

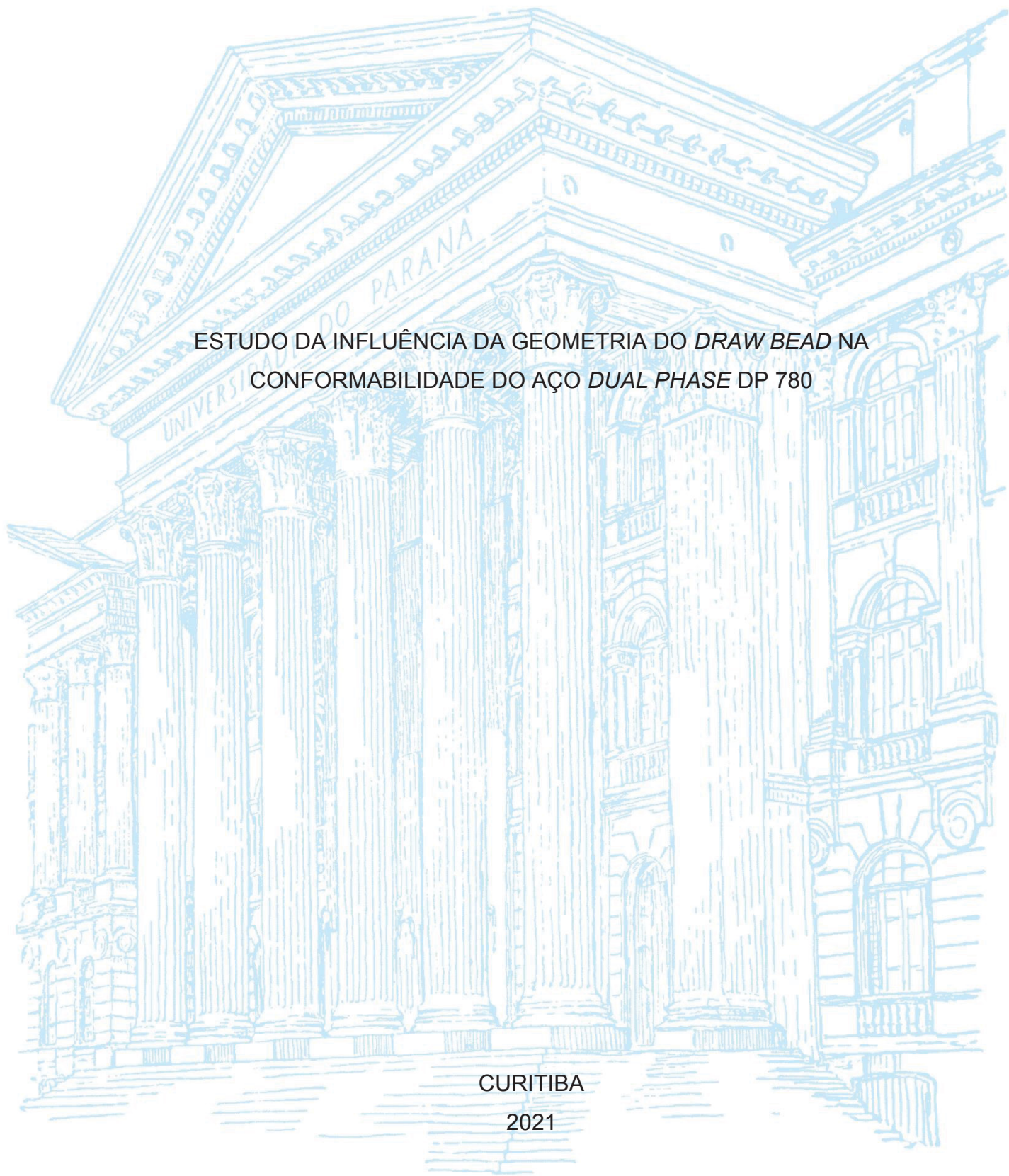
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ALEX RAIMUNDO DE OLIVEIRA

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DO *DRAW BEAD* NA  
CONFORMABILIDADE DO AÇO *DUAL PHASE DP 780*

CURITIBA

2021



ALEX RAIMUNDO DE OLIVEIRA

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DO DRAW BEAD NA  
CONFORMABILIDADE DO AÇO *DUAL PHASE* DP 780

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Victor Prestes Marcondes

Coorientador: Prof. Dr. Ravilson Antônio Chemin Filho

CURITIBA

2021

CATALOGAÇÃO NA FONTE – SIBI/UFPR

---

O48e            Oliveira, Alex Raimundo de

Estudo da influência da geometria do *draw bead* na conformabilidade do aço dual Phase DP 780 [recurso eletrônico]/ Alex Raimundo de Oliveira - Curitiba, 2021.

Dissertação apresentada no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Victor Prestes Marcondes

Coorientador: Prof. Dr. Ravilson Antônio Chemin Filho

1. Aço. 2. Estampabilidade. 3. Engenharia mecânica. I. Marcondes, Paulo Victor Prestes. II. Chemin Filho, Ravilson Antônio. III. Título. IV. Universidade Federal do Paraná.

CDD 669

---

Bibliotecária: Vilma Machado CRB9/1563

## TERMO DE APROVAÇÃO

ALEX RAIMUNDO DE OLIVEIRA

### ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DO *DRAW BEAD* NA CONFORMABILIDADE DO AÇO *DUAL PHASE DP 780*

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Setor de tecnologias, Universidade Federal do Paraná, como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

*Paulo V P Marcondes*

---

Prof. Dr. Paulo Victor Prestes Marcondes  
Departamento de Engenharia Mecânica, UFPR

*Lírio Schaeffer*

---

Prof. Dr. Lírio Schaeffer  
Laboratório de Transformação Mecânica, UFRGS

*Ramón Sigifredo Cortes Paredes*

---

Prof. Dr. Ramón Sigifredo Cortes Paredes  
Departamento de Engenharia Mecânica, UFPR

Curitiba, 17 de abril de 2021.

## **AGRADECIMENTOS**

- Primeiramente a Deus, pela oportunidade de estar realizando este trabalho;
- A minha esposa Simone e filho Muryllo pela ajuda e dedicação;
- Aos Meus pais Dorizeti e Clarice, sogros Sebastião e Ivete pelo apoio e incentivo;
- Meu irmão Odirlei e sua esposa Priscila;
- Aos Professores Paulo Victor Prestes Marcondes e Ravilson Antônio Chemin Filho pela orientação e auxílio prestados durante a realização deste trabalho;
- Ao professor Claudimir José Rebeyka pela ajuda em todas as etapas de fabricação da ferramenta de ensaio, nos ensaios realizados e outros;
- Ao professor Ramón Sigifredo Cortes Paredes por aceitar fazer parte da banca de avaliação e contribuir para enriquecimento do trabalho através do seu conhecimento;
- Ao professor Lírio Schaeffer por aceitar fazer parte da banca de avaliação e contribuir para enriquecimento do trabalho através do seu conhecimento;
- Aos alunos de iniciação científica Raul e Ronaldo de Souza Silveira Junior
- A todos os colegas da UFPR que de uma forma ou outra contribuíram para realização do trabalho.
- ArcelorMittal por fornecer o material para realização do estudo
- Ao Professor Nelson Henrique da Silva pelo incentivo;
- Ao Professor Mario Coseglio pelo incentivo.

... trabalhe, fazendo de conta que esta vida é um dia de capina com sol quente, que às vezes custa muito a passar, mas que sempre passa.

(Guimarães Rosa)

## RESUMO

As indústrias, em especial a automobilística, no que diz respeito a estamparia, acabam utilizando um único maquinário para fabricação de diversos modelos de peças. O tempo necessário para o *tryout* de ferramentas de estampagem para o início de um novo ciclo de produção é frequentemente necessário. Sendo desde a escolha de um novo material com melhor conformabilidade, ajustes no *design* de matrizes, punções e ou nos componentes que compõe o ferramental, a fim de se atingir o grau de satisfação esperado para o produto. Correções são necessárias e levam tempo e dinheiro. O que mostra a necessidade de uma melhor avaliação das chapas metálicas usadas no processo, parâmetros de produção e os componentes que compõe o ferramental de estampagem. Isto sendo uma maneira de se evitar perdas provocadas pelo conhecimento insuficiente das reais condições de deformação a que os materiais podem ser submetidos. Procura-se, desta forma desenvolver ensaios em laboratório que permitam às indústrias de estampagem conhecer melhor a estampabilidade dos materiais utilizados, e que sirvam como base de dados para o desenvolvimento de modelos computacionais cada vez mais precisos para a simulação de processos de estampagem. A utilização eficiente do material usado na fabricação de um produto estampado deve estar calcado no grau máximo de deformação que o mesmo é submetido antes da ruptura. O levantamento da curva limite de conformação (CLC) de uma liga de aço é um método bastante eficaz para esta avaliação, sendo bastante utilizado por diversos autores em trabalhos recentes e por diversas indústrias fabricantes de peças estampadas. Um elemento já estudado, mas pouco investigado é o *draw bead*, (freio ou antirrugas), utilizados em ferramentas de estampagem para diminuir o fluxo do material para o interior da matriz em pontos críticos. O projeto de pesquisa em questão tem como objetivo principal a avaliação da influência da geometria do *draw bead*, ou seja, Plano (sem geometria), Circular, Triangular e Quadrado na estampagem do aço DP780 e variando a carga do prensa-chapas em 58, 80 e 118 tf (toneladas força). Analisar a influência da geometria do *draw bead* e as cargas de restrição do prensa-chapas na estampabilidade de chapas de aços AHSS (*Advanced High Strength Steels*), em especial o *Dual Phase DP 780*. O mesmo apresenta sua microestrutura composta de "ilhas" de martensita dispersas em uma matriz ferrítica, em uma proporção aproximada de 17%. Foram obtidas as curvas limites de conformação (CLC) do aço DP780 através do ensaio de estampagem Nakajima para todas as geometrias comparadas entre si e com as diferentes cargas do prensa-chapas. Também as velocidades de escoamento do flange ( $V_2$ ) em função da força do prensa-chapas, para todas as geometrias e a taxa de afinamento dos corpos de provas por região. Espera-se obter uma melhora na conformabilidade do material, uma vez que o seu ajuste correto pode levar a um ganho considerável na conformabilidade, permitindo a produção satisfatória de peças com maior grau de complexidade.

Palavras-chave: Estampabilidade. Curva CLC. Ensaio Nakajima. *Draw Bead*.

## ABSTRACT

Industries, especially the automobile, with regard to stamping, end up using a single machine to manufacture several models of parts. The time required for the stamping tool tryout in order to start a new production cycle is often required. As example, the choice of a new material with better conformability, adjustments in the tool design and on the components that make up the tooling. The target is to achieve the level of satisfaction expected for the product. Corrections are necessary and take time and money. This fact, shows the need for a better evaluation of the metal sheets used in the process, production parameters and the components that make up the stamping tool. As a result, determining a way to avoid losses caused by insufficient knowledge of the real deformation conditions to which the materials can be worked. In this way, we seek to develop laboratory tests that allow the industries to better understand the stampability of the materials used, and that serve as a database for the development of increasingly accurate computational models for the simulation of stamping processes. The efficiency of the material used in the manufacture of a stamped product is in the maximum degree of deformation that is submitted before the rupture. The use of the forming limit curve (FLC) of a steel is a very effective method for this evaluation, being widely used by several authors in recent years and by several manufacturers of stamped parts. An element already studied, but little investigated is the draw bead, (brake or anti-wrinkle), used in stamping tools to decrease the flow of the material into the matrix at critical points. The research project in question has as main objective on the evaluation of the influence of the draw bead geometry, as Flat (without geometry), Circular, Triangular and Square in the stamping of the DP780 steel and, also, the load changes of the blankholder force of 58, 80 and 118 tf (tonnes). The objective is to analyze the influence of the geometry of the draw bead and the blankholder loads on the AHSS (Advanced High Strength Steels), especially the Dual Phase DP 780. Steel with its microstructure composed of martensite "islands" dispersed in a ferritic matrix, in an approximate proportion of 17%, which have hard phases in their microstructure. The forming limit curves (FLC) of DP780 steel were raised through the Nakajima stamping test for all geometries and compared, with each other, with the different loads of the blank holder. Also, the flow velocities of the flange ( $V_2$ ) as a function of the blankholder force for all geometries and the thinning of the specimens separated by region. It is expected to obtain an improvement in the material formability, since its correct adjustment can lead to a considerable gain in formability, allowing the satisfactory production of parts with a higher degree of complexity.

Keywords: Conformability. FLC curve. Nakajima Test. Draw Bead

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| FIGURA 1- DESENHO ESQUEMÁTICO DA CONFIGURAÇÃO DO TESTE DE NAKAZIMA.....   | 21 |
| FIGURA 2 - RELAÇÃO ENTRE DUCTILIDADE E RESISTÊNCIA DE VÁRIAS CATEGORIAS DE AÇOS AMPLAMENTE UTILIZADOS NA ESTRUTURA DOS AUTOMÓVEIS.....                          | 24 |
| FIGURA 3 - ESQUEMA DO FERRAMENTAL TESTE MARCINIAK .....   | 26 |
| FIGURA 4 - VARIAÇÃO DA TAXA DE DEFORMAÇÃO NA FLANGE EM FUNÇÃO DA FORÇA DO PRENSA.....   | 27 |
| FIGURA 5 – FALHA NA ESTAMPAGEM “RUGAS” .....  | 28 |
| FIGURA 6 – TESTE EXPERIMENTAL SIMULAÇÃO.....  | 30 |
| FIGURA 7 – FORMA DO MODELO CIRCULAR.....  | 31 |
| FIGURA 8 – TIPOS DE DRAWBEAD USADOS: (a) QUADRADO, (b) CIRCULAR E (c) COM DEGRAU .....  | 32 |
| FIGURA 9 – DEFEITOS DE ESTAMPAGEM E ENRUGAMENTO NO PROCESSO DE CONFORMAÇÃO .....  | 33 |
| FIGURA 10 – REPRESENTAÇÃO DAS FORÇAS DE RESTRIÇÃO.....  | 33 |
| FIGURA 11 – ZONA DE PRESSÃO DO DRAW BEAD.....   | 34 |
| FIGURA 12 – EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL: (A) CILINDROS HIDRÁULICOS; (B) CÉLULAS DE CARGA; (C) VÁLVULA REGULADORA DE PRESSÃO; (D) TRANSDUTOR; E) TIRA DE TESTE..... | 35 |
| FIGURA 13 – EQUIPAMENTO DE TESTE .....  | 36 |
| FIGURA 14 – FERRAMENTA DRAWBEAD CRUCIFORME .....  | 37 |
| FIGURA 15 - DESENHO DOS CORPOS DE PROVA UTILIZADOS NO ENSAIO DE ESTAMPAGEM NAKAZIMA PARA O LEVANTAMENTO DA CLC....  | 40 |
| FIGURA 16 - CORPO DE PROVA COM MALHA DE CÍRCULOS DE 5 mm DE DIÂMETRO APÓS A DEFORMAÇÃO. ....  | 41 |
| FIGURA 17 - PRENSA HIDRAULICA PARA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE ESTAMPAGEM NAKAZIMA.....   | 42 |
| FIGURA 18 - DETALHES DAS DIMENSÕES DOS <i>DRAW BEAD</i> .....   | 44 |
| FIGURA 19 - FERRAMENTA DE ENSAIO NAKAZIMA ADAPTADA PARA O PRESENTE TRABALHO .....   | 45 |

|   |    |
|---|----|
| FIGURA 20 - FERRAMENTA DE ENSAIO NAKAZIMA COM INSERTO PARA UTILIZAÇÃO DE DIFERENTES GEOMETRIAS DE <i>DRAW BEAD</i> . ...  | 45 |
| FIGURA 21 - CORPO DE PROVA SECCIONADO LONGITUDINALMENTE PARA REALIZAÇÃO DAS MEDIÇÕES DA ESPESSURA AO LONGO DA AMOSTRA. ....   | 49 |
| FIGURA 22 – CLASSIFICAÇÃO QUANTO A LOCALIZAÇÃO DA TRINCA NOS ENSAIOS DE ESTAMPAGEM NAKAZIMA, (a) TRINCA NA REGIÃO DO RAIO DO PUNÇÃO, (b) ESCORREGAMENTO PARA O INTERIOR DA MATRIZ (SEM TRINCA), (c) TRINCA NO OMBRO DA MATRIZ, (d) TRINCA NO <i>DRAW BEAD</i> E (e) TRINCA ENTRE O <i>DRAW BEAD</i> E O OMBRO DA MATRIZ ..... | 50 |
| FIGURA 23 - INFLUÊNCIA DA CARGA DO PRENSA-CHAPAS NA CONFORMABILIDADE DO AÇO DP780, PARA O <i>DRAW BEAD</i> DE GEOMETRIA PLANA (a), CIRCULAR (b), TRIANGULAR (c) E QUADRADO (d). ....  | 55 |
| FIGURA 24 – INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DO <i>DRAW BEAD</i> NA ESTAMPAGEM COM AS FORÇAS DE PRENSA-CHAPAS DE 58 tf (a), 80 tf(b) E 118 tf (c). ....  | 58 |
| FIGURA 25 - TAXA DE DEFORMAÇÃO NO FLANGE EM FUNÇÃO DA FPC, PARA OS <i>DRAW BEADS</i> PLANO (a), CIRCULAR (b), TRIANGULAR (c) E QUADRADO (d). ....   | 62 |
| Figura 26 – NOVA CONFIGURAÇÃO DA TAXA DE DEFORMAÇÃO NO FLANGE EM FUNÇÃO DA FPC, PARA OS <i>DRAW BEADS</i> PLANO (a), CIRCULAR (b), TRIANGULAR (c) E QUADRADO (d). ....  | 63 |
| FIGURA 27 – PONTOS DE MEDIÇÃO DA ESPESSURA PARA AS GEOMETRIAS DE <i>DRAW BEAD</i> PLANA (a) E GEOMETRIAS COM DENTE (b). ....  | 66 |
| FIGURA 28 – ESPESSURA DA CHAPA METÁLICA AO LONGO DO PERFIL ESTAMPADO PARA O <i>DRAW BEAD</i> PLANO (a), CIRCULAR (b), TRIANGULAR (c) E QUADRADO (d). ....   | 67 |

## LISTA DE QUADROS

|  |    |
|--|----|
| QUADRO 1 - CLASSIFICAÇÃO DAS GEOMETRIAS DOS DRAW BEADS .....                       | 43 |
| QUADRO 2 - PRESSÕES DO PRENSA CHAPAS .....   | 46 |
| QUADRO 3 - QUANTIDADE DE CONJUNTOS ESTAMPADOS PARA CADA<br>CONDIÇÃO DE TESTE. .... | 46 |
| QUADRO 4 – MAPEAMENTO DA TRINCA NOS CORPOS DE PROVA<br>ESTAMPADOS. ....            | 51 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| TABELA 1 - RESULTADOS DO DBRF COM RELAÇÃO ÀS VARIÁVEIS DE DESIGN<br>USANDO O DESIGN BOX-BEHNKEN ..... | 31 |
| TABELA 2 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS .....   | 38 |
| TABELA 3 – TAXA DE ESCOAMENTO NO FLANGE. ....   | 61 |
| TABELA 4 – FAIXA ÚTIL DE TRABALHO DO (FPC) EM FUNÇÃO DA<br>VELOCIDADE MÁXIMA (V2) .....               | 64 |

## LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
- AHSS - *Advanced High Strength Steels* (Aços avançados de alta resistência)
- ASTM - *American Society for Testing and Materials* (Sociedade Americana de Ensaios e Materiais)
- BH - *Bake Hardening* (Aços de Alta Resistência e Baixa Liga) CLC - Curva Limite de Conformação
- CLP - Controlador Lógico Programável
- CP - Corpo de prova
- DBRF – Força de restrição do *drawbead*
- DP - *Dual Phase* (Dupla fase)
- FLD - *Forming Limit Diagram* (Curva Limite de Deformação)
- FPC – Força do Prensa-Chapas
- FPC<sub>cr</sub> – Força do Prensa-Chapas Crítica
- FPC<sub>max</sub> – Força do Prensa-Chapas Máxima
- HSLA - *High Strength Low Alloy* (Alta resistência baixa liga)
- HSS - *High Speed Steel* (Aço de alta velocidade)
- ISO - Organização Internacional de Normalização
- LE - Limite de escoamento
- MEV - Microscopia eletrônica de varredura
- SQP – Programação Quadrática Sequencial
- TRIP - *Transformation Induced by Plasticity* (Transformação induzida pela plasticidade)
- UFPR - Universidade Federal do Paraná
- UHSS - *Ultra High Strength Steel* (Aço de Ultra Alta Resistência)
- ULSAB - *Ultra Light Steel Auto Body*

## LISTA DE SÍMBOLOS

$D_1$  – Maior deformação

$D_2$  – Menor deformação

$R_s$  – Raio do *drawbead*

$d_f$  - Comprimento final

$d_i$  - Comprimento inicial

$e_1$  - Maior deformação convencional

$e_2$  - Menor deformação convencional

$\varepsilon_1$ - Maior deformação verdadeira

$\varepsilon_2$ - Menor deformação verdadeira

$\Delta df$  - Variação do deslocamento do material

$\Delta r$  – Variação de anisotropia

$\mu$  - Módulo de atrito

AA - Liga de alumínio

Al - Alongamento percentual

At - Alongamento total

Au - Alongamento uniforme

C - Carbono

E – Coeficiente de deformação

h – Altura do *drawbead*

K - Constante plástica de resistência

LC - Tensão limite de conformação efetiva

LR - Limite de resistência à tração

mm/min – Milímetro por minuto

n - Coeficiente de encruamento por deformação

n médio - Coeficiente de encruamento médio

$n_{0^\circ}$  - Coeficiente de encruamento a  $0^\circ$  da direção de laminação

