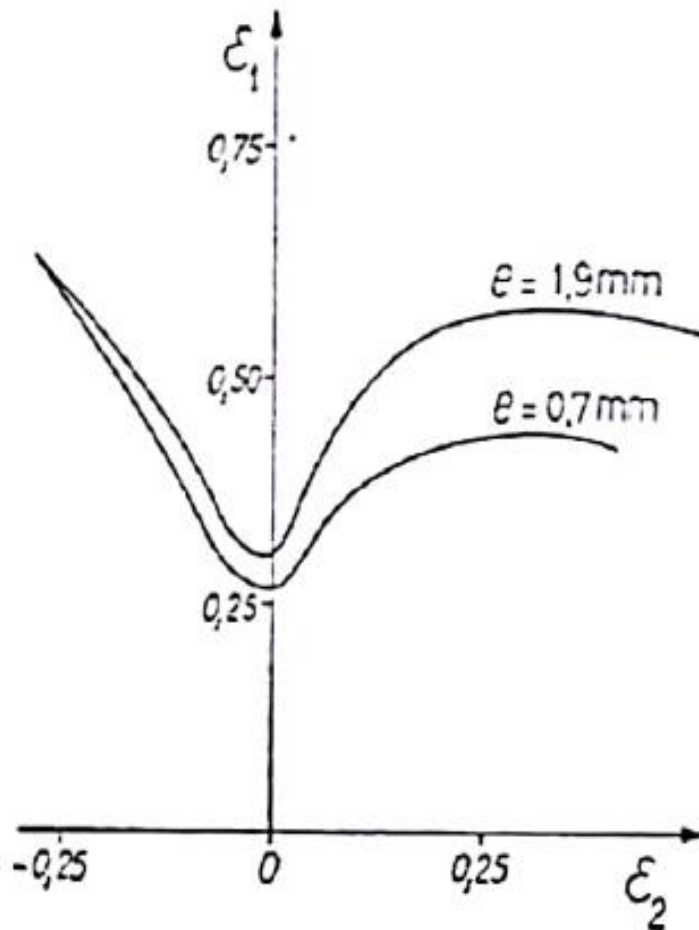


Figura 11 - Influência da espessura na curva limite de conformação segundo Powey e Partinière(1980).

3.5 Influência da Trajetória de Deformação

Os estudos realizados sobre a curva limite de conformação determinam que existe uma trajetória de deformação que aponta a sucessão dos valores de deformação que um determinado ponto percorre até que este ponto atinja o valor de ruptura do material. O início da trajetória de deformação se dá no início dos eixos de deformação, onde $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 0$. Através de diferentes ensaios experimentais se torna possível a determinação da curva limite de conformação (CLC) como apresentada da Figura 12, Pomey e Partinière (1980) observam que a trajetória de deformação é praticamente retilínea até a aparição da estricção.

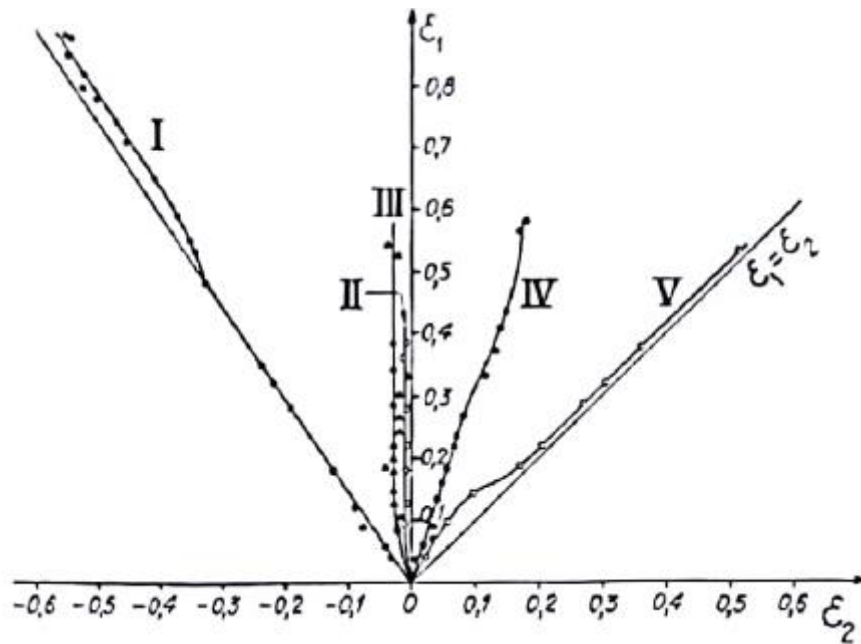


Figura 12 - Trajetória de Deformação (Pomey e Partinière, 1980).

Normalmente, o caminho da deformação que se verifica em operações de estampagem de um único estágio, é do tipo quase-proporcional, isto é, verifica-se uma relação constante entre a deformação maior e a menor. Durante o processo de estampagem, diversas partes do material têm chance de sofrer variações que vão de um tipo de deformação até o outro. Em operações complexas, podemos encontrar um caminho de deformação igualmente complexo, com mudanças até abruptas no tipo de deformação. Vários trabalhos técnicos, neste aspecto, têm evidenciado que há mudanças substanciais na estampabilidade (refletidas na CLC), de acordo com caminho tomado, segundo Plaut (2003).

3.6 Influência da Taxa de Deformação

Para a grande parte dos materiais, um aumento da taxa de deformação irá causar um aumento no limite de escoamento do material. Quando o limite de elasticidade é aumentado o material suporta maiores deformação e conseqüentemente a CLC sofrerá alterações. A proporção do efeito depende do material e da temperatura. Na maioria de materiais metálicos o efeito da temperatura ambiente é pequeno e pode freqüentemente ser negligenciado. Um fator de aumento de 10 vezes da taxa de deformação pode levantar a curva de tensão-

deformação em cerca de 1 ou por 2%. O modelo adotado é o M-K (proposto por Marciniak e Kuczynski) onde é adotada uma imperfeição inicial na espessura do material, onde ξ_a é a deformação na região livre de imperfeições e ξ_b é a deformação na região defeituosa.

Na região deformada cujo comprimento é da mesma ordem da espessura da chapa, a taxa de deformação é da ordem de cem vezes aquela dada para o restante de material. A tensão de deformação local atinge valores conseqüentemente superiores, direcionando a um desenvolvimento mais lento do pescoço, permitindo que haja maiores deformações na região adjacente a ele, aumentando a deformação limite na CLC.

O efeito de m na CLC é semelhante ao de n , sendo assim, haverá um aumento do valor desses índices no qual estão associados a uma maior uniformidade na distribuição das deformações e a postergar o escoamento localizado. A taxa dos limites de conformação irá aumentar junto com os valores do coeficiente de sensibilidade de acordo com a taxa de deformação m , conforme figura 13.

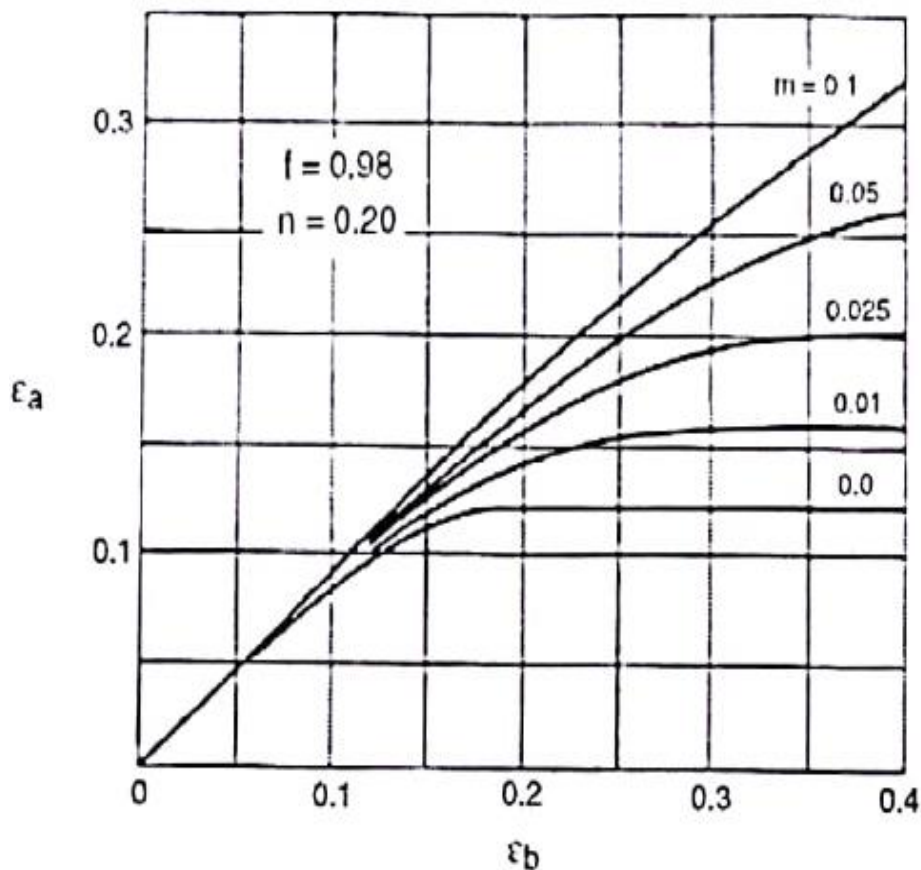


Figura 13 - Influência da taxa de deformação nos valores de deformação na zona livre do defeito e na zona defeituosa segundo modelo de localização do tipo Marciniak-Kuczynski (Hosford e Caddell, 1983)

3.7 Espessura e Orientação

O aumento da espessura implica em retardar a formação da deformação localizada.

Para valores de $n < 0,2$ verifica-se um aumento na mesma proporção no estado plano de deformação (0). Acima deste valor, a influência de n (na posição da curva) deixa de existir, permanecendo porém, o efeito da espessura em conformidade com Plaut (2003) conforme Figura 14.

