

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

EDIMAR DE LIMA

**AVALIAÇÃO DO LIMITE DE ESTRICÇÃO DE AÇOS AVANÇADOS DE ALTA
RESISTÊNCIA**

CURITIBA

2017

EDIMAR DE LIMA

**AVALIAÇÃO DO LIMITE DE ESTRICÇÃO DE AÇOS AVANÇADOS DE ALTA
RESISTÊNCIA**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, no curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná, na área de concentração Manufatura.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Victor Prestes Marcondes

Coorientador: Prof. Dr. Ravilson Antônio Chemin Filho

CURITIBA

2017

L732a

Lima, Edimar de

Avaliação do limite de estrição de aços avançados de alta resistência
/ Edmar de Lima. – Curitiba, 2017.

56f. : il. [algumas color.] ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de
Tecnologia, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, 2017.

Orientador: Paulo Victor Prestes Marcondes -- Coorientador: Ravilson
Antônio Chemin Filho.

Bibliografia: p. 55-56.

I. Estampagem (Chapas de metal) . 2. Aços Dual-Phase. 3. Ensaio
Nakazima. I. Universidade Federal do Paraná. II. Marcondes, Paulo Victor
Prestes. III. Chemin Filho, Ravilson Antônio. IV. Título.

CDD: 671.34




MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
Setor TECNOLOGIA
Programa de Pós Graduação em ENGENHARIA MECÂNICA
Código CAPES: 40001016040P5

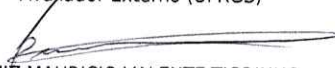
TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA MECÂNICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **EDIMAR DE LIMA**, intitulada: "**AVALIAÇÃO DO LIMITE DE ESTRICÇÃO DE AÇOS AVANÇADOS DE ALTA RESISTÊNCIA**", após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa. A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Curitiba, 01 de Setembro de 2017.


PAULO VICTOR PRESTES MARCONDES
Presidente da Banca Examinadora (UFPR)


LIRIO SCHAEFER
Avaliador Externo (UFRGS)


LUIZ MAURICIO VALENTE TIGRINHO
Avaliador Externo (IFPR)

AGRADECIMENTOS

À Deus que nos dá forças a cada dia.

À minha Noiva Vivian, presente em todos os momentos, auxiliando-me como pode.

À minha Família, pelo apoio e incentivo.

Ao Orientador Paulo Victor Prestes Marcondes, pela oportunidade apresentada com este trabalho, e pelo acompanhamento, orientação e amizade.

Ao Co-orientador Ravilson Antonio Chemin Filho, por todo apoio desde a idealização do trabalho, sempre presente com sua experiência teórica e prática, e pela sua amizade e companheirismo.

Ao Professor Claudimir Rebeyka, pela ajuda fundamental nos ensaios de laboratório.

A todos os companheiros do Laboratório de Mecânica da UFPR.

RESUMO

Atualmente na área de conformação de chapas, espera-se obter o máximo de alongamento com o mínimo de defeitos. Para este fim, são consideradas CLCs (Curvas Limite de Conformação) das chapas metálicas, as quais fornecem uma condição adequada para o limite de estampagem do material, bastando trabalhar em regiões inferiores a elas. Os parâmetros da máquina de trabalho, como aquecimento do óleo e de sistemas, raramente são considerados para levantamento das CLCs, mas estes apresentam influência significativa no processo. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi a adequação da máquina de ensaios para a obtenção da deformação de chapas metálicas no início da estrição, buscando assim um resultado mais preciso da conformabilidade dos principais materiais utilizados na indústria, em especial os aços avançados de alta resistência. Inicialmente foi realizada uma análise da máquina de ensaios onde, aproveitando os sensores de deslocamento e pressão de óleo presentes, determinou-se uma nova programação de controle no CLP (Controlador Lógico Programável), afim de parametrizar pontos que antecedem a ruptura da chapa durante o ensaio de estampagem. Um problema observado, porém, foi que a variação de temperatura do óleo hidráulico influenciou na padronização destes pontos. Desta forma, foram realizados testes de estampagem em diferentes condições de aquecimento da máquina, tornando possível a definição de uma condição precisa de parada da máquina no ponto de estrição do material, sem a influência de parâmetros associados ao equipamento. Nessas condições foi determinada a CLC do aço dual phase DP600 até a sua ruptura e, posteriormente, até o ponto de início da sua estrição, o que permitiu a definição do real limite de conformabilidade deste material. Além desta conclusão quanto ao comportamento do material, considerando os processos industriais, os resultados obtidos permitem ainda a determinação de pontos de ajuste de máquinas mais adequados aos limites de deformação no material.

Palavras-chave: Ensaio Nakazima. Curva CLC. Aços Dual-Phase.

ABSTRACT

Currently in the area of steel sheet forming, it is expected to obtain the maximum of elongation with the minimum of defects. To this end, FLCs (Formability Limit Curves) of the steel sheets are considered, which provide a suitable condition for the stamping limit of the material, by working in regions inferior to them. The parameters of the working machine, such as oil heating and systems, are rarely considered for making the FLCs, but they have significant influence on the process. Therefore, the objective of this work was the adequacy of the testing machine to obtain the deformation of steel sheet at the beginning of the necking, thus seeking a more precise result of the formability of the main materials used in the industry, especially Advanced High Strength Steels. Initially, an analysis of the test machine was carried out, by taking advantage of the displacement and oil pressure sensors present, a new control program was determined in the PLC (Programmable Logic Controller), in order to parameterize points that precede the rupture of the steel sheet during the Stamping test. A problem observed, however, was that the temperature variation of the hydraulic oil influenced the standardization of these points. In this way, stamping tests were carried out under different machine heating conditions, making it possible to define a precise stopping condition of the machine at the point of material stress, without the influence of parameters associated with the equipment. Under these conditions, the FLC of the dual phase steel DP600 was determined until its rupture and, later, until the point of its beginning, which allowed the definition of the real limit of formability of this material. In addition to this conclusion regarding the behavior of the material, considering the industrial processes, the results obtained also allow the determination of set points of machines more adequate to the limits of deformation in the material.

Keywords: Nakazima test. FLC. Dual-Phase Steel.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - CONTRIBUIÇÃO DE AÇOS AHSS NO PESO DOS VEÍCULOS DESDE 2000 E A PREVISÃO PARA 2020.....	11
FIGURA 2 - DIAGRAMA GLOBAL DE DUCTILIDADE PARA OS AÇOS AHSS (INCLUINDO COMPARAÇÃO COM AÇOS CONVENCIONAIS).....	11
FIGURA 3 - TIRA METÁLICA EM PROCESSO DE ESTAMPAGEM PROGRESSIVA	14
FIGURA 4 – DIFERENTES SOLICITAÇÕES NA PEÇA DURANTE ESTAMPAGEM PROFUNDA	15
FIGURA 5 – (a) DIAGRAMA DE DEFORMAÇÃO. (b) ESTIRAMENTO. (c) ESTADO PLANO DE DEFORMAÇÕES. (d) ESTADO UNIAXIAL DE TENSÕES. (e) CISALHAMENTO PURO. (f) COMPRESSÃO UNIAXIAL	16
FIGURA 6 – EXEMPLO DE MEDIÇÃO DE DEFORMAÇÃO EM UMA PEÇA ESTAMPADA COMPLEXA	17
FIGURA 7 –REPRESENTAÇÃO DE CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO, PLOTADA EM UM DIAGRAMA LIMITE DE CONFORMAÇÃO.....	18
FIGURA 8 – FORMATOS DE MALHA CIRCULAR PREVISTOS PELA NORMA ISO 12004-1:2008.	19
FIGURA 9 – CORPO DE PROVA E FERRAMENTA DE ENSAIO NAKAZIMA.....	20
FIGURA 10 – DIREÇÃO DE CORTE DO CORPO DE PROVA PARA ENSAIO NAKAZIMA.....	21
FIGURA 11 – DIMENSÕES DA FERRAMENTA DE ENSAIO NAKAZIMA.....	22
FIGURA 12 – EXEMPLO DE CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO OBTIDA EXPERIMENTALMENTE.....	23
FIGURA 13 – VARIAÇÃO PROVOCADA NA CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO PARA CARGA DE 130 TF NO PRENSA-CHAPAS.....	24
FIGURA 14 - CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO PARA CARGA DE 80 TF NO PRENSA-CHAPAS.....	24
FIGURA 15 - VARIAÇÃO PROVOCADA NA CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO PARA CARGA DE 58 TF NO PRENSA-CHAPAS.....	25

FIGURA 16 – SUPERFÍCIE DA FRATURA DO AÇO DP600 NO ENSAIO COM CARGA DE 130TF NO PRENSA CHAPAS.....	26
FIGURA 17 - SUPERFÍCIE DA FRATURA DO AÇO DP600 NO ENSAIO COM CARGA DE 58TF NO PRENSA CHAPAS.....	26
FIGURA 18 – DESENHO ESQUEMÁTICO DO TESTE DE DOBRAMENTO (DRAW-BENDTEST) E OS DIFERENTES MODOS DE FRATURA.....	28
FIGURA 19 – COMPARAÇÃO ENTRE VALORES DE R/T NA TRANSIÇÃO ENTRE FRATURA POR TRAÇÃO E CISALHAMENTO EM DIFERENTES MÉTODOS DE SIMULAÇÃO E RESULTADO EXPERIMENTAL.	29
FIGURA 20 – EQUIPAMENTO PARA TESTE DE DOBRAMENTO E ESTIRAMENTO.	30
FIGURA 21 – TESTE COM VÁRIOS RAIOS DE MATRIZ PARA (A) AÇO DP800 E (B) AÇO HC340.....	31
FIGURA 22 – PRENSA HIDRÁULICA UTILIZADA NOS ENSAIOS.....	32
FIGURA 23 – TRANSDUTOR DE PRESSÃO (ESQUERDA) E ENCODER LINEAR (DIREITA).....	33
FIGURA 24 – MATRIZ E ATUADORES (ESQUERDA) E UNIDADE HIDRAULICA (DIREITA).....	34
FIGURA 25 – EQUIPAMENTO PARA ENSAIO NAKAZIMA MODIFICADO.....	34
FIGURA 26 – FLUXOGRAMA DE ENSAIO ATE A RUPTURA.....	36
FIGURA 27 – FLUXOGRAMA DE ENSAIO COM INTERRUPÇÃO CONTROLADA.....	38
FIGURA 28 – PONTOS DE MONITORAMENTO DE TEMPERATURA.....	39
FIGURA 29 – FLUXOGRAMA DE ENSAIO ATE A RUPTURA COM TEMPERATURA MONITORADA.....	40
FIGURA 30 – FLUXOGRAMA DE ENSAIO ATE O LIMITE DE ESTRICÇÃO COM TEMPERATURA MONITORADA.....	41
FIGURA 31 – METALOGRAFIA DO AÇO DP600 COM AUMENTO DE 800X (A) E AUMENTO DE 3500X (B).....	43
FIGURA 32 - CURVA TENSÃO VS DEFORMAÇÃO DE ENGENHARIA DO AÇO DP600.....	46

FIGURA 33 – CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO DO AÇO DP600, OBTIDA ATRAVÉS DO ENSAIO DE ESTAMPAGEM NAKAZIMA.....	47
FIGURA 34 – CORPO DE PROVA RESULTANTE DOS ENSAIOS (ESQUERDA) E DETALHE DA ESTRICÇÃO (DIREITA).....	49
FIGURA 35 – COMPARAÇÃO DAS CURVAS OBTIDAS POR CHEMIN (2011) E PELO AUTOR (2017).....	50
FIGURA 36 – COMPARAÇÃO DAS CURVAS OBTIDAS COM E SEM CONTROLE DE TEMPERATURA.....	51
FIGURA 37 – COMPARAÇÃO DA CURVA OBTIDA ATE O LIMITE DE ESTRICÇÃO COM A CURVA LEVANTADA PARA O AÇO DP600.....	52
FIGURA 38 – COMPARAÇÃO DA CURVA OBTIDA ATE O LIMITE DE ESTRICÇÃO COM TEMPERATURA CONTROLADA.....	53

LISTA DE QUADROS E TABELAS

TABELA 1 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA RESULTANTE DO ENSAIO DE ANÁLISE QUÍMICA DO AÇO DP600.....	42
TABELA 2 - COMPARATIVO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS LE, LR E AL, DO AÇO DP600, OBTIDOS ATRAVÉS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO E FORNECIDOS PELO FABRICANTE DO AÇO.....	45
TABELA 3 - PARÂMETROS DE ESTAMPAGEM R, N, E, DO AÇO DP600, OBTIDOS ATRAVÉS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO E FORNECIDOS PELO FABRICANTE DO AÇO.....	45
TABELA 4 - PARÂMETROS DE MAQUINA LEVANTADOS PARA ANÁLISE.....	48
TABELA 5 - VALORES ATRIBUIDOS PARA INTERRUPÇÃO DO ENSAIO, VALORES RESULTANTES DOS ENSAIOS E ANÁLISE VISUAL DA PEÇA.....	49

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS.....	10
1.1 INTRODUÇÃO	10
1.2 OBJETIVOS	12
1.2.1 Objetivo geral.....	12
1.2.2 Objetivos específicos.....	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.2 PROCESSO DE ESTAMPAGEM	14
2.2.1 Estado de tensão e deformação.....	16
2.2.2 Análise de Deformações	17
2.3 ENSAIO DE ESTAMPAGEM NAKAZIMA	20
2.4 EFEITO DA CARGA DO PRENSA-CHAPAS	23
2.5 FRATURA DE AÇOS DUAL PHASE.....	27
2.5.1 Modelo termo-mecânico de Wagoner	27
2.5.2 Relação entre velocidade de estampagem e a relação R/t	30
3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	32
3.1 PREPARAÇÃO DA PRENSA HIDRÁULICA	32
3.1.1 Preparação das amostras	35
3.2 LEVANTAMENTO DA CLC ATÉ O LIMITE DE RUPTURA.....	35
3.3 ENSAIO ATÉ O LIMITE DE ESTRICÇÃO.....	36
3.4 ENSAIOS COM TEMPERATURA CONTROLADA	38
3.4.2 Ensaio até o limite de estrição	40
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	42
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL	42
4.1.1 Análise química	42
4.1.2 Metalografia	43
4.1.3 Ensaio de tração	44
4.1.4 Ensaio de estampagem Nakazima	47
4.2 DETERMINAÇÃO DO PONTO DE ESTRICÇÃO DO MATERIAL.....	48
4.2.1 Curva Limite de Conformação na Estricção do Material....	50
5 CONCLUSÃO.....	54
REFERÊNCIAS.....	55

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

1.1 INTRODUÇÃO

A indústria automotiva tem buscado constantemente novos materiais para suprir a sua demanda por melhoria na segurança veicular, redução na emissão de poluentes e melhoria no design, buscando sempre baixos custos de produção.

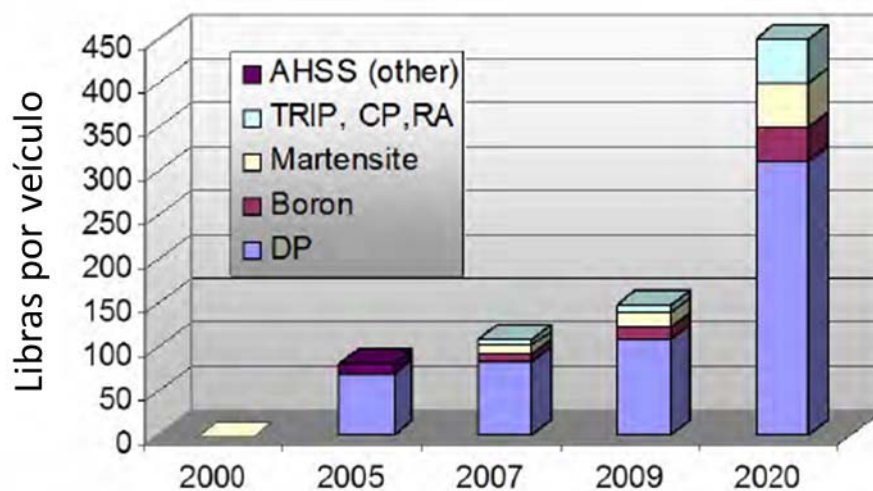
Quando se pensa em melhorar a segurança, uma solução simples seria a utilização de chapas com maiores espessuras, com o objetivo de atingir uma maior resistência mecânica na estrutura do veículo. No entanto, isto significa maiores custos com matéria prima e maior peso na carroceria, o que ocasionaria uma maior emissão de poluentes. Uma opção que não prejudicaria o peso do veículo seria a utilização de aços convencionais de maior resistência mecânica, porém, estes aços têm baixa conformabilidade, o que torna o processo inviável, ou obrigaria o fabricante a utilizar formas mais simples nas peças do veículo, em detrimento do design.

Procurando soluções para este mercado, surgiram os aços avançados de alta resistência no final dos anos 90, de acordo com (KEELER e MENACHEM, 2014). Segundo Asgari et al (2007) a principal diferença física entre os aços AHSS e os convencionais está na microestrutura. Utilizando elementos de liga e um processo de fabricação controlado, obtêm-se materiais com elevada resistência mecânica e boa conformabilidade. Materiais que possuem diferentes fases em sua microestrutura e fases que sofrem transformações durante o processo de conformação e aquecimento fazem parte desta família chamada AHSS (Advanced High Strength Steels).

Nesta família estão os aços Dual Phase (DP), Complex-Phase (CP), Ferritic-Bainitic (FB), Martensitic (MS or MART), Transformation-Induced Plasticity (TRIP), Hot-Formed (HF) e o Twinning-Induced Plasticity (TWIP). Estes aços são obtidos com um processo de fabricação das chapas de aço cuidadosamente controlado, de maneira que a taxa de resfriamento e os elementos de liga presentes foram uma microestrutura com quantidades definidas de martensita, bainita, austenita retida e ferrita.

O gráfico da (FIGURA 1) mostra o aumento na utilização destes materiais desde o ano 2000, em libras por veículo.

