

**ISABELLA SISMOTTO DO VALE**

**Estudo de caso sobre a Adequação de Estampo de Corte para a otimização  
de produção de Peças Automotivas**

Guaratinguetá

2023

**Isabella Sismotto do Vale**

**Estudo de caso sobre a Adequação de Estampo de Corte para a otimização de produção  
de Peças Automotivas**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia e Ciências do *Campus* de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador (a): Prof. Dr. Marcelo Sampaio  
Martins

Guaratinguetá

2023


V181p	<p>Vale, Isabella Sismotto do</p> <p>Estudo de caso sobre a adequação de estampo de corte para a otimização de produção de peças automotivas/ Isabella Sismotto do Vale – Guaratinguetá, 2023.</p> <p>58 f. : il.</p> <p>Bibliografia: f. 57-5</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia de Materiais – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2023.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins</p> <p>1. Estampagem (Metais). 2. Ferramentas de corte. 3. Cisalhamento.</p> <p>I. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU 621.98.043</p>
-------	--

Pâmella Benevides Gonçalves  
Bibliotecária CRB-8: 9203


**ISABELLA SISMOTTO DO VALE**


ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO  
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
“GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA”


APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

  
Prof. Dr. Celso Eduardo Tuna  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

  
Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins  
Orientador/UNESP-FEG

  
Profa. Me. Sofia Glyniadakis  
UNESP-FEG

  
Prof. Me. Geraldo César Rosário de Oliveira  
UNESP-FEG

**Janeiro de 2023**

## **DADOS CURRICULARES**

### **ISABELLA SISMOTTO DO VALE**

**NASCIMENTO** 30.08.1996 – São Paulo / SP

**FILIAÇÃO** José Eduardo Ribeiro do Vale  
Simone Sismotto do Vale

**2011/2013** Ensino Médio  
Colégio Augusto Laranja

Dedico este trabalho de modo especial, à minha família, que me apoiou durante o meu curso mesmo a longa distância, e aos meus professores, desde a escola até a faculdade, que contribuíram para a formação da pessoa que eu sou hoje.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço à minha família e meus amigos;  
ao meu orientador, *Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins* que jamais deixou de me incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível.

aos meus pais *José Eduardo e Simone*, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos.

às secretárias da pós-graduação Regina e Elisa pela dedicação e alegria no atendimento.

“Na vida, não existem soluções. Existem forças em marcha: é preciso criá-las e, então, a elas seguem-se as soluções.”

Antoine de Saint-Exupéry



## RESUMO

O objetivo desse trabalho foi o estudo de caso sobre a viabilidade de adequação de um estampo de corte que permita realizar o corte sincronizado de chapas para estampagem, a fim de concentrar o processo em uma única prensa de corte e assim adequar o processo de uma planta de estampagem automotiva à Manufatura Enxuta. Em virtude de gargalos operacionais, como movimentações desnecessárias no chão de fábrica e grande volume de itens em estoque, foi detectada a necessidade de eliminar uma etapa do processo. O método encontrado para tal foi o projeto de um estampo novo de corte a partir do reaproveitamento de outro estampo que seria descartado, incluindo-se a preocupação com a redução do consumo e descarte de aço pela planta de estampagem. Para o projeto da nova região de corte do estampo, foram consideradas cinco peças diferentes, com mesma geometria, com variadas dimensões. O presente estudo utiliza os conceitos de dimensionamento de ferramentas de corte apanhados na literatura. Foram documentadas as etapas de construção do estampo pela ferramentaria da planta, desde o dimensionamento, usinagem e montagem, bem como a testagem da nova ferramenta e de seus produtos. A partir da validação do novo estampo e seu emprego imediato na produção, os gargalos antes encontrados foram eliminados e a fabricação das peças automotivas por essa planta teve seu processo otimizado dentro do conceito de *Lean Manufacturing*.

**PALAVRAS-CHAVE:** Estampo de corte. Corte por cisalhamento. Estampagem. Manufatura Enxuta. Estampagem Automotiva.

## **ABSTRACT**

The goal of this project was to perform a case study about the viability of adapting a cutting die for the synchronized cut of steel plaques for stamping, while maintaining the process in single press so that the production would be in accordance with the principles of Lean Manufacturing. In light of operational constraints, such as unnecessary transit of industrial vehicles and big volumes of stocked items, it was found necessary to eliminate one step of the blanking process. The chosen methodology for such was to build a new blanking die, while reusing the components of a disposed blanking die for the construction of the new one. This includes the concern of reducing the steel and iron consumption by the plant as another objective of this project. For the design of the new cutting region of the die, five parts with the same geometry but different dimensions were considered. This study used die design concepts found in literature. The steps of the construction of the new blanking die by the plant were documented and are presented in the study, from the design to the testing of the die and its products. Once the new blanking die was validated by the plant, it was immediately introduced in the plant's production and the constraints were eliminated as intended. With the conclusion of this project, the production of stamped parts was optimized in accordance with the concepts of Lean Manufacturing.