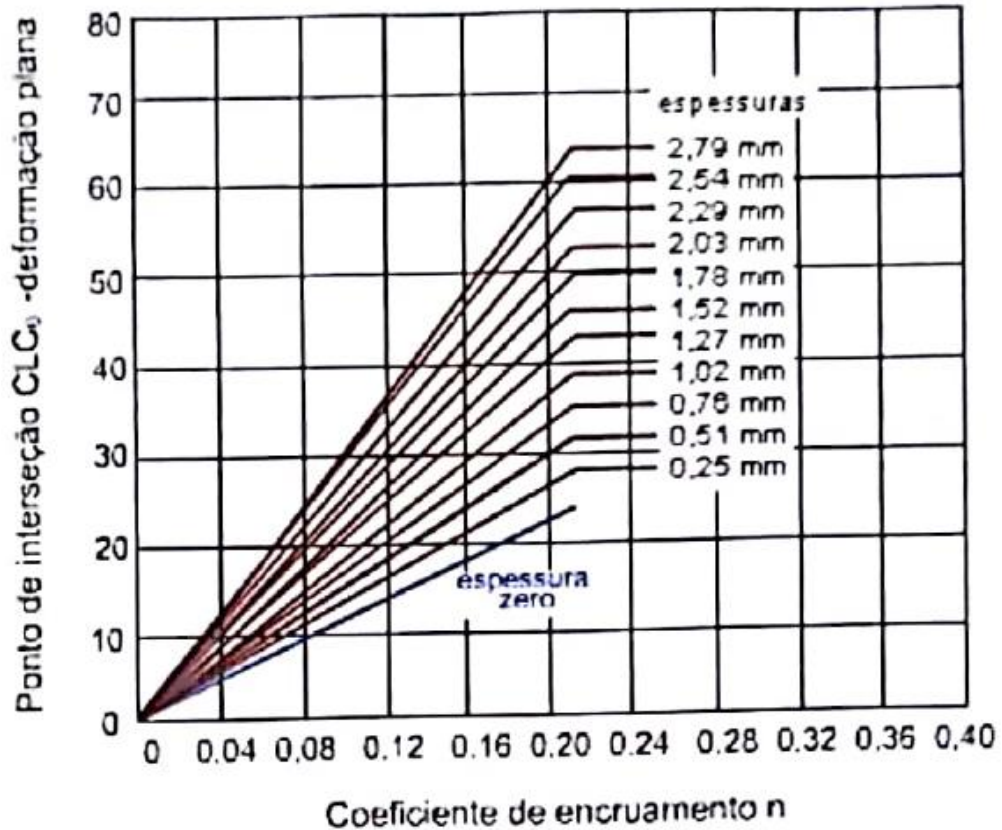


Figura 14 - Influência da espessura. (Plaut: 2003)

A interseção da curva com o eixo vertical CLC_0 , que representa o estado de deformação plana é o ponto mínimo e possui o valor do coeficiente de encruamento. Como visto o ponto de interseção cresce de forma linear à espessura, até atingir o valor de 3mm. A taxa de variação do ponto de interseção CLC_0 em relação ao coeficiente de encruamento n é proporcional até $n=0,2$. Além deste limite, podem ocorrer aumentos extras de espessura ou mesmo de n que causará pouco efeito na posição da curva.

4 METODOLOGIA

4.1 Procedimento Experimental

Todos os procedimentos experimentais teóricos dos corpos de prova (Nakazima, tração e análise química) foram realizados numa siderúrgica do Sul Fluminense do estado do Rio de Janeiro, e os ensaios práticos na indústria automobilística. A depuração dos resultados após as conformações foram realizados por meio de um programa de aquisição e imagens e obtenção dos cálculos desenvolvidos (ImageJ).

4.1.1 Materiais

Os materiais em estudo são aços zincados em linhas contínuas por imersão a quente, conforme normas NBR 7008-2 ZEE grau2, e EN 10346:2009 HX260YD.

Foram realizadas análises químicas em uma indústria siderúrgica do Sul Fluminense do estado do Rio de Janeiro nas amostras das chapas, em % de pesos referentes aos elementos carbono, manganês, fósforo, enxofre, silício, alumínio, nióbio, titânio, nitrogênio, molibdênio, e cromo conforme mostrado na tabela 2.

Tabela 2 - Composição química do aço NBR 7008 ZEE grau 2 – Indústria siderúrgica

C(%)	Mn(%)	P(%)	S(%)	Si(%)	Al(%)	Nb(%)	Ti(%)	Ni(%)	Mo(%)	Cr(%)
0,002	0,125	0,013	0,01	0,004	0,043	0,002	0,053	0,005	0,002	0,011

Tabela 3 - Composição química do aço EN 10346:2009 HX260YD – Indústria siderúrgica

C(%)	Mn(%)	P(%)	S(%)	Si(%)	Al(%)	Nb(%)	Ti(%)	Ni(%)	Mo(%)	Cr(%)
0,003	0,551	0,074	0,011	0,005	0,03	0,016	0,02	0,009	0,003	0,012

O material NBR7008-2 ZEE grau 2 em estudo é proveniente de chapas laminadas de um aço baixo carbono para estampagem, com espessura de 0,85mm e propriedades mecânicas descritas na tabela 4.

Tabela 4 – Propriedades mecânicas do aço ZEE grau 2, conforme norma ABNT NBR 7008 – Autores

Direção de ensaio	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência (MPa)	Alongamento Total (%)	Coefficiente de Anisotropia média (r)	Coefficiente de Encruamento médio (n)
0°	166	296	47	2,24	0,28

O material EN 10346:2009 HX260YD em estudo é oriundo de chapas laminadas de um aço baixo carbono de alta resistência para estampagem microligado ao Nióbio, com espessura de 0,7mm e propriedades mecânicas descritas na tabela 5.

Tabela 5 - propriedades mecânicas do aço HX260YD conforme norma BS EN 10346:2009 - Autores

Direção de ensaio	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência (MPa)	Alongamento Total (%)	Coefficiente de Anisotropia média (r)	Coefficiente de Encruamento médio (n)
0°	306	413	32,5	1,8	0,19

4.1.2 Ensaio de tração uniaxial

Os ensaios de tração uniaxial para determinação de propriedades mecânicas, encruamento e anisotropia plástica foram realizados em uma máquina universal Instron série 4260 com célula de carga de 3000Kgf e software Instron Série IX. Foram realizados testes em três corpos de prova por direção e por especificação, longitudinal (0°), transversal (90°) e diagonal (45°), fazendo assim as medidas para se obter as propriedades mecânicas dos materiais. As dimensões do corpo de prova de tração uniaxial foram tomadas segundo a norma NBR 6673 e estão mostradas na Figura 15.

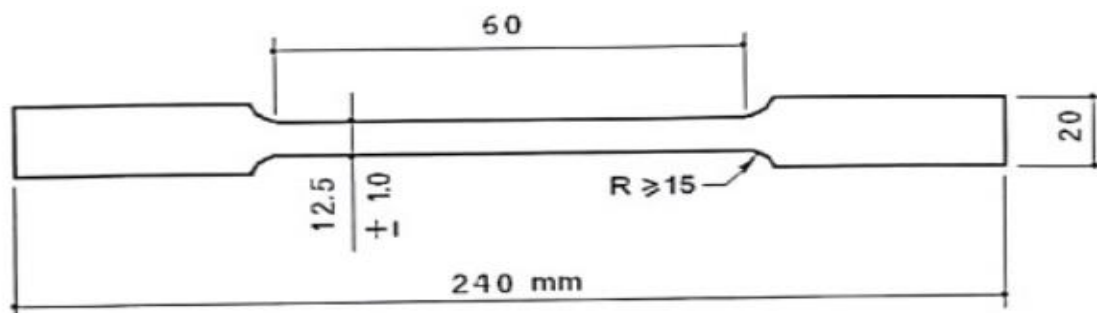


Figura 15- Corpo de prova para ensaio de tração uniaxial.- Autores

O objetivo do ensaio de tração é avaliar as variações das propriedades no plano da chapa. Com as médias das propriedades de cada corpo de prova na direção 0° , 45° e 90° em relação à direção de laminação onde foi possível avaliar a diferença entre os valores do limite de escoamento, LE, o limite de resistência, LR, o alongamento total, Δl_u , a anisotropia plástica, R, e o expoente de encruamento, n, do material de acordo com a direção.

4.1.3 Curva limite de conformação

As curvas teóricas Limite de Conformação dos materiais analisados foram obtidas na região de fratura e de estrição próxima à fratura, e foram levantadas através do ensaio conforme método Nakazima. Nos corpos de prova foram impressas grades circulares nas amostras para avaliação das deformações, conforme apresentados na fig. 6, pág. 10. Esses corpos de prova foram conformados em uma máquina hidráulica AMSLER 100 t em que o punção e matriz, e que são fabricados com aço SAE 4140 temperado e revenido com uma dureza de 53 RC, estão acoplados (figura 16).

Após a conformação, a análise dos corpos de prova para obtenção das deformações foram realizadas através de fotografias nas regiões de maiores deformações sendo utilizado o programa ImageJ, que utiliza sobreposição de imagens para obter os resultados de maior e menor deformação na superfície do corpo de prova.

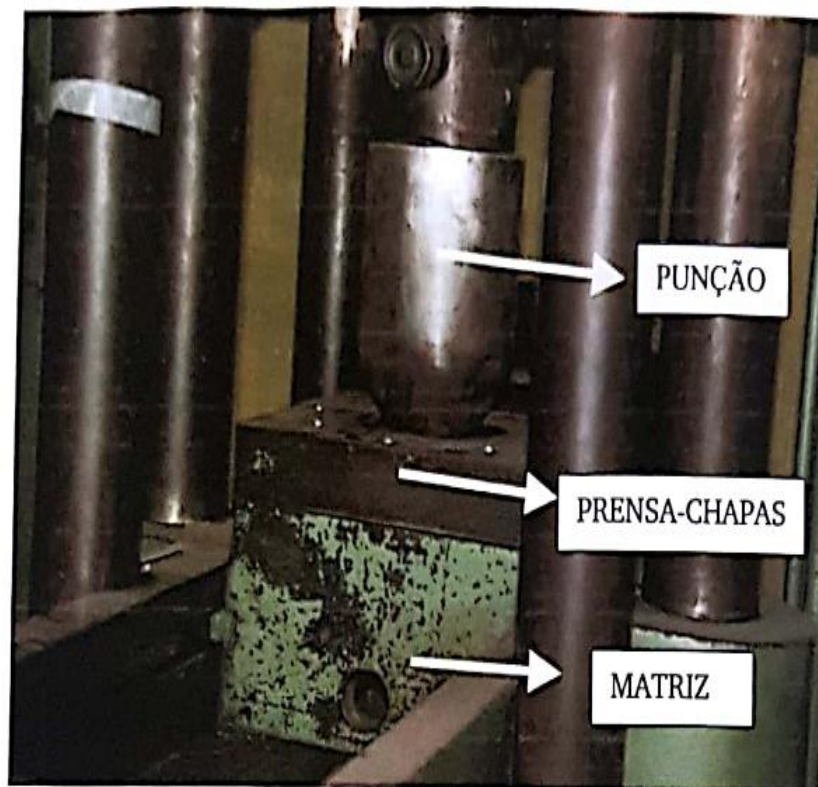


Figura 16 – Ferramental de ensaio com punção hemisférico pelo método de Nakazima. – Indústria siderúrgica

4.1.3.1 Preparação dos corpos de prova

Os corpos de prova que foram utilizados, e as suas dimensões, segundo Nakazima, para os ensaios de conformação são mostrados na figura 17, sendo a direção do esboço no mesmo sentido da direção de laminação (longitudinal). As dimensões utilizadas foram: 80x200, 90x200, 100x200, 110x200, 130x200, 150x200, 160x200, 170x200, 180x200 e 200x200mm, totalizando 10 corpos de prova.