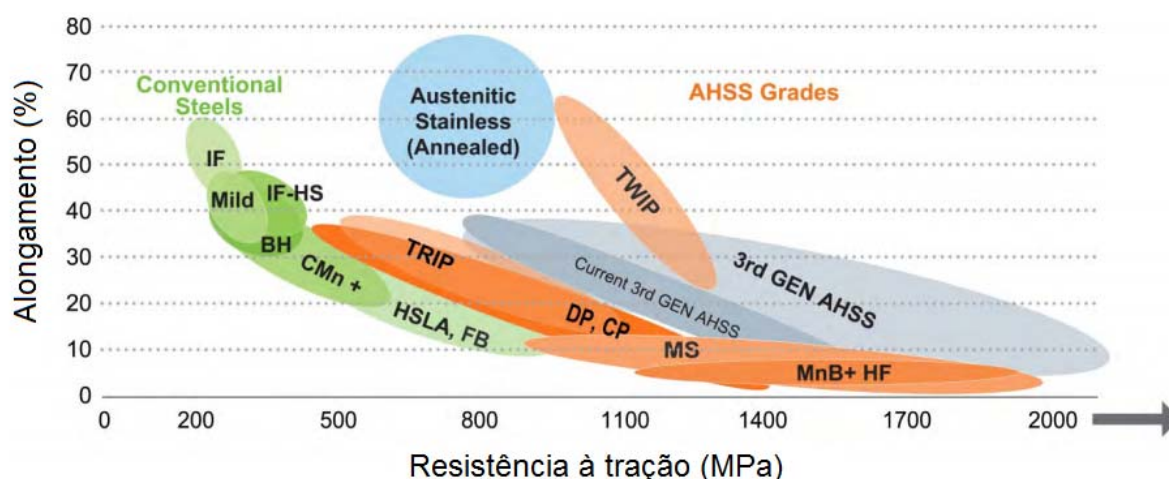
FIGURA 1 - CONTRIBUIÇÃO DE AÇOS AHSS NO PESO DOS VEÍCULOS DESDE 2000 E A PREVISÃO PARA 2020



FORNTE: WORLDAUTOSTEEL (2014)

No entanto, apesar de controlado, normalmente existe uma perda na ductilidade e, conseqüentemente, na conformabilidade com o aumento na resistência mecânica, o que é mostrado na (FIGURA 2).

FIGURA 2 - DIAGRAMA GLOBAL DE DUCTILIDADE PARA OS AÇOS AHSS (INCLUINDO COMPARAÇÃO COM AÇOS CONVENCIONAIS)



FORNTE: WORLDAUTOSTEEL (2017)

O estudo da conformabilidade de aços de alta resistência mecânica é de fundamental importância para que modelos cada vez mais precisos possam ser empregados na etapa do projeto de ferramentas de estampagem.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O trabalho em questão tem por objetivo avaliar o limite de conformabilidade no ponto de estrição de aços de nova geração, quando submetidos ao teste de estampagem Nakazima. A pesquisa concentrar-se-á num trabalho experimental, onde será utilizado o ferramental para estampagem de chapas de aço com regulagem da força aplicada no prensa-chapas, construído por Chemin (2011), e a programação da prensa hidráulica para que se consiga parar o teste no ponto de estrição da chapa metálica. Desta forma, analisar-se-á, através da curva limite de conformação, a diferença entre os limites de conformabilidade do aço dual-phase DP600 quando estampado até a sua ruptura e quando estampado até o seu limite de estrição.

Espera-se chegar, ao final do trabalho, a curva limite de conformação que caracterize com precisão o real limite de conformabilidade do aço DP600, dentro do seu limite de estrição e não de ruptura. Desta forma, tornar-se-á evidente a contribuição do trabalho proposto, que permitirá não apenas avaliar o efeito das variáveis do equipamento sobre o processo, mas também definir limites mais sofisticados para a conformação de chapas metálicas, algo de fundamental importância na solução de problemas em processos industriais e projetos de ferramentas de estampagem.

1.2.2 Objetivos específicos

- Preparação da prensa hidráulica para que se consiga realizar ensaios de estampagem com a finalização precisa do teste no ponto de estrição de chapas metálicas;
- Determinação do limite de estrição do aço DP600, através da curva limite de conformação do material;
- Avaliação quantitativa entre os limites de estrição e ruptura do aço DP600;
- Avaliação do efeito que as variáveis do equipamento têm na conformabilidade das chapas metálicas.

- Geração de dados experimentais que possam ser utilizados no desenvolvimento e aprimoramento de modelos numéricos para simulação de operações de estampagem.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.2 PROCESSO DE ESTAMPAGEM

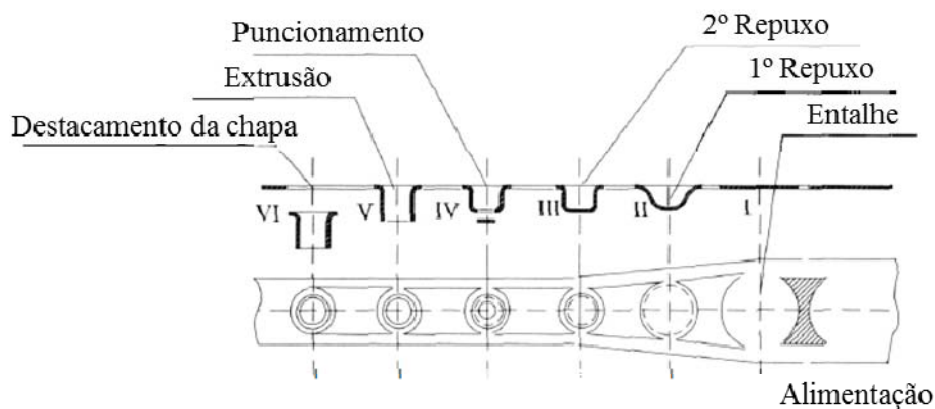
Prever o comportamento do material a ser estampado é fundamental na etapa de projeto de ferramentas. Por isso, vários métodos vêm sendo desenvolvidos para a determinação de parâmetros cada vez mais precisos.

O processo de estampagem pode ser dividido em diversas categorias, de acordo com o tipo de ferramenta utilizada e o estado de tensões e deformações aplicado na peça. Por isto, diferentes testes foram desenvolvidos, de maneira a prever processos distintos de estampagem.

Na indústria automotiva é comum ter-se um jogo de ferramentas para estampagem de um componente, onde cada ferramenta do jogo é responsável por um modo específico de estampagem. Por exemplo, para estampar uma peça de geometria complexa, pode-se utilizar uma primeira ferramenta de corte para, a partir de uma bobina de aço, produzir uma chapa plana com dimensões definidas. Na próxima operação, é comum uma etapa onde predomina o embutimento profundo e o estiramento, comumente chamada de repuxo. Na sequência, uma operação de corte e furação pode preceder uma operação de flangeamento e por último uma operação de calibragem. Em cada etapa deste processo o material é submetido a esforços distintos, mas o mais crítico em termos de ruptura indesejada é o repuxo.

Um exemplo de processo de estampagem com várias etapas está ilustrado na (FIGURA 3):

FIGURA 3 - TIRA METÁLICA EM PROCESSO DE ESTAMPAGEM PROGRESSIVA



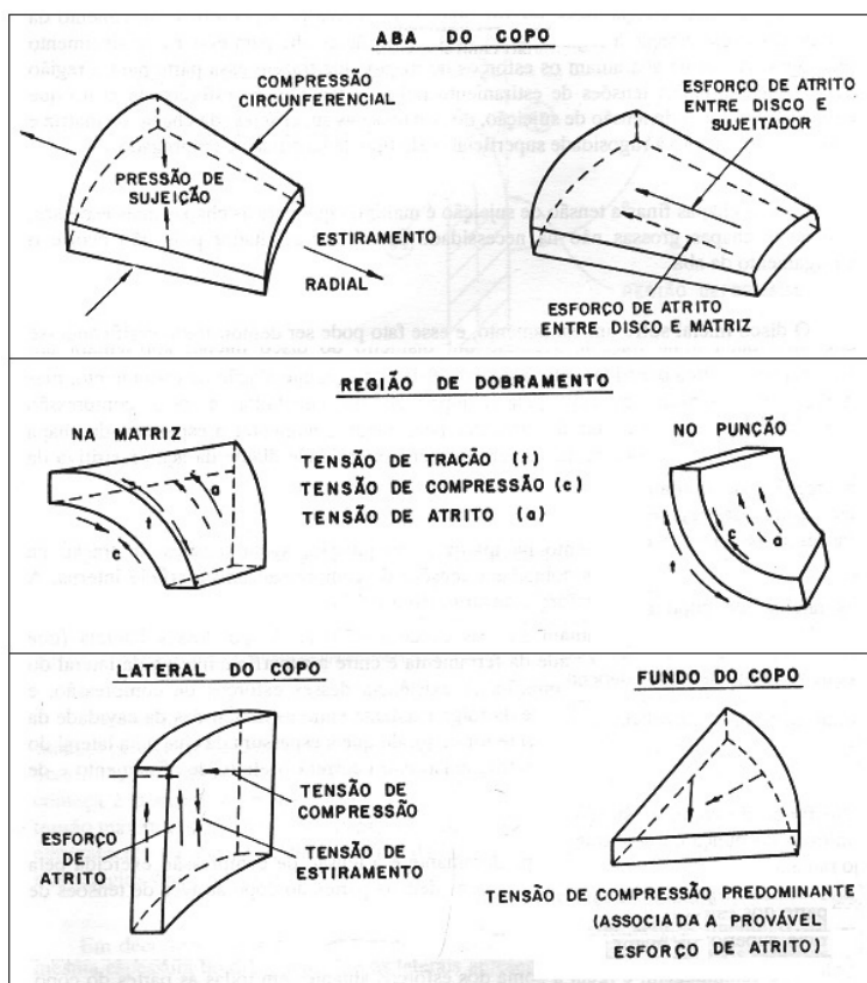
FONTE: BOLJANOVIC (2004)

No exemplo da (FIGURA 3), tem-se um processo de estampagem iniciando com o embutimento dividido em três etapas, seguido de um puncionamento, onde um furo é feito para posteriormente, num processo de extrusão (similar ao flangeamento), faz com que a peça chegue ao seu formato final. Por último, uma operação de corte destaca a peça do restante da tira metálica.

Segundo Bresciani et al (1997), o processo de embutimento submete a chapa plana a um estado de tensões e deformações que alteram sua espessura durante o processo, dessa forma, a peça está sujeita a maior deformação plástica e, portanto, a maior tensão. Por isso, muitas vezes esta é a etapa onde a ruptura pode ocorrer.

A mesma peça suporta diferentes solicitações em cada região da peça, conforme está mostrado na (FIGURA 4).

FIGURA 4 – DIFERENTES SOLICITAÇÕES NA PEÇA DURANTE ESTAMPAGEM PROFUNDA



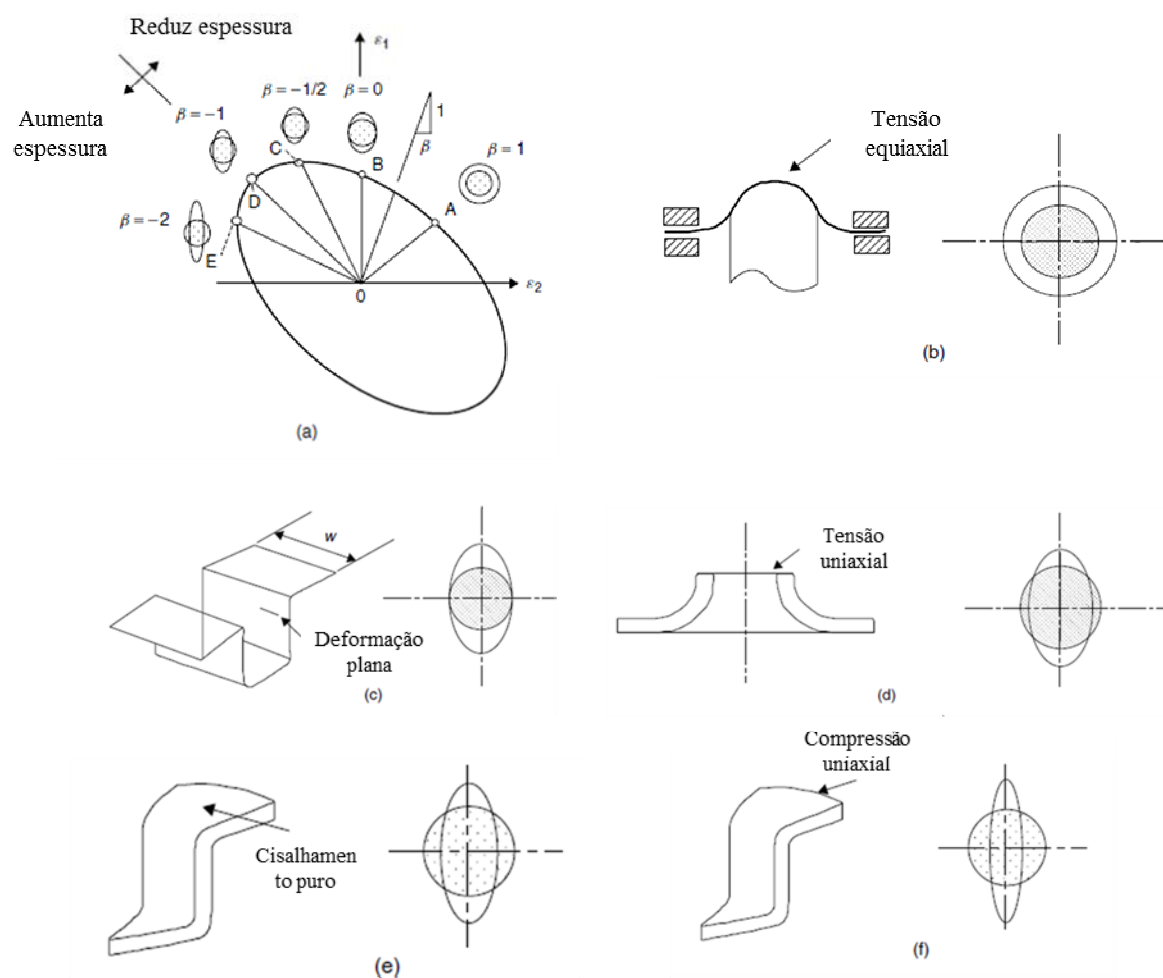
FONTE: BRESCIANI (2011)

Devido à complexidade deste processo, as propriedades comuns de um material retiradas de um ensaio de tração não são suficientes para medir a sua capacidade de deformar plasticamente de modo a adquirir o formato desejado, ou seja, a sua estampabilidade.

2.2.1 Estado de tensão e deformação

Antes de definir o que é o ensaio de estampabilidade, observa-se na (FIGURA 5) os modos de deformação que uma peça estampada está sujeita.

FIGURA 5 – (a) DIAGRAMA DE DEFORMAÇÃO. (b) ESTIRAMENTO. (c) ESTADO PLANO DE DEFORMAÇÕES. (d) ESTADO UNIAXIAL DE TENSÕES. (e) CISLHAMENTO PURO. (f) COMPRESSÃO UNIAXIAL



FONTE: MARCINIAK (2002)

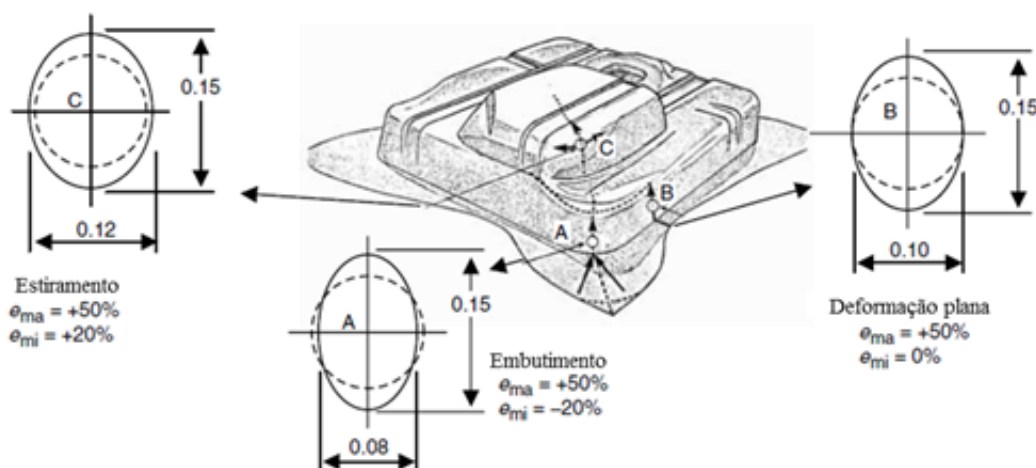
Na (FIGURA 5.a), é mostrado um diagrama de deformações, em que no eixo horizontal está a menor deformação (ϵ_2) e no eixo vertical, a maior deformação (ϵ_1). A reta O-A, representa um processo de estiramento puro, com deformação equiaxial. Na reta O-B, a deformação é somente em uma direção, o que não significa que não existe deformação na direção perpendicular. Na verdade, a própria resistência do material a estrição impede que deformações ocorram no eixo ϵ_2 , o que ocasiona uma maior redução na espessura.

Na reta O-C, tem-se um estado uniaxial de tensões, ou seja, nenhuma tensão é feita no sentido de ϵ_2 . A partir deste ponto (para a esquerda do gráfico), observa-se a compressão no sentido perpendicular à tensão principal. Na figura 5.e, apresenta-se cisalhamento puro, onde a deformação $\epsilon_1 = \epsilon_2$, ou seja, não há redução na espessura e o material somente deforma no plano. É normalmente neste ponto que o material é capaz de apresentar os maiores níveis de deformação no eixo ϵ_1 .

2.2.2 Análise de Deformações

Medir a tensão em cada segmento da peça em um processo de conformação é uma tarefa muito complexa e sujeita a erros. Já a deformação no plano da chapa é possível com alguns recursos simples, como a impressão de uma grade de dimensões conhecidas antes do processo, seguido de uma simples medição das dimensões finais após este processo, como ilustrado na (FIGURA 6).