**KEY WORDS:** Blanking die. Cutting by shear. Lean Manufacturing. Stamping. Automotive Stamping.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 - Esquema de estampo simples de corte13
- Figura 2 - Etapas da estampagem de uma peça15
- Figura 3 - Fases da operação de corte16
- Figura 4 - Aspecto da região de corte17
- Figura 5 - Representação da linha neutra em uma peça dobrada18
- Figura 6 - Recuperação elástica19
- Figura 7 – Estampagem profunda20
- Figura 8 – Etapas do corte por cisalhamento21
- Figura 9 - Distribuição dos cortes de blank em uma tira de metal24
- Figura 10 - Elementos do estampo progressivo de corte25
- Figura 11 - Punção de corte seccionado26
- Figura 12 - Esquema de uma *Blanking Line*27
- Figura 13 - Representação de uma Tesoura Rotativa28
- Figura 14 - Dimensões dos corpos de prova31
- Figura 15 - Conceitos para a matriz de corte31
- Figura 16 - Malha em conjunto bipartido33
- Figura 17 - Análise inicial de tensões34
- Figura 18 - Seções com geometrias especiais35
- Figura 19 - Regiões de tensão crítica36
- Figura 20 - Geometria do *blank*37
- Figura 21- Desenho do conjunto do estampo de corte38
- Figura 22 - Esquema da peça a ser estampada39
- Figura 23 - Geometria dos *blanks* selecionados para o projeto42
- Figura 24 - Ferramenta de *blank* em *disposal* selecionada para o projeto43
- Figura 25 - Desenho da base inferior da ferramenta inicial44
- Figura 26 - Desenho da nova base inferior da ferramenta45
- Figura 27 - Detalhe da sangria da aresta das facas46
- Figura 28 - Base inferior da ferramenta após limpeza47
- Figura 29 - Base inferior da ferramenta após usinagem47
- Figura 30 - Ferramenta após a fixação das linhas de facas48
- Figura 31 - Base superior da ferramenta após montagem48
- Figura 32 - Roletes guia fixados na ferramenta49
- Figura 33 - Ferramenta após a adição do berço de transporte de *blanks*50

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - <i>Blanks</i> selecionados para o projeto do estampo de corte.....	42
Tabela 2 - Memorial de cálculo para dimensionamento da ferramenta de corte.....	52

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1	OBJETIVO.....	14
1.2	JUSTIFICATIVA.....	14
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>15</b>
2.1	PROCESSOS DE ESTAMPAGEM.....	15
<b>2.1.1</b>	<b>Operação de corte.....</b>	<b>16</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Operação de dobramento.....</b>	<b>17</b>
<b>2.1.3</b>	<b>Operação de embutimento.....</b>	<b>19</b>
2.2	ESTAMPAGEM DE CORTE.....	21
<b>2.2.1</b>	<b><i>Blanking e Fine Blanking</i>.....</b>	<b>21</b>
<b>2.2.2</b>	<b>Ferramental de corte.....</b>	<b>23</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Elementos do estampo de corte.....</b>	<b>24</b>
2.3	ESTAMPAGEM DE CORTE NA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA.....	26
<b>2.3.1</b>	<b>Planta de estampagem de corte.....</b>	<b>26</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Materiais.....</b>	<b>28</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Qualidade e defeitos.....</b>	<b>29</b>
2.4	ESTUDOS RELACIONADOS COM A TEMÁTICA DA MONOGRAFIA.....	30
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>41</b>
3.1	DETALHAMENTO E ANÁLISE DO PROBLEMA.....	41
3.2	EXIGÊNCIAS NORMATIVAS DO PROJETO.....	41
3.3	SELEÇÃO DAS PEÇAS PARA O PROJETO.....	41
3.4	SELEÇÃO DA BASE FERRAMENTAL PARA O PROJETO.....	43
3.5	DESENHO DO FERRAMENTAL DE CORTE.....	43
3.6	CONSTRUÇÃO DA NOVA FERRAMENTA DE CORTE.....	46
3.7	CÁLCULOS DO ESTAMPO DE CORTE.....	50
<b>3.7.1</b>	<b>Esforço de corte.....</b>	<b>50</b>
<b>3.7.2</b>	<b>Espessura da placa matriz.....</b>	<b>51</b>
<b>3.7.3</b>	<b>Folga entre punção e matriz.....</b>	<b>51</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>52</b>
4.1	DIMENSIONAMENTO DO ESTAMPO DE CORTE.....	52
4.2	CONSTRUÇÃO DA FERRAMENTA DE CORTE E TESTES.....	53
4.3	IMPACTOS NO PROCESSO PRODUTIVO DA PLANTA.....	54
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>56</b>