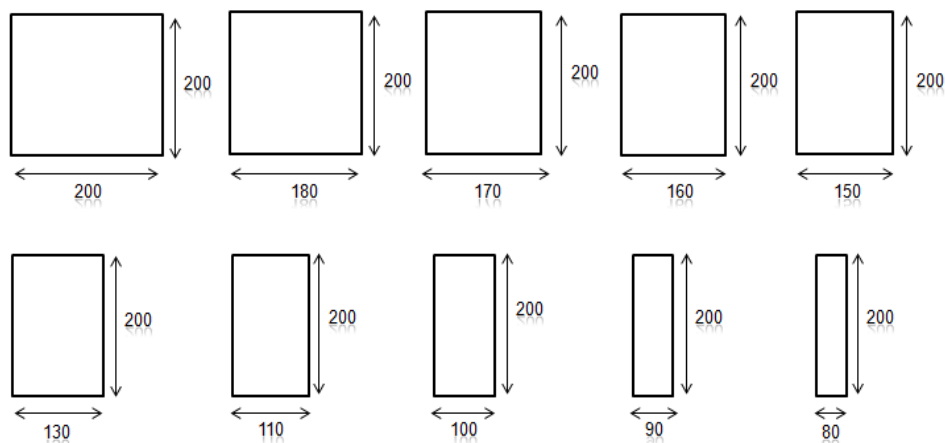


Figura 17 – Dimensões utilizadas nos corpos de prova em milímetros – Autores

4.1.3.2 Impressão das grades circulares nos corpos de prova

Para verificação das deformações após conformação é necessário a gravação de uma grade nos corpos de prova a serem deformados.

Neste trabalho, a marcação utilizada foi uma grade Circular de 2,5 milímetros de diâmetro em cada corpo de prova, através do processo eletrolítico, com o objetivo de transferir a imagem do estêncil para o material a partir do ataque químico acelerado via corrente elétrica. As etapas desse processo são listadas abaixo:

- Limpeza do CP com álcool de forma a retirar qualquer tipo de sujeira ou gordura da superfície dos corpos de prova;
- Posicionamento do CP sobre uma chapa metálica de maior dimensão e por cima coloca-se a tela com o negativo da malha a ser gravada;
- A seguir coloca-se um feltro encharcado em solução eletrolítica. Neste caso utilizamos como eletrólito o Eletromark 344;
- Efetua-se a regulagem do gerador de tensão e corrente na amperagem e voltagem desejada. Prende-se a chapa na garra que está interligada ao terminal positivo do gerador. A seguir passa-se o rolo compressor que está ligado ao terminal negativo, sobre o feltro fazendo circular uma corrente entre o rolo e a chapa provocando o ataque químico do CP;
- Finalmente, retira-se o CP já com a grade impressa e imerge-se o mesmo em banho com um neutralizador para controlar o ataque eletrocorrosivo no material.

4.1.3.3 Realização do ensaio de Nakazima nos corpos de prova

Posiciona-se o corpo de prova entre a matriz e o prensa chapas, e a seguir aplica-se uma carga através de um punção hemisférico até o rompimento do CP.

As etapas do ensaio foram às seguintes:

- posicionamento da chapa no plano superior da matriz;
- lubrificação do punção/corpo de prova com um filme de PVC, de forma a diminuir o atrito entre CP e o punção no momento do ensaio, devido a essa grandeza influenciar no posicionamento da CLC;
- posicionamento do prensa chapa em cima da camada composta pelo filme de PVC, aplicando, em seguida, uma pré-carga no plano superior do prensa chapas de forma a transmitir esta força e permitir que o freio de estampagem deforme o material e o

fixe-se na matriz evitando assim o escorregamento da chapa. Em seguida a fixação total é realizada através de seis parafusos $\frac{3}{4}$ ". Esta etapa é de suma importância para o sucesso do ensaio, pois se devidamente realizado ele impede o escorregamento da chapa para dentro da matriz garantindo assim que o material deformado é somente aquele que está em contato com o punção;

- liberação da prensa hidráulica para início do ensaio. Neste momento é necessário atenção quanto ao valor da carga, pois quando o material está na eminência de romper a carga decresce até que o corpo de prova se rompe a um determinado valor de carga.

4.1.4 Obtenção dos valores através do ImageJ

A depuração de resultados do ensaio de Nakazima, assim como dos ensaios de conformação na peça, são realizados com o emprego de um *software* de análise de imagens digitais, o ImageJ. Este *software* permite realizar medições a partir de um comprimento referenciado, tanto em zonas específicas quanto na totalidade da imagem.

Já nas medidas de deformação no ensaio de Nakazima será aplicado ao CP não deformado o gradeamento eletrolítico. O gradeamento utilizado é circular com um diâmetro de 2,5mm. Convém mencionar que o diâmetro do círculo impresso é em função da espessura do material.

O ensaio de Nakazima é realizado e o CP assume forma deformada, assim como a peça em estudo após o processo de estampagem. Para obtenção de melhores resultados na região de estiramento é importante que a lubrificação seja eficaz.. A peça e o CP resultantes terão, a partir desta etapa, suas deformações analisadas e mensuradas.

Para o ensaio de Nakazima, são selecionadas quatro regiões com as maiores deformações em torno da fratura de cada CP. Em cada uma dessas regiões é realizado uma fotografia, evidenciando os gradeamentos deformados pelo ensaio de conformação mais próximo a fratura, conforme figura 18.

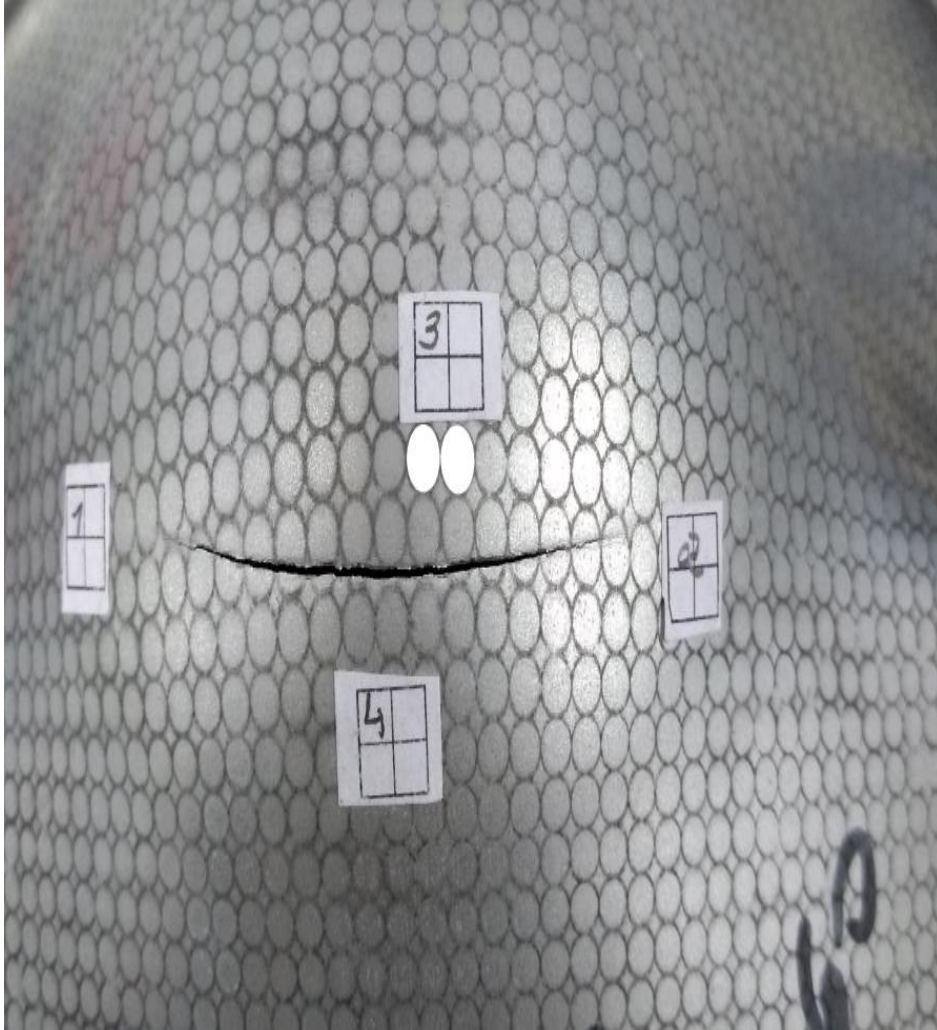


Figura 18 – fotografia da região n° 3 do CP 200x160 – Indústria siderúrgica

Como o ensaio na peça não deve apresentar fratura, as medidas são tomadas nas regiões de maiores deformações. Essas regiões variam de acordo com a quantidade de deformações que a peça sofre durante a conformação. Cada peça a ser estudada apresenta diferentes quantidades de deformações conforme a sua aplicabilidade. A peça automotiva a seguir apresenta inúmeras deformações, conforme figura 19, onde foram evidenciadas 15 regiões diferentes de estudo.



Figura 19 – fotografia de uma peça automotiva após estampagem com a identificação de cada região a ser estudada – Indústria automobilística

4.1.5 Método de obtenção dos dados da CLC

A obtenção dos dados da CLC teórica foram calculados a partir das medidas de dimensões feitas pelo *software* ImageJ nos 10 corpos de prova para cada especificação de material. Cada CP gerou uma nuvem de dados que varia entre 7 e 12 pontos de deformação próximo a fratura. Para determinar os pontos das deformações reais a serem plotadas na CLC, respeitamos as equações Eq. 1 e Eq. 2 para cada ponto de deformação analisado pelo ImageJ,

em seguida foi identificada a maior e a menor deformação real e também foram feitos os cálculos das médias das maiores e menores deformações.

$$\varepsilon_1 = \ln (l_1 \div d) \quad [\text{Eq. 1}]$$

$$\varepsilon_2 = \ln (l_2 \div d) \quad [\text{Eq. 2}]$$

As obtenções dos dados da CLC prática foram feitos em peças automotivas com problemas de conformação. Foram identificados pela empresa automotiva peças para o levantamento da CLC, visando à comparação dos materiais. As peças foram: bagageiro interno e porta traseira externa.

Primeiramente foram impressas grades circulares dos esboços, conforme o item 4.1.3.2, a seguir esses esboços foram levados a prensa e confeccionadas as peças. Posteriormente essas peças foram enviadas para a indústria siderúrgica onde foram realizadas as medição das deformações. Os cálculos foram feitos conforme o item 4.1.5.

4.2 Resultados e discussões

4.2.1 Ensaio de tração

Os valores dos ensaios de tração uniaxial para os dois materiais estudados estão apresentados na tabela 5A (ZEE grau 2) e 5B (HX260YD).