FIGURA 6 – EXEMPLO DE MEDIÇÃO DE DEFORMAÇÃO EM UMA PEÇA ESTAMPADA COMPLEXA



FONTE: SCHAEFFLER E VINEBERG (2006)

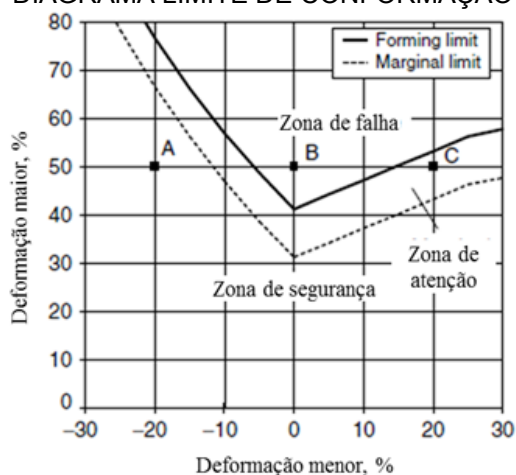
Na (FIGURA 6), os círculos com linha pontilhada representam as dimensões dos círculos gravados na chapa antes da estampagem, e as elipses, o estado de deformação no plano da chapa após a estampagem. A deformação de engenharia nos dois eixos pode ser calculada através das equações:

$$e_1 = 100 * \frac{Lma - Li}{Li} \quad e \quad e_2 = 100 * \frac{Lmi - Li}{Li}$$

Sendo Lma o comprimento do maior eixo da elipse, Lmi o comprimento do menor eixo e Li o diâmetro inicial do círculo impresso na chapa antes da estampagem.

De acordo com (SCHAEFFLER e VINEBERG, 2006), experimentos mostram que cada produto possui um limite ao qual o material pode ser deformado antes da ruptura, mas este valor não é função apenas da deformação na direção de máxima deformação, mas também sua deformação no eixo de menor deformação. Desde 1960, quando Marciniak criou o primeiro método para medição da chamada curva limite de conformação, diversas classes de matérias com variadas espessuras foram ensaiadas com o objetivo de desenhar a curva que representa a máxima deformação que ele pode suportar antes da ruptura, para uma variedade de níveis de deformação menor (ϵ_2), simulando condições desde o estiramento equiaxial (FIGURA 5.b), até uma condição de embutimento profundo, quando $\epsilon_1 = -\epsilon_2$ (FIGURA 5.e).

FIGURA 7– REPRESENTAÇÃO DE CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO, PLOTADA EM UM DIÁGRAMA LIMITE DE CONFORMAÇÃO

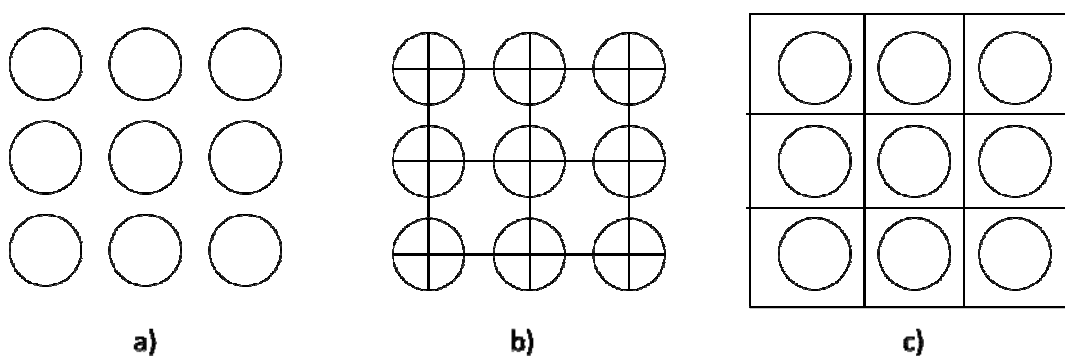


FONTE: SCHAEFFLER E VINEBERG (2006)

Na (FIGURA 7), foi representada uma CLC (curva limite de conformação) clássica, onde a linha contínua representa os valores de máxima deformação para cada deformação mínima. A curva pontilhada é um fator de segurança de 10%, conforme recomendado pelo ASM Handbook volume 14B (SCHAEFFLER e VINEBERG, 2006), que indica uma margem de segurança, visto que a condição de estampagem pode variar de acordo com a condição do lubrificante e até mesmo com variação nas propriedades da chapa a ser estampada.

Este diagrama é muito útil no processo de try-out de uma ferramenta, onde pode-se determinar se a peça está na zona crítica do DLC (Diagrama Limite de Conformação). O procedimento para aplicação do DLC na estamparia é definido pela norma ISO 12004-1:2008. Esta norma prevê a impressão de uma malha circular (conforme FIGURA 8) em regiões críticas da peça. A malha é gravada na chapa antes da estampagem, com círculos de diâmetro entre 1,5 e 5mm. Após a estampagem, as novas dimensões dos círculos são medidas e os dados plotados em um diagrama DLC, de maneira que os valores encontrados possam ser comparados com a curva limite de conformação e a curva de segurança, garantindo assim que modificações sejam feitas até que uma condição de boa estampabilidade possa ser assegurada.

FIGURA 8 – FORMATOS DE MALHA CIRCULAR PREVISTOS PELA NORMA ISO 12004-1:2008



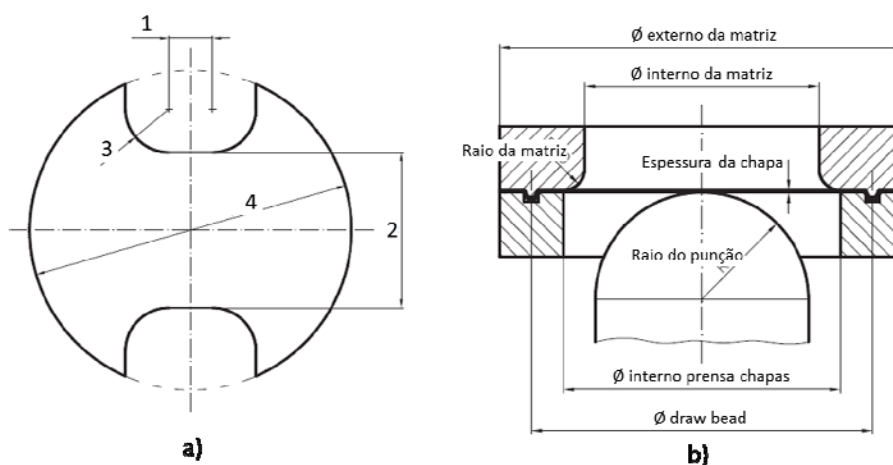
FONTE: NORMA ISO 12004-1 (2008)

2.3 ENSAIO DE ESTAMPAGEM NAKAZIMA

Vários métodos para criação das curvas CLC foram definidos sobre condições de laboratório bem definidas, de maneira que uma única curva possa ser obtida para cada material, caracterizando a quantidade que este material pode ser deformado em processos de embutimento, estiramento, ou em processos combinados (EN ISO 12004-2, 2008). Uma CLC é somente válida para materiais de mesma classe, espessura e tratamento termo mecânico.

Nakazima desenvolveu um procedimento para determinação da curva CLC, o qual é aceito pela norma ISO 12004-2:2008. Conforme ilustrado na FIGURA 9, o método de Nakazima é um processo de estampagem em que um punção hemisférico induz diferentes modos de deformação na região central do corpo de prova. Modificando a largura do corpo de prova (dimensão 2, FIGURA 9.a), permite a reprodução de diferentes estados de tensão e deformação no corpo de prova.

FIGURA 9 – CORPO DE PROVA E FERRAMENTA DE ENSAIO NAKAZIMA



FONTE: ABDOLVAHED KAMIA (2014).

A norma ISO 12004-2:2008 cita algumas recomendações para a geometria do corpo de prova, de acordo com as cotas indicadas na (FIGURA 9), conforme segue:

- a. Dimensão 1: 25% a 50% do diâmetro do punção (25mm e 50mm para punção de 100mm)
- b. Dimensão 2: largura variável que define modo de deformação.
- c. Dimensão 3: raio de 20 a 30mm.

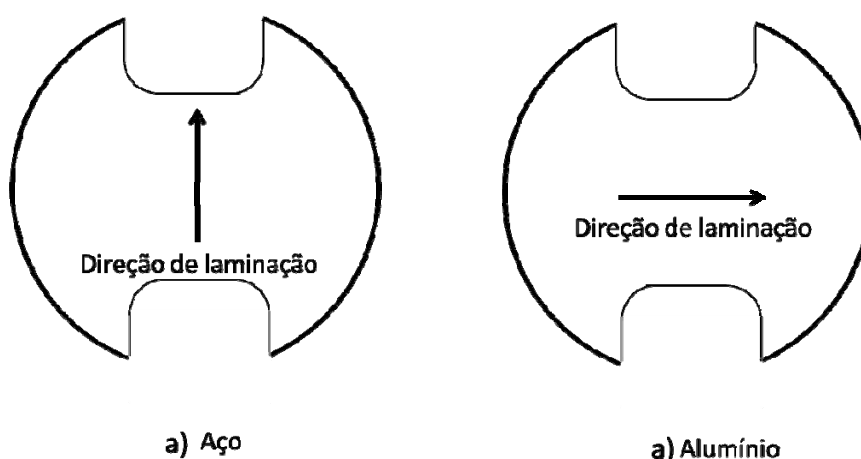
Para a dimensão 2, é indicado no mínimo 5 valores diferentes para descrever a curva CLC completa, de maneira que sejam obtidos estados de tensão uniaxial e equiaxial para a menor e maior dimensão, respectivamente. Recomenda-se também ao menos 3 corpos de prova para dimensão, de maneira a melhorar a confiabilidade do ensaio.

O espaçamento da malha impressa no corpo de prova (conforme FIGURA 8) deve apresentar entre 1 e 2,5 vezes a espessura da chapa e o tamanho máximo permitido é de 2,54mm. Técnicas comuns de aplicação da malha são deposição eletroquímica, foto química, offset print e grid transfer, ou qualquer outro método, desde que não prejudique a microestrutura ou cause entalhe.

Para o equipamento, a norma recomenda:

- Velocidade do punção: $1,5 \pm 0,5$ mm/s
- Prevenção de escoamento para dentro da matriz (uso de draw-bead)
- Força no prensa chapas: de modo a prevenir qualquer escoamento.
- Temperatura ambiente: 23 ± 5 °C
- Direção de teste: A direção principal da CLC ϵ_1 deve ser a de menor limite de deformação, conforme indicado na (FIGURA 10).

FIGURA 10 – DIREÇÃO DE CORTE DO CORPO DE PROVA PARA ENSAIO NAKAZIMA



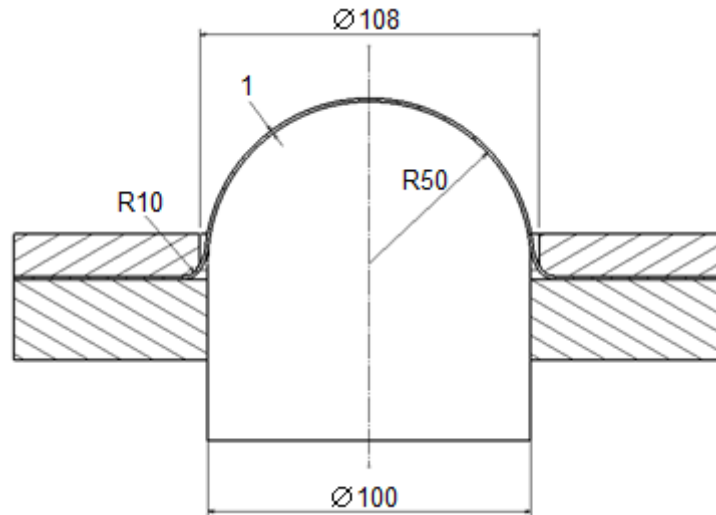
FONTE: ABDOLVAHED KAMIA (2014).

Rugosidade do punção: região de contato com o corpo de prova deve ser polido.

Durante o teste, o punção deforma o corpo de prova na sua região central até que a ruptura tenha início, o que pode ser detectado por meio visual ou pela redução na força da prensa.

As dimensões da ferramenta estão indicadas na (FIGURA 11).

FIGURA 11 – DIMENSÕES DA FERRAMENTA DE ENSAIO NAKAZIMA



FONTE: ADAPTADO DE CHEMIN FILHO (2014).

Após o ensaio, as novas dimensões dos círculos impressos no material na região da fratura são tomadas e comparadas com as dimensões originais, conforme exposto anteriormente. As deformações principais ε_1 e ε_2 são encontradas conforme segue:

Deformação de engenharia:

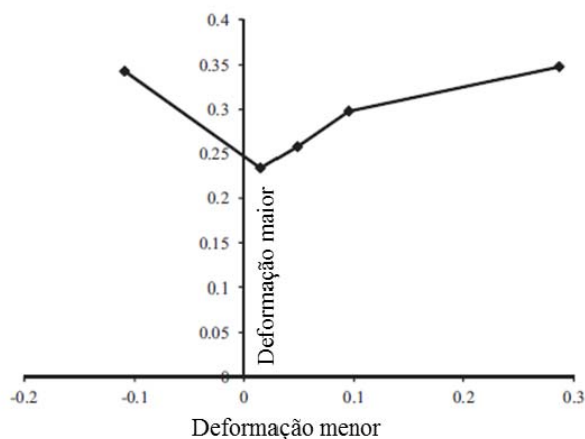
$$e_1 = 100 * \frac{L_{ma} - L_i}{L_i} \quad e \quad e_2 = 100 * \frac{L_{mi} - L_i}{L_i}$$

Deformação verdadeira:

$$\varepsilon_1 = \ln(1 + e_1) \quad e \quad \varepsilon_2 = \ln(1 + e_2)$$

Estes dados são inseridos no CLC, conforme (FIGURA 12).

FIGURA 12 – EXEMPLO DE CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO OBTIDA EXPERIMENTALMENTE



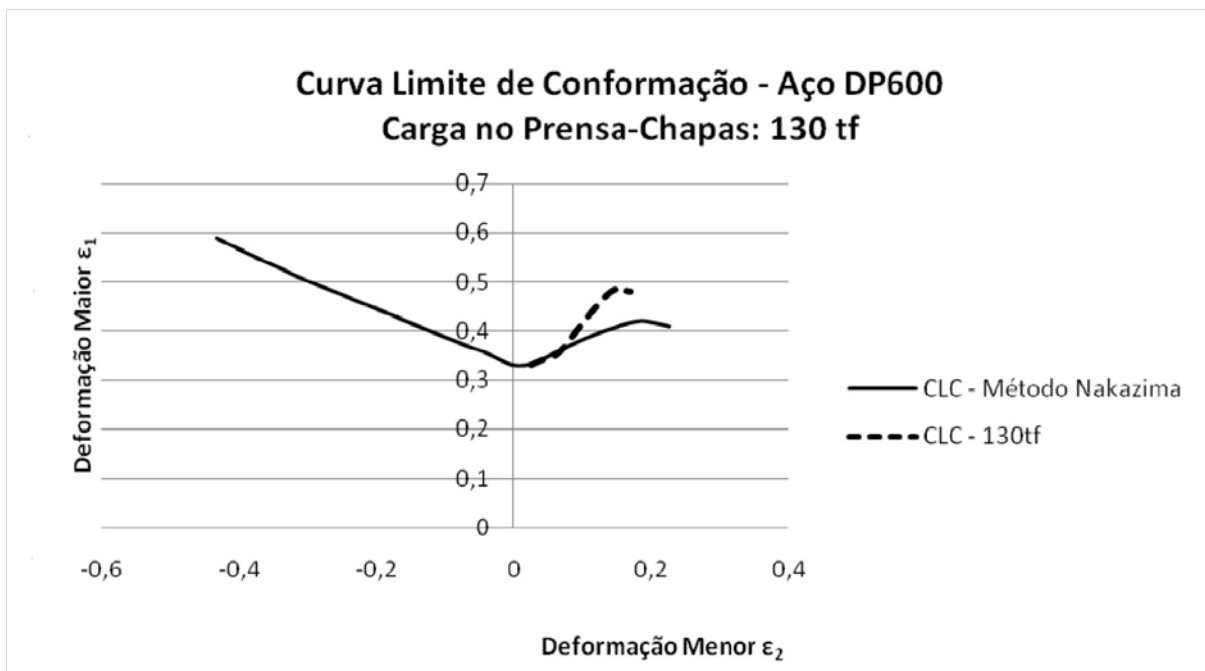
FONTE: ABDOLVAHED KAMIA (2014).

2.4 EFEITO DA CARGA DO PRENSA-CHAPAS

De acordo com a norma (EN ISO 12004-2, 2008), a ferramenta possui um draw-bead para evitar qualquer escoamento do material para dentro da matriz, mas isto não representa a maior parte dos processos de estampagem, de maneira que Chemin Filho (2011) sugeriu um teste Nakazima alterado, de maneira que seja possível avaliar o comportamento da CLC com diferentes cargas no prensa chapas e sem draw-bead. Nos ensaios realizados, foram comparados os resultados obtidos para um aço dual-phase DP600, com cargas de 130tf, 80tf e 58tf para corpos de prova com 200mm de largura por 150mm e 200mm por 200mm, de maneira que o modo de deformação predominante foi o de estiramento.

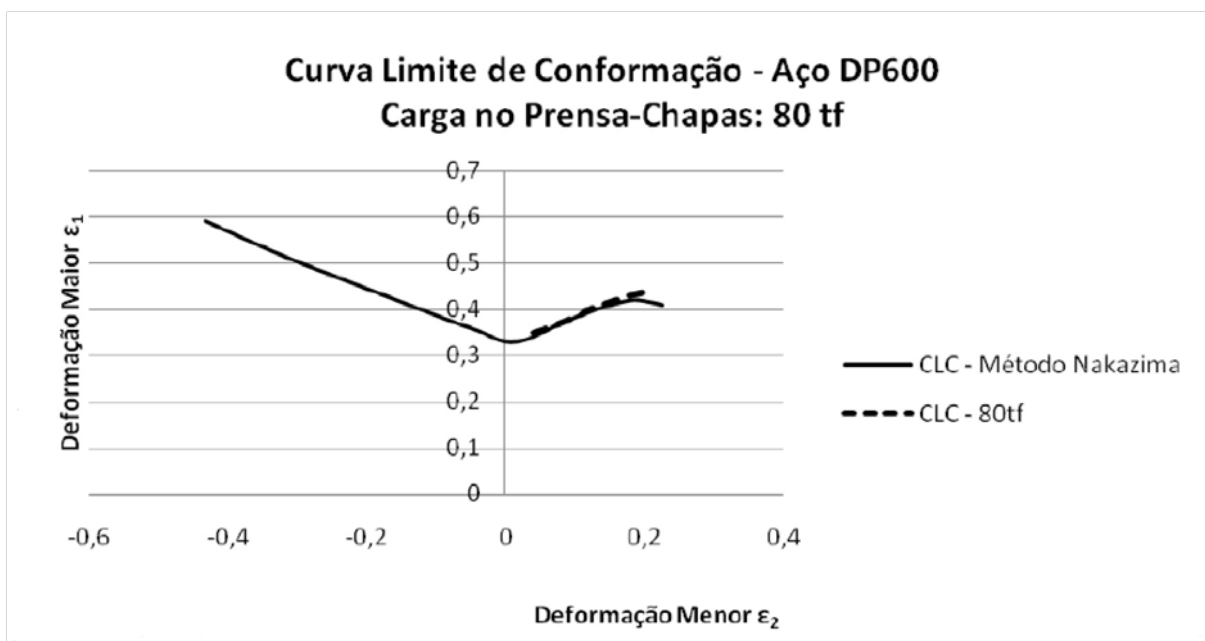
Como resultado, verificou-se uma curva CLC para a carga de 130tf com maiores níveis de deformação que o encontrado no ensaio Nakazima convencional, representando um ganho de 20% na conformabilidade. Porém, para a carga no prensa chapas de 58tf, foi obtido um valor de menor deformação e para a carga de 80tf foram observados valores equivalentes aos encontrados para o ensaio Nakazima convencional (FIGURAS 13, 14 e 15).