<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>57</b>
--	-----------

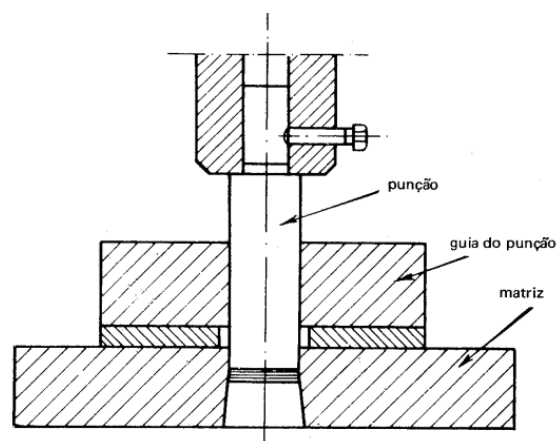
## 1 INTRODUÇÃO

O processo de estampagem de chapas metálicas é amplamente utilizado na indústria automobilística para a manufatura de peças em série. A estampagem tem como finalidade dar uma nova forma geométrica a uma chapa metálica a partir de conformação mecânica, por meio de máquinas chamadas prensas e ferramentas chamadas estampos. O processo de estampagem compreende as operações de corte, repuxo, embutimento e dobramento (CHIAVERINI, 1986).

De acordo com Schaeffer (2004), as operações da estampagem podem ser divididas em dois grupos: processos de conformação e processos de separação. No grupo de processos de conformação estão as operações que alteram a forma geométrica da chapa sem separar material, como o repuxo, o embutimento e a dobra. Já no grupo dos processos de separação estão alocadas as operações que envolvem separação de material da chapa, como o corte fino e o cisalhamento. A estampagem de corte por cisalhamento também compreende a produção de chapas metálicas a partir do corte de tiras em bobina. *Blank* é o nome dado a essas chapas metálicas que servem de matéria-prima para as peças obtidas a partir do processo de conformação por estampagem. (DIETER, 1981).

No caso da manufatura de peças em série e com alta precisão, como ocorre na indústria automobilística, é preferível a utilização de estampos progressivos de corte. Os estampos progressivos são aqueles com alimentação contínua, feita por tiras em bobinas, onde ocorre o avanço da chapa por meio de facas de avanço ou pinças (SENAI, 2016). Os elementos básicos de um estampo de corte são a matriz, o punção e a guia do punção, como pode ser observado no esquema apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Esquema de estampo simples de corte



Fonte: Chiaverini (1986)

Na planta de estamparia onde foi realizado o estudo para elaboração deste trabalho, a fim de garantir a alta precisão dos cortes para peças com geometrias diversas, são utilizadas duas linhas de prensa. O corte preliminar é realizado em uma prensa de corte automático, enquanto o corte final é feito em uma prensa de acionamento manual. No cenário atual da manufatura, a eficiência dos processos, bem como a redução do desperdício de aço, são conceitos de *Lean Manufacturing* amplamente almejados quando se discute ganhos de produtividade. Diante dos ganhos processuais apresentados, o estudo da junção dos cortes preliminar e final em um único estampo de corte que abrange a gama dimensional das peças produzidas, em uma única linha de prensa, contribui para a adequação do processo aos conceitos da indústria 4.0.

### 1.1 Objetivo

O objetivo principal deste trabalho foi o estudo de caso sobre a viabilidade de adequação de um estampo de corte que permita realizar o corte sincronizado de chapas para estampagem, a fim de concentrar o processo em uma única prensa de corte e assim adequar o processo de uma planta de estampagem automotiva à Manufatura Enxuta. O projeto teve como foco o processo de corte de *blanks*, como são chamadas as chapas das peças pré-estampadas, de cinco peças automotivas diferentes, porém com geometrias semelhantes. Incluiu-se ainda como objetivo a utilização de um estampo de corte em desuso para servir como base para o novo conjunto de facas.

### 1.2 Justificativa

A justificativa para esse trabalho foi de tornar o processo de manufatura de peças automotivas mais enxuto, eliminando a necessidade de duas prensas de corte no processo, de um estoque intermediário de *blanks*, de equipamentos para armazenar as chapas, movimentação de empilhadeiras dentro da área fabril, reduzindo o custo de mão de obra e os impactos ambientais advindos da construção de um novo estampo. Espera-se que a junção das etapas de corte traga impactos positivos na cadeia produtiva da montadora, na segurança da área fabril e ambiental da planta.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Processos de estampagem

Devido as particularidades das ferramentas de estampagem, pode-se separar o processo de estampagem em três operações: corte, dobramento, embutimento ou repuxo (SENAI, 2016). De acordo com Chiaverini (1986), em casos de peças com geometrias simples, uma única operação pode ser suficiente para adquirir a geometria desejada. Entretanto, há casos em que mais de uma operação é necessária, caracterizando a utilização de uma linha de prensas, onde cada máquina é responsável por realizar uma ou mais operações do processo de estampagem. A forma final da peça é o que define o tipo de operação a ser realizada durante o processo de fabricação. Na Figura 2, é possível conferir um exemplo das etapas dos processos de estampagem necessários para a conformação de um cárter de óleo, desde o corte do *blank* até o produto.