$n_{45^\circ}$  - Coeficiente de encruamento a  $45^\circ$  da direção de laminação

$n_{90^\circ}$  - Coeficiente de encruamento a  $90^\circ$  da direção de laminação

r - Coeficiente de anisotropia

$r_{0^\circ}$  - Coeficiente de anisotropia a  $0^\circ$  da direção de laminação

$r_{45^\circ}$  - Coeficiente de anisotropia a  $45^\circ$  da direção de laminação

$r_{90^\circ}$  - Coeficiente de anisotropia a  $90^\circ$  da direção de laminação

t - Espessura da chapa

$t_e$  - Tempo de embutimento ou estampagem

$t_f$  - Tonelada força

V1 - Velocidade embutimento ou velocidade do punção

V2 - Taxa de escoamento no flange

$\varphi$  - Estricção

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....  | <b>16</b> |
| 1.1 JUSTIFICATIVA .....  | 17        |
| 1.2 OBJETIVOS .....  | 18        |
| <b>1.2.1 Objetivo geral</b> .....  | <b>18</b> |
| <b>1.2.2 Objetivos específicos</b> .....   | <b>18</b> |
| <b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....   | <b>19</b> |
| 2.1 CURVAS LIMITE DE CONFORMAÇÃO (CLC).....  | 19        |
| 2.2 AÇOS AVANÇADOS DE ALTA RESISTÊNCIA .....   | 22        |
| 2.3 INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DA FERRAMENTA NA ESTAMPAGEM.....   | 25        |
| 2.4 INFLUÊNCIA DO DRAWBEAD NA CONFORMAÇÃO DE AÇOS DE ALTA<br>RESISTÊNCIA .....   | 29        |
| <b>3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</b> .....   | <b>38</b> |
| 3.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS E PARÂMETROS DE CONFORMABILIDADE  | 38        |
| 3.2 ENSAIO DE ESTAMPAGEM NAKAZIMA .....  | 38        |
| <b>3.2.1 Seleção do material e preparação das amostras</b> .....   | <b>38</b> |
| <b>3.2.2 Preparação da prensa hidráulica</b> .....   | <b>41</b> |
| <b>3.2.3 Ensaio de estampagem para avaliação da influência do <i>Draw Bead</i> e da<br/>carga do prensa-chapas</b> ..... | <b>43</b> |
| <b>3.2.4 Medição das deformações e determinação das curvas limite de<br/>conformação</b> .....                           | <b>47</b> |
| <b>3.2.5 Avaliação da taxa de escoamento no flange (V2)</b> .....  | <b>48</b> |
| <b>3.2.6 Avaliação da redução da espessura das amostras</b> .....  | <b>48</b> |
| <b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....   | <b>50</b> |
| 4.1 ANÁLISE DA FRATURA .....   | 50        |
| 4.2 CURVAS LIMITE DE CONFORMAÇÃO .....   | 53        |
| <b>4.2.1 – Curvas limite de conformação para as diferentes geometrias de <i>draw<br/>beads</i></b> 53                    |           |
| <b>4.2.2 Curva limite de conformação para as diferentes forças no prensa-chapas</b><br>57                                |           |
| 4.3 TAXA DE ESCOAMENTO DO FLANGE .....   | 60        |
| 4.4 ANÁLISE DA REDUÇÃO DE ESPESSURA.....   | 65        |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>5 CONCLUSÕES .....</b>                | <b>70</b> |
| <b>6 TRABALHOS FUTUROS.....</b>          | <b>72</b> |
| <b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b> | <b>73</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria automotiva em busca de maior desempenho, segurança, diminuição da emissão de gases poluentes e uma evolução na geometria dos automóveis com linhas mais curvilíneas, associados com a diminuição do consumo de combustíveis, com custo reduzido de produção e com um aumento da demanda e concorrência por modelos mais atrativos.

Para obter esses componentes que constituem o projeto da carroceria de diversas montadoras de automóveis, tem esses produzidos pelo processo de conformação mecânica em especial a estampagem. Por este motivo é de grande importância o aprofundamento constante em estudos nesta área.

Com as necessidades da indústria automobilística de produzir produtos com um custo-benefício cada vez melhor à indústria siderúrgica fornecedora de matéria prima para a produção dos componentes estampados tem a constante missão de sempre estar em busca de ligas metálicas cada vez mais eficiente.

Com o surgimento de ligas metálicas cada vez mais resistentes e com o compromisso de diminuir a massa dos veículos o avanço tecnológico para obtenção de novas ligas de aços é de grande importância neste setor. Para atender essa demanda, uma nova classe de aços, nomeados de nova família dos aços avançados de alta resistência foi desenvolvido em especial o AHSS (*Advanced High Strength Steels*).

Com o avanço na obtenção de novas ligas metálicas as suas características mecânicas sofrem algumas alterações como aumento do nível da resistência mecânica e conseqüentemente a redução de seu alongamento total, ou seja, de sua estampabilidade.

Para maximizar o processo com custo de produção aceitável, uma compreensão da conformabilidade das chapas metálicas é de extrema importância para a produção de estampados de qualidade. No projeto de ferramentas é importante determinar o nível de conformabilidade do material requerido para cada peça a ser estampada, pois materiais iguais podem melhorar ou piorar a sua conformabilidade dependendo dos parâmetros de processo usados.

A conformabilidade dos materiais é um parâmetro de produção difícil de ser mensurada, uma vez que não existe um único parâmetro que permite sua avaliação para um material específico, de forma que estas condições sejam asseguradas para

as diversas condições de produção e diferentes estampos que utilizam a mesma matéria-prima. Durante o *tryout* (testes) de ferramentas de estampagem, mudanças e ou ajustes nos componentes que compõem são frequentemente necessárias, desde ajustes no “design” (projeto) de matrizes, punções, prensa chapas, *draw bead* (antirrugas), troca de lubrificantes e até a escolha de um novo material com melhor estampabilidade, a fim de se obter o produto esperado.

Todas essas ações corretivas, elevam consideravelmente os custos de produção, o que mostra a necessidade de uma melhor avaliação das chapas metálicas e juntamente com os parâmetros de produção a serem utilizados. Todas essas têm o objetivo de diminuir os custos causados pela falta de conhecimento das condições reais de deformação dos aços usados na produção em especial da linha automotiva.

O presente trabalho tem o objetivo de estudar a influência dos componentes que constituem a ferramenta de estampagem em especial o *draw bead*, que tem a função de diminuir o fluxo do material para o interior da matriz em áreas críticas da estampagem. Permitindo as indústrias conhecer melhor os parâmetros de processo e entender a estampabilidade das chapas utilizadas que, em parte, pode garantir que as peças produzidas serão estampadas sem maiores restrições.

No final desta pesquisa espera-se chegar a resultados satisfatórios do real efeito da geometria do *draw bead* na estampabilidade dos aços avançados de alta resistência AHSS em especial o *Dual Phase DP 780*. Tendo como base resultados práticos, que mostrem de forma precisa, valores adequados para o dimensionamento e ajuste deste componente de ferramentas de estampagem. Com estes resultados será possível, ganhos significativos de tempo nas fases de projeto e testes de ferramentas, além da possibilidade de utilização do material na produção de componentes mais exigentes quanto ao grau de deformação requerido.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Com o avanço na obtenção de novas ligas de aços de alta resistência em especial o AHSS os parâmetros de produção mudam conforme a evolução desses materiais. Por esse motivo é de grande importância a realização de estudos para compreender a influência dos componentes que compõem a ferramenta de estampagem na conformabilidade dos aços avançados de alta resistência.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

O trabalho em questão tem por objetivo estudar a influência de diferentes geometrias de *draw bead* na estampabilidade de aços avançados de alta resistência, quando submetidos ao teste de estampagem Nakazima.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Desenvolver um equipamento sofisticado para a realização do ensaio de estampagem Nakazima, que permita a alteração da geometria do *drawbead*, alterando intermitentemente a regulagem da força aplicada no prensa-chapas durante a operação de estampagem das amostras;
- Verificar o efeito da geometria do *drawbead* com diferentes cargas do prensa-chapas na estampabilidade dos aços avançados de alta resistência - AHSS, através da curva limite de conformação e pela caracterização da trinca ocasionada no material;
- Organizar os resultados, demonstrando o efeito da geometria, com diferentes cargas no prensa-chapas, na estampagem dos aços avançados de alta resistência – AHSS;
- Gerar dados experimentais que possam ser utilizados no desenvolvimento e aprimoramento de modelos numéricos para simulação de operações de estampagem.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Na carroceira dos automóveis há componentes com *formatos ou geometrias* desafiadores, que exigem um projeto robusto de engenharia para a construção da ferramenta de estampagem. Este deve prever algumas variáveis de processo que pode interferir na produção do produto.

No processo de fabricação de peças estampadas no setor automobilístico e na linha branca, as ferramentas de estampagem ou matrizes são de grande importância para obtenção de peças de qualidade. O design (projeto ou desenho) da matriz e de seus componentes é objeto de estudos de diversos pesquisadores para obter componentes estampados com qualidade e diminuir o tempo de *tryout* (troca de ferramentas ou testes), na produção.

### 2.1 CURVAS LIMITE DE CONFORMAÇÃO (CLC)

A Curva Limite de Conformação (CLC) é uma importante ferramenta para mensurar a estampabilidade de chapas metálicas, ferrosas e não ferrosas, dos mais variados tipos de ligas. Keeler (1965) a partir de testes experimentais desenvolveu o conceito do Diagrama Limite de Conformação (FLD) para os valores positivos da menor deformação principal no plano da chapa. A partir deste, Goodwin (1968) e Woodthorpe et al (1969) utilizou as deformações compreendido entre os estados de tração uniaxial e estiramento biaxial. Desde a época diversas pesquisas foram realizadas para a determinação experimental e ao modelamento teórico das deformações limite em chapas.

De acordo com Moreira et al (2003) a Curva Limite de Deformação (CLD) é definida nos eixos das menores e das maiores deformações principais obtidas no plano da chapa e a quantidade de deformação plástica que a chapa metálica pode suportar antes da ocorrência da estricção localizada é assunto de grande importância na conformação de chapas. A curva é estabelecida através de trajetórias lineares de deformação e permanece constante durante o processo de deformação, sendo conhecida como curva limite de conformação.

Conforme Richter (2003) a curva limite de conformação é representada em um diagrama, o comportamento mecânico em que a chapa metálica está passando

no processo de conformação mecânica, neste diagrama é obtido às deformações verdadeira maior em função da verdadeira menor.

Keeler (1968) e Kuzman (2000) consideram que para uma chapa de metal obter sucesso no processo de conformação mecânica vai depender de alguns parâmetros de processos, como propriedades do material, condições superficiais, dimensões e geometria do blank (matéria prima), lubrificação, velocidade da prensa, pressão do prensa-chapas, design do punção e da matriz e outros.

Lange (1993) utiliza o diagrama limite de conformação para representar os processos de conformação que uma chapa de metal pode sofrer. Com o auxílio de uma malha de círculos impressa no corpo de prova é possível identificar se o material tem características para estiramento e ou embutimento profundo.

De acordo com Bae et. al. (2007) nos processos de conformação de chapa metálica, o indicador de fratura é a distribuição das principais deformações no diagrama limite de conformação. Se for possível controlar a distribuição das deformações é possível obter com segurança peças conformadas por estiramento ou embutimento sem fraturas e rugas. Para melhorar a conformabilidade na região de otimização, a distribuição presume-se que a porção das principais deformações seja uma curva linear.

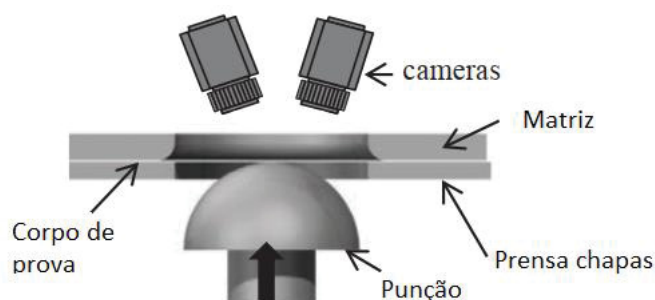
Iquilio et. al. (2019) desenvolveu um método experimental para obter a CLC de chapas metálicas usando a correlação de imagens digitais é uma técnica óptica, que permite a medição do deslocamento e deformação dos pontos em toda a superfície da amostra. Para validação do método foi comparado com o modelo Marciniak e Kucznski e os testes experimentais foram realizados de acordo com a norma ISO (Organização Internacional de Normalização) 12004-2-2008.

Min et. al. (2016) usou um método descrito por Min et al. (2016a, b), em que uma mudança na curvatura da superfície é usada para detectar um efeito geométrico associado ao aparecimento de estilhaços localizados. Além de demonstrar que os testes padrão de Marciniak e Nakazima produzem curva limite de conformação idêntica para um aço de alta resistência multifásico. Este novo procedimento compensa os efeitos combinados da curvatura e do caminho de deformação não linear que ocorrem durante esses testes, usando medições registradas por correlação de imagem digital ao longo do histórico de deformações.

Affronti e Merklein (2017) usando o ensaio Nakazima e a curva limite de conformação desenvolveu um método para a análise da superfície do aço DC 04 em

diferentes estados de tensão, para coletar informações sobre o comportamento de falhas de chapas metálicas aplicadas a componentes para estampagem profunda. Foi utilizada a medição óptica, conforme FIGURA 1, essa técnica é baseada na correlação de imagens digitais, que fornece esforços precisos na medição da distribuição local de deformação.

FIGURA 1- DESENHO ESQUEMÁTICO DA CONFIGURAÇÃO DO TESTE DE NAKAZIMA



AUTOR: Affronti e Merklein (2017)

Schmid et. al. (2019<sup>a</sup>) usou o ensaio na Nakazima para obter a curva limite de conformação em seus estudos sobre o comportamento de falhas no processo de conformação mecânica em destaque o embutimento de chapas metálicas de aço e alumínio de diferentes ligas.

Barlo et. al. (2019) utilizou a curva limite de conformação (CLC), "tradicional", utilizada por diversos pesquisadores em trabalhos envolvendo conformação de chapas metálicas e por uma porcentagem significativa da indústria automotiva e a curva limite de conformação não linear. O uso dos dois métodos foi para avaliar a previsão de falhas em chapas ferrosas e não ferrosas de ambas as ferramentas para validar o uso e a precisão da simulação por elementos finitos AutoFormplus R7.04. Este estudo foi desenvolvido na Volvo Cars Body Components, para melhorar os seus processos de estampagem e entender o comportamento dos diversos materiais utilizados na fabricação e montagem de todos os componentes da carroceria dos diversos modelos produzidos pela marca.

Já Shinmiya et. al. (2019) utilizou a curva limite de conformação para detectar possíveis falhas e ou ocorrência de trincas na flexão por estiramento em superfícies

de chapas metálicas de resistência entre 980 N/mm<sup>2</sup> e 1180 N/mm<sup>2</sup> com flexibilidade diferente.

Norz e Volk (2019) utilizou o ensaio Nakazima tradicional e um modelo desenvolvido por Jocham et al. (2017) e realizou destes comparativos com as curvas limites de conformação de ambos os testes e constatou que as duas curvas de limite de conformação mostram quase nenhuma diferença no nível de tensão. Apenas os caminhos da tensão uniaxial e biaxial diferem.

O método Nakazima para obter a curva limite de conformação de diferentes tipos de metais se mostrou eficaz o seu uso por diversos pesquisadores em trabalhos publicados e a curva limite de conformação é uma ferramenta de investigação para entender o comportamento das diversas ligas de materiais ferrosos e ou não ferrosos no processo de conformação mecânica, seja na área acadêmica ou na indústria, principalmente a automobilística.

## 2.2 AÇOS AVANÇADOS DE ALTA RESISTÊNCIA

A indústria automobilística na busca de projetos com custos cada vez mais baixos e sem diminuir a segurança dos seus produtos, vem exigindo das indústrias siderúrgicas, fornecedoras da matéria prima para a construção da carroceria automotiva, novas ligas de aço que consiga associar as exigências e o contínuo desafio do mercado de aço. Quando se combina um bom projeto de liga com um processo termomecânico adequado, é possível obter inúmeras combinações de propriedades, tais como: alta resistência associada à ductilidade, tenacidade e conformabilidade. Com a existência de diferentes características mecânicas só se torna possível em decorrência da presença de diferentes constituintes microestruturas, segundo Bhadeshia (2001), Bleck (2005) e Gorni (2008).

O desenvolvimento de novas ligas para a indústria automotiva é de grande expressão, pois diversos projetos estão em andamento, envolvendo diversos pesquisadores e grandes indústrias siderúrgicas espalhadas nos principais países que dominam essas tecnologias. O grande objetivo deste setor é obter métodos e técnicas de produção industrial com ênfase na descoberta de produtos mais seguros e com peso reduzido de acordo com Andrade et. al. (2002).

Porsche Engineering Services, Inc., Troy, Michigan, EUA lidera um grupo de diversas companhias siderúrgicas de dezoito diferentes países nomeado *Ultra Light*

*Steel Auto Body* – ULSAB. Um dos objetivos deste grupo é o desenvolvimento de ligas metálicas que proporcione veículos seguros, baixo custo de fabricação, consumo de combustível reduzido, proporcionado por uma redução na massa dos veículos e responsabilidade ambientalmente. O desenvolvimento oriundo dessa grande iniciativa foi à introdução dos aços de alta resistência – HSS (*High Strength Steel*) nas estruturas dos automóveis, destacando-se entre esses os aços *Bake-Hardening* - BH e os Aços de Alta Resistência e Baixa Liga – HSLA (*High Strength Low Alloy*) (WORLD AUTO STEEL, 2019).

De acordo com Andrade et. al. (2000) este projeto foi avaliado satisfatoriamente em relação aos objetivos almejados principalmente no que se refere à segurança e redução no consumo de combustível.

Abeyrathna et. al. (2015) afirma que os aços AHSS e os UHSS cada vez mais estão sendo usados na indústria automotiva em componentes de geometrias complexas. No processo de fabricação destes aços são formadas bobinas para um armazenamento mais eficiente e após este processo é realizado o tratamento térmico de acordo com as especificações do cliente final. Nestes processos de fabricação o material destas bobinas pode ter formações heterogêneas na sua estrutura em um mesmo rolo, esse problema de formação pode causar alterações de conformabilidade no produto. Por isso é importante que se realize estudos experimentais para entender o comportamento das diversas ligas de aços de alta resistência que existem na indústria automotiva.

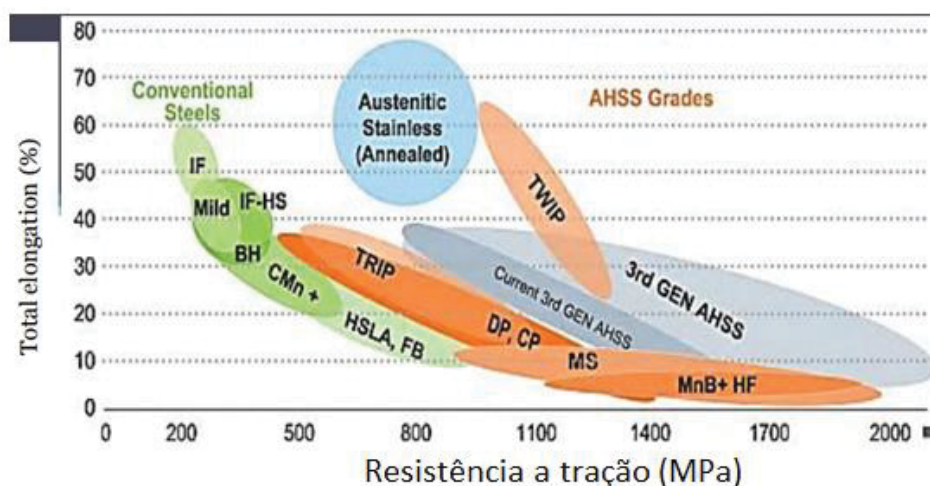
Schmid et. al. (2019<sup>a</sup>) usou as ligas de aço DC 04 e DP 800 e uma liga de alumínio AA6014, todos com espessura de um milímetro e amplamente usados na indústria automotiva em diferentes componentes. Em seus estudos sobre o comportamento de falhas que possa ocorrer em chapas metálicas de diferentes características químicas e mecânicas no processo de embutimento após e antes de passar pelos antirrugos ou *drawbead*.

Ke et. al. (2018<sup>a</sup>) utilizou as ligas de aço DC 03 e 04 e em especial WDQ com 0,6 mm de espessura e realizou testes experimentais para analisar o fenômeno que ocorre quando o material flui através das inserções dos componentes da ferramenta de estampagem. Em ensaios realizados as tensões limites dos materiais estão acima da curva limite de conformação indicando fratura em teoria, enquanto é seguro na prática, esta viola o padrão da curva de limite de conformação. Este é um fenômeno

que reafirma a importância de pesquisas para o entendimento do comportamento das várias famílias de aços de alta resistência utilizados na indústria de estampagem.

Na FIGURA 2 é uma comparação da família de aços de alta resistência aplicados na carroceria dos automóveis e permite comparar as características do limite de escoamento e ductilidade destes tipos de aços aplicados na indústria automotiva. O aumento do nível de resistência mecânica do produto leva quase inevitavelmente à redução de seu alongamento total, ou seja, de sua estampabilidade. Contudo, o uso de microestruturas adequadas permite minimizar a perda de ductilidade sob maiores níveis de resistência mecânica, (SCHRÖDER, 2004).