FIGURA 13 – VARIAÇÃO PROVOCADA NA CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO PARA CARGA DE 130 tf NO PRENSA-CHAPAS



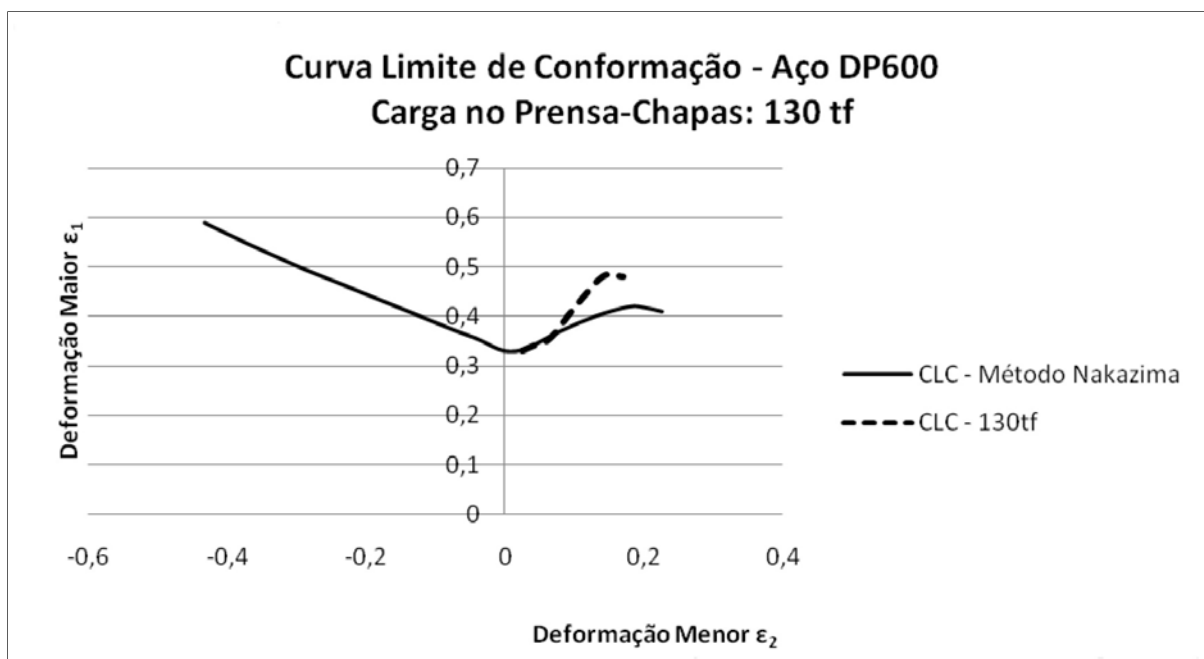
FONTE: CHEMIN FILHO (2011).

FIGURA 14 - CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO PARA CARGA DE 80 tf NO PRENSA-CHAPAS



FONTE: CHEMIN FILHO (2011).

FIGURA 15 - VARIAÇÃO PROVOCADA NA CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO PARA CARGA DE 58 tf NO PRENSA-CHAPAS



FONTE: CHEMIN FILHO (2011).

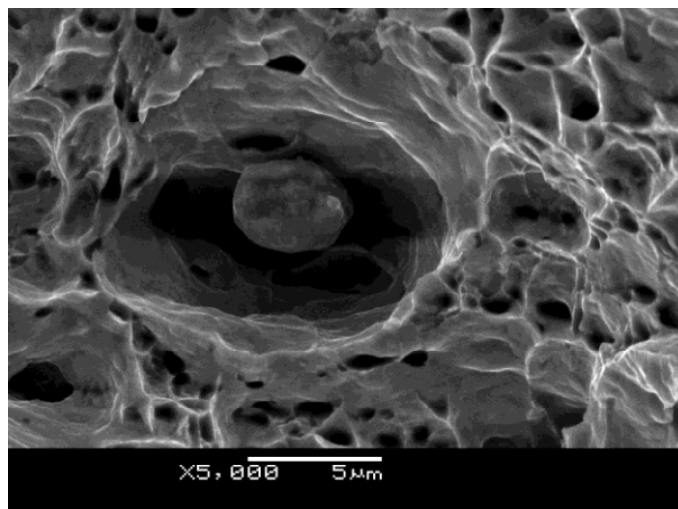
O efeito de perda de conformabilidade encontrado para a carga do prensa chapas de 58tf foi justificado pela fragilização do material pelo dobramento da chapa no raio da matriz. Com a carga de 58tf, o escoamento do material sobre o raio da matriz foi elevado, e a região fragilizada avançou para a região de trinca.

Esta fragilização foi comprovada através da análise da fratura, onde foi identificado que no ensaio Nakazima com o aço DP600, a fratura é predominantemente dúctil, ao contrário do que foi encontrado para a peça ensaiada com a carga do prensa chapas de 58tf, onde foram encontrados pontos de clivagem (fratura frágil).

O ganho na estampabilidade obtido no teste com carga de 130tf foi justificado pela melhor distribuição de tensão obtida com o pequeno escoamento de material para dentro da matriz.

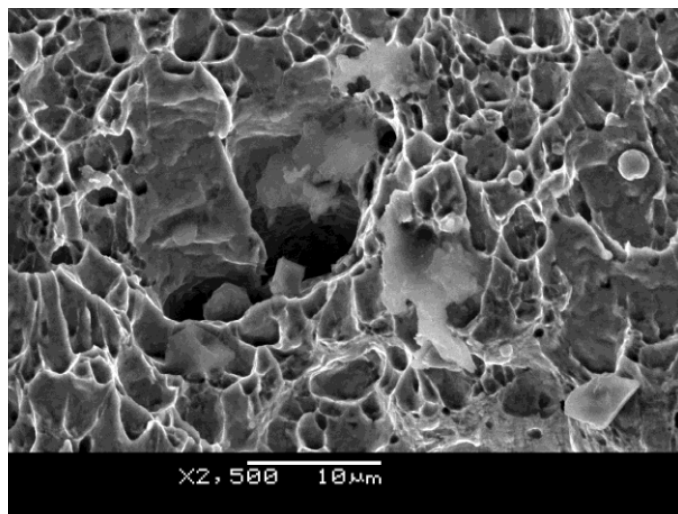
Nas (FIGURAS 16 e 17), são mostradas evidências de fratura dúctil por tração e por cisalhamento para as cargas de 130tf e 58tf, respectivamente.

FIGURA 16 – SUPERFÍCIE DA FRATURA DO AÇO DP600 NO ENSAIO COM CARGA DE 130TF NO PRENSA CHAPAS



FONTE: CHEMIN FILHO (2011).

FIGURA 17 - SUPERFÍCIE DA FRATURA DO AÇO DP600 NO ENSAIO COM CARGA DE 58TF NO PRENSA CHAPAS



FONTE: CHEMIN FILHO (2011).

2.5 FRATURA DE AÇOS DUAL PHASE

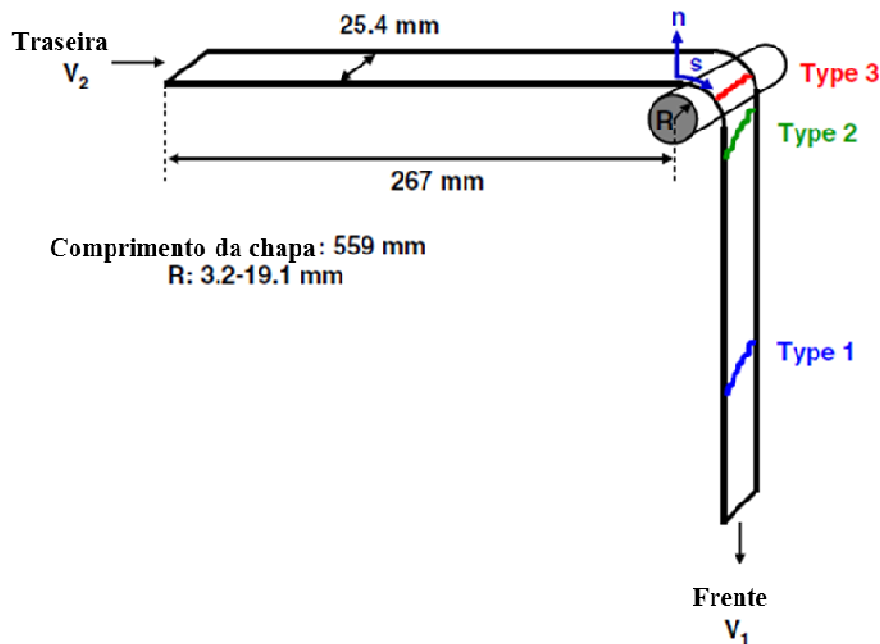
Os aços dual-phase são aços de elevada resistência mecânica e ductilidade, o que fazem com que eles sejam de grande interesse para a indústria automobilística, conforme dito na introdução. Esta alta dureza é devido a sua microestrutura apresentar 75% de ferrita e 25% de martensita, o que é conseguido através de tratamento térmico e composição definida (WANG, LI, *et al.*, 2014). Apesar desta característica, este aço encontra dificuldades de utilização devido à imprevisibilidade de falhas por fraturas de cisalhamento. Aços comuns utilizados na estampagem automotiva apresentam falha dúctil com perda de espessura, que é o mesmo fenômeno encontrado para falhas dos aços dual-phase em condições de ensaio Nakazima. No entanto, estes aços possuem a peculiaridade de apresentar, em processos industriais, fratura por cisalhamento em níveis de deformação inferiores aos apresentados nos ensaios Nakazima e previstos pela curva CLC e sem redução significativa de espessura.

Diversos pesquisadores têm desenvolvido teorias para propor a causa deste tipo de falha em aços dual-phase, atribuindo este fenômeno à microestrutura do material, identificando que esta falha ocorre preferencialmente quando há escoamento do material para matrizes com pequenas razões R/t e alta taxa de deformação, sendo R o raio da matriz e t a espessura da chapa (WANG, LI, *et al.*, 2014), o que não ocorre no teste Nakazima.

2.5.1 Modelo termomecânico de Wagoner

Wagoner et al. (2011) desenvolveu um novo teste de dobramento (draw-bend test), simulando a condição operacional a que o material pode ser submetido no raio da matriz. O teste consiste em um corpo de prova na forma de uma tira metálica que é dobrado a 90° sobre um rolete fixo. Através de motores presos às extremidades do corpo de prova, este corpo é deformado sobre diferentes raios de rolete a diferentes taxas de deformação (definida pela diferença da velocidade V_2-V_1 , conforme FIGURA 18).

FIGURA 18 – DESENHO ESQUEMÁTICO DO TESTE DE DOBRAMENTO (DRAW-BENDTEST) E OS DIFERENTES MODOS DE FRATURA



FONTE: WAGONER, KIM et al (2011).

Com este ensaio, foram evidenciados diferentes modos de fratura, sendo o tipo 1 ocorre em região que não sofreu dobramento no rolete, e a fratura ocorre devido ao estiramento decorrente da deformação plástica devido a tensão trativa. O tipo 3 é uma fratura por cisalhamento, que ocorre na saída do rolete e se propaga de forma perpendicular a direção de movimento do material, iniciando no centro da tira. O tipo 2 é um modo de fratura intermediário entre o tipo 1 e 3.

De acordo com os resultados obtidos por Wagoner et al. (2011), a fratura por cisalhamento ocorre quando é empregada alta taxa de deformação (na ordem de 1/s), ou pequenas razões R/t , que é o mesmo fator que faz com que este modo de fratura prevaleça em operações de estampagem. Operações de estampagem industriais podem apresentar taxas de deformação ainda maiores, na ordem de 10/s. Wagoner et al. (2011) propôs que a falha inesperada por cisalhamento se deve a deformação induzida pelo calor gerado na operação de dobragem e desdobragem, que pode gerar temperaturas na faixa de 100°C.

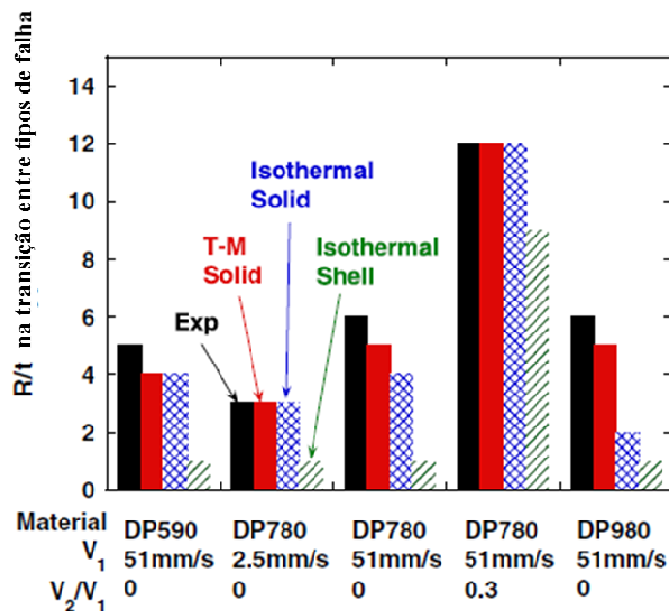
A grande quantidade de calor gerada pela deformação de metais de alta dureza e ductilidade é atingida devido à energia necessária ser superior ao necessário para deformar materiais com menor resistência. Quando o material está sujeito à alta taxa de deformação, este calor não é dissipado e a temperatura aumenta significativamente, o que faz com que a suposição de deformação

isotérmica empregada nos meios tradicionais de simulação numérica imprima um erro significativo nos resultados.

Os autores propuseram então um modelo de simulação que considera endurecimento por deformação em função da temperatura, sensibilidade à taxa de deformação e a perda de resistência com a temperatura, tudo isto considerando um elemento sólido (ao contrário de elemento em forma de casca empregado normalmente na indústria).

A (FIGURA 19) mostra diferentes resultados comparando o obtido experimentalmente e por diferentes métodos de simulação.

FIGURA 19 – COMPARAÇÃO ENTRE VALORES DE R/t NA TRANSIÇÃO ENTRE FRATURA POR TRAÇÃO E CISLHAMENTO EM DIFERENTES MÉTODOS DE SIMULAÇÃO E RESULTADO EXPERIMENTAL



FONTE: WAGONER, KIM et al (2011).

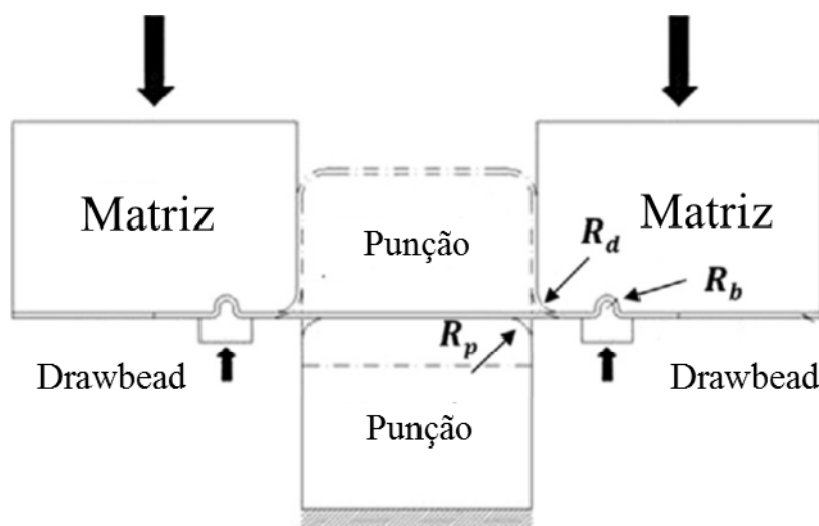
Apesar da convergência dos resultados apresentados por Wagoner, este modelo leva em consideração a velocidade de estampagem e um processo não adiabático. O que representa bem os processos de estampagem industriais, mas não apresenta diferença dos métodos isotérmicos quando trata-se de velocidades baixas de deformação. Portanto, este método não é significativo para ensaios de estampabilidade Nakazima, que emprega velocidades do punção entre 1 e 2mm/s, conforme exposto na seção 2.3.

2.5.2 Relação entre velocidade de estampagem e a relação R/t

Wang et al. (2014) desenvolveu uma série de ensaios envolvendo dobramento e alongamento em aços DP800 e HC340 para identificar o modo de falha do aço dual-phase, em comparação com o aço High Strength Low Alloy HC340.

O teste consistiu na simulação de dobramento e estiramento comumente empregado na estamparia e onde existe a maior incidência de falha por cisalhamento em aços dual-phase. O equipamento ilustrado na (FIGURA 20) foi utilizado. Nota-se os raios de importância, sendo R_d o raio da matriz, R_p o raio do punção e R_b o raio do Draw-bead.