Figura 2 - Etapas da estampagem de uma peça



Fonte: Schuler (1998)

### 2.1.1 Operação de corte

Conforme Schaeffer (2004), a operação de corte por cisalhamento entra na categoria de processos de separação. O corte é a operação na qual se consegue separar uma chapa com um contorno previamente determinado de uma tira de metal, com a utilização de ferramentas aptas ao corte (ROSSI, 1979). A tira é deformada plasticamente pela ação do punção, até o ponto de ruptura na região do perfil de corte e o cisalhamento do material, o qual é empurrado para dentro da matriz (SENAI, 2016). As fases do processo de corte são representadas esquematicamente na Figura 3. Dieter (1981) aponta que a espessura que deve ser forçada para o interior da matriz para produzir o corte é relacionada com a natureza do metal em processo. No caso de metais dúcteis, a penetração do punção pode ser levemente superior à espessura da chapa, ao passo que para metais frágeis a penetração deve ser igual à uma fração da espessura.

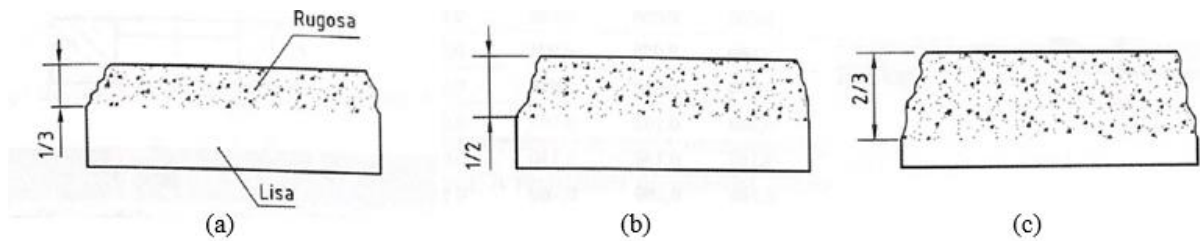
Figura 3 - Fases da operação de corte



Fonte: Schuler (1998)

O corte por cisalhamento resulta em uma área lisa na superfície de corte, no entanto, se a resistência ao cisalhamento for excedida, trincas serão formadas nessa superfície. Abaixo da zona de cisalhamento, a superfície apresenta um aspecto rugoso na fratura (SCHULER, 1998). Na Figura 4, está esquematizado o fenômeno de corte, mostrando as superfícies da chapa após o esforço do punção. A proporção entre a superfície lisa e a superfície rugosa é dada pela espessura do material, como representado na Figura 4a, para os materiais não ferrosos, dúcteis e com baixa resistência a tração; na Figura 4b para os materiais ferrosos com baixa resistência a tração e na Figura 4c para os materiais ferrosos com alta resistência a tração. Pode ser observado que com o aumento da resistência a tração do material, diminui a região do corte que sofre cisalhamento de fato (SENAI, 2016).

Figura 4 - Aspecto da região de corte



Fonte: adaptado de SENAI (2016)

Para obter um aspecto limpo na região da fratura, é necessário que os pontos de ruptura, ou seja, os pontos da chapa que entram em contato com as arestas cortantes da ferramenta, estejam alinhados. Segundo Koninck (1980), esse alinhamento só é possível quando existe uma folga entre o punção e a matriz, folga cujo valor varia conforme a espessura da chapa cortada e o tipo de material. A folga entre o punção e matriz é o parâmetro de processo com maior influência na qualidade das peças cortadas, no caso de uma folga muito grande, por exemplo, a chapa fica suscetível à formação de rebarbas e caroços na superfície de corte (DIETER, 1981).

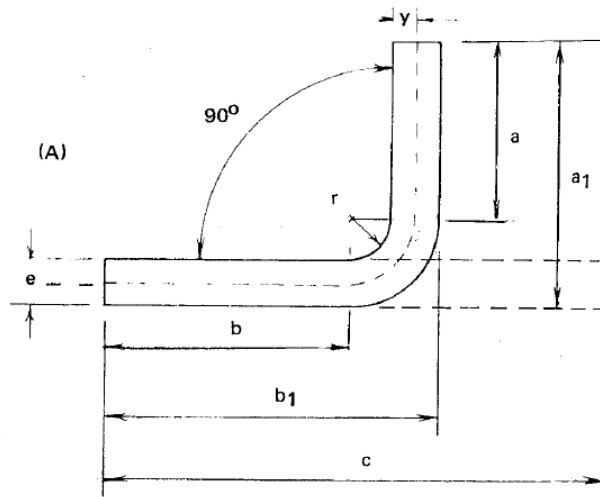
Em relação a força que age no corte, Schaeffer (2004) defini-a como sendo o produto do comprimento da linha de corte, da espessura da chapa e da resistência do material contra o cisalhamento. A folga entre o punção e a matriz também pode ter influência na força de corte.