Tabela 5A- Propriedades mecânicas do aço NBR 7008 ZEE grau 2 – Indústria siderúrgica

α (graus)	LE (Mpa)	LR (Mpa)	$\Delta l_u \Delta l_u$ (%)	n	R
0°	166	296	46	0,28	2,01
45°	178	300	46	0,28	1,98
90°	177	296	47	0,28	2,99
				$\bar{n} = 0,28$	$\bar{r} = 2,24$

Tabela 5B- Propriedades mecânicas do aço EN 10346:2009 HX260YD – Indústria siderúrgica

α (graus)	LE (Mpa)	LR (Mpa)	$\Delta l_u \Delta l_u$ (%)	n	R
0°	306	413	32,5	0,19	2,23
45°	295	422	32,9	0,2	1,55
90°	298	406	35,5	0,19	1,87
				$\bar{n} = 0,19$	$\bar{r} = 1,8$

Os resultados obtidos nos ensaios de tração para os materiais analisados mostram que existe uma grande diferença de propriedades entre os mesmos, evidenciando que o material ZEE grau 2, em função do seu baixo limite de escoamento deverá ter uma performance, em termos de conformação, muito superior em relação ao material HX260YD. Este comportamento é também claramente demonstrado pelos valores de coeficiente de anisotropia. Pelos valores de encruamento (n) verificamos que o material ZEE grau 2 absorve muito mais deformação durante o processo de conformação (estiramento).

4.2.2 CLC teórica

As tabelas a seguir apresentam os resultados do ensaio de Nakazima, valores gerados pelo ImageJ, os cálculos das deformações reais para cada CP, conforme item 4.1.5, e tipo de especificação atendendo as especificações das normas ABNT NBR 7008-2 e EN BS 10346.

- NBR 7008 - ZEE grau2

Tabela 6 - Dados para CP 200x80 NBR 7008 ZEE grau 2 – Indústria siderúrgica

CP 200x80	<i>ImageJ</i>		<i>ImageJ/1000</i>		ϵ_1	ϵ_2
	<i>Maior</i>	<i>Menor</i>	<i>Maior</i>	<i>Menor</i>		
		4.761	1.902	4,761	1,902	0,644167
	4.305	1.933	4,305	1,933	0,543486	-0,25722
	4.493	1.776	4,493	1,776	0,58623	-0,34193
	4.281	1.768	4,281	1,768	0,537896	-0,34644
	4.045	1.750	4,045	1,75	0,481191	-0,35667
	4.021	1.774	4,021	1,774	0,47524	-0,34305
	4.358	1.991	4,358	1,991	0,555723	-0,22765
	4.258	1.824	4,258	1,824	0,532509	-0,31526

Tabela 7 – Dados para CP 200x90 NBR 7008 ZEE grau 2 – Indústria siderúrgica

CP 200x90	<i>ImageJ</i>		<i>ImageJ/1000</i>		ϵ_1	ϵ_2
	<i>Maior</i>	<i>Menor</i>	<i>Maior</i>	<i>Menor</i>		
		4.456	1.908	4,456	1,908	0,577961
	4.142	1.780	4,142	1,78	0,504888	-0,33968
	4.701	2.011	4,701	2,011	0,631485	-0,21766
	4.412	2.035	4,412	2,035	0,568037	-0,20579
	3.929	1.812	3,929	1,812	0,452094	-0,32186
	3.937	1.919	3,937	1,919	0,454128	-0,26449
	3.917	1.915	3,917	1,915	0,449035	-0,26657
	3.938	1.923	3,938	1,923	0,454382	-0,2624
	3.937	1.919	3,937	1,919	0,454128	-0,26449
	3.939	1.827	3,939	1,827	0,454636	-0,31362

Tabela 8 - Dados para CP 200x100 NBR 7008 ZEE grau 2 – Indústria siderúrgica

CP 200x100	<i>ImageJ</i>		<i>ImageJ/1000</i>		ϵ_1	ϵ_2
	<i>Maior</i>	<i>Menor</i>	<i>Maior</i>	<i>Menor</i>		
		4.266	1.982	4,266	1,982	0,534386
	4.233	1.963	4,233	1,963	0,52662	-0,24182
	4.533	1.984	4,533	1,984	0,595093	-0,23118
	3.724	1.820	3,724	1,82	0,398508	-0,31745
	3.883	1.888	3,883	1,888	0,440317	-0,28077
	3.928	1.904	3,928	1,904	0,45184	-0,27233
	4.136	1.835	4,136	1,835	0,503438	-0,30925
	4.059	1.921	4,059	1,921	0,484646	-0,26344
	3.982	1.893	3,982	1,893	0,465493	-0,27813

Tabela 9 - Dados para CP 200x110 NBR 7008 ZEE grau 2 – Indústria siderúrgica

CP 200x110	<i>ImageJ</i>		<i>ImageJ/1000</i>		ϵ_1	ϵ_2
	<i>Maior</i>	<i>Menor</i>	<i>Maior</i>	<i>Menor</i>		
		4.327	1.971	4,327	1,971	0,548584
	4.044	1.842	4,044	1,842	0,480944	-0,30544
	4.457	2.028	4,457	2,028	0,578185	-0,20924
	4.156	2.106	4,156	2,106	0,508262	-0,1715
	4.081	1.984	4,081	1,984	0,490051	-0,23118
	3.972	1.930	3,972	1,93	0,462979	-0,25877
	4.231	1.918	4,231	1,918	0,526148	-0,26501
	4.220	1.968	4,22	1,968	0,523544	-0,23927

Tabela 10 - Dados para CP 200x120 NBR 7008 ZEE grau 2 – Indústria siderúrgica

CP 200x130	<i>ImageJ</i>		<i>ImageJ/1000</i>		ϵ_1	ϵ_2
	<i>Maior</i>	<i>Menor</i>	<i>Maior</i>	<i>Menor</i>		
		4.045	1.900	4,045	1,9	0,481191
	4.447	2.091	4,447	2,091	0,575939	-0,17865
	4.133	1.939	4,133	1,939	0,502713	-0,25412
	3.693	2.001	3,693	2,001	0,390148	-0,22264
	3.721	2.110	3,721	2,11	0,397702	-0,1696
	4.151	2.063	4,151	2,063	0,507059	-0,19213
	4.067	2.017	4,067	2,017	0,486615	-0,21468

Tabela 11 – Dados para CP 200x150 NBR 7008 ZEE grau 2 – Indústria siderúrgica

CP 200x150	<i>ImageJ</i>		<i>ImageJ/1000</i>		ϵ_1	ϵ_2
	<i>Maior</i>	<i>Menor</i>	<i>Maior</i>	<i>Menor</i>		
		3.999	2.101	3,999	2,101	0,469754
	3.819	2.180	3,819	2,18	0,423698	-0,13697
	3.989	2.277	3,989	2,277	0,46725	-0,09343
	3.733	2.131	3,733	2,131	0,400921	-0,1597
	3.413	2.384	3,413	2,384	0,311301	-0,04751
	3.478	2.251	3,478	2,251	0,330167	-0,10492
	3.548	2.304	3,548	2,304	0,350093	-0,08164
	4.076	2.279	4,076	2,279	0,488825	-0,09255
	4.064	2.259	4,064	2,259	0,485877	-0,10137
	4.030	2.152	4,03	2,152	0,477476	-0,14989

Tabela 12 - Dados para CP 200x160 NBR 7008 ZEE grau 2 – Indústria siderúrgica

CP 200x160	<i>ImageJ</i>		<i>ImageJ/1000</i>		ϵ_1	ϵ_2
	<i>Maior</i>	<i>Menor</i>	<i>Maior</i>	<i>Menor</i>		
		3.349	2.290	3,349	2,29	0,292371
	3.762	2.443	3,762	2,443	0,40866	-0,02306
	3.426	2.406	3,426	2,406	0,315103	-0,03833
	3.731	2.553	3,731	2,553	0,400386	0,020978
	3.245	2.378	3,245	2,378	0,260825	-0,05003
	3.140	2.552	3,14	2,552	0,227932	0,020587
	2.929	2.379	2,929	2,379	0,15837	-0,04961
	3.717	2.334	3,717	2,334	0,396626	-0,06871
	3.756	2.357	3,756	2,357	0,407064	-0,0589
	3.746	2.355	3,746	2,355	0,404398	-0,05975

Tabela 13 – Dados para CP 200x170 NBR 7008 ZEE grau 2 – Indústria siderúrgica

CP 200x170	<i>ImageJ</i>		<i>ImageJ/1000</i>		ϵ_1	ϵ_2
	<i>Maior</i>	<i>Menor</i>	<i>Maior</i>	<i>Menor</i>		
		3.631	2.536	3,631	2,536	0,373217
	3.343	2.386	3,343	2,386	0,290578	-0,04667
	3.400	2.433	3,4	2,433	0,307485	-0,02717
	3.677	2.639	3,677	2,639	0,385806	0,054109
	3.171	2.480	3,171	2,48	0,237756	-0,00803
	3.210	2.509	3,21	2,509	0,24998	0,003594
	3.302	2.613	3,302	2,613	0,278238	0,044208
	3.465	2.370	3,465	2,37	0,326422	-0,0534
	3.552	2.426	3,552	2,426	0,35122	-0,03005
	3.466	2.522	3,466	2,522	0,32671	0,008762

Tabela 14 - Dados para CP 200x180 NBR 7008 ZEE grau 2 – Indústria siderúrgica

CP 200x180	<i>ImageJ</i>		<i>ImageJ/1000</i>		ϵ_1	ϵ_2
	<i>Maior</i>	<i>Menor</i>	<i>Maior</i>	<i>Menor</i>		
		3.801	2.624	3,801	2,624	0,418973
	3.732	2.586	3,732	2,586	0,400654	0,033822
	3.567	2.465	3,567	2,465	0,355434	-0,0141
	3.475	2.569	3,475	2,569	0,329304	0,027226
	3.048	2.599	3,048	2,599	0,198195	0,038836
	3.350	2.666	3,35	2,666	0,29267	0,064288
	3.626	2.468	3,626	2,468	0,371839	-0,01288
	3.737	2.547	3,737	2,547	0,401992	0,018625
	3.604	2.445	3,604	2,445	0,365754	-0,02225

Tabela 15 – Dados para CP 200x200 NBR 7008 ZEE grau 2 – Indústria siderúrgica

CP 200x200	<i>ImageJ</i>		<i>ImageJ/1000</i>		ϵ_1	ϵ_2
	<i>Maior</i>	<i>Menor</i>	<i>Maior</i>	<i>Menor</i>		
		3.876	2.495	3,876	2,495	0,438513
	3.808	2.595	3,808	2,595	0,420813	0,037296
	3.896	2.394	3,896	2,394	0,44366	-0,04333
	3.466	2.659	3,466	2,659	0,32671	0,061659
	3.363	2.579	3,363	2,579	0,296543	0,031111
	3.449	2.334	3,449	2,334	0,321794	-0,06871
	3.509	2.621	3,509	2,621	0,33904	0,047265
	3.642	2.467	3,642	2,467	0,376242	-0,01329

- EN 10346:2009 HX260YD

Agora serão apresentados os resultados para os corpos de prova ensaiados para o material de especificação HX260YD, conforme norma EN BS 10346.