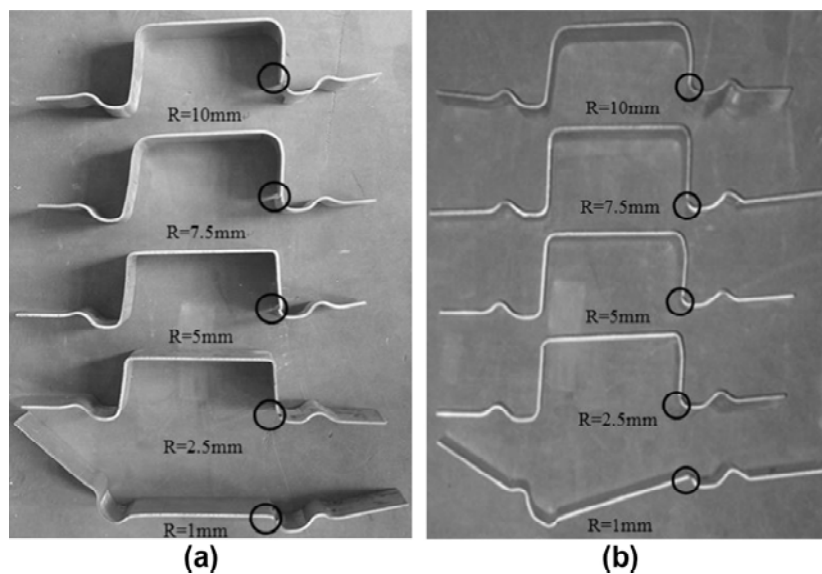
FIGURA 20 – EQUIPAMENTO PARA TESTE DE DOBRAMENTO E ESTIRAMENTO



FONTE: WANG, LI, et al (2014).

O material é estirado sobre o raio da matriz através do punção até que haja ruptura. Foram ensaiados corpos de prova dos dois materiais com raios da matriz variando entre 1mm e 10mm, conforme mostrado na (FIGURA 21).

FIGURA 21 – TESTE COM VÁRIOS RAIOS DE MATRIZ PARA (A) AÇO DP800 E (B) AÇO HC340



FONTE: WANG, LI, et al (2014).

Para verificar o modo de falha, foi feita análise por microscopia eletrônica e foi evidenciado que as chapas de aço DP800 romperam por cisalhamento em todos os ensaios, a não ser o de raio de matriz 10mm. Já as amostras de HC340 apresentaram redução de espessura para todos os raios de matriz e a micrografia apresentou dimples equiaxiais, típicos de uma fratura dúctil por tração.

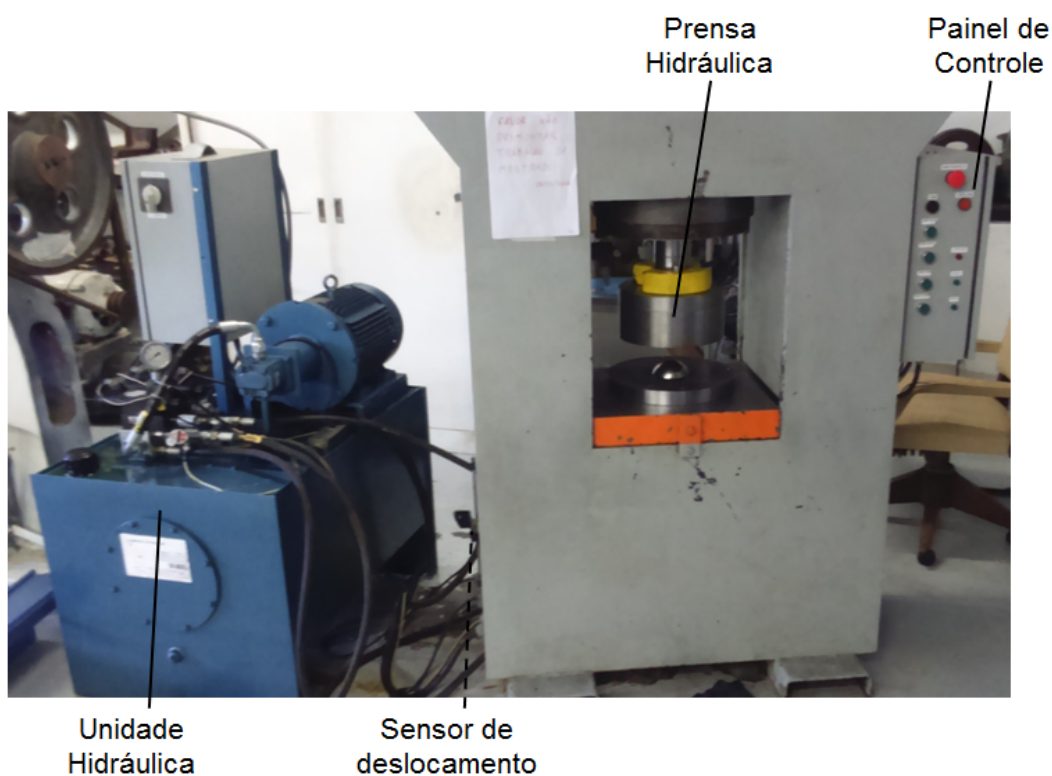
Através deste trabalho pode-se estimar o raio crítico da matriz em um processo de estampagem de aço DP800 com draw-bead e 5mm/s de velocidade de deslocamento do punção, mas não foi retirado nenhum parâmetro significativo para utilização prática na estamparia.

3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 PREPARAÇÃO DA PRENSA HIDRÁULICA

Inicialmente foi analisado por completo o funcionamento da prensa hidráulica, mostrada na FIGURA 22, incluindo seus dispositivos eletrônicos como sensores e o software de aquisição de dados.

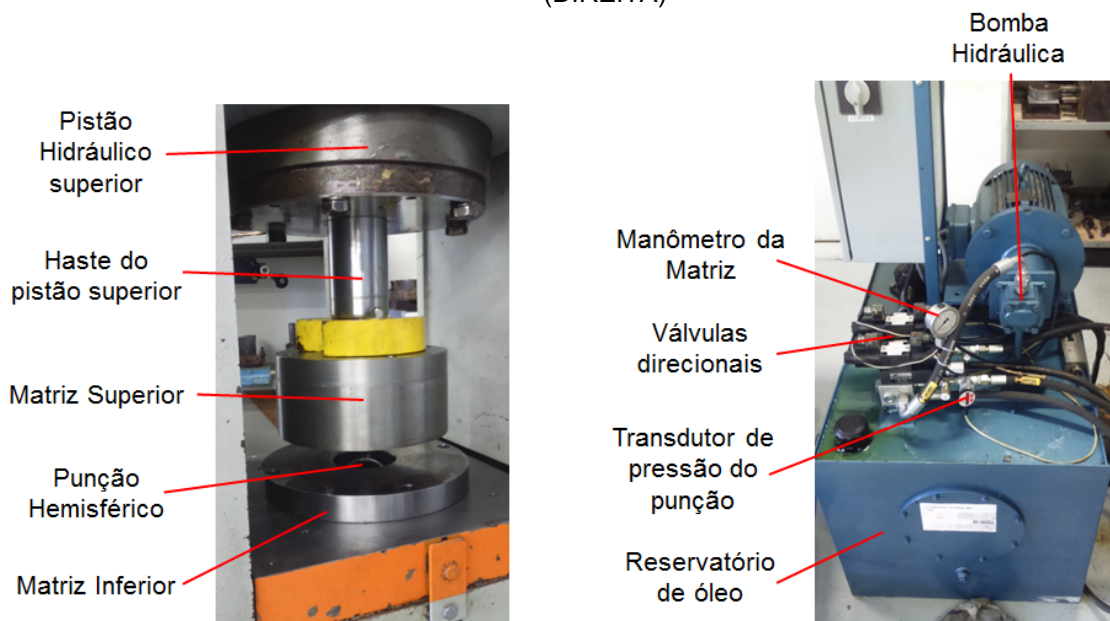
FIGURA 22 – PRENSA HIDRÁULICA UTILIZADA NOS ENSAIOS.



FONTE: O autor (2017)

A prensa em questão possui um acionamento de duplo efeito, o que permite que o acionamento da matriz e do punção, observados na FIGURA 23, sejam controlados por cilindros hidráulicos independentes, através de botoeiras localizados no painel da prensa.

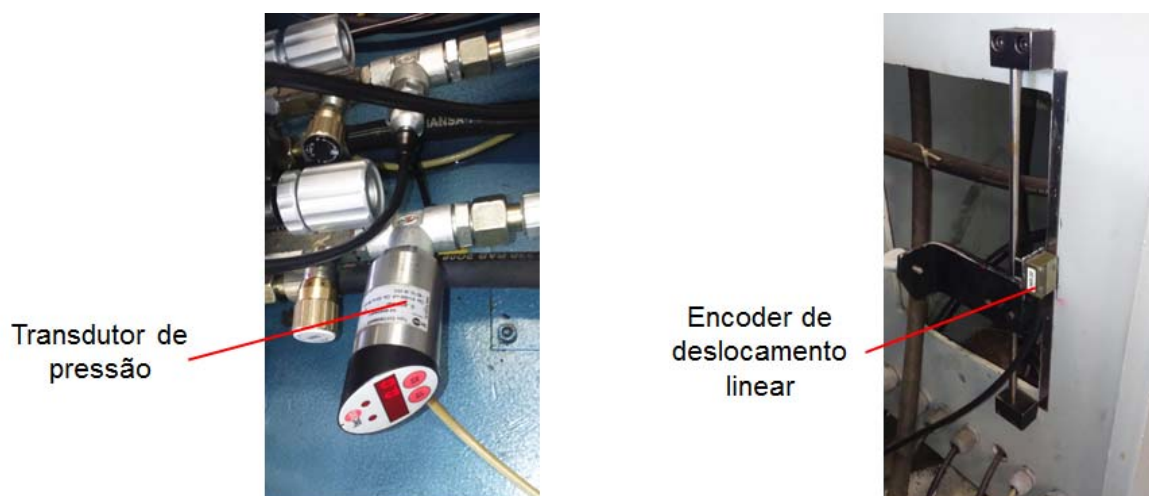
FIGURA 23 – DETALHE DA MATRIZ DE ENSAIO (ESQUERDA) E DA UNIDADE HIDRÁULICA (DIREITA)



FONTE: O autor (2017)

O sistema hidráulico da prensa possui um manômetro analógico acoplado a linha que aciona o prensa chapas, o qual registra a pressão durante seu acionamento em função da regulação de uma válvula de controle de fluxo associada, (FIGURA 23). O valor da pressão foi convertido para o valor da força correspondente. Simultaneamente, um transdutor de pressão instalado na linha de acionamento hidráulico do punção, monitora a pressão no cilindro desse atuador (FIGURA 24). Este transdutor tem um papel fundamental na programação, pois torna possível a detecção da variação de força exercida pelo punção durante o ensaio. Há ainda na máquina um encoder linear para o monitoramento do deslocamento do punção. Este encoder registra, com precisão de 0,1mm o deslocamento do punção, sendo zerado a cada novo acionamento no ponto de início de ensaio, quando o punção se encontra alinhado com a matriz, sem exercer força sobre a chapa. Para monitorar todos os sensores e atuar as válvulas hidráulicas, a prensa possui um CLP. Este monitora os sensores, respondendo, no próprio software, com um gráfico de deslocamento em função do tempo ou força em função do tempo. O CLP é responsável ainda pelo acionamento do punção e da matriz, pois detecta o sinal das botoeiras de comando manual e aciona as válvulas direcionais convenientemente.

FIGURA 24 – TRANSDUTOR DE PRESSÃO (ESQUERDA) E ENCODER LINEAR (DIREITA)

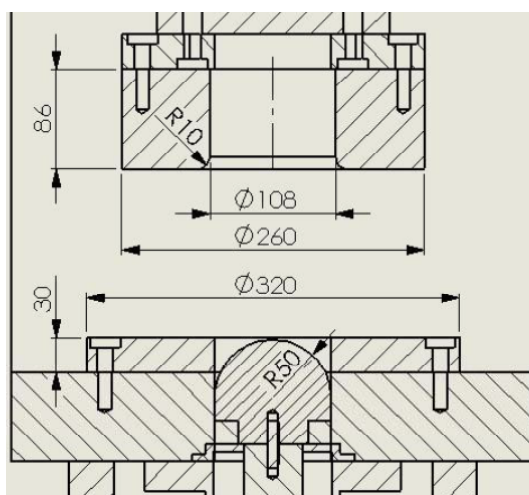


FONTE: O autor (2017)

Definidos os sensores e suas funções, foram determinados parâmetros de monitoramento durante os ensaios, uma vez que o software de controle possui uma função através da qual pode-se visualizar e salvar os valores obtidos nos sensores com intervalos de tempo de 100ms.

O ferramental utilizado foi o mesmo desenvolvido por Chemin Filho (2011), constituído por um punção hemisférico de raio 50mm, e matriz com superfície plana, ou seja, sem draw-bead. Através desta ferramenta, com carga de 80tf do prensa chapas sobre o material, foi obtida a curva CLC para o aço DP600 de forma similar a curva CLC obtida através do método convencional de ensaio Nakazima, onde faz-se o uso de draw-bead.

FIGURA 25 – EQUIPAMENTO PARA ENSAIO NAKAZIMA MODIFICADO.



FONTE: Adaptado de CHEMIN FILHO (2011).

3.2.1 Preparação das amostras

Para o procedimento foi utilizado o aço DP600, produzido e fornecido pela Usiminas-MG, com 2,0mm de espessura, 350 MPa de tensão de escoamento e 600 MPa de máxima tensão. Dentre os Aços AHSS, que são alvo de vários estudos, pode-se citar alguns estudos que utilizaram o aço DP600, como DeArdo (2008), Huh (2008), Curtze (2009), Farabi (2010), Uthaisangsuk (2011), Kim S. B. (2011), entre tantos outros

O ensaio Nakazima prevê um total de dezoito corpos de prova, todos com 200mm de comprimento e largura que varia de 40mm à 200mm, contudo, devido a quantidade de possíveis ensaios que seriam necessários para caracterização da máquina, foram utilizados oito corpos, quantidade considerada suficiente para o propósito esperado. Estes corpos foram definidos nas medidas 25mm, 50mm, 75mm 100mm, 120mm, 150mm, 175mm e 200mm, todos cortados na guilhotina.

Apesar de não serem as mesmas dimensões sugeridas pela norma ISO 12004-1:2008, esta norma prevê a utilização de corpos de prova retangulares de maneira a simplificar o procedimento experimental.

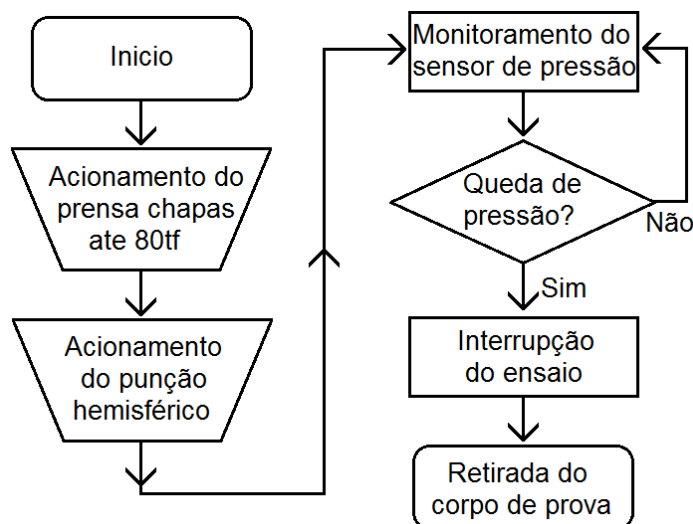
Os corpos de prova passaram por impressão da malha de círculos na sua superfície, destinada à medição da deformação sofrida pelo material após a estampagem. O processo utilizado foi a serigrafia, a qual trata-se de aplicação de tinta através de uma tela, designada a este fim e com o desenho das malhas desejado. Somente a tinta utilizada, do tipo vinílica de cor preta, não é suficiente para uma marcação eficiente, pois a superfície do corpo de prova não adere a esta tinta com facilidade. Para solucionar este problema, foi adicionado à tinta Ácido Nítrico, na proporção de 10% em relação ao volume da tinta. Este ácido melhora a aderência da tinta à superfície do material, resultando em malhas perfeitas antes e depois do ensaio.

3.2 LEVANTAMENTO DA CLC ATÉ O LIMITE DE RUPTURA

O primeiro ensaio realizado baseou-se no levantamento da CLC deformando as amostras até o instante da sua ruptura. Cada corpo de prova foi posicionada na ferramenta e aplicada uma carga de 80tf através do prensa chapas. Em seguida houve o acionamento do punção que deformou o material ate que se perceber-se o

início da sua ruptura através da queda de pressão, de acordo com o fluxograma da FIGURA 26.

FIGURA 26 – FLUXOGRAMA DE ENSAIO ATÉ A RUPTURA



FONTE: O autor (2017)

A partir deste ensaio foi obtida a curva CLC, com carga de prensa-chapas de 80tf e sem draw-bead, para posterior validação com a CLC obtida por Chemin Filho (2011). Nestas condições de ensaio, monitorou-se graficamente a pressão hidráulica do punção em função do seu deslocamento, dados estes utilizados como parâmetros de máquina que definem o limite de ruptura do material.