### 2.1.2 Operação de dobramento

Dieter (1981) define a operação de dobramento como a conformação de chapas planas, os *blanks*, em peças curvas. Durante o processo, a superfície interna da chapa se contrai na região próxima ao raio interno da dobra enquanto a superfície externa à dobra sofre alongamento (SENAI, 2016). De acordo com Chiaverini (1986), esse fenômeno implica na existência de uma região dentro da espessura da chapa na qual as fibras do metal não sofrem esforços de tração e de compressão, denominada linha neutra. A linha neutra representa, portanto, a região da chapa que não sofre deformação durante o dobramento. Uma representação da linha neutra em uma chapa dobrada é apresentada na Figura 5. No caso do dobramento elástico, a linha neutra se encontra na metade da espessura da chapa e no caso

do dobramento plástico, a região de deformação zero se aproxima da superfície interna a medida que o dobramento ocorre (DIETER, 1981).

Figura 5 - Representação da linha neutra em uma peça dobrada

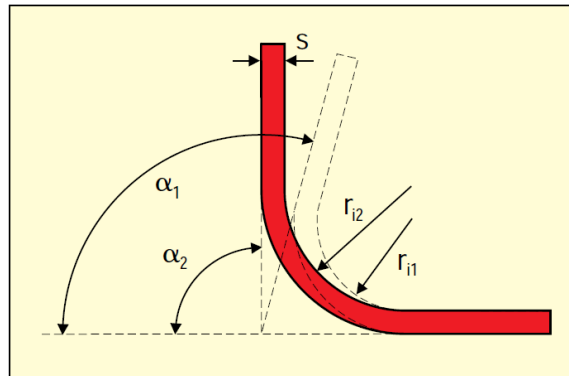


Fonte: Chiaverini (1986)

Um fator importante no processo de dobramento é o raio de curvatura da dobra. De acordo com Rossi (1979), o raio de curvatura deve ser de 1 a 2 vezes o valor da espessura da chapa para metais dúcteis e de 3 a 4 vezes o valor da espessura do *blank* para metais duros. O raio de curvatura deve ser o maior possível considerando-se a espessura da chapa e o tipo de aço (SCHULER, 1998). Essa regra deve ser respeitada a fim de evitar cantos vivos na peça final e garantir uma peça dobrada sem trincas.

Um fenômeno que deve ser levado em consideração durante o processo de dobra é o efeito mola ou recuperação elástica. Segundo Dieter (1981), ao retirar a pressão exercida pela ferramenta sobre a peça ao fim do processo, a deformação elástica sofrida pela chapa desaparece, reduzindo a deformação total da peça, como pode ser visto na Figura 6. Quanto maior for o limite de escoamento do material, maior será a recuperação elástica. Além disso, a geometria do *blank* também interfere sobre o efeito mola, aumento conforme a razão entre as dimensões da chapa e a espessura. A fim de compensar a recuperação elástica, recomenda-se utilizar um raio de curvatura menor que o desejado no processo de dobramento ou realizar a dobra à altas temperaturas a fim de reduzir o limite de escoamento do metal (DIETER, 1981).

Figura 6 - Recuperação elástica



Fonte: Schuler (1998)

As forças que aparecem durante o dobramento estão relacionadas ao formato do punção utilizado no processo, cuja forma pode ser em “V” ou “U”. De acordo com Koninck (1980), no caso de dobras em “V”, a chapa sofre uma flexão que varia conforme a resistência do material, o comprimento dobrado, a espessura e a abertura da cabeça do punção. No caso do punção em formato de “U”, o esforço de dobra é relacionado ainda com a folga entre o punção e a matriz e com o raio de curvatura.

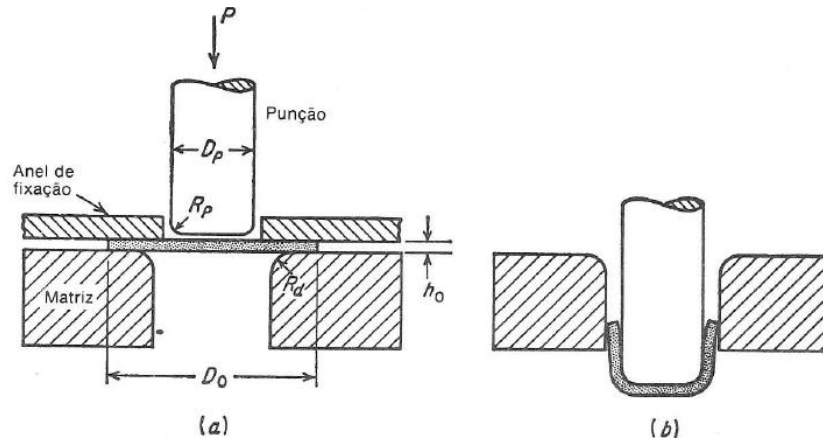
Podem ocorrer deformações indesejadas durante as operações de dobramento, as quais podem levar à não conformidade do escoamento do material, o que implica em variação da espessura da peça dobrada. Essa variação da espessura gera enfraquecimento do material, podendo levar à fraturas nas arestas da peça. Dessa forma, é necessário assegurar a distribuição de escoamento do material na matriz durante a dobra (SCHULER, 1998).