FIGURA 2 - RELAÇÃO ENTRE DUCTILIDADE E RESISTÊNCIA DE VÁRIAS CATEGORIAS DE AÇOS AMPLAMENTE UTILIZADOS NA ESTRUTURA DOS AUTOMÓVEIS



AUTOR: World Auto Steel (2014)

Haase et. al. (2017) desenvolveu um método de simulação usando elementos finitos e utilizou e variou variáveis de processo do aço da família dos aços avançados de alta resistência o DP 500. Este método foi desenvolvido para analisar a influência da geometria do *drawbead* na estampagem de chapas metálicas em especial o DP 500.

O uso e aplicação de diversas ligas de aços da família dos aços avançados de alta resistência é projeto de estudo de diversos pesquisadores e da indústria automotiva como um todo para entender as características mecânicas e melhorar os processos da indústria como um todo. Um exemplo da importância de entender como as novas ligas de aços de alta resistência se comportam no processo de estampagem

ou fabricação de componentes da indústria automotiva é um estudo realizado na tradicional montadora de veículos Volvo *Cars Body Components*, por Barlo et. al. (2019). Utilizou uma liga de alumínio AA6016 e uma de aço bifásica DP780 da nova família dos aços de alta resistência. O objetivo é entender as possíveis falhas que possa ocorrer quando os materiais expostos sobre tensão e flexão combinadas.

As características mecânicas das diversas ligas de aços da nova família, usadas na indústria automotiva é uma variável de processo e tem influência direta no processo de produção por conformação mecânica. Por este motivo é importante o desenvolvimento de pesquisa para entender o comportamento e o fluxo do material na estampagem de peças de toda a carroceria dos diversos modelos fabricados nas diversas indústrias automotivas espalhadas pelo mundo.

### 2.3 INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DA FERRAMENTA NA ESTAMPAGEM

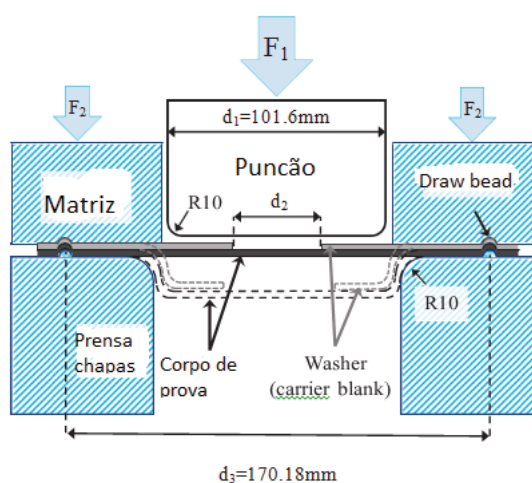
Diversos parâmetros podem influenciar na qualidade das peças produzidas pelo processo de conformação mecânica e é de conhecimento da indústria metal mecânica como um todo e principalmente da automobilística que o design da ferramenta de estampagem, conhecida como matriz tem influência diretamente no processo de fabricação.

De acordo com Chemin (2004) dentre os componentes que fazem parte da ferramenta de estampagem à matriz atua de maneira que a chapa será empurrada pelo punção para dentro da sua cavidade central, servindo como espécie de forma que delimita o diâmetro externo do corpo embutido. Para facilitar o fluxo do material, para o interior da cavidade é confeccionado na entrada desta um raio, nomeado de “raio do ombro”, este tem a função de facilitar o fluxo do material para o interior da matriz. O “raio do ombro” deve estar previsto no projeto, pois raios hiper ou hipo dimensionados podem aumentar ou diminuir respectivamente o fluxo do material, causando falhas na estampagem como trincas, enrugamento ou falta de conformação no produto.

Sarraf et. al. (2019) no desenho esquemático FIGURA 3 com algumas dimensões dos componentes que faz parte e representa o ferramental do teste de Marciniak, utilizado pelo mesmo, para obter a curva limite de conformação de chapas metálicas em especial o aço de alta resistência DP 600. Todos estes componentes do ferramental têm influência na estampabilidade da nova família dos aços de alta

resistência. O raio do ombro igual a 10 mm que tem a função de melhorar o fluxo do material para o interior da matriz é adotado por Altan et al (2007), citado por Chemin (2011) com a dimensão igual 16 mm. Esta diferença pode melhorar ou piorar o fluxo do material que está sendo estampado, por este motivo pesquisas são necessárias, pois a indústria siderúrgica fornecedora de matéria prima para as grandes montadoras automobilística e a própria estão em constante avanço tecnológico, seja em ligas de aço mais leves e resistente ou em *desing* inovadores.

FIGURA 3 - ESQUEMA DO FERRAMENTAL TESTE MARCINIAK



FONTE: Sarraf (2019)

Outro fator que tem influência no processo de conformação de peças metálicas é o punção, componente que faz parte do conjunto mecânico da ferramenta de estampagem. O punção é responsável direto pela deformação do material, ele delimita as dimensões internas da peça. O seu formato e a velocidade da estampagem são parâmetros que influenciam diretamente a qualidade do produto.

Chemin (2004) em seus estudos constatou que alterando a geometria do punção entre hemisférico e cilíndrico é possível obter o processo de conformação mecânica, estiramento e embutimento respectivamente, quando submetidos a estados de tensões uniaxial, biaxial e plano de deformação, através de ensaios de tração e estampagem.

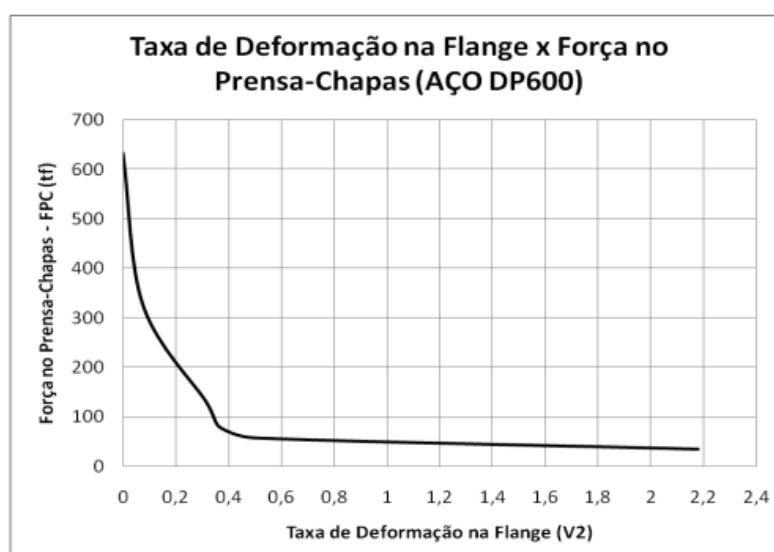
Affronti e Merklein (2017) usando o ensaio Nakazima com o punção de 100 mm de diâmetro, este utilizado para ensaios neste trabalho para análise do

comportamento do aço DC 04 no processo de embutimento. O objetivo do presente trabalho é uma análise da estrutura da superfície deste aço, utilizando o método Nakazima em diferentes estados de tensão, já mencionado anteriormente. Para a realização dos testes o primeiro é realizado até a fratura para determinar o maior deslocamento do punção e o próximo é interrompido com 0,5 mm em relação ao anterior e foram realizados oito ensaios com esta sequência. Este trabalho reforça que o punção e a sua geometria em especial tem influência no processo de conformação.

Outro fator de grande importância no processo de produção de peças estampadas é projeto de estudo de diversos pesquisadores é o prensa-chapas. Tem a função de restringir ou travar totalmente a chapa metálica no instante que o punção é acionado conduzindo o material para o interior da matriz. Este componente mecânico tem esta função de travamento ou restrição, para uma melhor conformabilidade do material.

Chemin (2011) constatou que a força do prensa-chapas tem influência na conformabilidade do aço DP 600. Ele usou três cargas distintas no prensa-chapas para restringir a movimentação do material. Observou-se conforme FIGURA 4 que de acordo com o aumento da carga em toneladas força, melhorava a conformabilidade do material.

FIGURA 4 - VARIAÇÃO DA TAXA DE DEFORMAÇÃO NA FLANGE EM FUNÇÃO DA FORÇA DO PRENSA



FONTE: Chemin (2011)

Já Bae et. al. (2007) desenvolveu um modelo de simulação numérica usando elementos finitos para definir a força de restrição do prensa-chapas definido como a soma da força de flexão e fricção, e é o principal parâmetro para controlar a conformabilidade de um produto. O *drawbead* é montado ou conectado no prensa-chapas e o valor da força do prensa-chapas depende da geometria do *drawbead*, a previsão da força de restrição do prensa chapas é considerando uma variável de processo e tem prevista no estágio inicial do projeto da ferramenta.

Shinmiya et. al. (2019) utilizou ligas de aço com resistência entre 980 N/mm<sup>2</sup> e 1180 N/mm<sup>2</sup> em seus estudos para prever possíveis falhas e ou trincas em ensaios experimentais e detectou que, com o aumento da força de restrição do prensa-chapas a tensão maior aumentou para todos os materiais utilizados nos ensaios.

O prensa-chapas pode ser projetado com ou sem *drawbead* (cordão de restrição), os dois tem o objetivo de restrição do material ou do seu fluxo para o interior da matriz. O *drawbead* é inserido no prensa-chapas quando ele não é capaz de restringir o fluxo do material em posições críticas da peça. E nestas áreas é inserido o *drawbead* para reter ainda mais o fluxo do material. Ele deve ser estar previsto no projeto em posições estratégicas da ferramenta de estampagem ou nas áreas críticas. Onde o fluxo em excesso do material pode comprometer a qualidade do produto. Causando por exemplo rugas e trincas conforme FIGURA 5.

FIGURA 5 – FALHA NA ESTAMPAGEM “RUGAS”



FONTE: Adaptado de Wang (2017)

O *drawbead* junto com os outros componentes da matriz é de grande importância para a qualidade do produto. E este elemento mecânico é projeto de

estudos de diversos pesquisadores, pois este setor da indústria de transformação está em constante avanço tecnológico em pesquisas para criação ou descoberta de ligas metálicas de alta resistência ou para o desenvolvimento de *desing* de automóveis ou produtos.

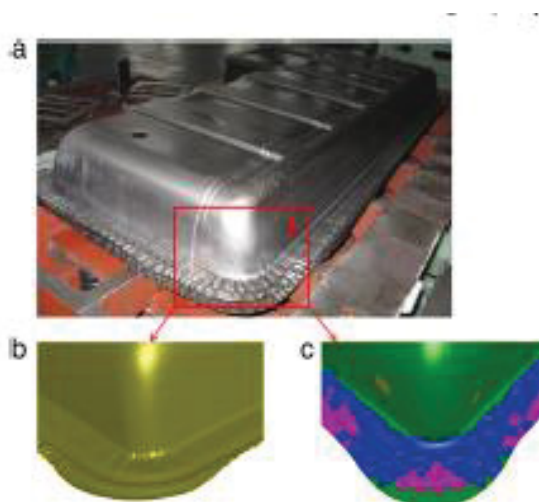
#### 2.4 INFLUÊNCIA DO DRAWBEAD NA CONFORMAÇÃO DE AÇOS DE ALTA RESISTÊNCIA

O *drawbead* tem influência na conformabilidade de chapas metálicas, alguns parâmetros, como geometria, altura, distância do centro do punção são fatores que determinaram se o processo absorvera toda a capacidade de conformabilidade do material.

Schmid et. al. (2019<sup>a</sup>) usou um pré-carregamento de 7,5 MPa no processo de conformação com os diferentes materiais, DC04, DP 800 e uma liga alumínio AA6014 e afirma que há diferenças na conformabilidade antes e depois de uma passagem pelo *drawbead*.

De acordo Wang et.al. (2017) desenvolveu um método de simulação de elementos finitos e realizou testes experimentais para validação dele. Constatou conforme FIGURA 6 que o design da ferramenta tem influência no formato final da peça. O processo de estampagem profunda ou embutimento pode ocorrer o springback (retorno elástico), enrugamento de partes crítica e até mesmo tricas no produto. Na simulação constatou, se utilizar *drawbead* a qualidade da estampagem tem uma melhora considerável.

FIGURA 6 – TESTE EXPERIMENTAL SIMULAÇÃO



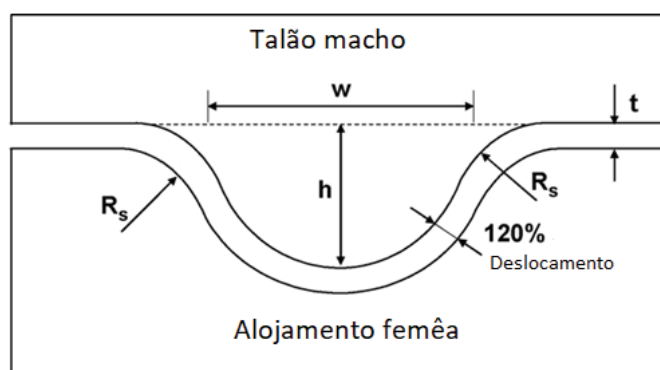
FONTE: Wang (2017)

Segundo Wang (2017) o *drawbead* é um dos parâmetros mais importantes para controlar o fluxo de material e a qualidade da peça no processo de conformação. A força de restrição dos *drawbeads* é principalmente relacionada com a sua geometria, por isso a qualidade da conformação de peças de chapa metálica pode ser melhorada mudando a geometria, o tamanho, e localização.

De acordo com Haase et. al. (2017) o *drawbead* tem influência considerável na quantidade de deformação sofrida pela peça, ele restringe o movimento da chapa, o que, somado à carga imposta pelas ferramentas de estampagem, pode causar o estiramento, levando a reduções da espessura na chapa metálica quando se compara o mesmo produto estampado sem a utilização de *drawbead*.

Hyoun et. al. (2007) desenvolveu um modelo de simulação através de elementos finitos para previsão de um modelo de *drawbead* circular conforme FIGURA 7 de acordo com design Box-Behnken, com dimensões selecionadas, como altura do cordão, raio do ombro e espessura da chapa conforme a TABELA 1.

FIGURA 7 – FORMA DO MODELO CIRCULAR



FONTE: Hyoun (2017)

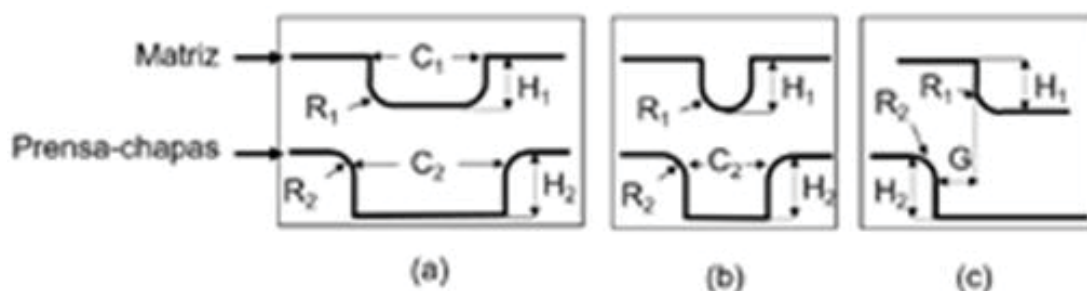
TABELA 1 - RESULTADOS DO DBRF COM RELAÇÃO ÀS VARIÁVEIS DE DESIGN USANDO O DESIGN BOX-BEHNKEN

| Design | $h$ (mm) | $R_s$ (mm) | $t$ (mm) | DBRF (N/mm) |
|--------|----------|------------|----------|-------------|
| 1      | 4.0      | 3.0        | 0.6      | 103.81      |
| 2      | 4.0      | 5.0        | 0.6      | 75.28       |
| 3      | 4.0      | 3.0        | 1.2      | 303.92      |
| 4      | 4.0      | 5.0        | 1.2      | 239.53      |
| 5      | 2.0      | 4.0        | 0.6      | 76.16       |
| 6      | 6.0      | 4.0        | 0.6      | 88.21       |
| 7      | 2.0      | 4.0        | 1.2      | 212.58      |
| 8      | 6.0      | 4.0        | 1.2      | 281.64      |
| 9      | 2.0      | 3.0        | 0.9      | 155.61      |
| 10     | 6.0      | 3.0        | 0.9      | 208.13      |
| 11     | 2.0      | 5.0        | 0.9      | 126.62      |
| 12     | 6.0      | 5.0        | 0.9      | 154.00      |
| 13     | 4.0      | 4.0        | 0.9      | 168.72      |

FONTE: Hyoun (2017)

Haase O. C et. al. (2017) usaram método de elementos finitos para desenvolver um modelo de simulação computadorizado para analisar o comportamento do material DP 500 no processo de conformação. Foram utilizadas três geometrias de *drawbead*, quadrado, circular e com degrau conforme FIGURA 8.

FIGURA 8 – TIPOS DE DRAWBEAD USADOS: (a) QUADRADO, (b) CIRCULAR E (c) COM DEGRAU



FONTE: Haase (2017)

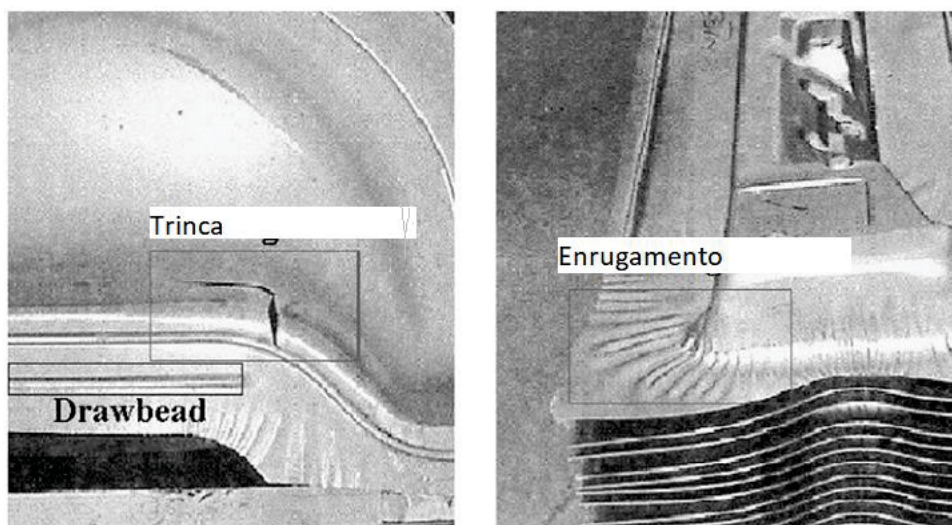
As simulações foram realizadas com e sem a utilização do *drawbead*, e com o auxílio da curva limite de conformação (CLC) foi possível obter dados importantes do comportamento do material DP 500. Após as simulações sem e com geometrias distintas e comparando com a curva CLC do material DP 500, foi possível comparar se houve melhoras na conformação do material em estudo.

Para Haase et. al. (2017), durante o processo de estampagem, em função da geometria da peça que se deseja produzir podem ocorrer redução ou aumento na espessura da chapa em diferentes regiões, resultando em enrugamento ou fraturas em casos extremos.

As forças de restrição do *drawbead* é um parâmetro que tem influência na qualidade de peças estampadas e a sua geometria pode aumentar ou diminuir o fluxo do material para o interior da matriz.

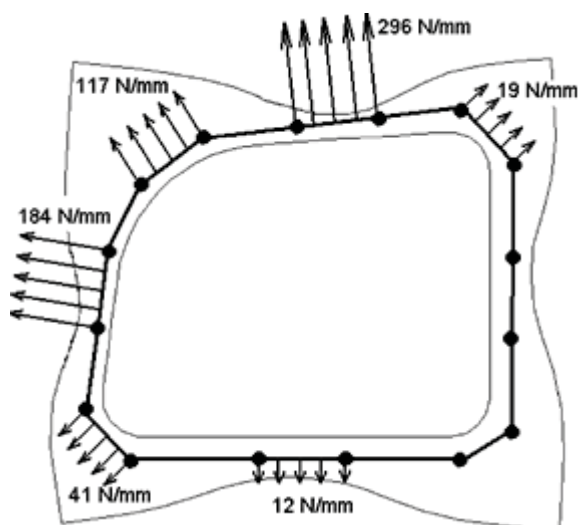
Segundo Naceur et. al. (2001) o *drawbead* é um dos parâmetros mais importantes para controlar o fluxo do material no processo de conformação, portanto forças de restrição muito fortes impedem a folha de escoar e pode causar estrias, mas forças insuficientes podem levar a rugas conforme FIGURA 9. As forças de restrição causadas pelo *drawbead* são sempre positivas, mas podem ser negativas, para estudar onde a tração deve ser evitada ou facilitada conforme FIGURA 10.

FIGURA 9 – DEFEITOS DE ESTAMPAGEM E ENRUGAMENTO NO PROCESSO DE CONFORMAÇÃO



FONTE: Naceur (2001)

FIGURA 10 – REPRESENTAÇÃO DAS FORÇAS DE RESTRIÇÃO



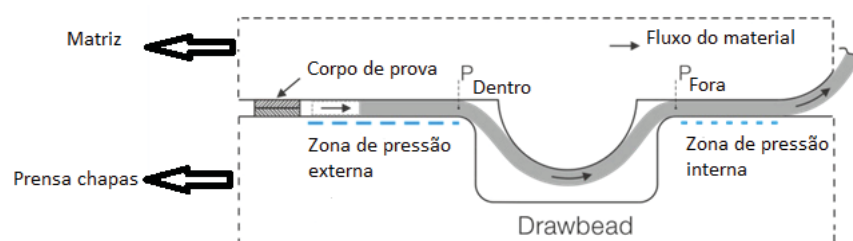
FONTE: Naceur (2001)

De acordo com Samuel (2001) quando uma alta força restrição é necessária, terá uma quantidade maior de pressão no *drawbead*, aumentando resistência ao atrito, o que pode causar excessivo desgaste no ferramental o efeito de galling na chapa metálica. Em alguns casos a força requerida do prensa-chapas pode exceder a capacidade de trabalho da prensa. Portanto, na conformação de peças não

simétricas ou peças com geometrias complexas, onde a força de restrição necessária para retardar o fluxo de metal é muito alta, o uso de *drawbead* é necessário.