Tabela 16 - Dados para CP 200x80 EN 10346:2009 HX260YD – Indústria siderúrgica

CP 200x80	<i>ImageJ</i>		<i>ImageJ/1000</i>		ϵ_1	ϵ_2
	<i>Maior</i>	<i>Menor</i>	<i>Maior</i>	<i>Menor</i>		
		3.559	2.135	3,559	2,135	0,353189
	3.806	1.963	3,806	1,963	0,420288	-0,24182
	3.781	1.953	3,781	1,953	0,413698	-0,24692
	3.708	1.915	3,708	1,915	0,394202	-0,26657
	3.619	2.138	3,619	2,138	0,369907	-0,15642
	3.677	1.974	3,677	1,974	0,385806	-0,23623
	3.773	1.907	3,773	1,907	0,411158	-0,27076
	3.471	2.003	3,471	2,003	0,328152	-0,22164
	3.443	1.990	3,443	1,99	0,320052	-0,22816

Tabela 17 - Dados para CP 200x90 EN 10346:2009 HX260YD – Indústria siderúrgica

CP 200x90	<i>ImageJ</i>		<i>ImageJ/1000</i>		ϵ_1	ϵ_2
	<i>Maior</i>	<i>Menor</i>	<i>Maior</i>	<i>Menor</i>		
		3.896	2.042	3,896	2,042	0,44366
	3.453	2.057	3,453	2,057	0,322953	-0,19504
	3.720	2.069	3,72	2,069	0,397433	-0,18923
	3.521	2.157	3,521	2,157	0,342454	-0,14757
	3.479	2.136	3,479	2,136	0,330454	-0,15736
	3.533	2.019	3,533	2,019	0,345857	-0,21369
	3.622	2.005	3,622	2,005	0,370736	-0,22065
	3.543	1.960	3,543	1,96	0,348683	-0,24335
	3.494	2.021	3,494	2,021	0,334756	-0,2127

Tabela 18 - Dados para CP 200x100 EN 10346:2009 HX260YD – Indústria siderúrgica

CP 200x100	<i>ImageJ</i>		<i>ImageJ/1000</i>		ϵ_1	ϵ_2
	<i>Maior</i>	<i>Menor</i>	<i>Maior</i>	<i>Menor</i>		
		3.789	2.183	3,789	2,183	0,415811
	3.537	2.019	3,537	2,019	0,346988	-0,21369
	3.641	2.080	3,641	2,08	0,375968	-0,18392
	3.456	2.196	3,456	2,196	0,323821	-0,12965
	3.616	2.100	3,616	2,1	0,369078	-0,17435
	3.582	2.130	3,582	2,13	0,359631	-0,16017
	3.660	2.187	3,66	2,187	0,381172	-0,13376
	3.568	2.042	3,568	2,042	0,355714	-0,20236

Tabela 19 - Dados para CP 200x110 EN 10346:2009 HX260YD – Indústria siderúrgica

CP 200x110	<i>ImageJ</i>		<i>ImageJ/1000</i>		ϵ_1	ϵ_2
	<i>Maior</i>	<i>Menor</i>	<i>Maior</i>	<i>Menor</i>		
		4.106	2.038	4,106	2,038	0,496159
	3.990	2.084	3,99	2,084	0,4675	-0,182
	3.507	1.942	3,507	1,942	0,33847	-0,25257
	3.631	2.009	3,631	2,009	0,373217	-0,21865
	3.666	2.033	3,666	2,033	0,38281	-0,20678
	3.738	1.911	3,738	1,911	0,40226	-0,26866
	3.921	2.025	3,921	2,025	0,450056	-0,21072
	3.849	1.985	3,849	1,985	0,431523	-0,23067
	3.810	2.042	3,81	2,042	0,421338	-0,20236

Tabela 20 - Dados para CP 200x130 EN 10346:2009 HX260YD – Indústria siderúrgica

CP 200x130	<i>ImageJ</i>		<i>ImageJ/1000</i>		ϵ_1	ϵ_2
	<i>Maior</i>	<i>Menor</i>	<i>Maior</i>	<i>Menor</i>		
		3.541	2.231	3,541	2,231	0,348118
	3.206	2.193	3,206	2,193	0,248733	-0,13102
	3.440	2.260	3,44	2,26	0,319181	-0,10093
	3.266	2.215	3,266	2,215	0,267275	-0,12104
	3.400	2.242	3,4	2,242	0,307485	-0,10892
	3.294	2.166	3,294	2,166	0,275812	-0,14341
	3.319	2.184	3,319	2,184	0,283373	-0,13513

Tabela 21 - Dados para CP 200x150 EN 10346:2009 HX260YD – Indústria siderúrgica

CP 200x150	<i>ImageJ</i>		<i>ImageJ/1000</i>		ϵ_1	ϵ_2
	<i>Maior</i>	<i>Menor</i>	<i>Maior</i>	<i>Menor</i>		
		3.276	2.371	3,276	2,371	0,270332
	3.246	2.351	3,246	2,351	0,261133	-0,06145
	3.171	2.304	3,171	2,304	0,237756	-0,08164
	3.093	2.249	3,093	2,249	0,212851	-0,10581
	3.268	2.372	3,268	2,372	0,267887	-0,05256
	3.237	2.350	3,237	2,35	0,258356	-0,06188
	3.205	2.357	3,205	2,357	0,248421	-0,0589
	3.159	2.318	3,159	2,318	0,233965	-0,07559
	3.059	2.372	3,059	2,372	0,201797	-0,05256

Tabela 22 - Dados para CP 200x160 EN 10346:2009 HX260YD – Indústria siderúrgica

CP 200x160	<i>ImageJ</i>		<i>ImageJ/1000</i>		ϵ_1	ϵ_2
	<i>Maior</i>	<i>Menor</i>	<i>Maior</i>	<i>Menor</i>		
		3.391	2.439	3,391	2,439	0,304834
	3.334	2.404	3,334	2,404	0,287882	-0,03916
	3.063	2.440	3,063	2,44	0,203104	-0,02429
	3.114	2.489	3,114	2,489	0,219617	-0,00441
	3.414	2.406	3,414	2,406	0,311594	-0,03833
	3.353	2.486	3,353	2,486	0,293565	-0,00562
	3.341	2.342	3,341	2,342	0,289979	-0,06529

Tabela 23 - Dados para CP 200x170 EN 10346:2009 HX260YD – Indústria siderúrgica

CP 200x170	<i>ImageJ</i>		<i>ImageJ/1000</i>		ϵ_1	ϵ_2
	<i>Maior</i>	<i>Menor</i>	<i>Maior</i>	<i>Menor</i>		
		3.200	2.409	3,2	2,409	0,24686
	3.079	2.493	3,079	2,493	0,208314	-0,0028
	3.340	2.510	3,34	2,51	0,28968	0,003992
	3.206	2.410	3,206	2,41	0,248733	-0,03666
	3.111	2.476	3,111	2,476	0,218653	-0,00965
	3.216	2.459	3,216	2,459	0,251848	-0,01654
	3.208	2.326	3,208	2,326	0,249357	-0,07214
	3.073	2.272	3,073	2,272	0,206364	-0,09563

Tabela 24 - Dados para CP 200x180 EN 10346:2009 HX260YD – Indústria siderúrgica

CP 200x180	<i>ImageJ</i>		<i>ImageJ/1000</i>		ϵ_1	ϵ_2
	<i>Maior</i>	<i>Menor</i>	<i>Maior</i>	<i>Menor</i>		
		3.429	2.514	3,429	2,514	0,315978
	3.328	2.441	3,328	2,441	0,286081	-0,02388
	3.433	2.562	3,433	2,562	0,317144	0,024497
	3.220	2.406	3,22	2,406	0,253091	-0,03833
	2.947	2.593	2,947	2,593	0,164497	0,036525
	3.306	2.606	3,306	2,606	0,279448	0,041526
	3.191	2.520	3,191	2,52	0,244044	0,007968

Tabela 25 - Dados para CP 200x200 EN 10346:2009 HX260YD – Indústria siderúrgica

CP 200x200	<i>ImageJ</i>		<i>ImageJ/1000</i>		ϵ_1	ϵ_2
	<i>Maior</i>	<i>Menor</i>	<i>Maior</i>	<i>Menor</i>		
		3.289	2.597	3,289	2,597	0,274293
	3.244	2.678	3,244	2,678	0,260516	0,06878
	3.180	2.624	3,18	2,624	0,24059	0,048409
	3.244	2.679	3,244	2,679	0,260516	0,069153
	3.270	2.549	3,27	2,549	0,268499	0,01941
	3.338	2.602	3,338	2,602	0,289081	0,03999
	3.294	2.568	3,294	2,568	0,275812	0,026837
	3.335	2.605	3,335	2,605	0,288182	0,041142

Com base nos valores de deformação dos CP's descritos nas tabelas acima, realizamos as médias das maiores e menores deformações das especificações, conforme tabela 26A e 26B, e suas respectivas curvas, gráfico 1 e gráfico 2.

Tabela 26A – valores médios das deformações referentes aos dez CP para a especificação NBR 7008 ZEE grau 2
– Indústria siderúrgica

Médias dos maiores pontos de deformação	Médias dos menores pontos de deformação	Maiores deformação ϵ_1		Menor deformação ϵ_2	
0,544555	-0,3077	0,64417	-0,27338	0,47524	-0,34305
0,500078	-0,27268	0,44904	-0,26657	0,63148	-0,21766
0,488927	-0,26962	0,59509	-0,23118	0,39851	-0,31745
0,514837	-0,23977	0,57819	-0,20924	0,46298	-0,25877
0,477338	-0,21518	0,39015	-0,22264	0,57594	-0,17865
0,420536	-0,11419	0,48883	-0,09255	0,3113	-0,04751
0,327173	-0,03946	0,40866	-0,02306	0,15837	-0,04961
0,312741	-0,00403	0,38581	0,05411	0,23776	-0,00803
0,348313	0,02022	0,41897	0,04841	0,19819	0,03884
0,370414	0,002672	0,29654	-0,04333	0,29654	0,03111