3.3 ENSAIO ATÉ O LIMITE DE ESTRICÇÃO

3.3.1 Interrupção do ensaio na estrição

Durante os ensaios até o limite de ruptura, foram observados dados de força do pistão, que apresenta uma ligeira queda no exato momento da estrição. Esta queda, apesar de ser muito pequena, foi considerado relevante. Levantou-se então uma hipótese inicial de interrupção do ensaio com uma detecção dessa queda através de uma programação do CLP. Durante os ensaios, observou-se que apenas uma leitura comparada com a seguinte era pouco para detectar eficientemente o momento desta queda. Sendo assim, foi considerada uma média de cinco medições anteriores com a seguinte, utilizando uma função conhecida como “Pilha de

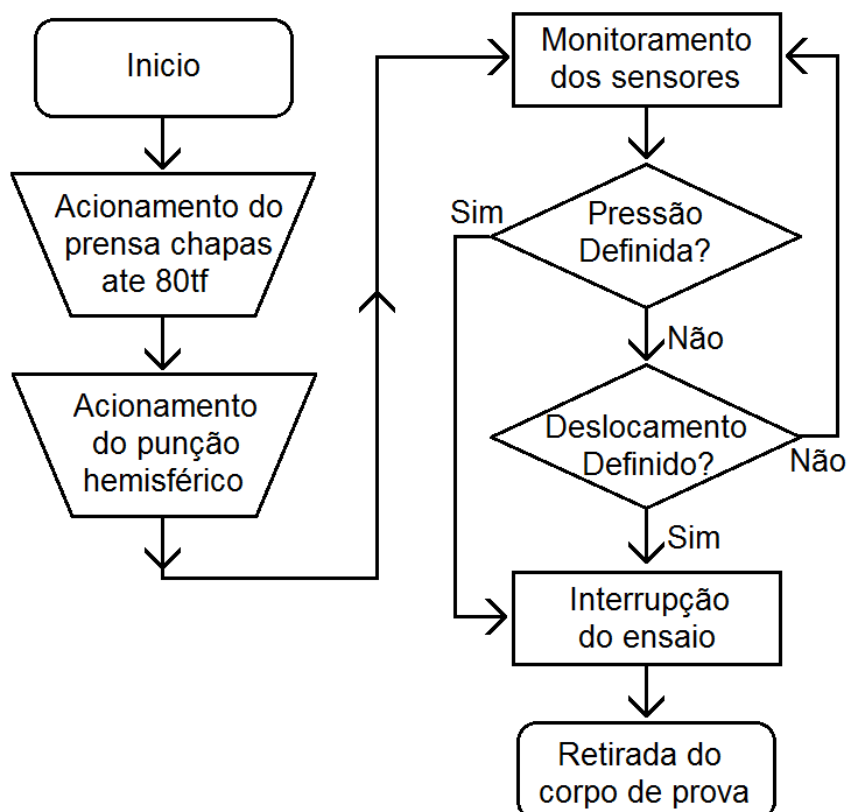
memória”, presente na linguagem de programação Ladder (do CLP). Como a quantidade de memória utilizada para esta função é muito grande, o CLP não foi capaz de armazenar e processar as informações devido a suas limitações. Afim de resolver a falta de memória, foi implementado um segundo sistema de processamento, composto por um sistema microcontrolado. Este foi programado (via programação C++) para detectar a queda de pressão, acionado um comando que seria levado ao CLP para interrupção do ensaio. Neste sistema, o CLP permaneceu com suas funções básicas e monitoramento de sensores, mas sem processamento de sinais. A leitura dos sinais e sua rápida análise e processamento (aproximadamente 50ms) trouxe uma resposta positiva ao método utilizado, porém, sem uma grande confiabilidade de resultado por se ter apenas um sensor monitorando a pressão. Sendo assim, uma nova abordagem tornou-se necessária para alcançar os objetivos.

3.3.2 Definição de pontos de estrição

Com os valores de máquina (pressão e deslocamento) levantados para o ponto de ruptura, analisou-se que o ponto de estrição deveria representar valores ligeiramente inferiores. Dessa forma, estimou-se um valor de variação para testes onde uma redução de 1% a cada ensaio deveria representar valores satisfatórios. Então, considerando os valores de máquina obtidos para a ruptura como 100%, reduziu-se este gradativamente até que o ponto de estrição fosse percebido visualmente.

Estes valores foram atribuídos ao software de controle da máquina, tornando a parada do ensaio totalmente automática, ou seja, quando a pressão hidráulica ou o deslocamento do punção alcancem os valores determinados o ensaio é interrompido, e a amostra analisada visualmente.

FIGURA 27 – FLUXOGRAMA DE ENSAIO COM INTERRUPTÃO CONTROLADA



FONTE: O autor (2017)

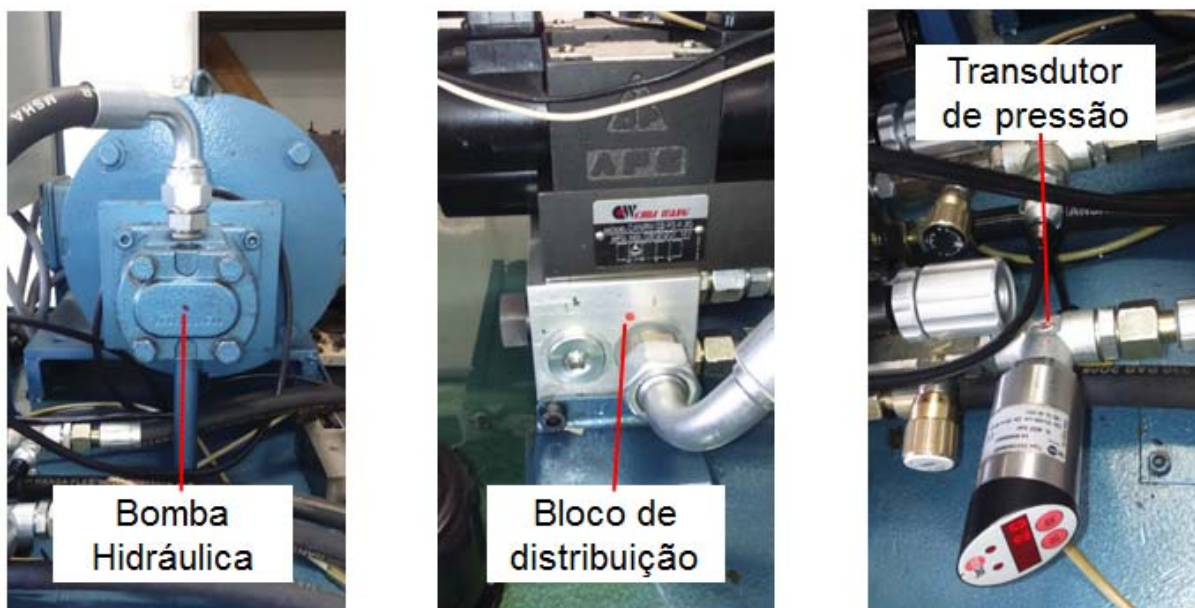
Com diversos pontos utilizados e diversos corpos testados considera-se que a definição do ponto de estricção totalmente experimental.

3.4 ENSAIOS COM TEMPERATURA CONTROLADA

Observou-se que alguns parâmetros não monitorados poderiam interferir nos ensaios, um deles a temperatura hidráulica da máquina poderia interferir na leitura dos sensores. Com isso, novos ensaios foram realizados afim de verificar se a temperatura realmente interferia nos resultados.

Inicialmente monitorou-se a temperatura da máquina em três pontos, considerados mais críticos, sendo eles a bomba hidráulica, o bloco de entrada, que distribui para as válvulas direcionais, e o sensor de pressão hidráulica que envia a medida ao CLP (FIGURA 28).

FIGURA 28 – PONTOS DE MONITORAMENTO DE TEMPERATURA



FONTE: O autor (2017)

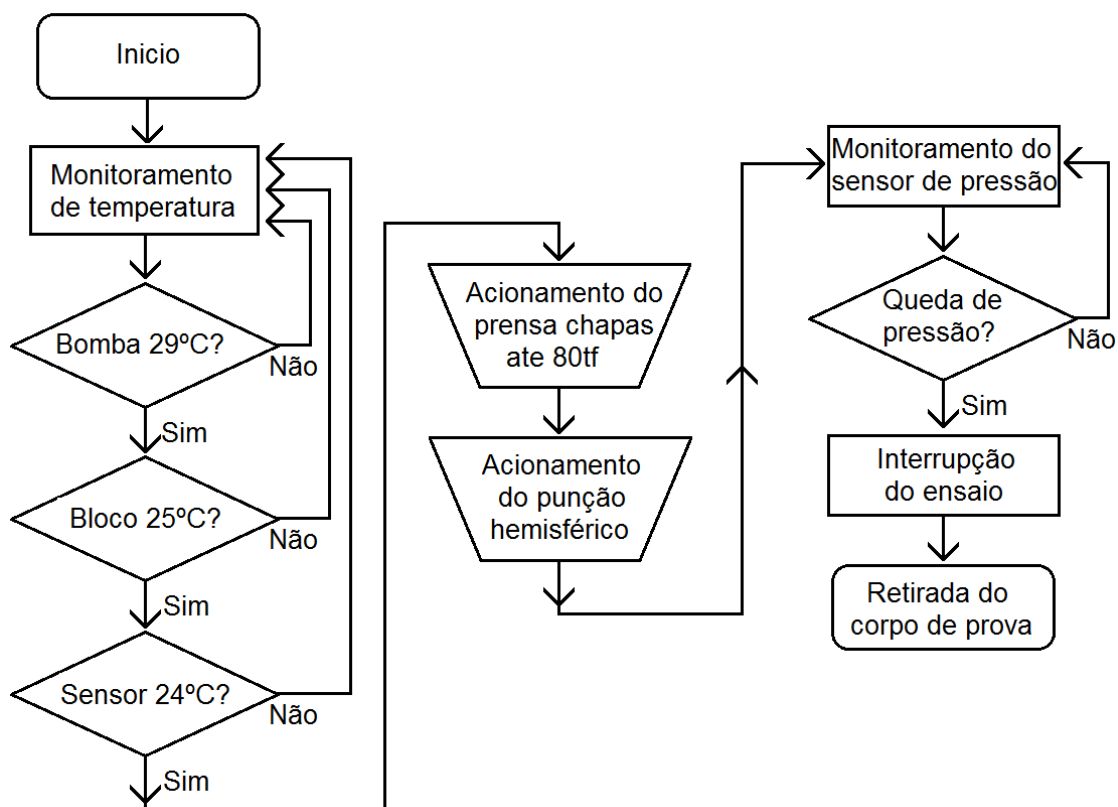
Foi necessário verificar a qual temperatura os três pontos estabilizassem, pois a partir deste, não deveria haver variações significativas. Atribuiu-se de modo empírico um monitoramento a cada 05 minutos nesses três pontos, até que a temperatura estabilizasse. O procedimento ocorreu durante 105 minutos (01 hora e 45 minutos), porém, com 70 minutos a temperatura alcançou a estabilidade, sendo 29°C para a bomba, 25°C para o bloco e 24°C para o transdutor de pressão. Mediu-se por mais alguns minutos para verificar a estabilidade.

3.4.1 Ensaio até o limite de ruptura

Novos ensaios levando os corpos à ruptura foram conduzidos partindo destas temperaturas, ou seja, o ensaio iniciava nestas condições e aguarda-se até que os pontos medidos se estabilizassem para um novo ensaio. O objetivo foi verificar se a temperatura da prensa interferiria no resultado da CLC até a ruptura.

Da mesma forma que o descrito no item 3.2, os valores de pressão hidráulica e deslocamento do punção foram monitoradas e registradas para análise.

FIGURA 29 – FLUXOGRAMA DE ENSAIO ATÉ A RUPTURA COM TEMPERATURA MONITORADA

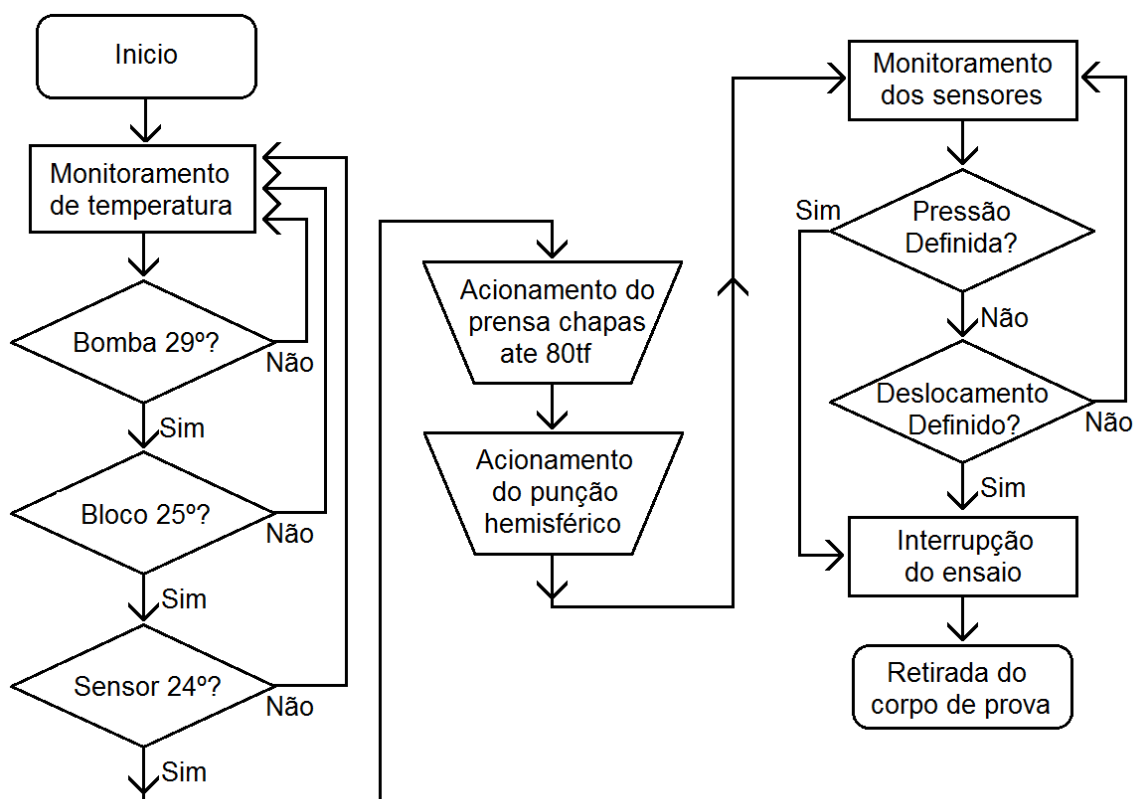


FONTE: O autor (2017)

3.4.2 Ensaio até o limite de estrição

Seguindo os parâmetros de máquina obtidos nos ensaios até a ruptura com temperatura controlada, alimentou-se o software de controle da máquina com 95% da pressão, e 98% do valor de deslocamento dos valores obtidos nos ensaios. Estes valores foram atribuídos com base nos resultados dos ensaios descritos no item 3.3, que apresentaram resultado satisfatório nesses percentuais.

FIGURA 30 – FLUXOGRAMA DE ENSAIO ATÉ O LIMITE DE ESTRIÇÃO COM TEMPERATURA MONITORADA



FONTE: O autor (2017)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

De acordo com o planejamento experimental descrito no capítulo 3, a primeira fase de testes compreendeu a análise das propriedades mecânicas fundamentais do aço DP600. Desta forma, buscou-se chegar a um melhor conhecimento da composição química do aço, da sua microestrutura, propriedades mecânicas básicas e parâmetros de estampabilidade obtidas através do ensaio de tração e sua conformabilidade, caracterizada através da curva limite de conformação gerada através de ensaios de estampabilidade Nakazima. Através dos resultados obtidos tornou-se possível uma análise prévia do comportamento do aço dual-phase quando submetido a testes laboratoriais tradicionalmente conhecidos.

4.1.1 Análise química

A análise química do material possibilita a verificação da real composição química da amostra fornecida para os ensaios, bem como sua comparação com a especificação fornecida pelo fabricante do aço DP600. A (TABELA1) mostra tanto a composição química mássica percentual prevista para o material segundo o fabricante, quanto o resultado obtido por Chemin Filho (2011).

TABELA 1 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA RESULTANTE DO ENSAIO DE ANÁLISE QUÍMICA DO AÇO DP600

Composição química do aço DP600 (partes da massa em %)												
Ensaio de laboratório												
C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Nb	Zr	Ti	Ni	Mo	Cu
0,086	0,053	1,739	0,027	0,007	0,031	0,048	0,028	0,006	0,004	0,029	0,226	0,0094
Fornecida pelo fabricante												
C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Nb	V	Ti	Ni	Mo	N
0,07	0,01	1,66	0,019	0,005	0,043	0,03	0,015	<0,005	<0,005	0,02	0,16	0,0058

FONTE: CHEMIN FILHO (2011).

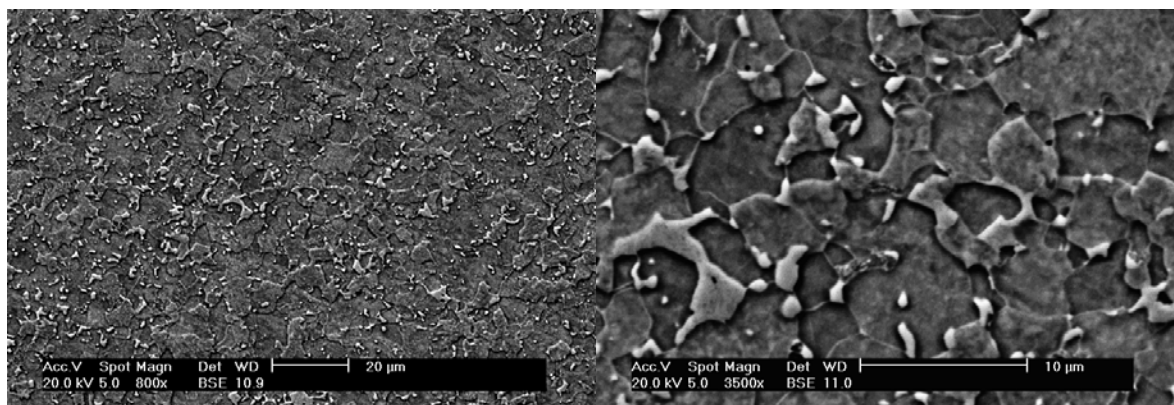
Entre os valores fornecidos pelo fabricante do aço e os obtidos através de ensaios de laboratório, observa-se que não houve uma diferença muito acentuada nos resultados.

4.1.2 Metalografia

Os ensaios metalográficos realizados com o aço DP600 tiveram como objetivo a verificação das fases presentes no material e o valor percentual de cada uma delas, fator este de grande influência para a conformabilidade do aço.

A (FIGURA 23) mostra as fotos da metalografia do aço DP600 com ampliação de 800x (a) e 3500x (b), onde se tornam visíveis regiões escuras, correspondentes à matriz ferrítica do material e regiões mais claras, que identificam as “ilhas” de martensita presentes na microestrutura do aço. Isso evidencia uma característica peculiar aos aços dual-phase, assim denominados devido a existência de regiões mais duras (martensita) dispersas numa matriz macia (ferrita).

FIGURA 31 – METALOGRAFIA DO AÇO DP600 COM AUMENTO DE 800X (A) E AUMENTO DE 3500X (B)



(a)

(b)

FONTE: CHEMIN FILHO (2011).

As imagens da (FIGURA 31) se assemelham às obtidas por Uthaisangsuk et al (2011) e pela World Auto Steel (2009), que apontam as mesmas fases, ferrita e martensita, caracterizadas pela diferente coloração observada na metalografia do material.