Já Leocata et. al. (2019<sup>a</sup>) defende que a força de restrição varia para diferentes zonas de pressão do *drawbead*, observou-se que o fluxo através do cordão causa um desgaste superficial, o que diminui a sensibilidade do atrito às variações em relação à quantidade de lubrificante. Como resultado, a dispersão da força de restrição devido a efeitos de atrito é menor para a zona de pressão interna do que para a zona de pressão externa conforme FIGURA 11.

FIGURA 11 – ZONA DE PRESSÃO DO DRAW BEAD

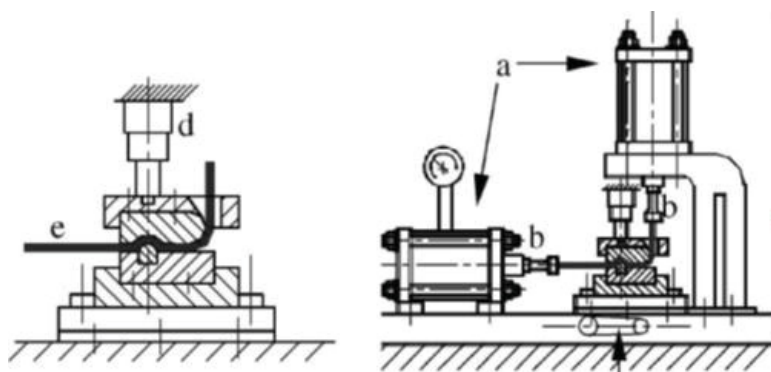


FONTE: Leocata (2019<sup>a</sup>)

Para mensurar as forças de restrições dos *drawbeads* e o coeficiente de conformabilidade dos aços de alta resistência os ensaios são de grande importância para validação dos resultados obtidos e estes devem ter uma excelente confiabilidade. Diversos pesquisadores vêm desenvolvendo ensaios e equipamentos para testes experimentais, para validação de seus trabalhos.

Samuel (2001) desenvolveu um equipamento FIGURA 12, para realização de teste experimental, este foi projetado para permitir medições independentes das forças de fixação e tração. Todos os componentes de transmissão de cargas foram projetados para fornecer rigidez máxima no travamento dos corpos de provas. O ensaio tem o objetivo de validar um modelo de simulação numérica MARC, usando dados de elementos finitos na programação. O modelo numérico foi introduzido para determinar a força de cisalhamento e o momento fletor necessário para conformar chapas de metal sujeitas à tensão do plano ao longo das suas dimensões e investigar a influência da geometria do *drawbead* neste processo.

FIGURA 12 – EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL: (A) CILINDROS HIDRÁULICOS; (B) CÉLULAS DE CARGA; (C) VÁLVULA REGULADORA DE PRESSÃO; (D) TRANSDUTOR; E) TIRA DE TESTE.

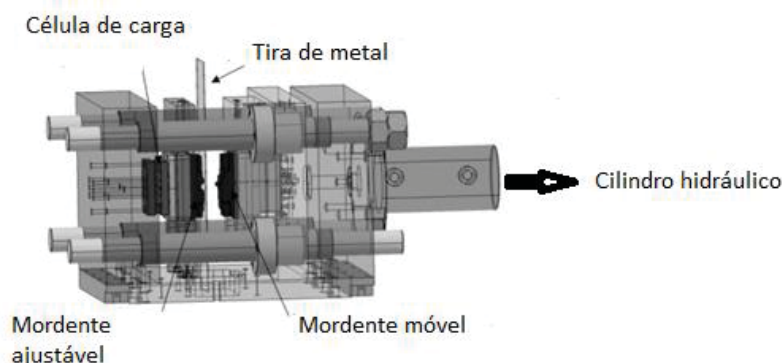


FONTE: Samuel (2001)

De acordo com Ke et. al. (2018<sup>a</sup>) a chapa de metal após fluir através dos *drawbeads* tem as suas propriedades mecânicas alteradas, dentre elas a resistência à deformação, a resistência à tração e a porcentagem de alongamento. Desenvolveu um equipamento que tem a função de dobrar e desdobrar o material e em seguida realizar testes de tração uniaxial com materiais com e sem processo de dobra e desdobra. Após esses, os dados obtidos foram analisados na curva limite de conformação e conclui que o material aço de alta resistência Wdq com 0,6 mm de espessura, melhorou suas características mecânicas, principalmente o percentual de alongamento.

Já Leocata et.al. (2019<sup>a</sup>) desenvolveu um equipamento para medir a força de restrição no *drawbead* em diferentes zonas de pressão no corpo de prova. O equipamento de teste consiste em uma placa que pode ser movida contra uma placa fixa com o auxílio de um cilindro hidráulico FIGURA 13, as garras de teste são montadas entre as duas placas. Para analisar os resultados experimentais e simulações foram realizadas com software FE LS-DYNA. O equipamento com o auxílio do software obteve êxito nos testes experimentais.

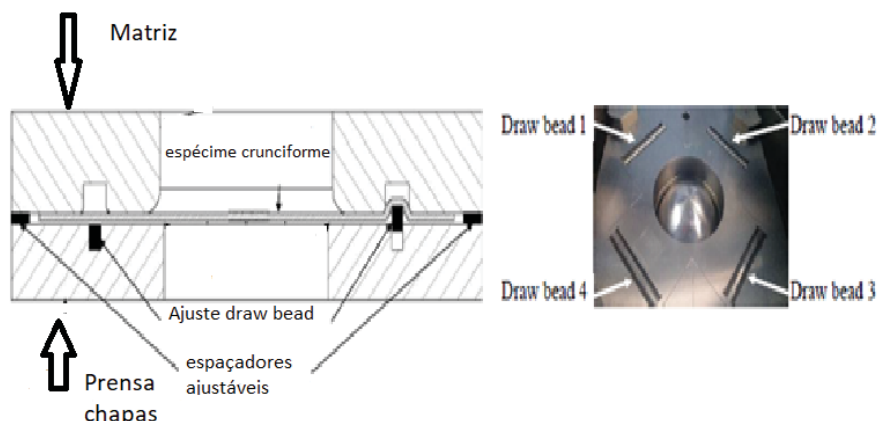
FIGURA 13 – EQUIPAMENTO DE TESTE

FONTE: Leocata (2019<sup>a</sup>)

Naceur et. al. (2001) desenvolveu um método de programação usando um procedimento de otimização simples e eficiente para projetos de cordões de tração. Usando método matemático de programação, chamado SQP (Programação Quadrática Sequencial) é possível determinar as forças de tração ideais do *drawbead*. As dimensões dos cordões de tração que fornecem essas forças podem ser estimadas usando fórmulas de cordas analíticas combinadas com um otimizador.

Norz e Volk (2019) usando a ferramenta de ensaio de conformação Nakazima, desenvolveram um modelo de *drawbead* nomeado cruciforme conforme FIGURA 14, utilizou os mesmos soldados a laser com uma altura fixa de 0,7 milímetros de altura. Foram usados quatro *drawbeads*, todos tangenciando um determinado raio concêntrico ao punção hemisférico. Este ensaio de conformação tem o objetivo de obter informações sobre o fluxo do material linear e não-linear em especial o HC340LA.

FIGURA 14 – FERRAMENTA DRAWBEAD CRUCIFORME



AUTOR: Norz e Volk (2019)

O *drawbead* é projeto de estudos de diversos pesquisadores e da indústria, em especial a automobilística. As pesquisas que envolvem este componente mecânico são os mais destinos, desde métodos numéricos usando elementos finitos para determinar o seu formato há procedimentos experimentais para colher informações e testar na pratica a sua eficiência. O fluxo do material através dos *drawbead* e a força de restrição são fatores que pode determinar uma estampagem de qualidade. A geometria do *drawbead* é um parâmetro de produção que tem influência na conformação de chapas metálicas e é projeto de estudos de diversos pesquisadores como Haase et. al. (2017), Norz e Volk (2019) e outros, já citados neste trabalho. Mas há muito a se estudar pois a família dos aços de alta resistência está em constante avanço tecnológico e os parâmetros de processo tem que se adequar a estas novas ligas metálicas para maximizar os processos de fabricação de componentes estampados.

### 3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1 PROPRIEDADES MECÂNICAS E PARÂMETROS DE CONFORMABILIDADE

Os aços *Dual Phase*, em especial o *DP 780*, é projeto de estudo de diversos pesquisadores em trabalhos de diferentes temas. LAJARIN e MARCONDES (2015), utilizaram em seu trabalho, diversos tipos de materiais, entre eles o *Dual Phase DP780*. Este material, por ser muito utilizado em diversos trabalhos do grupo de conformação da UFPR e fazer parte do mesmo lote, fornecido pela ArcelorMittal, que também disponibilizou os valores das propriedades mecânicas do material utilizado nesta pesquisa, conforme TABELA 2.

TABELA 2 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS

| <b>AÇO DUAL PHASE DP780</b> |                |           |            |            |                    |
|-----------------------------|----------------|-----------|------------|------------|--------------------|
| <b>Característica</b>       | <b>Unidade</b> | <b>0°</b> | <b>45°</b> | <b>90°</b> | <b>Valor Médio</b> |
| LE                          | MPa            | 530       | 526        | 549        | 535                |
| LR                          | MPa            | 793       | 783        | 802        | 793                |
| At                          | %              | 20,8      | 21,7       | 18,1       | 20,2               |
| Au                          | %              | 13,7      | 14,5       | 12,5       | 13,6               |
| r                           | -              | 0,68      | 1,06       | 0,95       | 0,897              |
| n                           | -              | 0,144     | 0,153      | 0,138      | 0,145              |

FONTE: ArcelorMittal (2021)

#### 3.2 ENSAIO DE ESTAMPAGEM NAKAZIMA

Para realização do ensaio de estampagem Nakazima, foi desenvolvido um procedimento de trabalho.

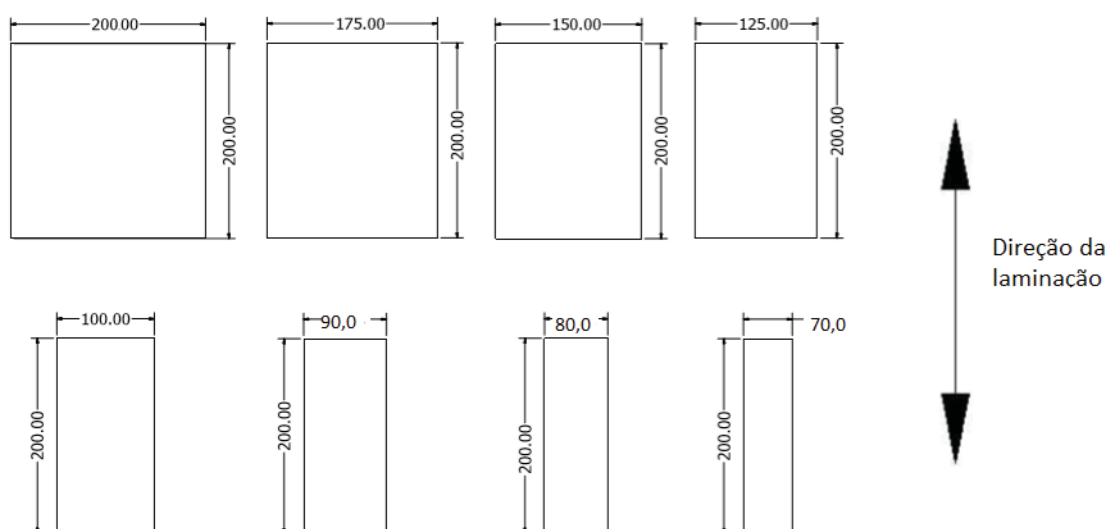
##### 3.2.1 Seleção do material e preparação das amostras

O procedimento de trabalho para os ensaios de estampagem constituiu da seleção da chapa de aço de alta resistência *Dual Phase DP 780*, com espessura de 1,5 mm, fornecido pela siderúrgica ArcelorMittal, a partir da qual foram cortados os corpos de prova na guilhotina do laboratório de conformação mecânica da UFPR.

O ensaio Nakazima prevê originalmente um total de dezoito corpos de prova, todos com 200mm de comprimento, porém, com a largura variando de 40mm e 200mm. Esta variação na largura dos corpos de prova é o fator determinante para a simulação dos modos de deformação por estiramento, quando a largura da amostra é suficiente para a plena atuação do prensa-chapa em todo o contorno do corpo estampado, passando pela deformação plana, até o embutimento, quando a chapa é mais estreita, de forma que uma porção lateral do corpo de prova não sofre a ação direta do prensa-chapas. Para o levantamento da CLC, foram utilizados conjuntos contendo oito corpos de prova, todos com 200 mm de comprimento e larguras de 70, 80, 90, 100, 125, 150, 175 e 200 mm, conforme apresentado na FIGURA 15. Esta quantidade de corpos de prova foi considerada suficiente para o propósito esperado. Observa-se ainda na FIGURA 15 o formato retangular dos corpos de prova, sem a utilização de entalhe circular nas laterais. Esse entalhe costuma ser utilizado para aços de maior resistência, especificamente nos corpos de prova mais estreitos, para se evitar a ruptura fora da região do raio do punção. Corpos de prova que sofrem rupturas na região do flange ou no ombro da matriz, não devem ser considerados válidos para a medição das deformações planas para a determinação da CLC, uma vez que não caracterizam o real limite de conformação da chapa até o instante de ruptura.

Desta forma, com esta configuração de amostras retangulares, espera-se avaliar a localização da ruptura apresentada para cada largura de corpos de prova, de acordo com as diferentes geometrias de *drawbead* e forças do prensa-chapas utilizadas nos testes.

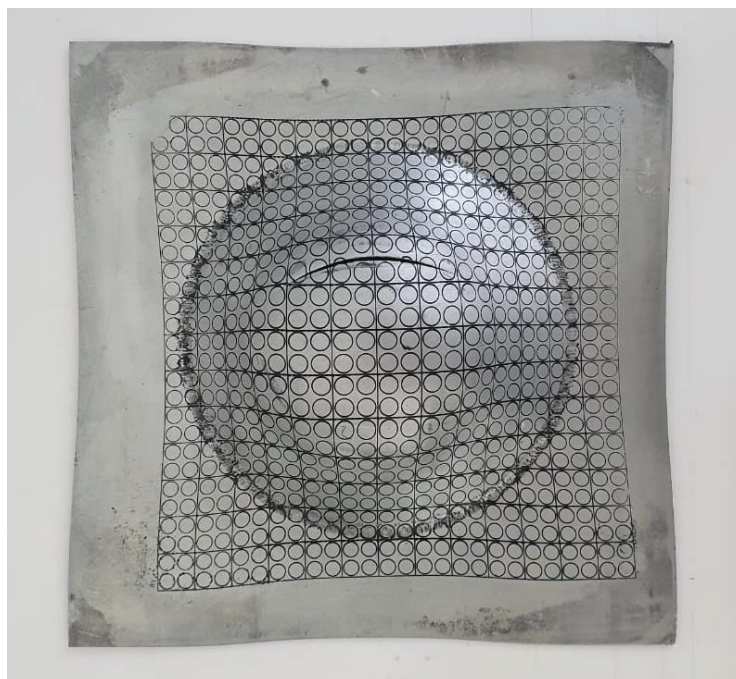
FIGURA 15 - DESENHO DOS CORPOS DE PROVA UTILIZADOS NO ENSAIO DE ESTAMPAGEM NAKAZIMA PARA O LEVANTAMENTO DA CLC



FONTE: O autor (2021)

Após o corte do material, foi realizada a limpeza dos corpos de prova para a impressão da malha de círculos com diâmetro de 5 mm (milímetros), pelo método *silk screen*. Esta etapa constitui a preparação da tinta, com uma mistura composta de 90% de tinta epóxi e 10 % de ácido nítrico. A malha impressa na superfície da chapa é necessária para a medição das deformações sofridas pelo material após a estampagem, FIGURA 16.

FIGURA 16 - CORPO DE PROVA COM MALHA DE CÍRCULOS DE 5 mm DE DIÂMETRO APÓS A DEFORMAÇÃO.



FONTE: Autor (2021)

Apesar de Keeler (1968) e Hosford et al (1993) proporem uma malha de diâmetro 1/10 de polegada (2,54mm), Marcondes (2002), Tigrinho (2011) e Chemin (2011) realizaram ensaios com a malha de 5 mm e obtiveram resultados condizentes com a CLC fornecida pelo fabricante do material. Isto demonstra que o diâmetro da malha de círculos utilizada neste trabalho permite a obtenção de resultados confiáveis para avaliação das curvas limite de conformação.

### 3.2.2 Preparação da prensa hidráulica

Com a ferramenta instalada na prensa-hidráulica, conforme FIGURA 17, realizou-se então a regulagem dos dispositivos de controle e aquisição dos resultados de ensaio, composto por duas válvulas de controle de fluxo, um sensor de deslocamento, dois manômetros e um CLP (controlador lógico programável).

FIGURA 17 - PRENSA HIDRAULICA PARA REALIZAÇÃO DOS ENSAIOS DE ESTAMPAGEM NAKAZIMA



FONTE: Autor (2021)

As duas válvulas reguladoras de fluxo dos cilindros hidráulicos permitem o controle da velocidade de acionamento da matriz, que vai de encontro ao prensa-chapas, e da velocidade de avanço do punção, regulada em 90mm/min, conforme norma ISO 12004-1:2008. Com esta velocidade de deslocamento do punção, os corpos de prova não se rompem por completo, apresentando uma leve trinca que determina o final do ensaio.

Os dois manômetros por sua vez fornecem os valores de pressão do prensa-chapas e de atuação do punção sobre o material durante a deformação plástica, que está associada a resistência mecânica à conformação da chapa metálica. O manômetro instalado na linha hidráulica do punção é interligado ao CLP da máquina.

O sensor de deslocamento acoplado em uma haste na parte de baixo do cilindro inferior, também interligado ao CLP, faz a leitura do deslocamento do punção no decorrer do ensaio, desde o instante que o punção tangencia a chapa metálica até o momento de máxima deformação do material, onde ocorre a fratura do mesmo.

O CLP permite a aquisição de um gráfico que mostra em tempo real a variação da força de deformação do material em função do deslocamento do punção. Com este gráfico é possível a percepção precisa do instante de ruptura da chapa para a finalização do teste.

### 3.2.3 Ensaio de estampagem para avaliação da influência do *DrawBead* e da carga do prensa-chapas

Nesse estudo foram definidas quatro geometrias de *drawbead*, denominadas conforme o QUADRO 1, com o objetivo de avaliar a influência dos mesmos na estampabilidade do aço *Dual Phase DP 780*.

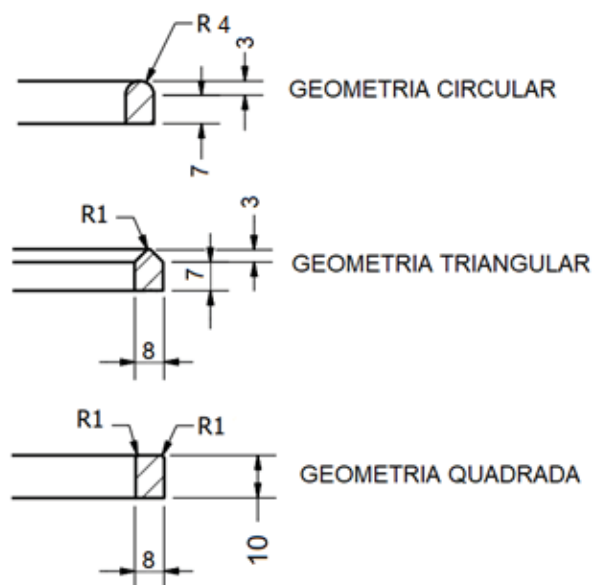
QUADRO 1 - CLASSIFICAÇÃO DAS GEOMETRIAS DOS DRAW BEADS

| Geometria              | Classificação |
|------------------------|---------------|
| Sem draw bead ou plano | P             |
| Circular               | C             |
| Triangular             | T             |
| Quadrado               | Q             |

FONTE: Autor (2021)

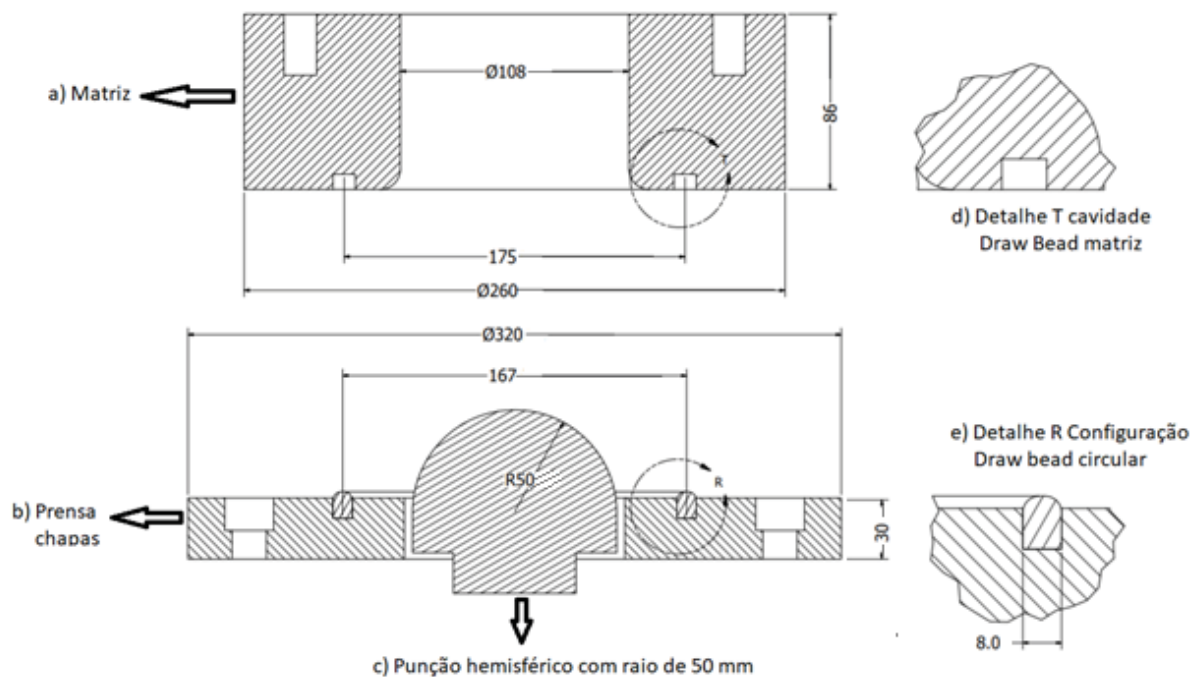
A FIGURA 18 mostra as geometrias e as dimensões dos *drawbeads* utilizados nos testes, e a FIGURA 19 mostra o desenho de conjunto da ferramenta de ensaio Nakazima, adaptada para utilização dos diferentes modelos de *drawbead* propostos. Essa ferramenta se encontra no laboratório de conformação mecânica da UFPR. A FIGURA 20 traz a imagem da ferramenta desenvolvida para o trabalho.