### 2.1.3 Operação de embutimento

A operação de embutimento, repuxo, ou estampagem profunda, é definida por Rossi (1979) como sendo o processo pelo qual se transforma uma chapa plana de metal em um corpo oco, com um ou mais golpes da prensa para atingir a geometria final da peça. Na Figura 7, é representado esquematicamente o processo de estampagem profunda de uma chapa. O embutimento pode ser de simples efeito, sem dispositivo para prender a chapa e

atingindo uma altura limitada de deformação, ou de duplo efeito, com dispositivo para prender o *blank* e sem limitação teórica de altura de deformação (KONINCK, 1980).

Figura 7 – Estampagem profunda



Fonte: Dieter (1981)

Para realizar o procedimento de embutimento, o punção da ferramenta apresenta a geometria interna do produto enquanto a matriz tem o formato de um anel com cantos arredondados, por onde o material da chapa escoava durante o processo (SCHAEFFER, 2004). Para garantir o escoamento correto do material na matriz, é necessário existir uma folga entre o punção e a matriz correspondente a espessura da chapa adicionada de 20% da tolerância máxima de laminação do material (SENAI, 2016). Schaeffer (2004) aponta que essa folga, junto com os dispositivos para prender a chapa evitam o surgimento de rugas na peça final.

O metal é submetido a três tipos de deformação enquanto passa pela operação de repuxo: a região do *blank* situada sob a cabeça do punção é sujeita a um estado biaxial de tração e acaba por ter a sua espessura reduzida, a região interna da chapa é submetida à compressão na direção tangencial e à tração na direção axial resultando no aumento da espessura da chapa. Entre a região contraída e a região comprimida da chapa existe uma região que sofre apenas tração e não tem alteração na espessura (DIETER, 1981).

A força necessária para produzir um corpo cilíndrico e oco por embutimento é a soma da força ideal de deformação, das forças de atrito e da força necessária para uniformizar a espessura, caso se faça necessária, de acordo com Dieter (1981). A força de deformação é crescente durante a operação devido ao encruamento do material, a força de

atrito diminui à medida que a área da chapa em contato com o anel de fixação diminui. A carga de embutimento é aplicada primeiro pelo punção no fundo do corpo cilíndrico e então é transmitida pelas paredes laterais do copo (DIETER, 1981).

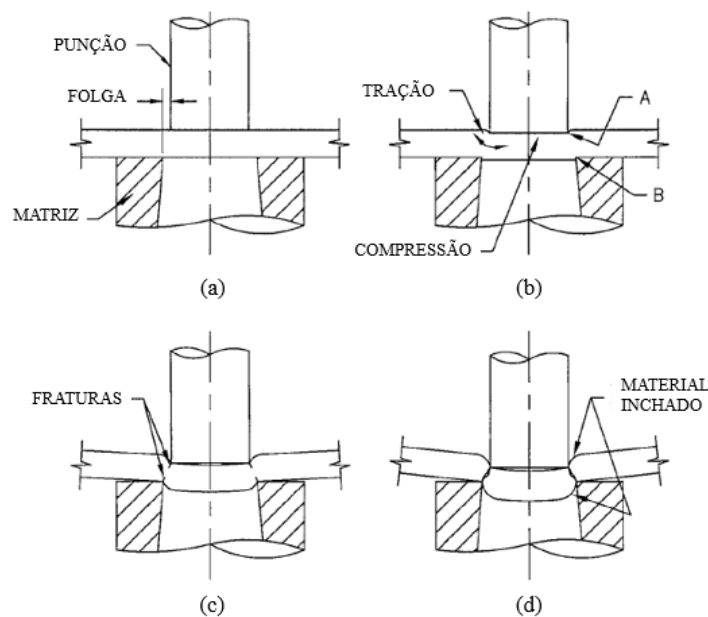
Rossi (1979) aponta que o tipo de material utilizado tem forte influência na qualidade das peças conformadas por estampagem profunda. Materiais não dúcteis resultam em embutidos com rachaduras e sem resistência, ao passo que materiais dúcteis e recozidos são ideais para o processo de embutimento.