Um aspecto importante, porém, na investigação do material foi a constatação do valor percentual de martensita dispersa no aço. Para isso utilizou-se o software AutoCad 2002, onde a imagem da microestrutura do aço foi inserida e, posteriormente, circundadas todas as regiões correspondentes à fase martensítica. Desta forma mediu-se a área destas regiões e a área total da imagem, a partir das quais determinou-se um teor de 16,54% de martensita, sendo o restante equivalente a matriz ferrítica. Estes valores ficam dentro da faixa de 15% a 20% esperado pelo fabricante do aço e abaixo do percentual de 27% determinado por Uthaisangsuk et al (2011) em seu trabalho de pesquisa. O autor, no entanto, menciona estar trabalhando com um aço de teor de martensita mais elevado.

O teor de martensita presente no material tem influência direta no seu alongamento até a fratura e, conseqüentemente, nos parâmetros de estampabilidade do aço, uma vez que, por se tratar de uma fase dura, quanto maior o seu valor percentual há uma tendência a uma maior resistência mecânica e menor ductilidade. Com base nisso, pode-se dizer que a eficiência do material em processos de estampagem depende diretamente do equilíbrio na quantidade das fases, responsáveis em atribuir ao aço uma maior resistência sem um comprometimento em termos de conformabilidade.

4.1.3 Ensaio de tração

Os ensaios de tração, realizados com os corpos de prova retirados formando ângulos de 0°, 45° e 90° em relação à direção de laminação da chapa, forneceram informações relativas às propriedades que caracterizam o material quanto aos seus valores limite em termos de resistência (LR), a tensão máxima atingida ao final da deformação elástica e conseqüente início de deformação plástica (LE) e finalmente o alongamento máximo (*A*) do material até o instante da fratura. Outros dados calculados ao final dos ensaios de tração foram o fator de anisotropia "*R*" e coeficiente de encruamento "*n*" do material. Estes dois parâmetros caracterizam o material quanto a sua estampabilidade.

A (TABELA 2) mostra os resultados referentes às propriedades mecânicas do material obtidas através dos ensaios de tração, em comparação aos valores fornecidos pelo fabricante do aço.

TABELA 2 - COMPARATIVO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS LE, LR E AI, DO AÇO DP600, OBTIDOS ATRAVÉS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO E FORNECIDOS PELO FABRICANTE DO AÇO

Propriedades Mecânicas do aço DP600			
Propriedades	LE (MPa)	LR (MPa)	AI (%)
Ensaio de tração	410	640	28,5
Fornecidas pelo fabricante	385	621	23,9

FONTE: Adaptado de CHEMIN FILHO (2011).

Os resultados apresentados na (TABELA 2) mostraram que tanto os valores do LR quanto do LE e do AI, obtidos pelos ensaios de tração, enquadram-se perfeitamente dentro dos valores fornecidos pelo fabricante. Somente o valor do alongamento apresentou uma diferença mais significativa se comparado ao valor fornecido pelo fabricante. Em termos de propriedades mecânicas, a amostra de aço a ser utilizada nos testes subsequentes não apresenta nenhuma restrição que possa influenciar nos resultados dos próximos ensaios de laboratório.

A (TABELA 3) apresenta, além dos valores médios de R e n para as direções de 0° , 45° e 90° , o valor da anisotropia média (\bar{R}) e da anisotropia planar (ΔR). Os valores foram obtidos a partir da realização de ensaios para cada direção de laminação do corpo de prova, conforme prevê a norma NBR 8164.

TABELA 3 - PARÂMETROS DE ESTAMPAGEM R , n , \bar{R} E ΔR , DO AÇO DP600, OBTIDOS ATRAVÉS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO E FORNECIDOS PELO FABRICANTE DO AÇO

Parâmetros de estampabilidade do aço DP600									
Parâmetros	\bar{R}	R_{0°	R_{45°	R_{90°	ΔR	n_{medio}	n_{0°	n_{45°	n_{90°
Ensaio de tração	0,9356	0,6739	1,0354	0,9977	0,1996	0,1880	0,1892	0,1931	0,1818
Fabricante do aço	0,84	0,70	1,06	0,70	x	0,18	0,17	0,19	0,17

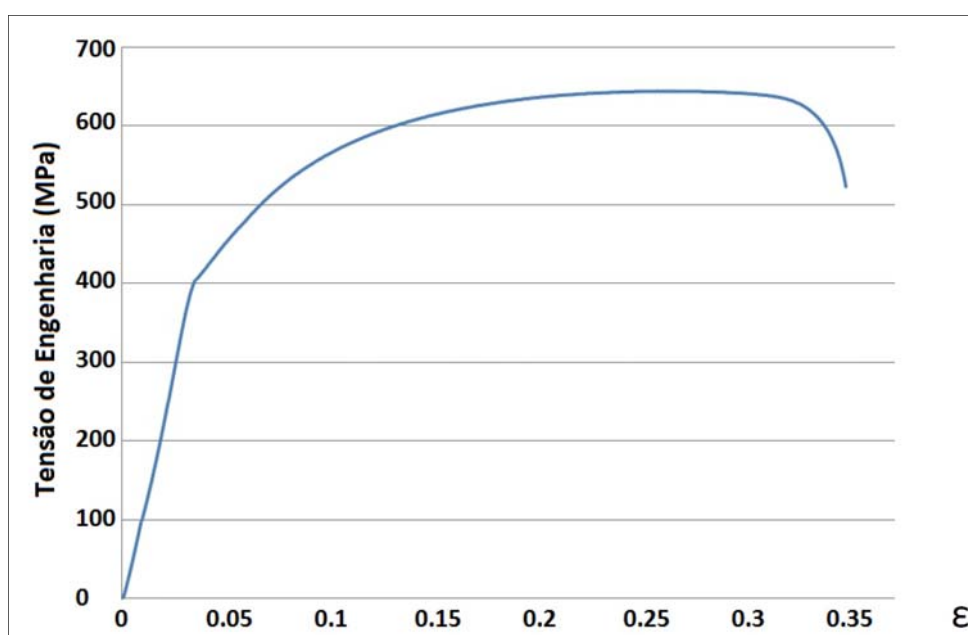
FONTE: Adaptado de CHEMIN FILHO (2011).

Os resultados reforçam que o aço DP600 é um material destinado a operações que exigem um certo nível de estampagem, uma vez que o fator R e

especialmente o coeficiente n apresentaram valores suficientemente elevados, próximos ou acima de 1,0 para o R e próximos a 0,2 para o n , a ponto de garantir esta característica do material.

A (FIGURA 32) mostra a curva Tensão vs Deformação de engenharia do aço DP600 obtida através do ensaio de tração, observa-se a inexistência do ponto de escoamento definido no final da região elástica para o aço DP600. Este é um dado importante para operações de estampagem, uma vez que neste processo de fabricação este ponto poderia acarretar defeitos no produto final, quando as deformações em alguns pontos da peça atingem uma deformação plástica porém próxima da região elástica, ocasionando esta falha. Este defeito ainda sim pode ocorrer, caso o material esteja envelhecido, o que seria evidenciado por uma consequente elevação na posição do ponto de escoamento na curva.

FIGURA 32 - CURVA TENSÃO VS DEFORMAÇÃO DE ENGENHARIA DO AÇO DP600.



FONTE: Adaptado de CHEMIN FILHO (2011).

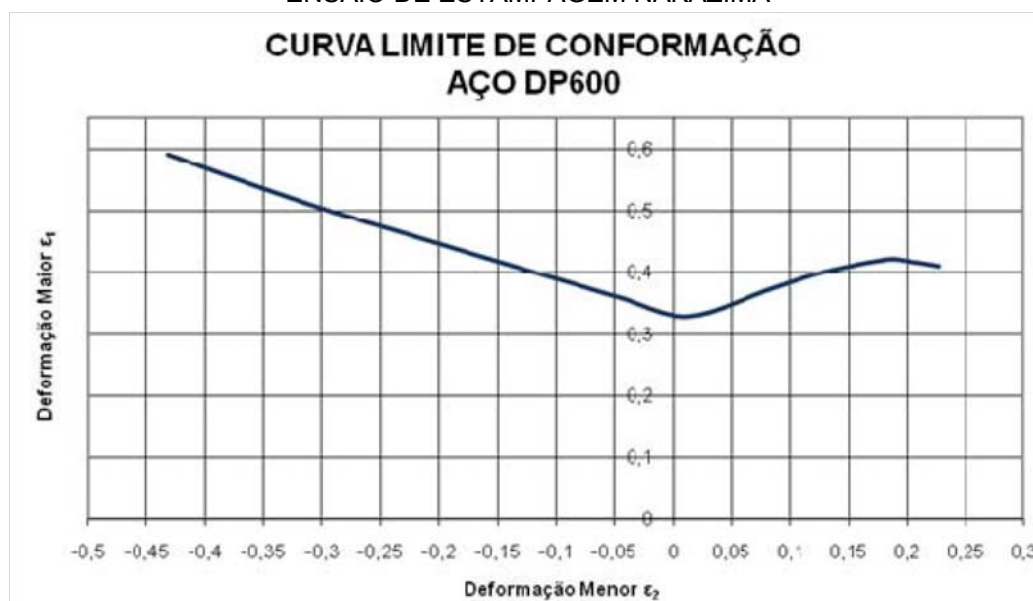
Aços DP apresentam uma excelente combinação de alta resistência e capacidade de deformação, resultado da sua microestrutura com grande capacidade de encruamento. A alta capacidade de encruamento garante a esses aços excelente capacidade de absorção de impacto, tornando esse aço uma opção interessante para componentes estruturais e de segurança nos automóveis.

4.1.4 Ensaio de estampagem Nakazima

Os ensaios de estampagem Nakazima, nesta etapa realizados segundo o método tradicional proposto pelo autor, tiveram dois focos importantes no estudo. O primeiro visando finalizar a caracterização do aço DP600, material de estudo nesta pesquisa, e o segundo com o objetivo de gerar uma base comparativa para os testes subsequentes, ou seja, os resultados dos ensaios Nakazima com interrupção no momento da estrição, que foram comparados aos resultados dos ensaios pelo método tradicional para verificação dos efeitos produzidos por esta variável de processo.

O ensaio originalmente proposto por Nakazima utiliza um único formato de punção hemisférico com 100 mm de diâmetro, e um total de 18 corpos de prova com a largura entre 40 e 200 mm, e com 200 mm de comprimento. A partir desta configuração de ensaio, tomando-se, porém, um número reduzido de corpos de prova (ver item 3.1.1), foi obtida a curva limite de conformação (CLC) do DP600 sem lubrificação, simulando a condição mais crítica de ensaio. A (FIGURA 33) mostra a curva CLC do aço DP600, determinada através do ensaio Nakazima, onde as amostras ficam presas pelo prensa-chapas a uma carga de 80tf.

FIGURA 33 – CURVA LIMITE DE CONFORMAÇÃO DO AÇO DP600, OBTIDA ATRAVÉS DO ENSAIO DE ESTAMPAGEM NAKAZIMA



FONTE: Adaptado de CHEMIN FILHO (2011).

4.2 DETERMINAÇÃO DO PONTO DE ESTRICÇÃO DO MATERIAL

Ao realizar os ensaios para levantar a CLC de caracterização e comparação com o fornecido com o fabricante, os parâmetros da máquina (mencionados no item 3.2) foram anotados, resultando na (TABELA 4).

TABELA 4 - PARÂMETROS DE MÁQUINA LEVANTADOS PARA ANÁLISE

Corpo de Prova	Pressão	Deslocamento
200 x 200	104,0 bar	37,6 mm
200 x 175	92,6 bar	36,4 mm
200 x 150	75,2 bar	33,6 mm
200 x 125	66,2 bar	35,2 mm
200 x 100	70,8 bar	41,2 mm
200 x 75	55,6 bar	40,8 mm
200 x 50	35,6 bar	40,8 mm
200 x 25	16,1 bar	38,0 mm

FONTE: O autor (2017)

Inicialmente a hipótese era de que quando o material alcançasse parâmetros da máquina próximos aos levantados durante o ensaio até a ruptura, estaria no início da ruptura ou na estrição visível, dessa forma, o software do CLP foi alimentado com os dados obtidos, seguindo a descrição do item 3.3, para verificar o proposto. A variação de valores limite permitiu a parada eficiente em pontos onde o início da estrição ocorreu visivelmente, sendo os valores mais eficientes na faixa de 95% de pressão hidráulica e 98% de deslocamento do punção. Ou seja, a interrupção do ensaio pode ocorrer em 95% do valor de pressão apresentado na TABELA 4, ou 98% de deslocamento do apresentado na mesma tabela.

Com estes valores definidos, o CLP foi programado com os valores de interrupção, apresentados na TABELA 5 como “Valores Atribuídos”, e resultaram visualmente no ponto esperado, o início da estrição, verificado visualmente.

Na TABELA 5 é possível observar ainda os valores obtidos pelos sensores no momento da interrupção. Estes dados são importantes para verificação de resultados e pontos de parada.

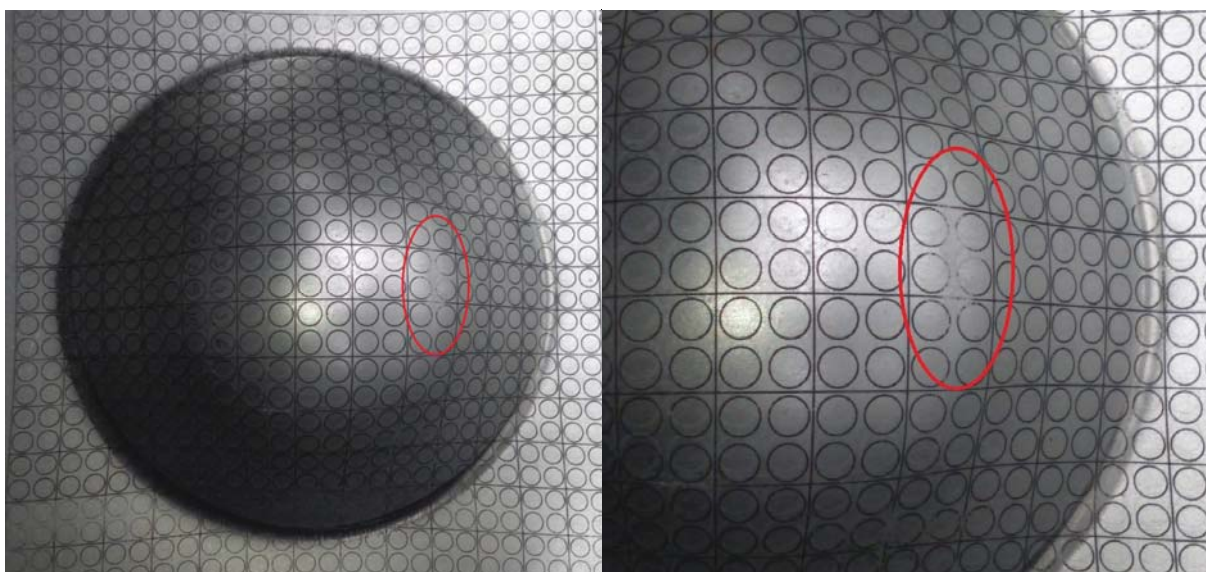
TABELA 5 - VALORES ATRIBUÍDOS PARA INTERRUPTÃO DO ENSAIO, VALORES RESULTANTES DOS ENSAIOS E ANÁLISE VISUAL DA PEÇA

Corpo de Prova	Valores atribuídos		Valores de parada do ensaio		Análise visual
	Pressão	Deslocamento	Pressão	Deslocamento	
200 x 200	98,8 bar (95%)	36,3 mm (98%)	97,3 bar	36,4 mm	Início da estrição
200 x 175	88,0 bar (95%)	35,7 mm (98%)	87,5 bar	34,4 mm	Início da estrição
200 x 150	71,5 bar (95%)	32,9 mm (98%)	70,1 bar	32,0 mm	Início da estrição
200 x 125	62,9 bar (95%)	34,5 mm (98%)	62,7 bar	33,6 mm	Início da estrição
200 x 100	69,4 bar (95%)	39,1 mm (98%)	68,0 bar	39,2 mm	Início da estrição
200 x 75	52,8 bar (95%)	40,0 mm (98%)	54,2 bar	39,2 mm	Início da estrição
200 x 50	33,8 bar (95%)	40,0 mm (98%)	34,8 bar	38,4 mm	Início da estrição
200 x 25	15,3 bar (95%)	37,2 mm (98%)	15,1 bar	36,8 mm	Início da estrição

FONTE: O autor (2017)

Os demais ensaios foram considerados com estes dois parâmetros (95% de pressão e 98% de deslocamento) para parada no ponto de estrição, e em todos os corpos sequentes foram observados sinais de início de estrição, sem a ruptura, como visto no detalhe da (FIGURA 34). Três corpos foram ensaiados com estes parâmetros para verificação, resultando em uma conformidade de valores.

FIGURA 34 – CORPO DE PROVA RESULTANTE DOS ENSAIOS (ESQUERDA) E DETALHE DA ESTRICÇÃO (DIREITA)



FONTE: O autor (2017)

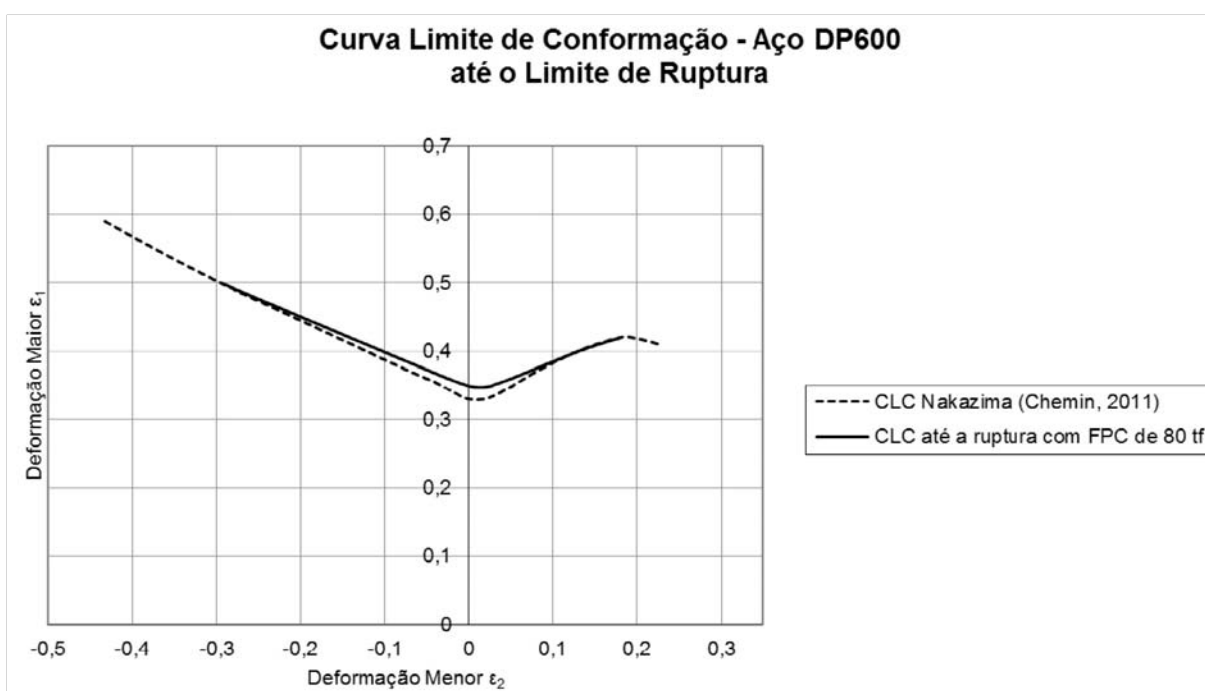
4.2.1 Curva Limite de Conformação na Estricção do Material

De acordo com o objetivo do trabalho, foram realizados os ensaios de estampagem seguindo a metodologia proposta, onde a deformação do material ficou limitada ao início da estricção do aço DP600.