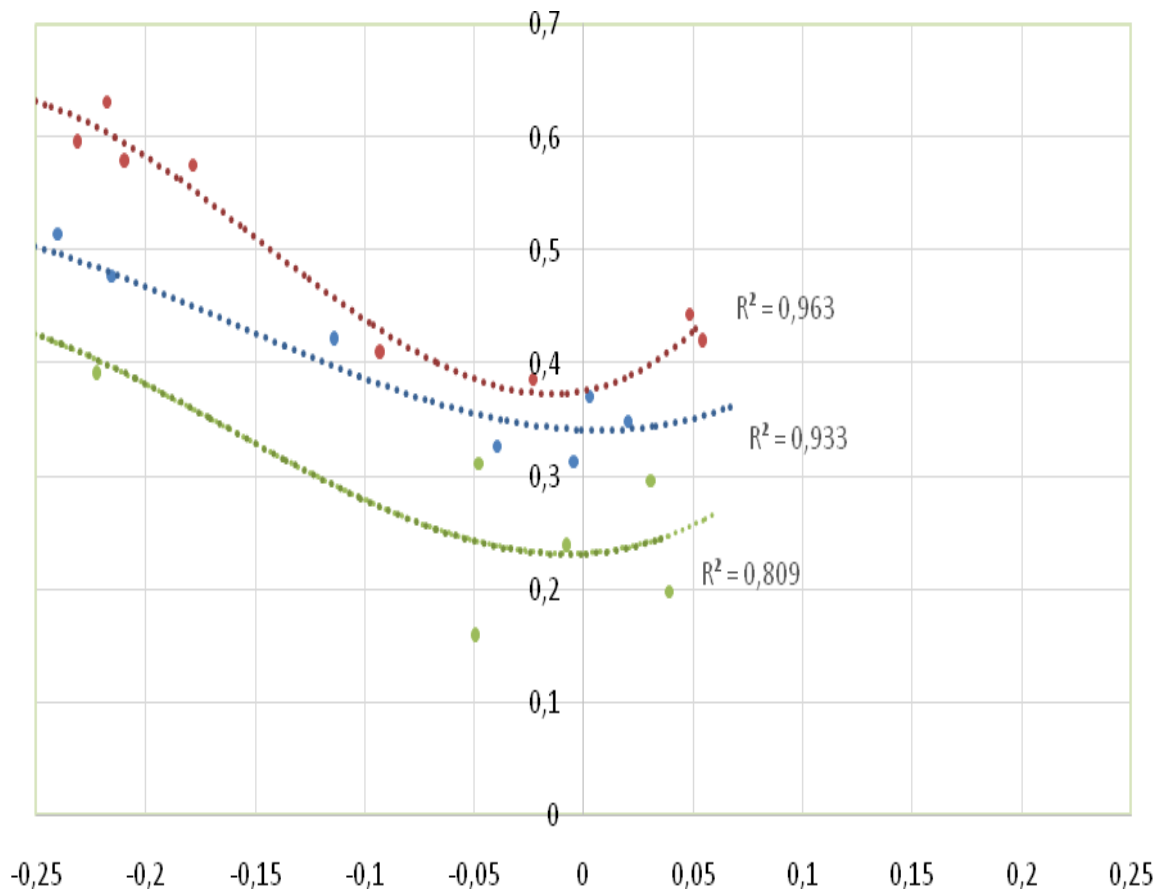


Gráfico 1 – valores referentes aos dez CP para a especificação NBR 7008 ZEE grau 2 - Autores

Tabela 26B – valores médios das deformações referentes aos dez CP para a especificação EN 10346:2009 HX260YD – Indústria siderúrgica

Médias dos maiores pontos de deformação	Médias dos menores pontos de deformação	Máxima deformação ϵ_1		Menor deformação ϵ_2	
0,37743	-0,22515	0,42029	-0,24182	0,32295	-0,22816
0,359665	-0,19799	0,32295	-0,19504	0,44366	-0,20236
0,366023	-0,16669	0,41581	-0,13559	0,32382	-0,12965
0,418148	-0,21964	0,49616	-0,20432	0,33847	-0,25257
0,292854	-0,12204	0,24873	-0,13102	0,34182	-0,11384
0,243611	-0,06704	0,26789	-0,05256	0,2018	-0,05256
0,272939	-0,02883	0,31159	-0,03833	0,2031	-0,02429
0,239976	-0,03331	0,28968	0,00399	0,20636	-0,09563
0,265755	0,007699	0,31714	0,0245	0,1645	0,03652
0,269686	0,047301	0,28908	0,03999	0,24059	0,04841

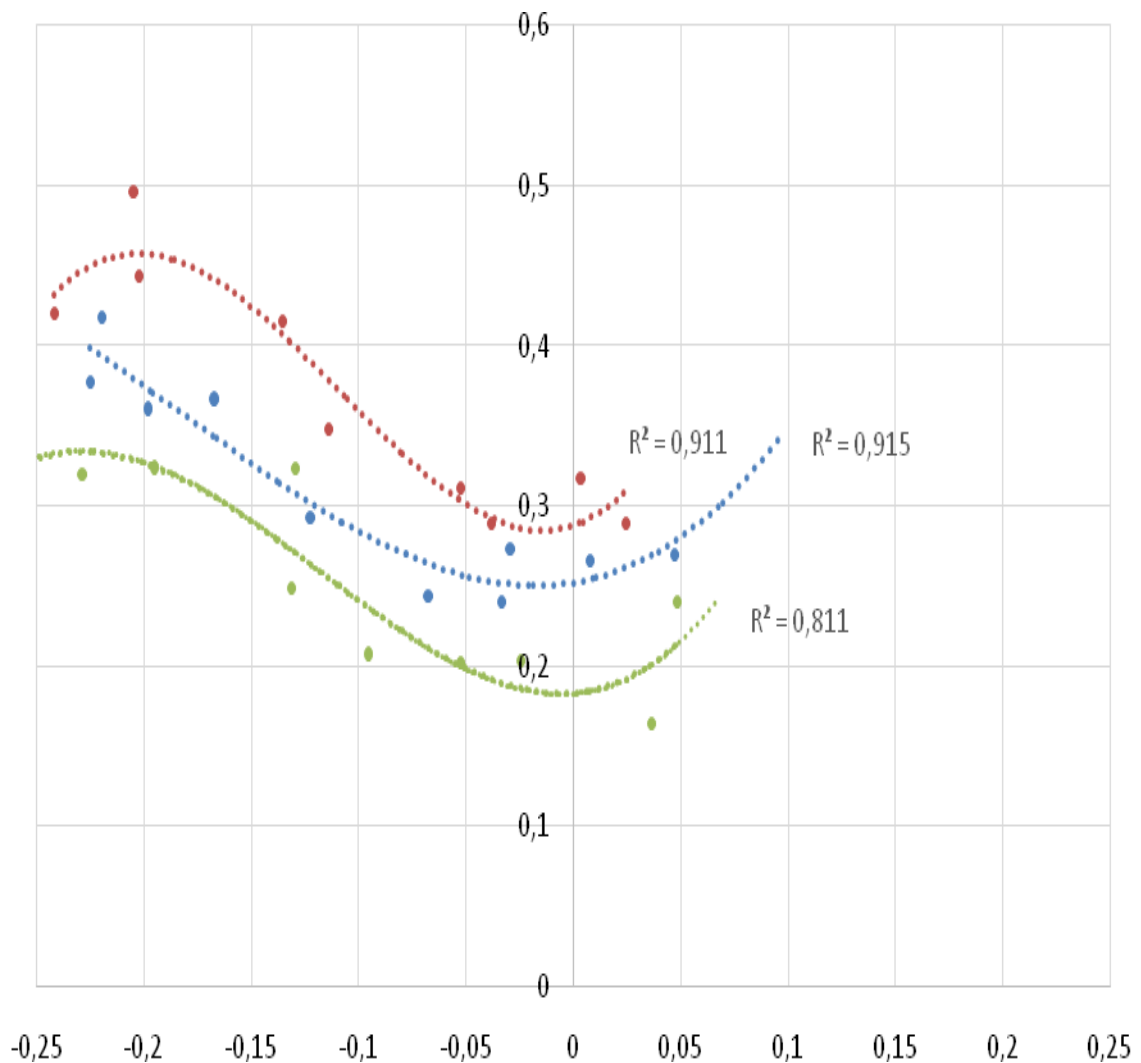


Gráfico 2 – valores referentes aos dez CP para a especificação EN 10346:2009 HX260YD - Autores

4.2.3 CLC prática

Os dados a seguir representam os valores das deformações encontrados a partir dos ensaios realizados nas peças em estudo: porta exterior traseira e bagageiro interno.

Os pontos de estudos da conformação das peças estampadas podem ser vistos nas figuras 20 e 21, os dados nas tabelas 27A e 27B, e os resultados nos gráficos 3 e 4.

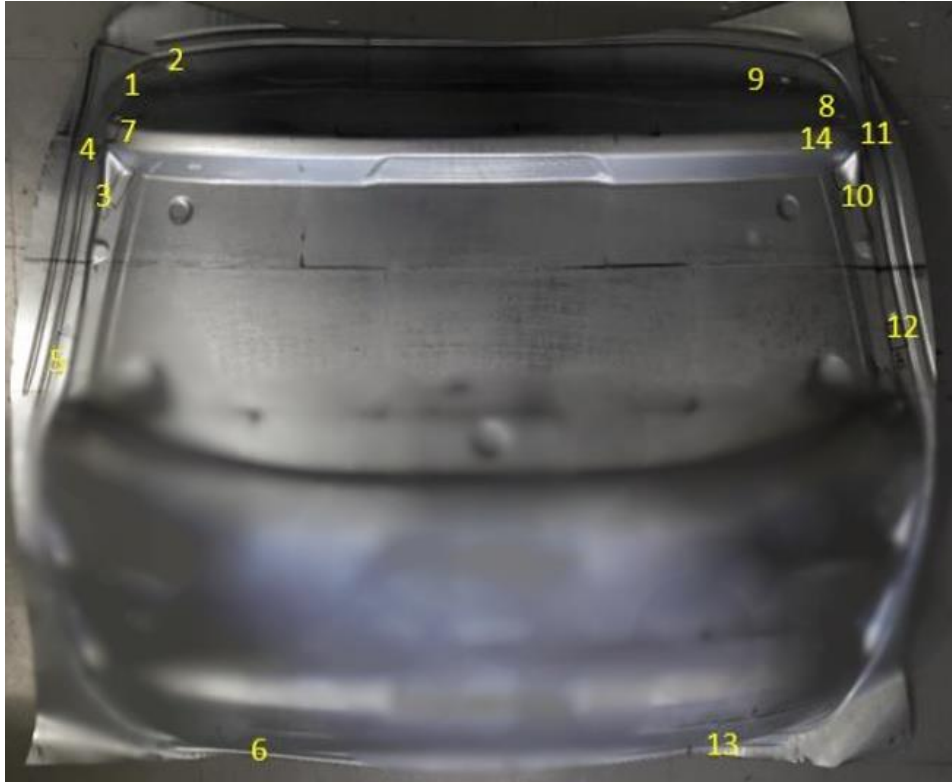


Figura 20 – Porta exterior traseira – Indústria automobilística

Tabela 27A – Dados das deformações – Porta exterior traseira – Indústria siderúrgica

Pontos	Maior (%)	Menor (%)	Redução Espessura (%)	Distancia CLC (%)	Espessura (mm)
1	30,69	-32,35	1,66	40,47	0,71
2	15,5	-15,92	0,43	38,93	0,7
3	16,62	-14,9	-1,72	36,51	0,69
4	10,87	-11,88	1,01	38,39	0,71
5	28,13	-2,31	-25,82	8,92	0,52
6	29,68	-5,21	-24,47	10,98	0,53
7	19,89	-4,37	-15,51	19,72	0,59
8	30,37	-30,27	-0,09	39,28	0,7
9	16,21	-24,13	7,92	47,78	0,76
10	16,11	-10,18	-5,93	30,95	0,66
11	28,19	-29,46	1,28	40,82	0,71
12	19,49	-10,09	-9,4	27,45	0,63
13	25,18	-9,04	-16,15	20,39	0,59
14	19,06	-13,33	-5,73	32,07	0,66