FIGURA 18 - DETALHES DAS DIMENSÕES DOS *DRAW BEAD*

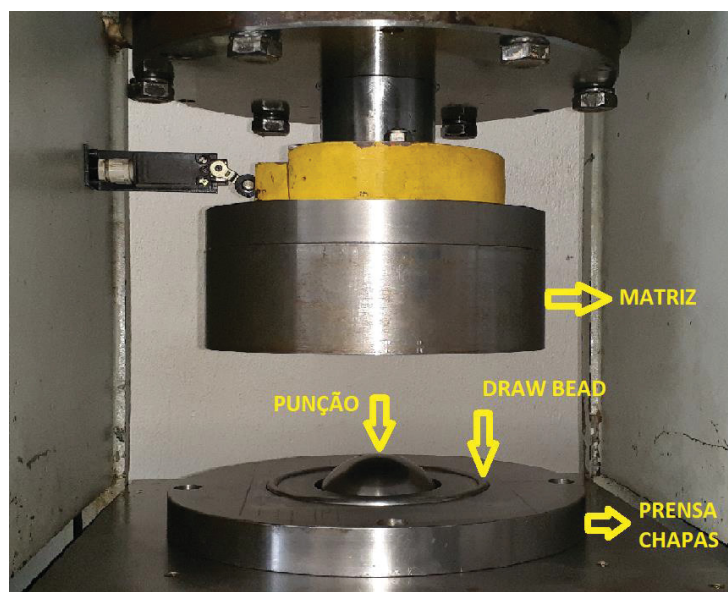


FONTE: Autor (2021)

FIGURA 19 - FERRAMENTA DE ENSAIO NAKAZIMA ADAPTADA PARA O PRESENTE TRABALHO



FONTE: AUTOR (2021)

FIGURA 20 - FERRAMENTA DE ENSAIO NAKAZIMA COM INSERTO PARA UTILIZAÇÃO DE DIFERENTES GEOMETRIAS DE *DRAW BEAD*.

FONTE: AUTOR (2021)

Outra variável dos ensaios foi a força do prensa-chapas (FPC), que influencia diretamente a conformabilidade da chapa metálica durante a estampagem. Foram utilizadas nos ensaios as forças de 58, 80 e 118 tf, conforme mostra o QUADRO 2.

QUADRO 2 - PRESSÕES DO PRENSA CHAPAS

|    | <b>PRESSÃO DO PRENSA CHAPAS</b> |
|----|---------------------------------|
| 1ª | 58 tf                           |
| 2ª | 80 tf                           |
| 3ª | 118 tf                          |

FONTE: Autor (2021)

Definidas as geometrias de *drawbead* e forças de prensa-chapas, definiu-se a quantidade de corpos de provas para realização dos ensaios Nakazima, de acordo com a norma ISO 12004-1:2008. O QUADRO 3 mostra a quantidade de conjuntos testados em cada condição de ensaio. Vale lembrar que cada conjunto corresponde aos oito corpos de prova apresentados na FIGURA 15. Desta forma, foram testados três conjuntos em cada condição de ensaio, totalizando 36 conjuntos.

QUADRO 3 - QUANTIDADE DE CONJUNTOS ESTAMPADOS PARA CADA CONDIÇÃO DE TESTE.

| FATORES                               | 58 tf | 80 tf | 118 tf |
|---------------------------------------|-------|-------|--------|
| GEOMETRIA PLANA<br>(superfície plana) | 3     | 3     | 3      |
| GEOMETRIA CIRCULAR                    | 3     | 3     | 3      |
| GEOMETRIA TRIANGULAR                  | 3     | 3     | 3      |
| GEOMETRIA QUADRADA                    | 3     | 3     | 3      |

FONTE: Autor (2021)

### 3.2.4 Medição das deformações e determinação das curvas limite de conformação

Após a estampagem, a malha de círculos, inicialmente com 5mm de diâmetro, deformou-se em consonância com o material, assumindo um formato elíptico. Desta forma, seguindo o mesmo procedimento adotado por Tigrinho (2011) e Chemin (2011), foram medidas as maiores elipses formadas na região de deformação do material, elipses essas, que correspondem às maiores deformações atingidas pelo material até a sua ruptura. Como as elipses de maior deformação tendem a ocorrer na altura da trinca do material, as medições são realizadas nessa mesma altura, porém, no lado oposto à fratura. Para isso utilizou-se um paquímetro analógico de precisão de 0,02mm.

Foram medidos os eixos de maior e menor deformações,  $D1$  e  $D2$  respectivamente, de cada elipse, e calculas as deformações convencionais  $e1$  e  $e2$  através das equações 1 e 2:

$$e1 = (D1 - D0)/D0 \quad (1)$$

$$e2 = (D2 - D0)/D0 \quad (2)$$

Onde  $D0$  corresponde ao diâmetro inicial do círculo.

A partir das deformações convencionais, foram calculadas as deformações verdadeiras maior  $\epsilon1$  e menor  $\epsilon2$  no plano da chapa, através das equações 3 e 4:

$$\epsilon1 = \ln(e1 + 1) \quad (3)$$

$$\epsilon2 = \ln(e2 + 1) \quad (4)$$

As deformações verdadeiras medidas foram então inseridas num gráfico  $\epsilon2$  x  $\epsilon1$  para determinação das curvas limite de conformação. Foram obtidas um total de 12 CLC's, uma para cada condição de ensaio, ou seja, para cada geometria de *drawbead* foram plotadas três curvas, para as três forças de prensa-chapas utilizadas.

### 3.2.5 Avaliação da taxa de escoamento no flange (V2)

A taxa de escoamento no flange (V2) foi determinada pela equação 5:

$$V2 = \Delta df / te \quad (5)$$

Onde  $\Delta df$  corresponde a variação do comprimento da amostra após a estampagem, calculado pela equação 6:

$$\Delta df = di - df \quad (6)$$

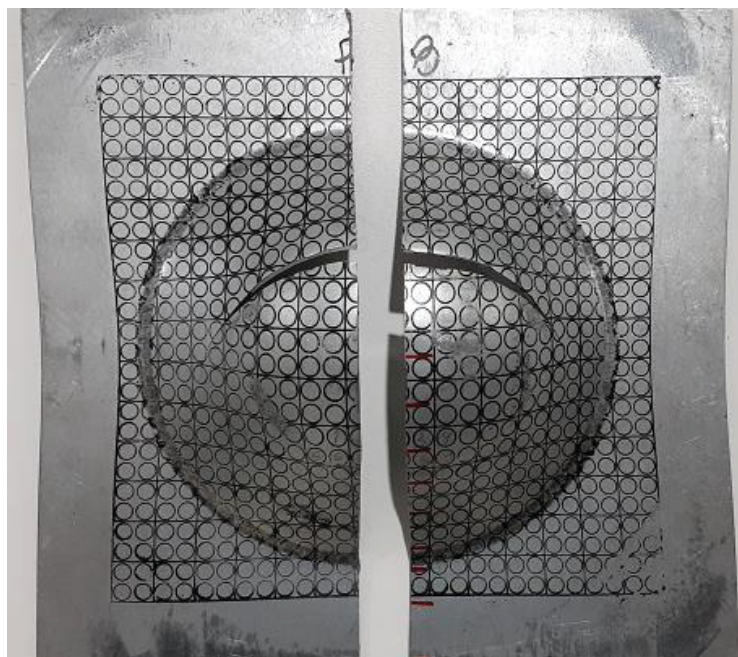
Onde  $di$  corresponde ao comprimento inicial do corpo de prova, de 200 mm, e  $df$  ao comprimento final do corpo de prova, medido após a estampagem.

O tempo total de embutimento das amostras ( $te$ ), foi obtido através do software do computador conectado ao CLP da máquina.

### 3.2.6 Avaliação da redução da espessura das amostras

A avaliação da redução de espessura do material após a estampagem foi realizada através da medição direta da espessura da chapa ao longo de um corte longitudinal nos corpos de prova, como mostra a FIGURA 21.

FIGURA 21 - CORPO DE PROVA SECCIONADO LONGITUDINALMENTE PARA REALIZAÇÃO DAS MEDIÇÕES DA ESPESSURA AO LONGO DA AMOSTRA.



FONTE: AUTOR (2021)

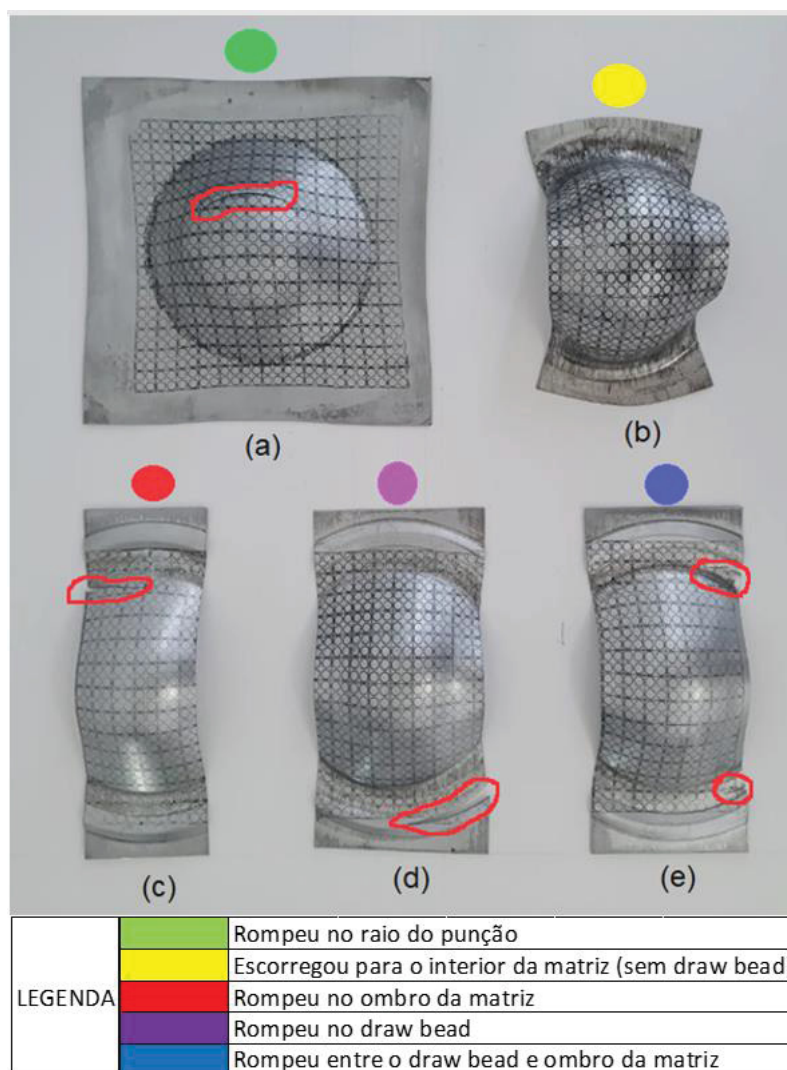
Foram realizadas medições nas regiões do flange, na região do *drawbead*, no ombro da matriz e ao longo da região de deformação da chapa, desde a saída do ombro da matriz, passando pela região da fratura, até o polo do punção. O objetivo dessa medição de espessura foi avaliar o afinamento causado nas regiões mencionadas, em especial no *drawbead* e no ombro da matriz, cujo encruamento causado influencia diretamente o limite de conformabilidade do material.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 ANÁLISE DA FRATURA

Após a realização dos ensaios de estampagem, variando a geometria do *drawbead* e também a carga do prensa-chapas, foram observadas cinco situações distintas quando a localização da trinca nos copos de prova, como mostra a FIGURA 22.

FIGURA 22 – CLASSIFICAÇÃO QUANTO A LOCALIZAÇÃO DA TRINCA NOS ENSAIOS DE ESTAMPAGEM NAKAZIMA, (a) TRINCA NA REGIÃO DO RAIÃO DO PUNÇÃO, (b) ESCORREGAMENTO PARA O INTERIOR DA MATRIZ (SEM TRINCA), (c) TRINCA NO OMBRO DA MATRIZ, (d) TRINCA NO *DRAW BEAD* E (e) TRINCA ENTRE O *DRAW BEAD* E O OMBRO DA MATRIZ



A legenda da FIGURA 22, classifica por cores cada uma das localizações de trinca que ocorreram nos ensaios. Deve-se observar que, a única condição que permite a medição das deformações maiores e menores, para a determinação da CLC, é a da trinca localizada na região do raio do punção, definida pela cor verde. Todas as outras condições, de escorregamento total sem trinca (amarelo), trinca no ombro da matriz (vermelho), trinca no *drawbead* (roxo) e trinca entre o *drawbead* e o ombro da matriz (azul), implicam no descarte do corpo de prova.

Desta forma foi montado o QUADRO 4, que mostra a sequência dos oito corpos de prova estampados, para cada geometria de *drawbead*, em cada condição de força no prensa-chapas. Através deste mapeamento pode-se observar em cada condição de ensaio, qual a localização da trinca gerada em cada dimensão de corpo de prova testado.

QUADRO 4 – MAPEAMENTO DA TRINCA NOS CORPOS DE PROVA ESTAMPADOS.

|                                  |                            | REGIÃO IDEAL |     |     |            |     |     |            |     |     | REGIÃO DE TRANSIÇÃO |     |     |            |     |     | REGIÃO CRÍTICA |     |     |           |     |     |           |     |     |
|----------------------------------|----------------------------|--------------|-----|-----|------------|-----|-----|------------|-----|-----|---------------------|-----|-----|------------|-----|-----|----------------|-----|-----|-----------|-----|-----|-----------|-----|-----|
| DRAW BEAD PLANO (SEM SUPERFÍCIE) | Dimensões corpos de provas | 200X200 mm   |     |     | 200x175 mm |     |     | 200x150 mm |     |     | 200x125 mm          |     |     | 200x100 mm |     |     | 200x90 mm      |     |     | 200x80 mm |     |     | 200x70 mm |     |     |
|                                  | Pressão/Amostras           | 1            | 2   | 3   | 1          | 2   | 3   | 1          | 2   | 3   | 1                   | 2   | 3   | 1          | 2   | 3   | 1              | 2   | 3   | 1         | 2   | 3   | 1         | 2   | 3   |
|                                  | 58 tf                      | P1           | P2  | P3  | P4         | P5  | P6  | P7         | P8  | P9  | P10                 | P11 | P12 | P13        | P14 | P15 | P16            | P17 | P18 | P19       | P20 | P21 | P22       | P23 | P24 |
|                                  | 80 tf                      | P25          | P26 | P27 | P28        | P29 | P30 | P31        | P32 | P33 | P34                 | P35 | P36 | P37        | P38 | P39 | P40            | P41 | P42 | P43       | P44 | P45 | P46       | P47 | P48 |
|                                  | 118 tf                     | P49          | P50 | P51 | P52        | P53 | P54 | P55        | P56 | P57 | P58                 | P59 | P60 | P61        | P62 | P63 | P64            | P65 | P66 | P67       | P68 | P69 | P70       | P71 | P72 |
| DRAW BEAD CIRCULAR               | Dimensões corpos de provas | 200X200 mm   |     |     | 200x175 mm |     |     | 200x150 mm |     |     | 200x125 mm          |     |     | 200x100 mm |     |     | 200x90 mm      |     |     | 200x80 mm |     |     | 200x70 mm |     |     |
|                                  | Pressão/Amostras           | 1            | 2   | 3   | 1          | 2   | 3   | 1          | 2   | 3   | 1                   | 2   | 3   | 1          | 2   | 3   | 1              | 2   | 3   | 1         | 2   | 3   | 1         | 2   | 3   |
|                                  | 58 tf                      | C1           | C2  | C3  | C4         | C5  | C6  | C7         | C8  | C9  | C10                 | C11 | C12 | C13        | C14 | C15 | C16            | C17 | C18 | C19       | C20 | C21 | C22       | C23 | C24 |
|                                  | 80 tf                      | C25          | C26 | C27 | C28        | C29 | C30 | C31        | C32 | C33 | C34                 | C35 | C36 | C37        | C38 | C39 | C40            | C41 | C42 | C43       | C44 | C45 | C46       | C47 | C48 |
|                                  | 118 tf                     | C49          | C50 | C51 | C52        | C53 | C54 | C55        | C56 | C57 | C58                 | C59 | C60 | C61        | C62 | C63 | C64            | C65 | C66 | C67       | C68 | C69 | C70       | C71 | C72 |
| DRAW BEAD TRIANGULAR             | Dimensões corpos de provas | 200X200 mm   |     |     | 200x175 mm |     |     | 200x150 mm |     |     | 200x125 mm          |     |     | 200x100 mm |     |     | 200x90 mm      |     |     | 200x80 mm |     |     | 200x70 mm |     |     |
|                                  | Pressão/Amostras           | 1            | 2   | 3   | 1          | 2   | 3   | 1          | 2   | 3   | 1                   | 2   | 3   | 1          | 2   | 3   | 1              | 2   | 3   | 1         | 2   | 3   | 1         | 2   | 3   |
|                                  | 58 tf                      | T1           | T2  | T3  | T4         | T5  | T6  | T7         | T8  | T9  | T10                 | T11 | T12 | T13        | T14 | T15 | T16            | T17 | T18 | T19       | T20 | T21 | T22       | T23 | T24 |
|                                  | 80 tf                      | T25          | T26 | T27 | T28        | T29 | T30 | T31        | T32 | T33 | T34                 | T35 | T36 | T37        | T38 | T39 | T40            | T41 | T42 | T43       | T44 | T45 | T46       | T47 | T48 |
|                                  | 118 tf                     | T49          | T50 | T51 | T52        | T53 | T54 | T55        | T56 | T57 | T58                 | T59 | T60 | T61        | T62 | T63 | T64            | T65 | T66 | T67       | T68 | T69 | T70       | T71 | T72 |
| DRAW BEAD QUADRADO               | Dimensões corpos de provas | 200X200 mm   |     |     | 200x175 mm |     |     | 200x150 mm |     |     | 200x125 mm          |     |     | 200x100 mm |     |     | 200x90 mm      |     |     | 200x80 mm |     |     | 200x70 mm |     |     |
|                                  | Pressão/Amostras           | 1            | 2   | 3   | 1          | 2   | 3   | 1          | 2   | 3   | 1                   | 2   | 3   | 1          | 2   | 3   | 1              | 2   | 3   | 1         | 2   | 3   | 1         | 2   | 3   |
|                                  | 58 tf                      | Q1           | Q2  | Q3  | Q4         | Q5  | Q6  | Q7         | Q8  | Q9  | Q10                 | Q11 | Q12 | Q13        | Q14 | Q15 | Q16            | Q17 | Q18 | Q19       | Q20 | Q21 | Q22       | Q23 | Q24 |
|                                  | 80 tf                      | Q25          | Q26 | Q27 | Q28        | Q29 | Q30 | Q31        | Q32 | Q33 | Q34                 | Q35 | Q36 | Q37        | Q38 | Q39 | Q40            | Q41 | Q42 | Q43       | Q44 | Q45 | Q46       | Q47 | Q48 |
|                                  | 118 tf                     | Q49          | Q50 | Q51 | Q52        | Q53 | Q54 | Q55        | Q56 | Q57 | Q58                 | Q59 | Q60 | Q61        | Q62 | Q63 | Q64            | Q65 | Q66 | Q67       | Q68 | Q69 | Q70       | Q71 | Q72 |

|         |   |  |  |   |  |
|---------|---|--|--|---|--|
| LEGENDA | <span style="color: green;">■</span> Rompeu no raio do punção | <span style="color: yellow;">■</span> Escorregou para o interior da matriz (sem draw bead) | <span style="color: red;">■</span> Rompeu no ombro da matriz | <span style="color: purple;">■</span> Rompeu no draw bead | <span style="color: blue;">■</span> Rompeu entre o draw bead e ombro da matriz |
|---------|---|--|--|---|--|

FONTE: Autor (2021)

De acordo com o QUADRO 4, nota-se que os corpos de prova com largura de 200, 175 e 150 mm, tiveram a trinca localizada na região do raio do punção (cor verde) para todas as geometrias de *drawbead* e para todas as cargas de prensa-chapas

utilizadas. Com isso, observa-se que os corpos de prova onde se predomina o modo de deformação por estiramento, ou seja, onde há maior restrição imposta pelo prensa-chapas, a trinca localiza-se na região chamada “ideal”, uma vez que o trincamento localizado na região do raio do punção leva a um melhor desempenho do material quanto a sua estampabilidade. Em outras palavras, é nessa condição que a chapa atinge os maiores níveis de deformação até a ocorrência da trinca, por isso mais satisfatória para operações de estampagem.