## 2.2 Estampagem de corte

### 2.2.1 *Blanking e Fine Blanking*

A preparação dos blanks é um tipo de processo de corte utilizado unicamente para a conformação das chapas metálicas que serão a matéria prima da estampagem. Quando a estampagem de corte dá origem ao blank, o processo é chamado de blanking (DIETER, 1981). As características da estampagem de corte são as mesmas do blanking. Na Figura 8, pode-se observar as etapas do corte de uma chapa em detalhes.

Figura 8 – Etapas do corte por cisalhamento



Fonte: Suchy (1998)

Na primeira fase do processo, o punção se move para baixo e aplica a força de corte no material, gerando tensão de tração nos pontos A e B, mostrados na Figura 8(b). A região da chapa diretamente abaixo do punção é comprimida. Nessa etapa, a pressão de corte aplicada na chapa não ultrapassa o limite de escoamento do material. Conforme o punção continua a descer contra a chapa, a fratura começa a ocorrer nos pontos tracionados, pois a pressão de corte exercida pelo estampo atinge o limite de escoamento. Essas fraturas iniciais são fortemente influenciadas pela folga entre o punção e a matriz, como evidenciado na seção anterior. Ao final no processo, com a descida total do punção, as linhas de fratura se aprofundam e se encontram, resultando no cisalhamento do material e formação do *blank* (SUCHY, 1998)

Dieter (1981) também define o processo de *fine blanking*, caracterizado pela utilização de folgas muito pequenas e produção de *blanks* com melhor qualidade superficial. Atualmente, o processo de *fine blanking* é utilizado em larga escala na indústria automobilística devido as suas vantagens em relação ao processo convencional de *blanking*: o melhor acabamento do *blank* elimina a necessidade de retrabalho da chapa, são permitidas tolerâncias dimensionais menores, além da redução dos níveis de ruído e vibrações durante a produção (SCHULER, 1998).

As forças presentes no processo de corte, seja para *fine blanking* ou *blanking*, vão além do esforço de corte. Durante a penetração do punção na chapa, uma pequena parcela do metal é forçada para a lateral da matriz, gerando um escoamento de material para fora da região de corte. Suchy (1998) explica que esse escoamento é guiado pela ação de esforços de tração e compressão gerados pelos grãos da microestrutura do metal cortado. A movimentação de material durante o corte, se ocorrer de forma excessiva, pode acarretar cavidades ou ondulações na superfície da chapa. Além desses defeitos, esforços adicionais durante o corte podem diminuir o tempo de vida útil das ferramentas de corte (SUCHY, 1998).

O processo de corte por *blanking* ou *fine blanking*, devido à sua importância para a manufatura de peças estampadas, é alvo de diversas pesquisas e propostas de melhorias a fim de reduzir os custos de confecção das ferramentas e melhorar a qualidade final dos *blanks* (ARAVIND, 2020). Em sua pesquisa, Hambli (2003) propôs um algoritmo por meio de simulações utilizando o método de elementos finitos para prever a folga ótima entre o punção e a matriz, a qual impede a formação de fraturas secundárias na região de corte. O cálculo da folga ótima se dá pela minimização da diferença entre os ângulos de direção de



propagação das linhas de início da ruptura nas superfícies cortantes do punção e da matriz. Liu (2018) propõe a estrutura de um penetrador como superfície cortante do punção da ferramenta, a fim de aumentar o raio de curvatura da região de corte e aumentar a vida útil da ferramenta por meio da redução do esforço de corte. O estudo foi feito utilizando simulações pelo método de elementos finitos e definiu os parâmetros de construção do penetrador para uma peça automotiva específica. Choi (1999) desenvolveu um sistema em CAD para a manufatura de chapas de geometria irregular pelo processo de *blanking*, utilizando a teoria plástica e resultados experimentais da estampagem de corte de *blanks* com geometrias complexas. Os parâmetros de processo considerados foram o material, a espessura das chapas, o contorno da peça e o perfil do punção. O sistema desenvolvido foi capaz de prever a distribuição dos cortes na tira da bobina e o layout básico do punção, da matriz e dos demais elementos do estampo de corte. Além disso, existe a padronização das ferramentas simuladas por meio desse sistema, garantindo compatibilidade e precisão dos *blanks*.

### 2.2.2 Ferramental de corte

Segundo Koninck (1980), os estampos de corte podem ser classificados de acordo com a forma da ferramenta ou com o modo de trabalho realizado por ela. No caso da classificação devido ao modo de trabalho, os estampos de corte podem ser divididos em ferramentas de corte simples para peças simples, corte progressivo e corte total. As ferramentas de corte progressivo realizam o processo de *blanking* em várias etapas a partir de uma tira de metal que é alimentada continuamente. A ferramenta progressiva permite uma melhor utilização da tira em relação à distribuição dos recortes do *blank*, reforçando a otimização da utilização do material (SCHULER, 1998), como mostrado na Figura 9. Já as ferramentas de corte total realizam simultaneamente os processos de *blanking*, de furação e recorte da chapa, produzindo peças muito precisas e muito planas (KONINCK, 1980).