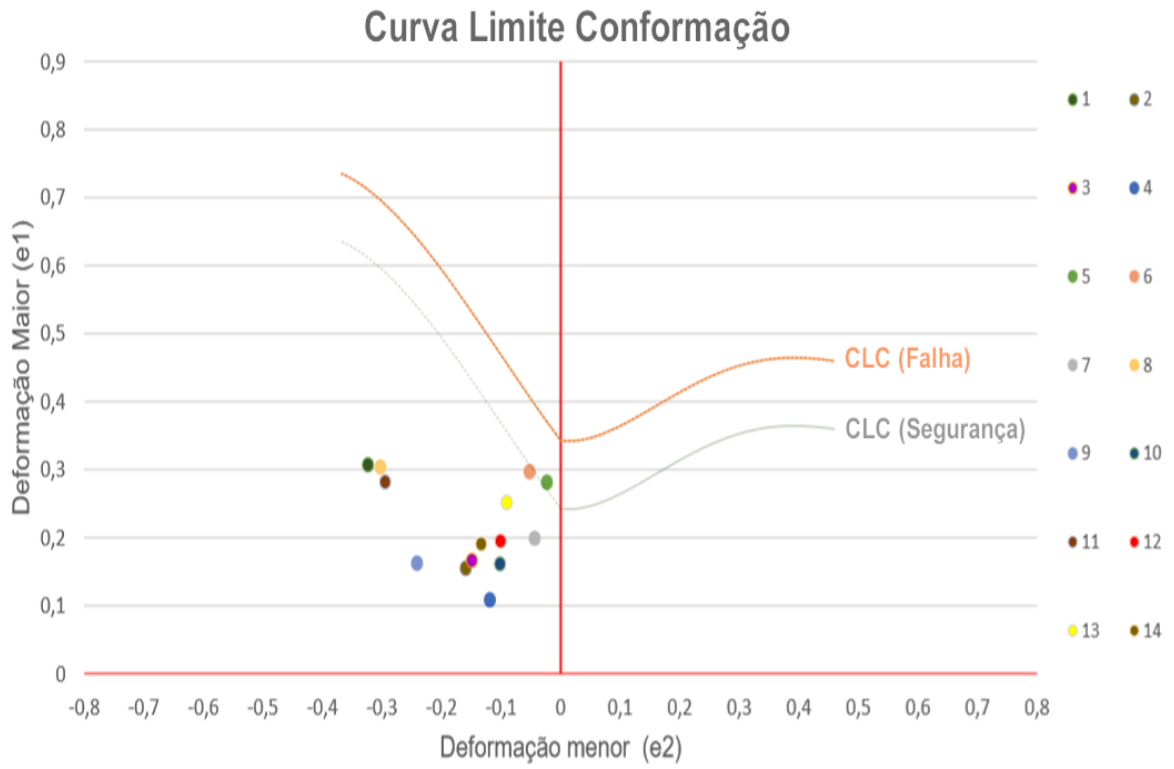


Gráfico 3 – Curva Limite Conformação – Porta exterior traseira – Indústria siderúrgica



Figura 21 – Bagageiro interno – Indústria automobilística

Tabela 27B – Dados das deformações – Bagageiro interno – Indústria siderúrgica

Pontos	Maior (%)	Menor (%)	Redução Espessura (%)	Distancia CLC (%)	Espessura (mm)
1	17,36	12,54	-29,9	19,77	0,49
2	7,55	-0,52	-7,03	26,46	0,65
3	17,6	-4,46	-13,14	21,1	0,61
4	13,21	3,73	-16,94	20,4	0,58
5	27,43	0,04	-27,47	5,94	0,51
6	26,45	-13,51	-12,94	23,6	0,61
7	29,09	-19,36	-9,73	27,92	0,63
8	17,36	-2,96	-14,4	19,52	0,6
9	13,56	1,51	-15,07	19,78	0,59
10	22,12	-6,83	-15,29	19,52	0,59
11	18,5	-9,12	-9,37	26,04	0,63
12	22,83	0,32	-23,14	10,22	0,54
13	25,93	-5,81	-20,12	14,43	0,56
14	37,24	-36,01	-1,23	32,2	0,69
15	21,35	-5,47	-15,88	18,59	0,59

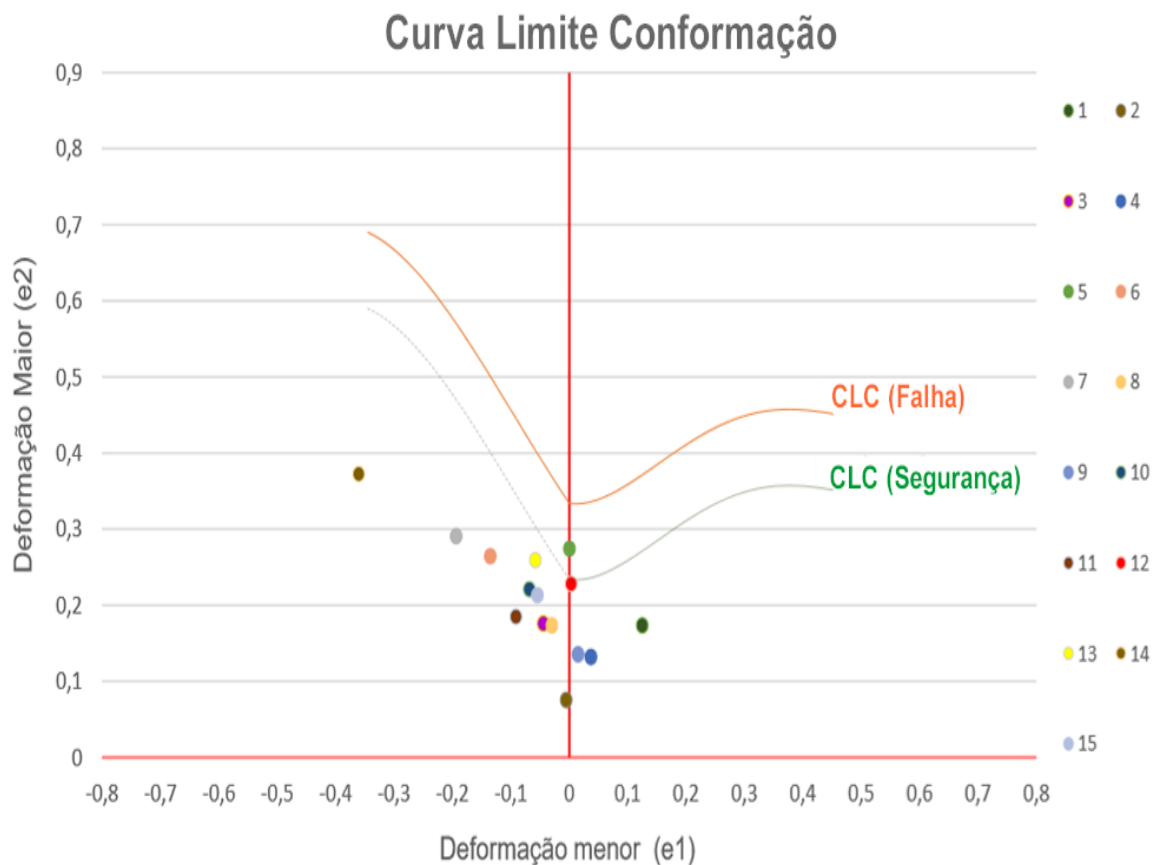
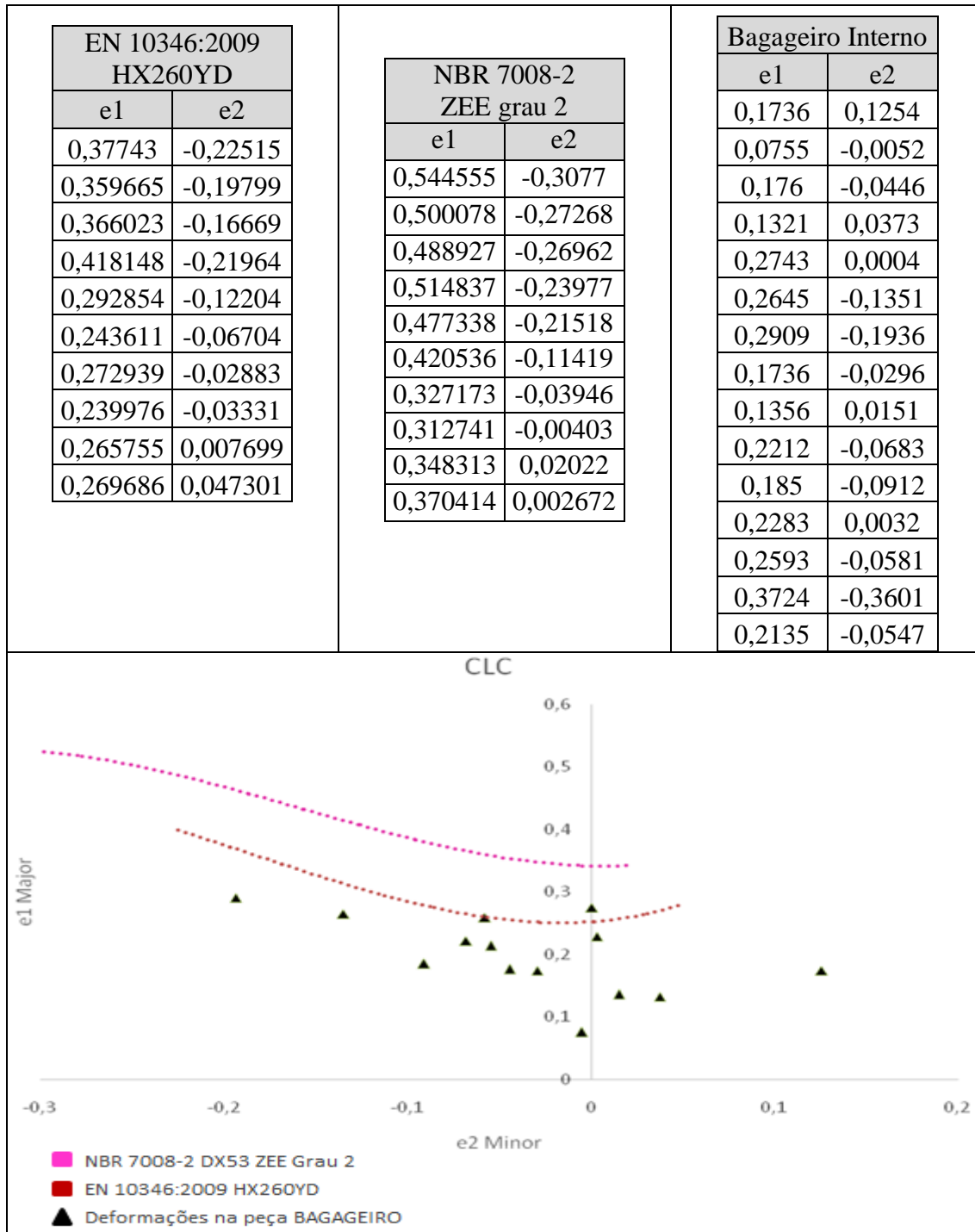


Gráfico 4 – Curva Limite Conformação – Bagageiro interno – Indústria siderúrgica

4.2.4 Análise comparativa

Serão apresentadas as comparações dos resultados da CLC teórica e prática obtida a partir dos ensaios experimentais descritos no item 4.1.5 com suas respectivas discussões.