Para os corpos de prova com largura de 125 e 100 mm, cujas deformações medidas ficam próximas ao estado plano de deformações, houve uma situação transitória, uma vez que nem todas as amostras concentraram a trinca na região do raio do punção (cor verde). Para o *drawbead* plano, com carga de prensa-chapas de 58 tf, houve o escorregamento total do material. O *drawbead* triangular promoveu o trincamento no ombro da matriz em 58 tf, para o corpo de prova de 100 mm de largura, e na região do *drawbead* para as cargas de 80 e 118 tf, para a mesma largura de corpo de prova.

No caso do *drawbead* plano, onde não há a restrição do dente, a carga de 58 tf mostrou-se insuficiente para restringir o escoamento da chapa, a ponto de levá-la a ruptura. Isso caracteriza um mal aproveitamento do limite de estampabilidade do material, além de que o completo avanço do material para dentro da matriz pode implicar num amassamento da chapa durante o processo e o refugo na operação. Assim, pode-se prever um limite mínimo de carga de prensa chapas para esse *drawbead*, acima de 58 tf de força.

Para o *drawbead* triangular, fica evidente que, a partir da largura de 100 mm dos corpos de prova, cuja tendência ao modo de deformação por embutimento se aproxima, há um efeito danoso desta geometria para a estampabilidade da chapa. Neste caso, o *drawbead* promove um encruamento e uma concentração de tensões mais acentuadas sobre o material, de maneira que, para 58 tf de carga o material escoou a ponto do trincamento evoluir sobre o ombro da matriz. Para as cargas de 80 e 118 tf, a trinca já ocorre de forma catastrófica no próprio *drawbead*, sem uma maior evolução da estampagem da chapa.

Para as larguras de amostras inferiores a 100 mm, ou seja, para 90, 80 e 70 mm de largura, onde o modo de deformação preponderante é por embutimento, a grande maioria dos corpos de prova não evoluíram para uma ruptura no raio do punção. Nesta condição, praticamente em todas as geometrias e cargas de prensa-

chapas utilizadas houve reprovação das amostras para a construção da CLC, por isso denominada “região crítica” no QUADRO 4.

Com o *drawbead* plano, condição está em que o material tem maior liberdade de escoamento pela não existência do dente no prensa-chapas, todos os corpos de prova reprovados apresentaram a trinca sobre o ombro da matriz. Para o *draw bead* circular, os corpos de prova reprovados apresentaram uma alternância na posição da trinca, variando entre o ombro da matriz, a região entre o ombro da matriz e o *drawbead* e no próprio *drawbead*. Os corpos de prova rejeitados testados com o *drawbead* triangular, apresentaram a trinca sobre o ombro da matriz para carga de 58 tf, e preponderantemente, no *drawbead* para as cargas de 80 e 118 tf. Utilizando-se o *drawbead* quadrado, os corpos de prova rejeitados apresentaram a trinca preferencialmente na região entre o *drawbead* e o ombro da matriz, com exceção para os corpos de prova com largura de 70 mm, cuja trinca localizou-se no ombro da matriz para as cargas de 58 e 80 tf.

Pelo mapeamento realizado, fica evidente o efeito das linhas de fluxo de escoamento da chapa na localização da trinca. Nos corpos de prova de menor largura, que simulam o modo de deformação por embutimento, as linhas de fluxo são menos uniformes que os corpos de prova de maior largura, cuja atuação do prensa-chapas ocorre em todo o perímetro em torno da região estampada. Quanto menos uniformes forem as linhas de fluxo, pontos de concentração de tensões são gerados nas regiões de descontinuidade do fluxo, levando ao trincamento fora da região de deformação do copo estampado. Esse efeito, somado a variação na restrição imposta a chapa pelas diferentes geometrias de *drawbead* e diferentes forças de prensa-chapas, levaram a variação da posição da trinca apresentada no mapeamento do QUADRO 4.

## 4.2 CURVAS LIMITE DE CONFORMAÇÃO

### 4.2.1 – Curvas limite de conformação para as diferentes geometrias de *drawbeads*

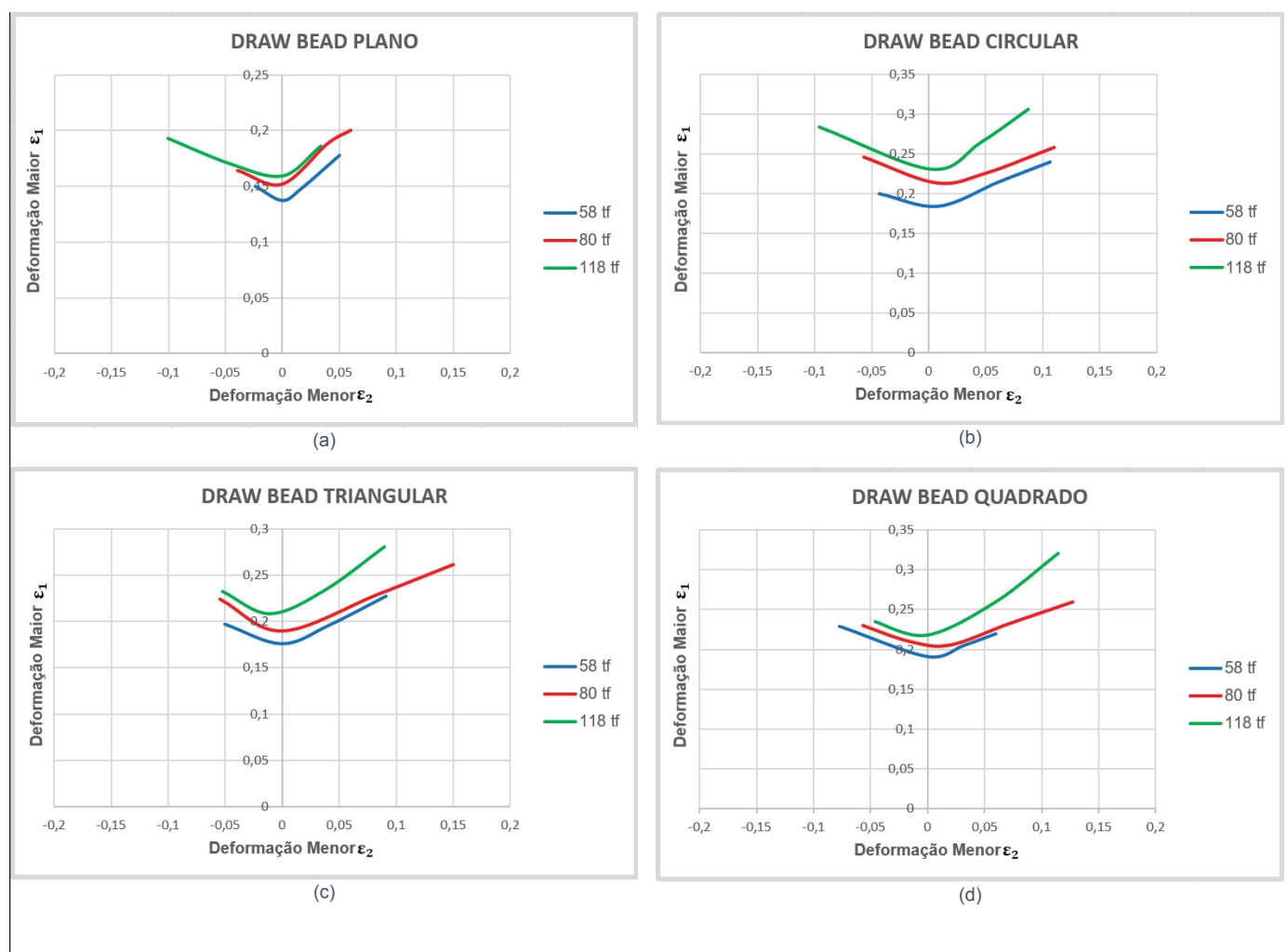
A partir da medição das deformações dos corpos de prova cuja deformação se concentrou na região do raio do punção, indicadas pela cor verde no QUADRO 4, foram obtidas as curvas limite de conformação para cada geometria de *drawbead*, para as três forças de prensa-chapas pré-definidas, totalizando 12 curvas CLC's.

Dessa forma realizou-se um primeiro agrupamento das curvas, para análise comparativa dos resultados de estampabilidade. Nessa primeira análise, foi gerado um gráfico para cada geometria de *drawbead*, onde foram alocadas as curvas para as cargas de prensa-chapas de 58, 80 e 118 tf geradas para as respectivas geometrias, como mostra a FIGURA 23.

Seguindo essa organização, a FIGURA 23 (a) mostra as CLC's para o *drawbead* plano, com as cargas de 58, 80 e 118 tf. A FIGURA 23 (b) mostras as CLC's para o *drawbead* circular, para as mesmas cargas de prensa-chapas, enquanto as FIGURAS 23 (c) e (d) apresentam as CLC's para as geometrias de *drawbead* triangular e quadrado respectivamente, também para as cargas de prensa-chapas de 58, 80 e 118 tf.

Desta forma é possível analisar a influência que a força do prensa-chapas exerce na conformabilidade do aço DP780, para cada geometria de *drawbead* utilizada nos testes de estampagem.

FIGURA 23 - INFLUÊNCIA DA CARGA DO PRENSA-CHAPAS NA CONFORMABILIDADE DO AÇO DP780, PARA O DRAWBEAD DE GEOMETRIA PLANA (a), CIRCULAR (b), TRIANGULAR (c) E QUADRADO (d).



FONTE: AUTOR (2021)

De acordo com a FIGURA 23, nota-se que todas as geometrias apresentaram menor conformabilidade para a carga de prensa-chapas de 58 tf e maior conformabilidade quando utilizada a carga de 118 tf, seguindo os mesmos resultados obtidos por CHEMIN (2011), para o aço DP600, estampado sem *drawbead*.

Esses resultados atestam o que CHEMIN (2011) observou em seu trabalho onde, para cargas de prensa-chapas muito baixas, inferiores a um certo valor crítico, o escoamento da chapa metálica se torna muito acentuado, de maneira que a porção da amostra encruada na região do flange e do ombro da matriz avança demasiadamente para dentro da região de estampagem da chapa, comprometendo o limite de conformabilidade do aço. A consequência disso se retrata numa curva CLC

mais baixa, como ocorreu para a carga de 58 tf, independentemente da geometria de *drawbead* utilizado no teste.

As curvas CLC's representadas na FIGURA 23(a), mostram que a FPC tem influência na estampabilidade do aço DP780. Os ensaios comprovam que, quanto menor a FPC utilizada, há uma tendência de o material escorregar para o interior da matriz, diminuindo o seu limite de estampabilidade. Por este motivo, um aumento da FPC, de 58 tf para 80 tf e posteriormente para 118 tf, resultou numa melhora considerável da estampabilidade do material, elevando a deformação maior no estado plano de deformações de 0,14, para FPC de 58 tf, para 0,17 com a FPC de 118 tf.

A FIGURA 23(b), apresenta os resultados dos ensaios realizados com o *drawbead* circular, repetindo as FPC's de 58, 80 e 118 tf. Nesta condição, repetiram-se os resultados, ou seja, quanto maior a FPC, maior o limite de estampabilidade do material. Neste caso, porém, em comparação aos resultados dos testes com o *drawbead* plano, foi possível verificar um maior limite de estampabilidade em todas as FPC's, cujos valores no estado plano de deformações ficaram entre 0,18 e 0,23, para as cargas de 58 e 118 tf respectivamente. Com base nesses resultados, pode-se dizer que a interferência do *drawbead* circular no fluxo do material durante a estampagem, foi benéfica para o aço DP780, elevando seu limite de estampabilidade máxima em mais de 40%.

A FIGURA 23(c), apresenta as CLC's obtidas com o *drawbead* triangular. Para esta geometria, o limite de estampabilidade do material foi superior ao limite de estampabilidade atingido com o *drawbead* plano. Os valores da deformação maior no estado plano de deformações ficaram entre 0,18 a 0,21, para as cargas de 58 e 118 tf respectivamente, ligeiramente inferiores aos valores obtidos com o *drawbead* circular em aproximadamente 8%.

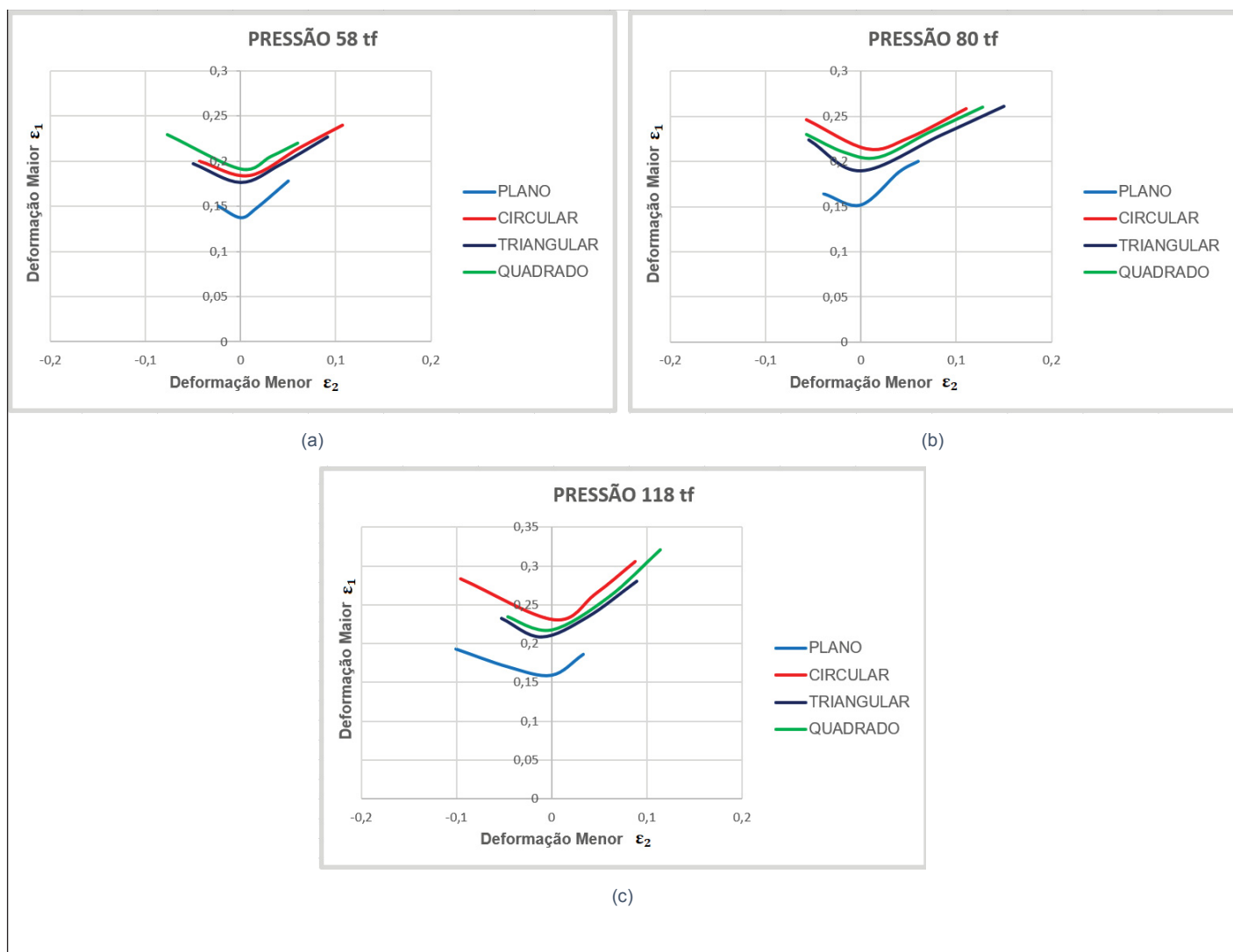
As CLC's obtidas com o *drawbead* quadrado, FIGURA 23(d), segue a mesma tendência, ou seja, quanto maior a FPC, maior o limite de estampabilidade do material. Na região de deformação plana, a CLC apresentou valores os seguintes valores para a deformação maior: 0,19; 0,2 e 0,22, para as cargas de prensa-chapas de 58 tf, 80 tf e 118 tf, respectivamente. Nessa condição, o limite máximo de estampabilidade com *drawbead* quadrado foi aproximadamente 4% inferior ao limite atingido com o *drawbead* circular e aproximadamente 4% superior ao limite de estampabilidade com o *drawbead* triangular.

Desta forma, conclui-se esta primeira análise, que aponta o melhor desempenho em conformabilidade do aço DP780, quando estampado com o *drawbead* de geometria circular e força de prensa-chapas de 118 tf. Cabe, porém, salientar que todas as geometrias de *drawbead* (circular, triangular e quadrada), elevaram o limite de estampabilidade do aço DP 780, demonstrando o real benefício do uso deste componente para a conformabilidade de chapas metálicas.

#### **4.2.2 Curva limite de conformação para as diferentes forças no prensa-chapas**

Outro método de análise dos resultados das curvas limite de conformação, deu-se pela comparação das curvas geradas para cada carga de prensa-chapas individualmente. Neste caso, foram agrupadas num mesmo gráfico as curvas de cada geometria de *drawbead* utilizado, para uma mesma força de prensa-chapas, como mostra a FIGURA 24.

FIGURA 24 – INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DO *DRAWBEAD* NA ESTAMPAGEM COM AS FORÇAS DE PRENSA-CHAPAS DE 58 tf (a), 80 tf(b) E 118 tf (c).



FONTE: AUTOR (2021)

Numa análise geral dos gráficos da FIGURA 24, observa-se que o *drawbead* plano apresentou o pior limite de conformabilidade para as três cargas de prensa-chapas, 58, 80 e 118 tf, com a CLC bastante abaixo das curvas obtidas para as demais geometrias de *drawbead*. Observa-se também que o *drawbead* triangular apresentou limite de conformabilidade sempre inferior às geometrias circular e quadrada, porém, não muito distante das mesmas.

Nota-se ainda que o *drawbead* circular apresentou maior limite de conformabilidade para as cargas de 80 e 118 tf, ao passo que, para a carga de prensa-chapas de 58 tf, o maior limite de conformabilidade foi atingido pelo *drawbead* quadrado.

Diante desses resultados, fica novamente evidente o efeito prejudicial da baixa restrição ao escoamento do material na região do flange, para a sua conformabilidade, uma vez que a geometria plana, que menos restringe o fluxo da chapa durante a estampagem, produziu curvas CLC mais baixas. Desta forma, a função restritiva ao escoamento da chapa, decorrente do uso do *drawbead*, melhora substancialmente o limite de conformabilidade do aço em aproximadamente 26, 31 e 30 %, para as cargas de prensa-chapas de 58, 80 e 118 tf, respectivamente.

Na FIGURA 24(a), para a força de prensa-chapas de 58 tf, a geometria de *drawbead* com a melhor estampabilidade foi a quadrada, seguida da circular e triangular, com valores muito próximos para a deformação maior: 0,19; 0,18 e 0,17 respectivamente, na deformação plana. A geometria plana, com deformação maior de aproximadamente 0,14 no estado plano de deformações, ficou bem abaixo das demais, em função escoamento excessivo da chapa metálica para o interior da matriz que, segundo CHEMIN (2011), implica no avanço de porções encruadas do material no ombro da matriz, para a região de maior deformação da amostra, comprometendo o seu limite de estampabilidade.

Ainda na FIGURA 24(a), para 58 tf de força do prensa-chapas, chama atenção o fato do *drawbead* quadrado ter apresentado maior conformabilidade que o *drawbead* circular. Este resultado ocorreu, porque a baixa restrição ao fluxo da chapa pela força do prensa-chapas, foi compensada pela maior restrição ao escoamento do material imposta pelo *drawbead* quadrado, quando comparado ao circular. Em outras palavras, houve uma compensação da perda de conformabilidade decorrente da baixa FPC, por uma geometria de *drawbead* mais restritiva ao escoamento no processo de estampagem.

Para os ensaios com a FPC de 80 tf, FIGURA 24(b), a geometria circular se destaca com a maior limite estampabilidade, atingindo uma deformação maior de 0,22 no estado plano de deformações. Nesta mesma região, os ensaios de estampagem apontaram uma deformação maior de 0,20; 0,19 e 0,15 para os *drawbeads* com geometria quadrada, triangular e plana, respectivamente.

Se compararmos a deformação maior máxima atingida no estado plano de deformações, para as forças de prensa-chapas de 58 e 80tf, houve um aumento do limite de conformabilidade em 13,6% com a FPC de 80 tf.