Primeiramente realizou-se a comparação da curva obtida pelo método Nakazima tradicional do aço DP600, determinada por Chemin (2011), com a curva CLC obtida através do ensaio de estampagem com o ferramental sem “draw bead”. Nessa condição foi utilizada uma carga de prensa chapas de 80 ton que, segundo Chemin (2011), corresponde à carga cuja curva CLC fica equivalente a CLC obtida pelo método convencional de Nakazima.

A (FIGURA 35) mostra a comparação entre essas curvas, onde pode-se observar uma proximidade entre elas.

FIGURA 35 – COMPARAÇÃO DAS CURVAS PELO MÉTODO NAKAZIMA E COM CARGA DE PRENSA CHAPAS DE 80tf, ATÉ A RUPTURA DA CHAPA

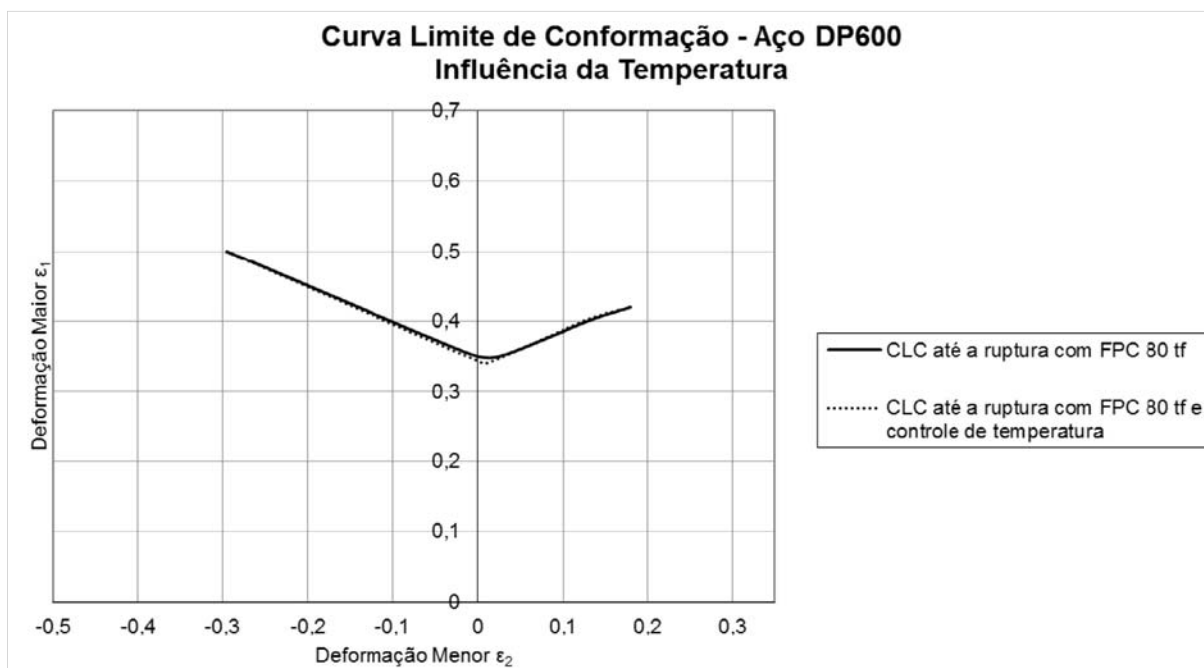


FONTE: O autor (2017)

A (FIGURA 36) mostra uma comparação entre as curvas CLC obtidas com a carga de prensa-chapas de 80tf, com e sem o controle de temperatura da máquina. Observa-se que na condição de temperatura estável da máquina, após 70 minutos

ligada, a CLC ficou equivalente à condição sem o controle de temperatura, ou seja, pode-se dizer o aquecimento imposto pela bomba ao óleo não está acarretando numa variação de pressão hidráulica ao sistema suficientemente grande, a ponto de afetar a determinação da conformabilidade do aço.

FIGURA 36 – COMPARAÇÃO DAS CURVAS OBTIDAS COM E SEM CONTROLE DE TEMPERATURA

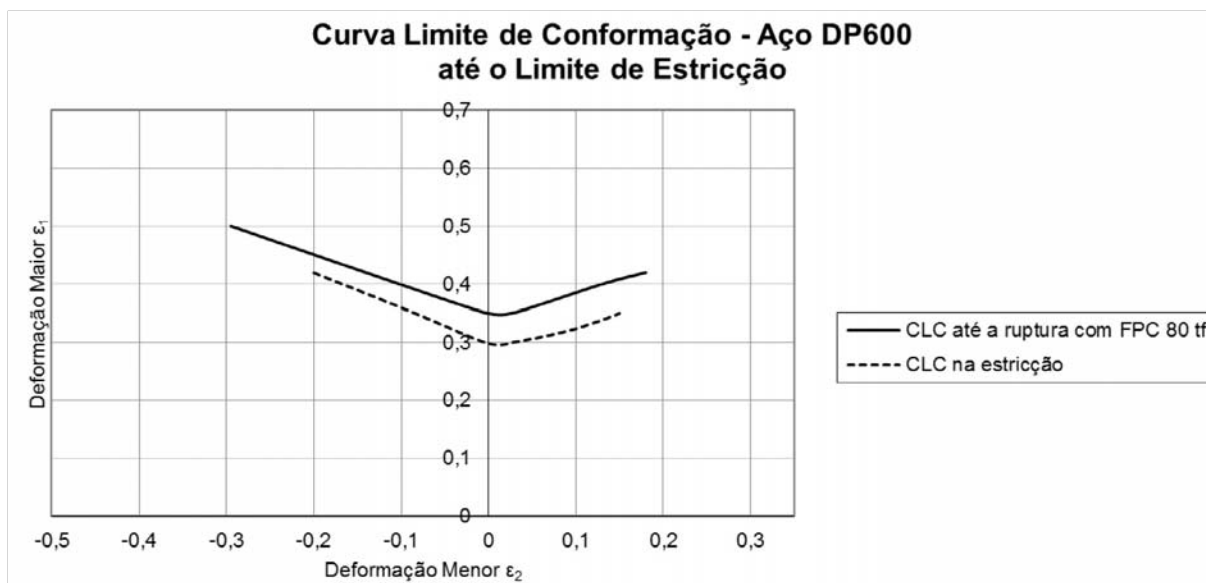


FONTE: O autor (2017)

De acordo com a condição observada na (FIGURA 35), ou seja, uma diferença inferior a 0,02 na deformação maior no estado plano de deformações entre a CLC obtida pelo método Nakazima e com carga de 80tf do prensa-chapas, e a não influência da temperatura da máquina nos ensaios de estampagem (observado na FIGURA 36), pode-se admitir a curva CLC determinada com a carga de prensa-chapas de 80 ton como base de comparação para os demais ensaios.

Desta forma, realizaram-se ensaios de estampagem com a carga de 80 toneladas no prensa-chapas, controlando o ponto de parada do punção 5% antes do limite máximo de pressão hidráulica e 2 % antes do limite máximo de deslocamento do punção, em relação aos ensaios realizados até a ruptura do material.

FIGURA 37 – COMPARAÇÃO ENTRE AS CURVAS DE RUPTURA E ATÉ O LIMITE DE ESTRICÇÃO PARA O AÇO DP600

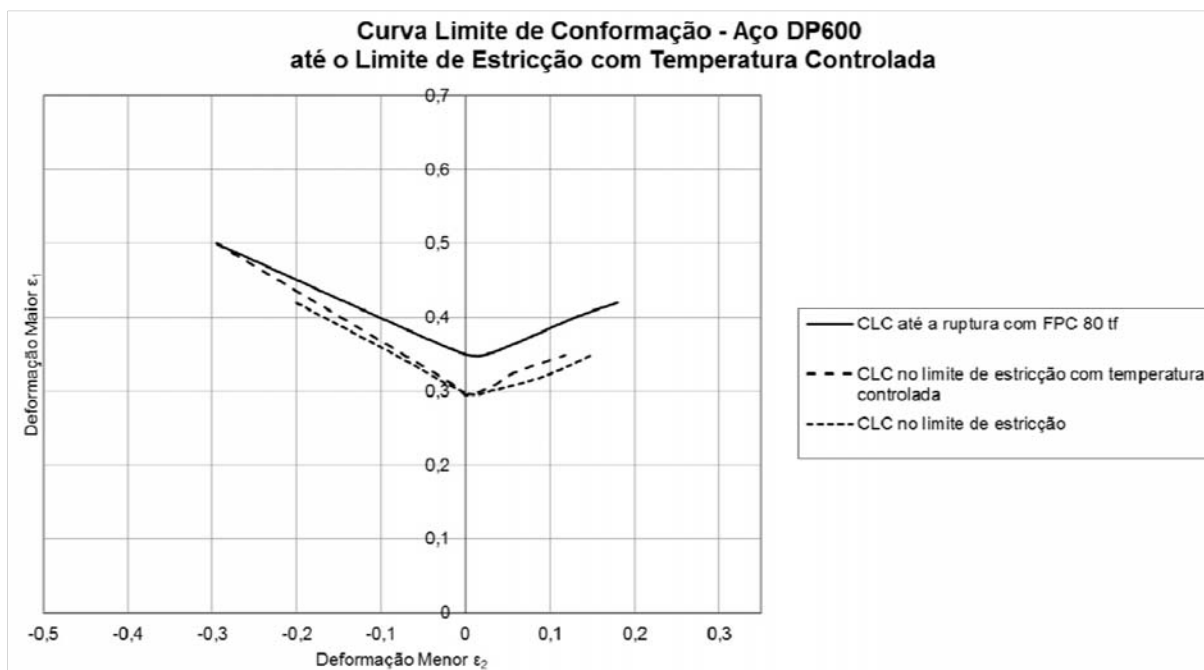


FONTE: O autor (2017)

A (FIGURA 37) mostra a redução sofrida na CLC do aço DP600, quando consideradas as deformações máximas no ponto de estricção do material, em comparação a CLC obtida na condição de ruptura do material. Essa diferença chega a 0,05 na deformação maior no estado plano de deformações, diferença esta que aumenta para o modo de deformação por estiramento e diminui no modo de deformação por embutimento profundo. Pode-se dizer assim que, na condição de estiramento há uma diferença mais acentuada entre os limites de estricção e ruptura do que no embutimento profundo, onde essa diferença tende a diminuir para deformações menores mais acentuadas.

Foram realizados ainda testes de estampagem com a mesma condição de parada no ponto de estricção do material, porém, com o controle de temperatura, como mostra a (FIGURA 38).

FIGURA 38 – COMPARAÇÃO DA CURVA OBTIDA ATÉ O LIMITE DE ESTRICÇÃO COM TEMPERATURA CONTROLADA



FONTE: O autor (2017)

Nesta condição, pode-se observar uma pequena variação entre as curvas que caracterizam o limite de estricção do material, com e sem o controle de temperatura da máquina. No estado plano de deformações praticamente inexistente diferença entre as curvas, e para o modo de embutimento profundo essa variação foi muito pequena. Para o modo de deformação por estiramento, no entanto, houve uma diferença mais acentuada, na ordem de 0,02 para a deformação maior.

Isso se justifica pelo fato de que o nível de pressão hidráulica no estiramento é maior do que no embutimento profundo, ou seja, no estiramento a ação do prensa-chapas é maior no flange da chapa, exigindo maior força para a estampagem da mesma. Dessa forma é no estiramento que a variação de viscosidade do óleo, decorrente aquecimento imposto a ele, resulta numa maior variação na CLC. Nos ensaios até a ruptura, a diferença entre a CLC com e sem o controle de temperatura inexistiu, porque nessa condição o material já havia excedido o seu limite de estricção, ou seja, já havia ocorrido o colapso metaúrgico da chapa, tornando imperceptível a influência da viscosidade do óleo da máquina sobre o limite de conformação do aço DP600.

5 CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos para os ensaios de estampagem do aço DP 600, pode-se dizer que o limite de estrição do material ficou aproximadamente 17% menor do que o seu limite de ruptura, de acordo com as CLC's levantadas nestas condições. Desta forma, tornou-se possível não apenas avaliar com exatidão a diferença entre o limite de estrição e de ruptura do material, mas definir com precisão o limite prático de conformabilidade do aço estudado, permitindo uma avaliação mais segura dos processos industriais. Tanto em projetos de matrizes como em ajustes de ferramentas, por exemplo, o sucesso da fabricação é alcançado desde que a chapa metálica se deforme em níveis seguros, abaixo do início da estrição do aço e, de acordo com essa premissa, os resultados apresentados definem claramente esse limite operacional.

Outra importante conclusão relativa ao estudo realizado, diz respeito à influência da máquina no processo de conformação da chapa metálica. Observou-se que, após o aquecimento da prensa, houve uma variação da CLC levantada no limite de estrição do aço DP600, caracterizada por um pequeno aumento no limite de conformabilidade do material. Isso deveu-se a influência do calor absorvido pelo óleo, que causou uma variação das suas propriedades e, como consequência disso, levou o material a uma maior deformação até que se atingisse o limite de pressão hidráulica, programado para a parada do ensaio no limite de estrição do aço.

Sendo assim, fica comprovado que certas variáveis, inerentes ao equipamento, influenciam diretamente o processo de conformação da chapa, o que, na prática, pode passar despercebido na indústria. Observa-se assim que o estudo da influência de fatores decorrentes da máquina no processo pode ser algo de grande relevância, não apenas para a solução de problemas na conformação mecânica, mas também para o desenvolvimento mais preciso de projetos de ferramentas. Baseado nisso, deve-se ressaltar ainda a importância de um estudo de possíveis melhorias das máquinas, visando uma melhora no processo, além de um plano de manutenção eficiente para que se mantenha o equipamento em condições adequadas de trabalho.

REFERÊNCIAS

ABDOLVAHED KAMIA, B. M. D. A. S. V. D. S. C. B. Numerical determination of the forming limit curves of anisotropic sheet metals using GTN damage model. **Journal of Materials Processing Technology**, Romania, 2014.

ARCELORMITTAL , 2015. Disponível em: <<http://brasil.arcelormittal.com/>>. Acesso em: 4 março 2015.

ASGARI, S. A.; et al. Statistical analysis of finite element modeling in sheet metal forming and springback analysis. **Journal of Materials Processing Technology**, 203., p. 129-136, 2008.

BRESCIANI FILHO, E.; et al. **Conformação Plástica dos Metais**. São Paulo: UNICAMP, 1997.

BRESCIANI FILHO, E.; et al. **Conformação Plástica dos Metais**. ed.dig. - São Paulo: EPUSP, 2011.

BOLJANOVIC, V. **Sheet metal forming processes and die design**. 1. ed. New York, New York: Industrial Press, 2004.

CHEMIN FILHO, R. A. Estudo da fratura de aços de nova geração DP600 através da variação de pressão no prensa-chapas. **Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná**, Curitiba, 2011.

CURTZE, S.; et.al. Deformation behavior of TRIP and DP steels in tension at different temperatures over a wide range of strain rates. **Materials Science and Engineering**, 2009.

DEARDO, A. J. de; et al. New method of Characterizing and quantifying complex microstructures in steels. In: **New Developments on Metallurgy and Applications of High Strength Steels, 2008**, Buenos Aires. Buenos Aires, 2008.

EN ISO 12004-2. **Metallic materials - Sheet and Strip - Determination of forming-limit curve**. [S.l.]: European Committee for standardization, 2008.

FARABI, N.; et al. Microstructure and mechanical properties of laser welded DP600 steel joints. **Materials Science and Engineering**. 2010.

HUH, H.; et. al. Dynamic tensile characteristics of TRIP-type and DP-type steel sheets for an auto-body. **International Journal of Mechanical Sciences**, 2008.

KEELER, S.; MENACHEM, K. Advanced High-Strength Steels Application Guidelines. **Worldautosteel**, 2014. Disponível em: <www.worldautosteel.org>. Acesso em: 2015.

KEELER, S.; MENACHEM, K.; MOONEY, P. Advanced High-Strength Steels Application Guidelines version 6.0. **Worldautosteel**, 2017. Disponível em: <www.worldautosteel.org>. Acesso em: 2017.

KIM, S. B.; et. al. Forming limit diagram of auto-body steel sheets high-speed sheet metal forming. **Journal of Materials Processing Technology**, 2011.

SCHAEFFLER, D. J.; VINEBERG, E. J. **Metalworking: Sheet Forming - Troubleshooting Formability Problems Using Strain Analysis**. Ohio: ASM International, v. Volume 14B, 2006.

UTHAISANGSUK, V.; PRAHL, U.; BLECK, W. Modelling of damage and failure in multiphase high strength DP and TRIP steels. **Engineering Fracture Mechanics**. 2011.

WAGONER, R. H. et al. The shear fracture of dual-phase steel. **International Journal of Plasticity**, n. 27, 2011.

WANG, W. et al. Study on stretch bendability and shear fracture of 800 MPa dual phase. **Materials and Design**, Shangha, China, 2014.

Z. MARCINIAK, J. L. D. S. J. H. **Mechanics of Sheet Metal Forming**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002.