O gráfico 5 nos mostra a CLC bagageiro. O gráfico foi traçado a partir da mediana dos pontos para cada especificação (HX260YD e ZEE Grau 2), e também, plotados os pontos de deformação da peça: bagageiro interno.



O gráfico 6 nos mostra a CLC porta exterior traseira. O gráfico foi traçado a partir da mediana dos pontos para cada especificação (HX260YD e ZEE Grau 2), e também, plotados os pontos de deformação da peça: porta exterior traseira.

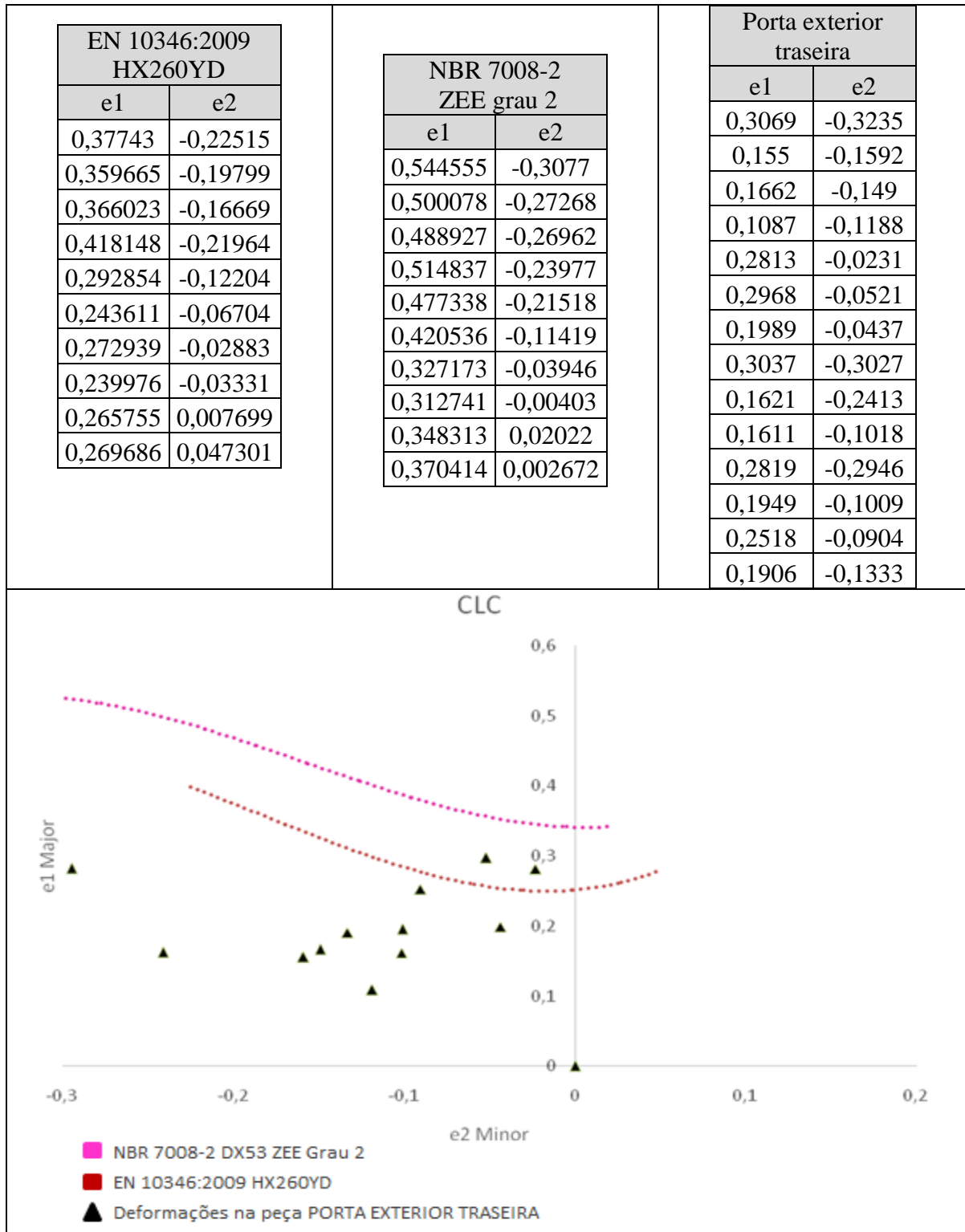


Gráfico 6 – Comparação CLC porta exterior traseira - Autores

Analisando os pontos de deformação na peça bagageiro, e com base no item 2.2, é possível afirmar que os tipos de deformações sofridas nessa peça são de tensão uniforme, deformação plana e estiramento biaxial.

Analisando os pontos na peça porta exterior traseira, e com base no item 2.2, é possível afirmar que os tipos de deformações sofridas nessa peça são de estampagem profunda, tensão uniforme e deformação plana.

• 5 CONCLUSÃO

Os objetivos propostos foram atendidos de forma que esta pesquisa permitiu evidenciar o melhor material a ser aplicado no processo de estampagem para produção das peças automotivas, bagageiro interno e porta exterior traseira.

O desenvolvimento deste trabalho permitiu as seguintes conclusões:

- ✓ Os corpos de prova de Nakazima nos permitem a determinação das CLC teóricas para os aços propostos;
- ✓ As características mecânicas e de composição química dos materiais utilizados no processo de estampagem, atendem aos requisitos solicitados pelas normas NBR 7008 ZEE grau 2 e EN 10346 HX260YD ;
- ✓ Do ponto de vista de estampabilidade, as especificações NBR 7008 ZEE grau 2 e EN 10346 HX260YD atendem plenamente aos requisitos de estampagem.
- ✓ O aço NBR 7008 ZEE grau 2 apresentou muito melhor estampabilidade em relação ao aço EN 10346 HX260YD principalmente em relação aos coeficientes de encruamento e de anisotropia, o que pode ser mostrado pela grande diferença dos níveis da CLC, quando se compara as duas curvas.

6 REFERÊNCIAS

- ASTM E2218 – 15. **Standard Method for Determining Forming Limit Curves.**
- ISO 120004 – 2. **Metallic materials – Sheet and strip – Determination of forming-curves – Part 2: Determination of forming-limit curves in the laboratory.**
- ABNT NBR 7008 –2. **Chapas e bobinas de aço revestidas com zinco ou liga zinco-ferro pelo processo contínuo de imersão a quente – Parte 2: Aços de qualidade comercial e para estampagem.**
- BS EN 10346:2009. **Continuously hot-dip coated steel flat products – Technical delivery conditions.**
- ABNT NBR 6673. **Produtos planos de aço - Determinação das propriedades mecânicas à tração.** 1981.
- Bresciani, F0., E., Button, S.T., Gomes, E., Nery, F.A.C. & Zavaglia, C.A.C. **Conformação Plástica dos Metais.** 5 ed, Ed. da UNICAMP, Campinas, 1997
- Col, A, Emboutissage des toles, Techniques de Lingenieurs.** Disponível em: http://www.techniques-ingenieur.fr/dossier/emboutissage_des_t_ocirc_les_aspect_mecanique/M3181> Acesso em 20 janeiro 2018
- Dieter, G. E. **Metalurgia mecânica.** 4ª ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1996.
- Dieter, G. E. **Metalurgia mecânica.** Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 2ª 61 P., 1981.
- Evangelista, S. H. **Diagramas de Limite de Conformação Aplicados à Análise por Elementos Finitos de um Processo de Estampagem em Chapas Metálicas.** Dissertação de mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos - USP, São Carlos, 2000.
- Freitas, M. C. S., **Modelamento de Deformações Limites em Chapas Metálicas,** EEIMVR-UFF, 2008
- Graf F., W. F. Hosford- **Met. Trans.,** v.24A, 1992, pp. 2497-2501.
- Goodwin, G. M. **Application of Strain Analysis to Sheet Metal Forming Problems in the Press Shop.** Society of Automotive Engineers, technical paper no. 680093, 1968.
- Ghosh A. K, S. S. Hecker - **Met. Trans.,** v.6A 1975, pp. 1065-1074.
- Hosford, W.F. e Caddel, R.M., **Metal forming – mechanics and metallurgy,** NJ (EUA): Prentice-Hall International, Inc., 1983, 325 p

Hosford, W. F. J. L. **Duncan-JOM**, nov., 1999, pp.119-44.

International Organization for Standardization. **ISO 12004-2., Metallic materials-sheet and strip-determination of forming limit curves – part 2: determination of forming limit curves in laboratory**. Geneva, 2007.

Keeler, S. P. **Understanding Sheet Metal Formability: Part 5 - Die Design and Lubrication**, New York, 1968.

Keeler, S.P., **Determination of the forming limits in automotive stamping, Sheet Metal Industries**, Vol. 461, 1965, pp. 683-691

Kobayashi, S.; Oh, S.I.; Altan, T. **Metal Forming and the Finite – Element Method**. Oxford University Press, 1989.

Lange, K. **Forming Handbook**. New York: McGraw Hill and SME, 1993.

Lange, K. - **Handbook of Metal Forming**, v.2, cap. 18, McGraw-Hill, 1985

Lorentz, R., Gilapa, G. M. **Avaliação da Conformabilidade de Chapas de Aço Plano**. I Conferência Nacional de Conformação de Chapas, Porto Alegre, pp. 141-150, 1998.

Marciniak, Z. e Kuczynski, K., **Limit strains in the processes of stretch-forming sheet metal**. International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 9, 1969, 62P. 609-620.

Moreira, LP, Romão, E.C., Viana, C.S, da C., Vieira, L.C. de A., Sampaio, AP., **Avaliação dos métodos de determinação da anisotropia plástica de chapas finas através de ensaios de tração uniaxial**. 420 Seminário de laminação, processos e produtos laminados e revestidos - Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Vol.1, p. 42-50, 2005.

Nakazima, K. , Kikuma, T. e Hasuka, T., **Study on the formability of steel sheets**, Yawata Technical Report Nr. 284, 1968, pp. 140–141.

Plaut R. L.- **II Workshop sobre Textura e Relações de Orientação**, pag, 265-1108,

Pomey, G., Partinière, P., **Travail dès Métaux en Feuilles: Aptitude à lémboutissage dès Tôles Minces, Techniques de ingénieurs**, 1980. Vol. MC2, No 1, M695/696.

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

Sampaio, A. P., Martins, C. A., Souza, P. C. **Caracterização da Conformabilidade de Aço Livre de Intersticiais**. III Conferência Nacional de Conformação de Chapas, IV Conferência Internacional de Forjamento /Brasil, Porto Alegre, 2003.

Schaeffer, L. **Conformação Mecânica**. Porto Alegre: Editora da UFRS, 1999.

Viana, CSC, **Fundamentos de Conformação de Chapas Metálicas**, IME, 2000.