Pelas CLC's da FIGURA 24(c), observa-se novamente que o *drawbead* circular obteve a maior estampabilidade, atingindo uma deformação maior de 0,23 no estado plano de deformações. Esse resultado caracteriza um aumento de 4,35% do limite de conformabilidade com a elevação da força do prensa-chapas de 80 para 118tf.

Pela análise e discussão dos resultados desse capítulo, observou-se que se chega ao melhor desempenho do material, em termos do seu limite de estampabilidade, através do equilíbrio entre FPC e geometria de *drawbead*. Ambas as variáveis implicam numa restrição ao escoamento da chapa na estampagem e, a interpolação entre elas é o que determina a performance do aço na operação. Desta forma, busca-se o fluxo ideal da matéria-prima no processo para se chegar à melhor conformabilidade do material.

#### 4.3 TAXA DE ESCOAMENTO DO FLANGE

Tendo como base a discussão anterior, onde se verificou considerável aumento do limite de conformabilidade do aço DP780 com o aumento da restrição imposta ao escoamento da chapa na região do flange, tornou-se necessário um levantamento da faixa de trabalho ideal para a carga do prensa-chapas, em função da geometria de *drawbead* a ser utilizada. Desta forma, buscou-se determinar um valor mínimo para a força do prensa-chapas, abaixo da qual a taxa de escoamento do material tornar-se-ia demasiadamente alta, levando o limite de conformabilidade do material a uma condição crítica. O força máxima no prensa-chapas se limita ao valor em que o escoamento da chapa cessa por completo.

Desta forma montou-se a TABELA 3, contendo os valores do tempo total de estampagem das amostras ( $t_e$ ) e do deslocamento do material ( $\Delta df$ ), a partir dos quais foi calculada a taxa de escoamento no flange ( $V_2$ ) para as diferentes geometrias de *drawbeads* e forças do prensa-chapas estudadas. Cabe destacar que, assim como no levantamento das CLC's, foram considerados apenas os corpos de prova que sofreram fratura na região do raio do punção.

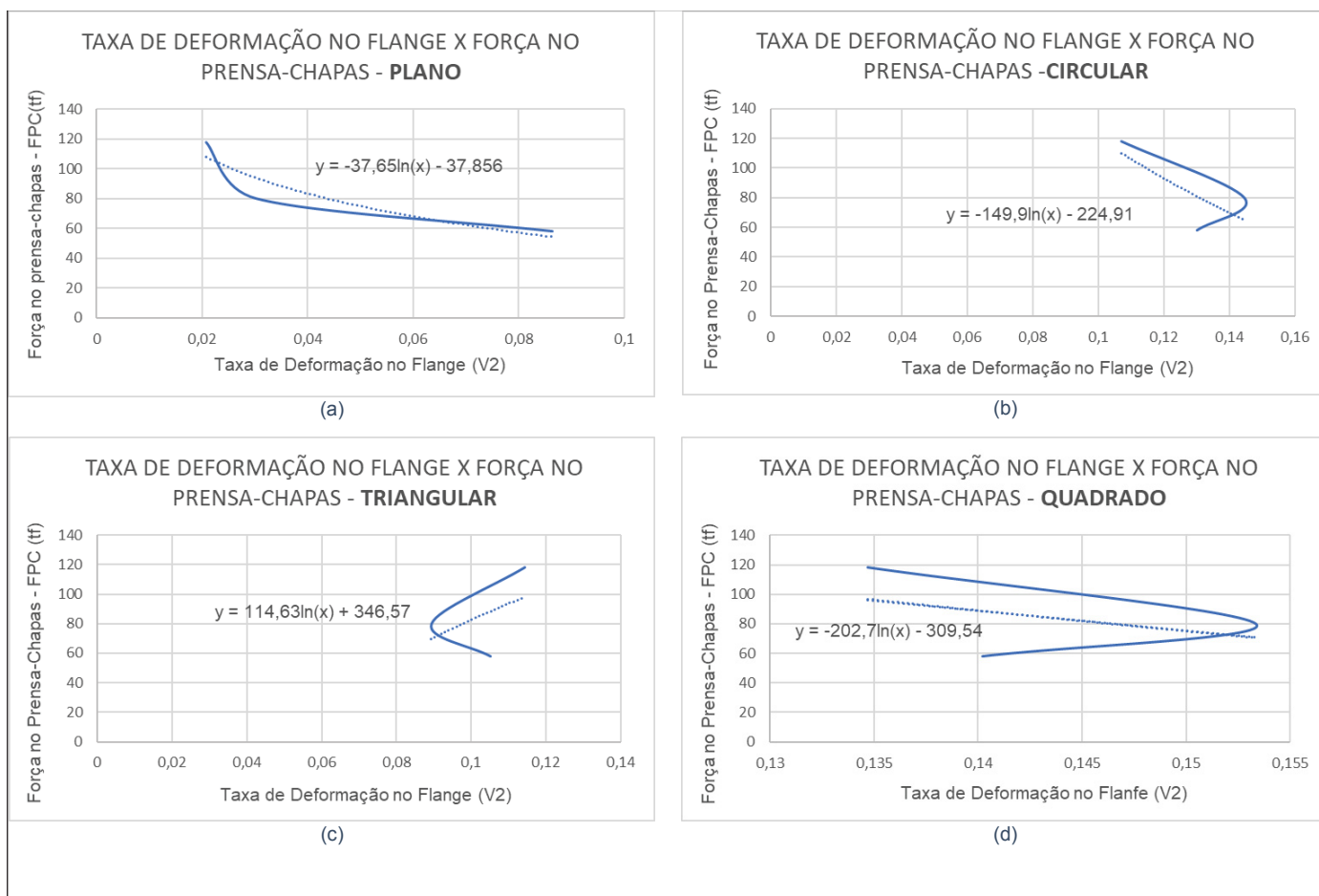
TABELA 3 – TAXA DE ESCOAMENTO NA FLANGE.

| <b>DRAW BEAD PLANO</b>      |        |                  |           |
|-----------------------------|--------|------------------|-----------|
| FPC (tf)                    | te (s) | $\Delta df$ (mm) | V2 (mm/s) |
| 58                          | 24,22  | 2,1              | 0,09      |
| 80                          | 27,11  | 0,83             | 0,03      |
| 118                         | 26,22  | 0,52             | 0,02      |
| <b>DRAW BEAD CIRCULAR</b>   |        |                  |           |
| FPC (tf)                    | te (s) | $\Delta df$ (mm) | V2 (mm/s) |
| 58                          | 23,91  | 3,12             | 0,13      |
| 80                          | 19,64  | 2,83             | 0,14      |
| 118                         | 21,51  | 2,27             | 0,11      |
| <b>DRAW BEAD TRIANGULAR</b> |        |                  |           |
| FPC (tf)                    | te (s) | $\Delta df$ (mm) | V2 (mm/s) |
| 58                          | 23,2   | 2,55             | 0,11      |
| 80                          | 25,33  | 2,4              | 0,09      |
| 118                         | 22,48  | 2,37             | 0,1       |
| <b>DRAW BEAD QUADRADO</b>   |        |                  |           |
| FPC (tf)                    | te (s) | $\Delta df$ (mm) | V2 (mm/s) |
| 58                          | 23,2   | 3,24             | 0,14      |
| 80                          | 22,84  | 3,5              | 0,15      |
| 118                         | 22,22  | 2,91             | 0,13      |

FONTE: AUTOR (2021)

Com estes dados, foram determinadas as curvas que representam a variação da taxa de escoamento do material no flange em função da força do prensa-chapas, para cada geometria de *drawbead*, como mostra a FIGURA 25.

FIGURA 25 - TAXA DE DEFORMAÇÃO NA FLANGE EM FUNÇÃO DA FPC, PARA OS DRAWBEADS PLANO (a), CIRCULAR (b), TRIANGULAR (c) E QUADRADO (d).



FONTE: AUTOR (2021)

Para cada uma das curvas geradas, foram obtidas as equações 7, 8, 9 e 10, correspondentes a cada geometria de *drawbend*:

$$FPC = - 37,65 \cdot \ln(V2) - 37,856 \quad (7)$$

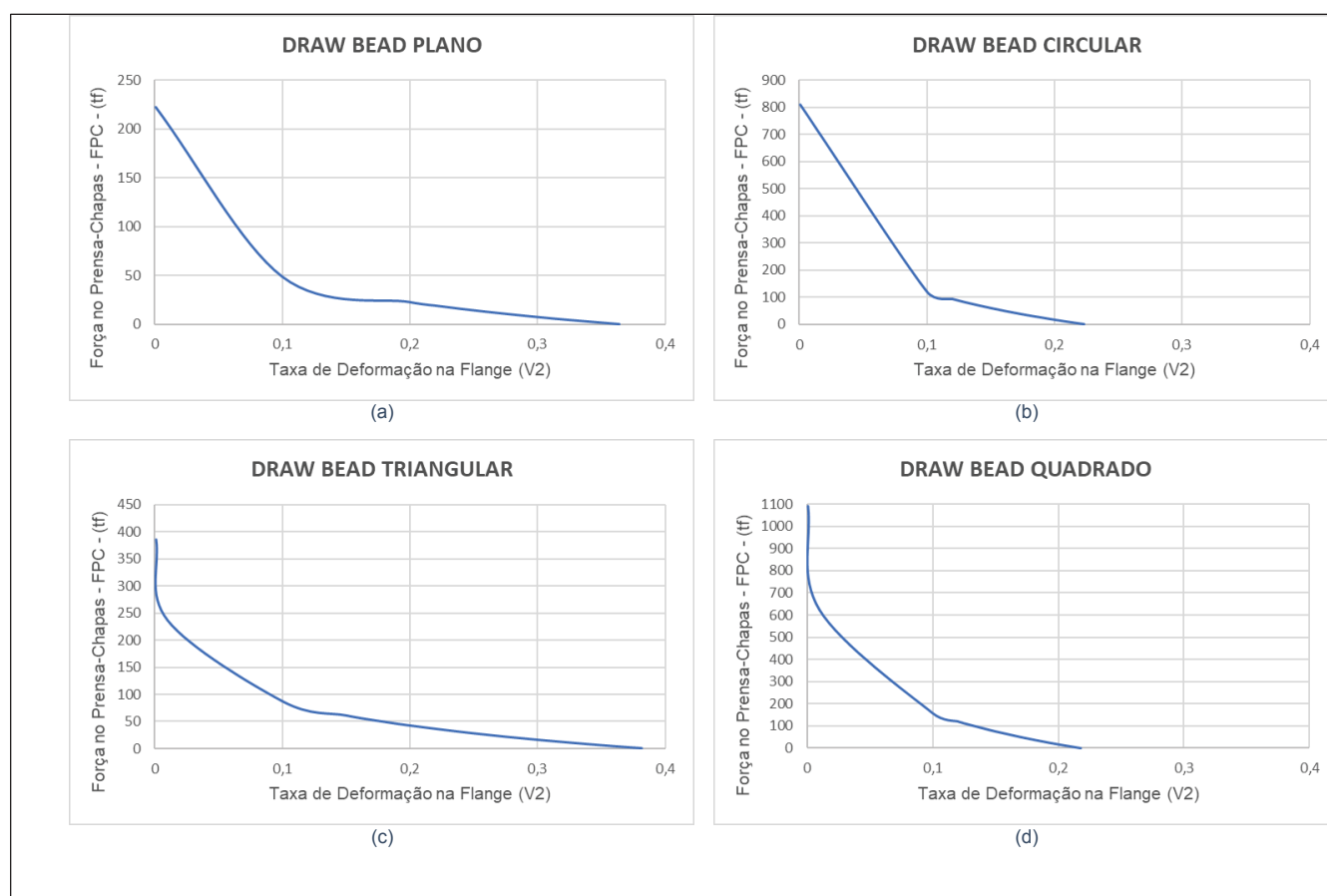
$$FPC = - 149,9 \cdot \ln(V2) - 224,91 \quad (8)$$

$$FPC = - 64,69 \cdot \ln(V2) - 61,579 \quad (9)$$

$$FPC = - 202,7 \cdot \ln(V2) - 309,54 \quad (10)$$

A partir das equações 7, 8, 9 e 10, foram recalculados valores de FPC, até uma condição de restrição total da amostra na região do flange, com a taxa de deformação ( $V_2$ ) tendendo a zero, e redesenhados os gráficos de  $V_2$  vs. FPC para cada geometria de *drawbead*, como mostra a FIGURA 26.

Figura 26 – NOVA CONFIGURAÇÃO DA TAXA DE DEFORMAÇÃO NO FLANGE EM FUNÇÃO DA FPC, PARA OS *DRAWBEADS* PLANO (a), CIRCULAR (b), TRIANGULAR (c) E QUADRADO (d).



FONTE: AUTOR (2021)

Uma característica peculiar a todos os gráficos mostrados na FIGURA 26, é um ponto de inflexão, que define claramente dois regimes de escoamento da chapa no flange a partir de um determinado valor de força no prensa-chapas. A direita desse ponto crítico de inflexão, definido como  $FPC_{cr}$ , ocorre um grande aumento da taxa de escoamento  $V_2$  para uma pequena redução da FPC, enquanto a esquerda ocorre o contrário, ou seja, um pequeno aumento da taxa de escoamento para uma redução mais acentuada da FPC.

De acordo com essa característica das curvas,  $FPC_{cr}$  define um valor mínimo da força no prensa-chapas, abaixo do qual se tem um escoamento em fluxo contínuo da chapa para dentro da matriz de estampagem, condição na qual se espera que o limite de conformabilidade da chapa diminua consideravelmente, segundo a análise das CLC's. Do ponto de vista prático operacional, não se recomenda trabalhar com uma força de prensa-chapas abaixo de  $FPC_{cr}$ , uma vez que o processo pode ficar comprometido, não apenas pelo baixo limite de conformabilidade do material, mas também pelo risco de amassamento da chapa e/ou formação de rugas.

Uma constatação importante, foi que o valor de  $FPC_{cr}$  para todas as geometrias de *drawbead*, FIGURA 26 (a), (b), (c) e (d), ocorreu sempre para uma taxa de escoamento  $V2$  próxima a 0,1 mm/s. Desta forma, se assumirmos esse valor como crítico para a taxa de escoamento da chapa ( $V2_{cr}$ ), considera-se o valor  $FPC_{cr}$  nesse ponto da curva como um limite de segurança a ser utilizada para cada geometria de *drawbead*, como mostra a TABELA 4. Para forças de prensa-chapas menores que  $FPC_{cr}$ , onde o escoamento do material aumenta consideravelmente, não há um valor previsível de  $V2$  a partir do qual o limite de conformabilidade da chapa fica totalmente comprometido.

TABELA 4 – FAIXA ÚTIL DE TRABALHO DO (FPC) EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE MÁXIMA ( $V2$ )

| <b><i>DRAW BEAD</i></b> | <b><math>V2_{cr}</math><br/>(mm/s)</b> | <b><math>FPC_{cr}</math><br/>(tf)</b> | <b><math>FPC_{max}</math><br/>(tf)</b> |
|-------------------------|--|---------------------------------------|--|
| Plano                   | 0,1                                    | 50                                    | 220                                    |
| Triangular              | 0,1                                    | 80                                    | 300                                    |
| Circular                | 0,1                                    | 120                                   | 800                                    |
| Quadrado                | 0,1                                    | 157                                   | 800                                    |

FONTE: AUTOR (2021)

Foi registrado ainda na TABELA 4, um valor máximo para a carga do prensa-chapas ( $FPC_{max}$ ), quando a taxa de escoamento tende a zero.

De acordo com os dados apresentados na TABELA 4, o valor  $FPC_{cr}$  para o *drawbead* plano é de 50 tf, enquanto para os *drawbeads* triangular, circular e quadrado é de 80, 120 e 157 tf, respectivamente. Esses dados mostram que, para o *drawbead*

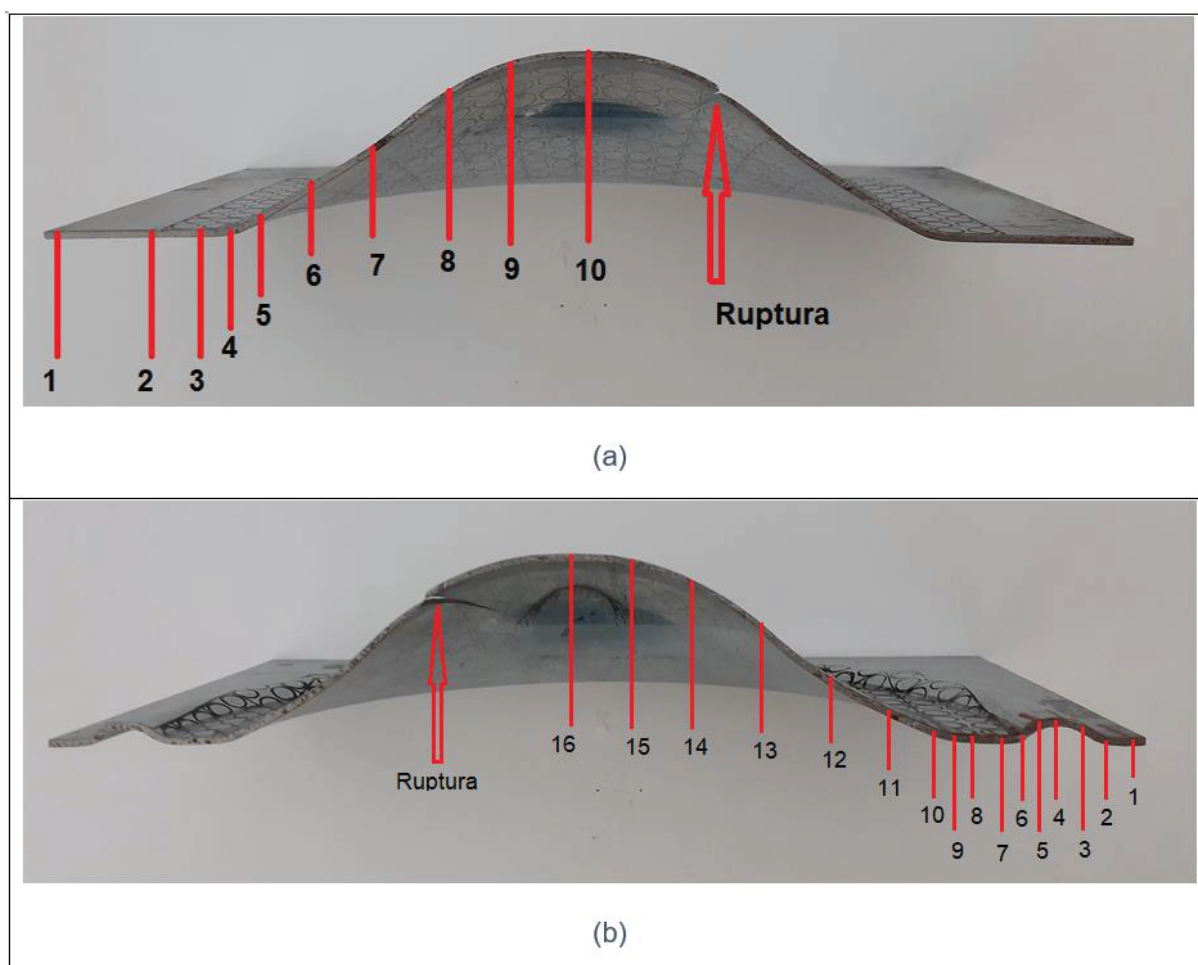
plano, as forças de prensa-chapas que foram utilizadas nos testes foram maiores que a  $FPC_{cr}$ . Para o *drawbead* triangular, apenas a FPC de 58 tf estaria abaixo do  $FPC_{cr}$ . Para os *drawbeads* circular e quadrado, todas as forças de prensa-chapas aplicadas nos testes ficaram abaixo da  $FPC_{cr}$ . Diante do exposto, considerando que os testes foram realizados com forças de prensa-chapas abaixo do  $FPC_{cr}$  para os *drawbeads* circular e quadrado, pode-se dizer que existe a possibilidade do limite de conformabilidade do aço DP780 atingir patamares ainda maiores que os obtidos, se utilizadas FPC's maiores que 118 tf para essas geometrias de *drawbeads*.

Os valores calculados para  $FPC_{max}$ , apresentados na TABELA 4, indicam as cargas máximas para o prensa-chapas, a partir das quais se espera a máxima restrição do material, ou seja, o travamento total da chapa. Para os *drawbeads* com geometria circular e quadrado a  $FPC_{max}$  calculada foi de 800 tf, para (V2) tendendo a zero. Esses valores ficaram muito acima dos valores de  $FPC_{max}$  para os *drawbeads* plano e triangular, calculados em 300 e 220 tf, respectivamente.

#### 4.4 ANÁLISE DA REDUÇÃO DE ESPESSURA

A fim de complementar a análise do efeito que as diferentes geometrias de *drawbeads* e forças no prensa-chapas exercem na conformabilidade do aço DP 780, foi realizado o corte longitudinal dos corpos de prova estampados e medidas as espessuras finais da chapa ao longo do perfil deformado, como mostra a FIGURA 27.

FIGURA 27 – PONTOS DE MEDIÇÃO DA ESPESSURA PARA AS GEOMETRIAS DE DRAW BEAD PLANA (a) E GEOMETRIAS COM DENTE (b).

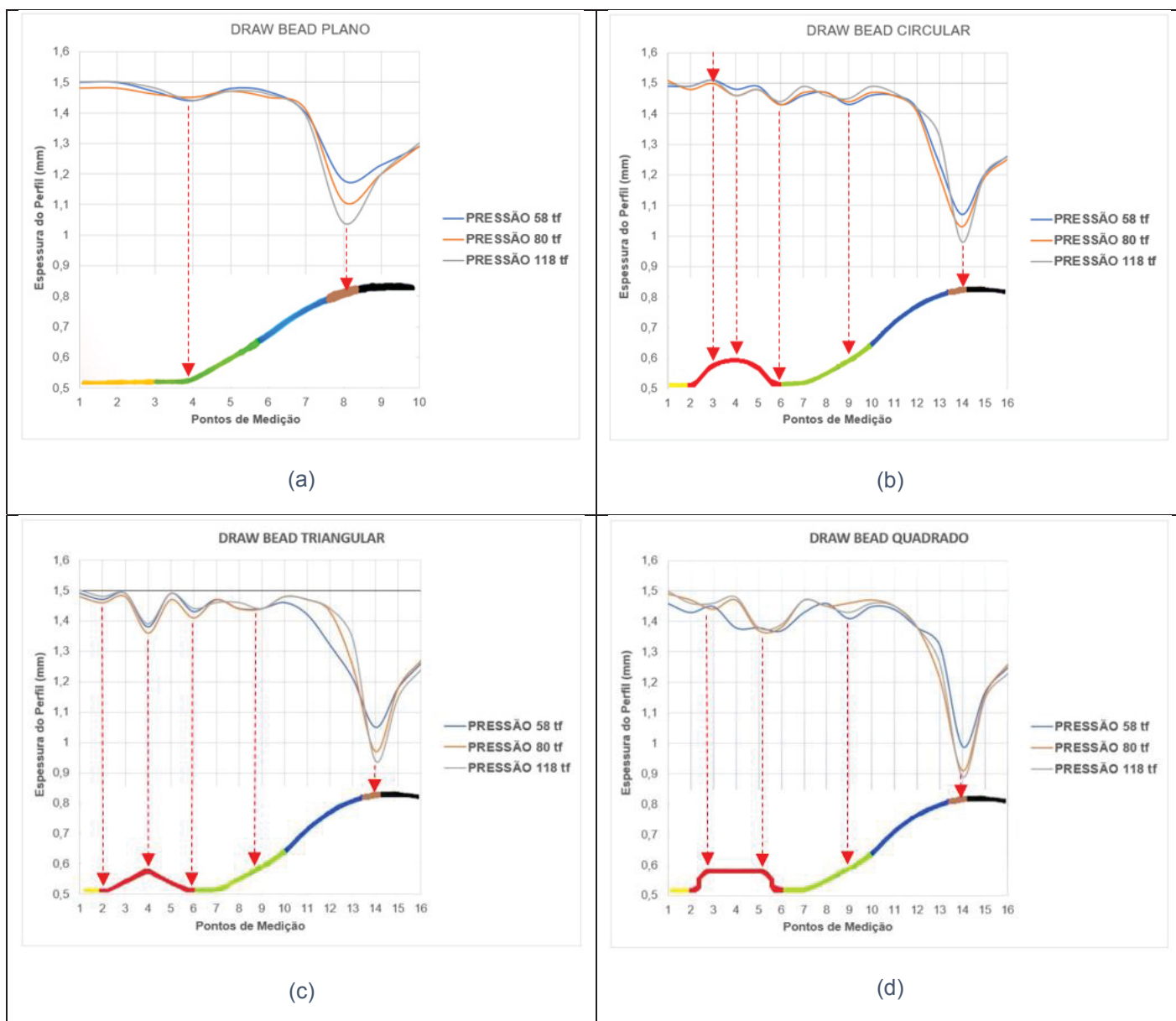


FONTE: AUTOR (2021)

Ainda de acordo com a FIGURA 27, para os corpos de provas ensaiados com o *drawbead* plano (sem o dente), foram considerados dez pontos de medições, ao passo que para os corpos de provas ensaiados com os *drawbeads* circular, triangular e quadrado, foram considerados dezesseis pontos de medição. As medições foram realizadas no lado oposto a fratura, com micrômetro externo de pontas finas, e permitiram analisar o afinamento do material em diferentes regiões das amostras, como no local de atuação do *drawbead* sobre a chapa, na região do ombro da matriz e na região da fratura.

Realizadas as medições nas amostras seccionadas, os perfis de variação de espessura foram representados na FIGURA 28 (a), (b), (c) e (d), para as geometrias de *drawbead* plano, circular, triangular e quadrado, respectivamente.

FIGURA 28 – ESPESSURA DA CHAPA METÁLICA AO LONGO DO PERFIL ESTAMPADO PARA O DRAWBEAD PLANO (a), CIRCULAR (b), TRIANGULAR (c) E QUADRADO (d).



FONTE: AUTOR (2021)

Para análise dos gráficos da FIGURA 28, considerando-se a resolução de 0,01 mm do micrmetro utilizado nas medições de espessuras, atribuiu-se um afastamento de mais ou menos 0,01 mm para os resultados, o que implicou numa tolerância dimensional de 0,02 mm. Com base nessa tolerância, observou-se uma pequena diferença nas medições em determinadas regiões dos corpos de prova onde, para a tolerância adotada, os resultados ficaram dentro dos limites de erro, implicando em variações não significativas para certos resultados.

Desta forma, pode-se dizer que para a região do ombro da matriz obteve-se um valor médio de espessura de 1,44 mm para o *drawbead* plano, considerando as forças de prensa-chapas de 58, 80 e 118 tf, representando um afinamento de 0,06mm, a partir da espessura inicial de 1,5 mm da chapa metálica. Com o *drawbead* circular, a espessura média entre as três cargas de prensa-chapas foi o mesmo, de 1,44 mm para a região do ombro da matriz. Nessa mesma região, a espessuras finais médias para os *drawbeads* triangular e quadrado foram de 1,43 mm e 1,44 mm, respectivamente. Assim sendo, pode-se dizer que a força do prensa-chapas e a geometria do *drawbead*, não apresentam grande influência na redução de espessura da chapa no ombro da matriz, estando essa variação associada principalmente ao raio da ferramenta nesse local.

Em seguida foram analisadas as espessuras na região do *drawbead* das amostras. Neste local, o *drawbead* circular apresentou valor médio de espessura, entre as três forças de prensa-chapas utilizadas, de 1,47 mm na parte central do *drawbead*. Na região de saída do *drawbead*, a espessura chegou a 1,43 mm, ou seja, um afinamento de 0,03 mm até o centro e 0,07 mm até o ponto de saída da chapa.

Para o *drawbead* triangular, que se caracteriza por apresentar uma extremidade central pontiaguda com pequeno raio na extremidade, a variação de espessura média foi de 1,47 mm, na entrada, chegou a 1,37 mm na ponta e 1,42 mm na saída do *drawbead*. Isso caracteriza um grau mais acentuado de encruamento da chapa na ponta do *drawbead*, fator associado ao menor limite de conformabilidade atingido com essa geometria, quando comparadas as curvas limite de conformação das FIGURAS 23 e 24.

O *drawbead* quadrado, por sua vez, apresentou espessuras médias de 1,45 mm e 1,37 mm, na porção do primeiro raio e no local do segundo raio do *drawbead*, respectivamente. Esse resultado aponta para uma redução de espessura similar ao *drawbead* triangular, mas que, porém, apresentou maior limite de conformabilidade, uma vez que as CLC's obtidas para geometria quadrada sempre foram superiores às CLC's obtidas para o *drawbead* triangular. Em outras palavras, independentemente do afinamento similar entre os *drawbeads* triangular e quadrado, o resultado quanto a conformabilidade foi diferente, ao passo que o grau de restrição ao escoamento do material não foi o mesmo.

Quanto a região do raio do punção, medida no lado oposto ao da fratura, os resultados apontaram uma maior redução de espessura a medida que a força do

prensa-chapas aumentou, algo já esperado, uma vez que uma maior restrição ao escoamento da chapa, em decorrência de uma maior FPC, leva o material a esticar mais e afinar mais como consequência desse modo de deformação. Como o limite de estampabilidade aumentou à medida que se elevou a FPC, de acordo com as CLC's da FIGURA 23, torna-se evidente a possibilidade de se elevar ainda mais o limite de estampabilidade do aço DP780, a partir de forças de prensa-chapas superiores a 118 tf, a fim de se explorar ainda mais o potencial de conformação do material. Isso não foi possível, porém, devido ao limite operacional da prensa hidráulica utilizada, mas que mantém em aberto a possibilidade de se explorar mais o efeito das variáveis em estudo.

Esse aspecto condiz com as curvas que relacionam a taxa de escoamento no flange (V2) em função da FPC, mostradas na FIGURA 26, que apontam essa possibilidade, uma vez que, pelas curvas, as forças de prensa-chapas utilizadas se encontram bastante abaixo dos valores máximos admissíveis para cada geometria de *drawbead*.

Cabe destacar ainda que, a redução de espessura da chapa, que está diretamente associada ao modo de deformação por estiramento, como mencionado anteriormente, tem essa característica evidenciada pelo fato de os corpos de prova avaliados terem sido os de maior largura, que sofreram ruptura na região do raio do punção e identificados pela cor verde no QUADRO 4.

## 5 CONCLUSÕES

De acordo com o objetivo do trabalho proposto, de avaliar o efeito da geometria do *drawbead* e da carga do prensa-chapas na estampabilidade do aço DP780, diversos aspectos foram evidenciados através dos testes realizados. O primeiro deles concentrou-se na posição de trincamento da amostra onde, apenas os corpos de prova mais largos, em que se caracteriza o modo de deformação por estiramento, houve um resultado totalmente satisfatório, com a trinca localizando-se na região do raio do punção. Para as larguras intermediárias, nem todos os corpos de prova apresentaram a trinca nessa posição, ao passo que a maioria dos corpos de prova mais estreitos falharam fora da posição do raio do punção, sendo rejeitados para a projeção da curva limite de conformação.

Este fato evidencia o efeito catastrófico de um escoamento não uniforme da chapa metálica durante a estampagem, uma vez que para as amostras estreitas, o *drawbead*, que não atua nas laterais da chapa, permite um escoamento totalmente livre nessa região. Como consequência houve um trincamento prematuro do material, variando de posição conforme o grau de restrição imposto pelo modelo de *drawbead* e carga de prensa-chapas aplicada.

Quanto a estampabilidade do aço DP780, conclui-se que os resultados mais eficientes foram obtidos com a força de prensa-chapas de 118 tf, uma vez que, independentemente da geometria do *drawbead*, foi nessa condição de carga que o aço atingiu os maiores níveis de deformação. Pode-se dizer assim que, o limite de estampabilidade do aço DP780 aumentou, à medida que a força do prensa-chapas foi elevada de 58 tf até 118 tf.

Para a melhor força do prensa-chapas, de 118 tf, o maior nível de conformação da chapa foi atingido com o *drawbead* circular, caracterizando essa configuração como a mais eficiente para a estampabilidade do aço DP780. Pode-se dizer então que o *drawbead* circular, com FPC de 118 tf, promove a melhor condição de equilíbrio entre o avanço do material no flange e a deformação da chapa dentro da ferramenta, que define a performance do aço na estampagem.

Segundo a análise da taxa de escoamento do material no flange, tornou-se possível a determinação de limites operacionais para a FPC, para cada geometria de *drawbead*. Estes limites correspondem a um valor mínimo, denominado  $FPC_{cr}$ , abaixo do qual há um avanço muito acentuado da chapa para dentro da matriz, e um valor

máximo, definido como  $FPC_{max}$ , onde a chapa tende a um escoamento nulo. Assim, chegou-se a uma importante referência para o dimensionamento do prensa-chapas em projetos de ferramentas de estampagem, dentro dos quais pode-se chegar mais facilmente a uma condição ideal de operação, e maximizar a conformabilidade do aço em questão.

Foi realizada ainda uma análise quanto a redução de espessura da chapa metálica em pontos críticos das amostras, como a região do ombro da matriz, do *drawbead*, e na posição de ruptura das amostras, na altura do raio do punção. Com o propósito de analisar o efeito das variáveis em estudo no afinamento do material, pode-se observar uma redução de espessura relativamente pequena e uniforme para o ombro da matriz, à medida em que se variou a FPC e a geometria de *drawbead*. Com estes resultados conclui-se que a FPC e a geometria de *drawbead* não têm grande influência sobre o encruamento sofrido pela chapa sobre o ombro da matriz.

Na região do *drawbead*, no entanto, foi possível observar que a geometria circular ofereceu menor afinamento, enquanto as geometrias triangular e quadrada, compostas por arestas com pequenos raios, ofereceram maior afinamento. O maior afinamento levou a chapa a um maior grau de encruamento no flange e, conseqüentemente, ao comprometimento da conformabilidade da chapa. Conclui-se assim que a redução de espessura do material em decorrência da geometria do *drawbead* representa um prejuízo a estampabilidade da chapa, devendo ser controlada à medida que se buscar restringir o fluxo do material em função dessa variável.

## 6 TRABALHOS FUTUROS

Realização de ensaios com uma prensa hidráulica de maior capacidade de carga, a fim de se verificar, com precisão, até que valor de força no prensa-chapas acima de 118tf ainda se pode conseguir um ganho no grau de conformabilidade do aço DP780, valor de carga que seria considerado ideal para se chegar à máxima estampabilidade do aço em questão com geometrias distintas de *drawbeads*.

Repetir a análise experimental para outros aços de nova geração, a fim se conhecer melhor o efeito da influência das diferentes geometrias de *drawbead* e a força do prensa-chapas na estampabilidade num maior universo de ligas de aços.

Realização de ensaios de microscopia para análise do efeito das variáveis estudadas na microestrutura do material, viabilizando modelos matemáticos mais sofisticados a serem implementados em softwares de simulação numérica.

Desenvolvimento de um modelo computacional para a simulação numérica de processos de estampagem com aços de nova geração, levando em conta o efeito da geometria do *drawbead* e a carga do prensa-chapas na conformabilidade do material.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEYRATHNA, Buddhika et al. A first step towards a simple in-line shape compensation routine for the roll forming of high strength steel. *International Journal Of Material Forming*, [s.l.], v. 9, n. 3, p.423-434, 18 abr. 2015. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s12289-015-1238-7>.

ANDRADE, S. L.; BATISTA, J. F.; TAISS, J. M.; ROSA, L. K. ULSAB-AVC – O aço no automóvel do futuro: A estratégia da USIMINAS. In: 55º Congresso da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2000, Rio de Janeiro, Anais... Rio de Janeiro, Julho 2000.

BAE, G.h. et al. Simulation-based prediction model of the draw-bead restraining force and its application to sheet metal forming process. *Journal Of Materials Processing Technology*, [s.l.], v. 187-188, p.123-127, jun. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.059>.

BARLO, Alexander; SIGVANT, Mats; ENDELT, Benny. On the Failure Prediction of Dual-Phase Steel and Aluminium Alloys Exposed to Combined Tension and Bending. *Iop Conference Series: Materials Science and Engineering*, [s.l.], v. 651, p.012030-12040, 25 nov. 2019. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899x/651/1/012030>.

CHEMIN FILHO, Ravilson Antonio. Estudo da fratura de aços de nova geração dp600 através da variação de pressão no prensa-chapas. 2011. 149 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Parana, Curitiba, 2011.

CHOI, T.h. et al. Draw-bead simulation by an elasto-plastic finite element method with directional reduced integration. *Journal Of Materials Processing Technology*, [s.l.], v. 63, n. 1-3, p.666-671, jan. 1997. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0924-0136\(96\)02704-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0924-0136(96)02704-5).

EMANUELA, Affronti; MARION, Merklein. Metallographic Analysis of Nakajima Tests for the Evaluation of the Failure Developments. *Procedia Engineering*, [s.l.], v. 183, p.83-88, 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.015>.

GOODWIN, G. M. Application os strain analyses to sheet metal forming problems in the press shop. *Metall Italiana*, 60., 764-774, 1968.

IISI - International Iron and Steel Institute, UltraLight Steel Auto Body - Advanced Vehicle Concepts (ULSAB-AVC) Overview Report (2014), disponível em: [www.worldautosteel.org](http://www.worldautosteel.org). Acesso em :17fev.2019.

LAJARIN, Sérgio F; MARCONDES, Paulo Vp. Influence of process and tool parameters on springback of high-strength steels. *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, [S.L.], v. 229, n. 2, p. 295-305, 24 abr. 2014. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0954405414527954>.

IQUILIO, R.a. et al. Novel experimental method to determine the limit strain by means of thickness variation. *International Journal Of Mechanical Sciences*, [s.l.], v. 153-154, p.208-218, abr. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.01.036>.

KE, Junyi et al. Formability of sheet metal flowing through drawbead – an experimental investigation. *Journal Of Materials Processing Technology*, [s.l.], v. 254, p.283-293, abr. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.11.051>.

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

KEELER, S. P. *Understanding Sheet Metal Formability*. Machinery, 1968.

KUZMAN, K. *Enviromental Friendly Lubricants in Deep Drawing of Steel Sheet Metal*. Enform Project. Slovenia, TECOS Celje, 2000.

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

LEOCATA, Salvatore et al. Influence of binder pressure zones on the robustness of restraining forces in sheet metal forming. *Procedia Manufacturing*, [s.l.], v. 29, p.209-216, 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.128>.

MOREIRA, L. P.; SAMPAIO, A. P.; FERRON, G.; LACERDA, A. C. Análise numérica e experimentação da influência da espessura inicial das deformações limites em chapas. In: *CONFERÊNCIA NACIONAL DE CONFORMAÇÃO DE CHAPAS*, 6., 2003, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: UFRGS – Centro de Tecnologia, p. 39-49, 2003.

NACEUR, H et al. Optimization of drawbead restraining forces and drawbead design in sheet metal forming process. *International Journal Of Mechanical Sciences*, [s.l.], v. 43, n. 10, p.2407-2434, out. 2001. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0020-7403\(01\)00014-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0020-7403(01)00014-5).

NORZ, R.; VOLK, W.. Investigation of non-proportional load paths by using a cruciform specimen in a conventional Nakajima test. *Iop Conference Series: Materials Science and Engineering*, [s.l.], v. 651, p.012020-12030, 25 nov. 2019. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899x/651/1/012020>.

OLAVO C. HAASE (Porto Alegre). 3 7th S e N A F O R. Influência da geometria do quebra-rugas na factibilidade do processo de estampagem com base no Método dos Elementos Finitos: Influence of drawbead geometry on stamping feasibility based on Finite Elements Method. 2017. Disponível em: <[http://www.2017.senafor.com/conteudo/view?ID\\_CONTEUDO=442](http://www.2017.senafor.com/conteudo/view?ID_CONTEUDO=442)>. Acesso em: 04 ago. 2017.

RICHTER, A. Comparação dos Resultados de Diferentes Testes para a Determinação da Curva Limite de Conformação. In: *CONFERÊNCIA NACIONAL DE CONFORMAÇÃO DE CHAPAS*, 6., 2003, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: UFRGS – Centro de Tecnologia, p. 24-29, 2003.

SAMUEL, M. Influence of drawbead geometry on sheet metal forming. *Journal Of Materials Processing Technology*, [s.l.], v. 122, n. 1, p.94-103, mar. 2002. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0924-0136\(01\)01233-x](http://dx.doi.org/10.1016/s0924-0136(01)01233-x).

SARRAF, I. Sari et al. Numerical analysis of damage evolution and formability of DP600 sheet with an extended Rousselier damage model. *International Journal Of Solids And Structures*, [s.l.], v. 134, p.70-88, mar. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2017.10.030>.

SCHMID, Harald; HETZ, Peter; MERKLEIN, Marion. Failure behavior of different sheet metals after passing a drawbead. *Procedia Manufacturing*, [s.l.], v. 34, p.125-132, 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.129>.

SCHAEFFER, L.; FOLLE, L. F.; ARRUDA, R. P.; MARCA, D. Escolha do lubrificante correto torna mais precisa a curva-limite de conformação. *Corte & Conformação de Metais*, p. 64-76, Abril 2008.

SHINMIYA, T et al. Investigation of Crack Prediction Method Using Limiting Surface Strain in High-Strength Steel Sheets. *Iop Conference Series: Materials Science and Engineering*, [s.l.], v. 651, p.012065-012080, 25 nov. 2019. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899x/651/1/012065>.

SHRIVASTAVA, Parnika; TANDON, Puneet. Enhancement of fracture forming limit by crystallographic texture reformation of AA1050 sheets in Single Point Incremental Forming. *Iop Conference Series: Materials Science and Engineering*, [s.l.], v. 651, p.012074-0120081, 25 nov. 2019. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899x/651/1/012074>.

SMITH, L.m. et al. A new experimental test apparatus for angle binder draw bead simulations. *Journal Of Materials Processing Technology*, [s.l.], v. 209, n. 10, p.4942-4948, jun. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.01.017>.

TIGRINHO, Luiz Maurício Valente. Análise da fratura de chapas do aço avançado de alta resistência dp600 quando submetido a diferentes estados de tensões. 2011. 129 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Parana, Curitiba, 2011.

WANG, J.f. et al. Anticlastic curvature in draw-bend springback. *International Journal Of Solids And Structures*, [s.l.], v. 42, n. 5-6, p.1287-1307, mar. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2004.08.017>.

WANG, Zhen et al. A robust and accurate geometric model for automated design of drawbeads in sheet metal forming. *Computer-aided Design*, [s.l.], v. 92, p.42-57, nov. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cad.2017.07.004>.

WOODTHORPE, J.; PEARCE, R. The Effect of r and n Upon the Forming Limit Diagrams of Sheet Metal. *Sheet Metal Industries*. p. 1061-1067, 1969.