Figura 9 - Distribuição dos cortes de blank em uma tira de metal



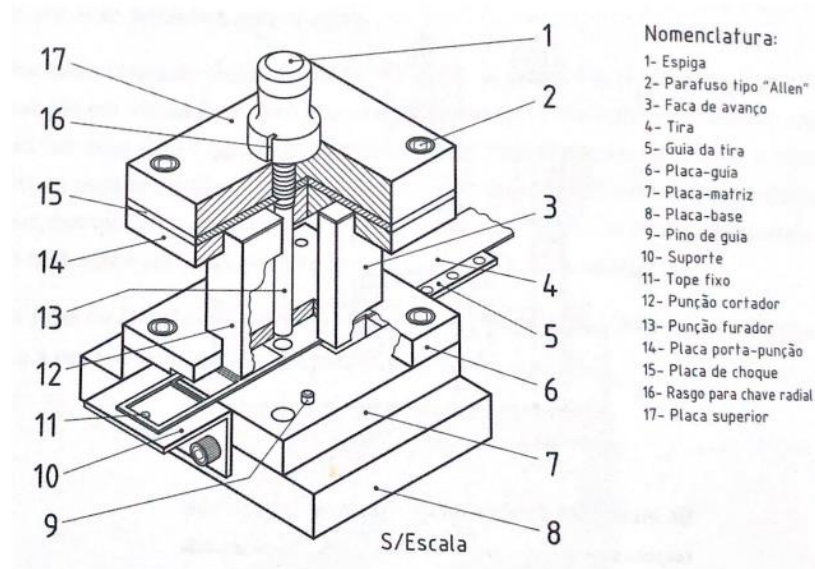
Fonte: Schuler (1998)

Em relação à forma da ferramenta, pode-se ter ferramentas descobertas ou cobertas, ferramentas de colunas e ferramentas com guias cilíndricas, sendo a ferramenta de corte com colunas a mais utilizada na indústria. Os estampos são classificados pela forma levando em consideração os elementos que os formam, os quais serão explicados com mais detalhes na próxima seção. A escolha do tipo de ferramenta de corte empregada no processo deve levar em consideração os fatores produtivos da planta, como a quantidade de peças a ser produzida, a geometria da peça e o tipo de material utilizado, bem como os custos de fabricação e manutenção do estampo e a mão de obra de ferramentaria (KONINCK, 1980).

### 2.2.3 Elementos do estampo de corte

Os elementos de uma ferramenta de corte são os dispositivos mecânicos empregados na construção do ferramental, a utilização de cada elemento depende dos fatores produtivos e técnicos dos produtos cortados (SENAI, 2016). A forma geométrica, o tamanho, o tipo de material e a espessura da chapa produzida são fatores determinantes na escolha dos elementos e do tipo de estampo (SCHULER, 1998). Na Figura 10, são mostrados os elementos de um estampo progressivo de corte, os principais elementos serão aprofundados a seguir de acordo com a definição dada pelo SENAI (2016).

Figura 10 - Elementos do estampo progressivo de corte

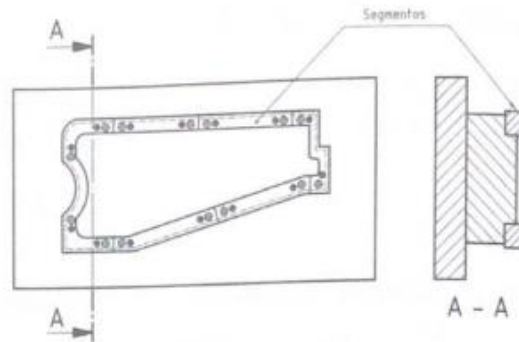


Fonte: SENAI (2016)

- *Espiga:* A espiga tem como principal função a sustentação do conjunto superior das ferramentas de estampagem. Ela faz a fixação entre a ferramenta e o martelo da prensa. A espiga pode ter formato cilíndrico, de corpo chanfrado, com flange ou com rebaixo cônico.
- *Placa de choque:* A placa de choque fica entre a placa porta punção, que sustenta o punção e as colunas de guia, e a placa superior. Esse elemento tem como função absorver o choque produzido pelo golpe da prensa durante a estampagem, impedindo que o choque atinja a placa superior e a espiga.
- *Guias da tira:* Esse elemento é posicionado entre as placas guia e matriz e tem a função de guiar a tira da bobina para região de corte da ferramenta, também servindo como apoio para a tira no caso de ser maior do que a matriz
- *Matriz de corte:* A matriz de corte apresenta perfil igual ao do punção do estampo. A matriz de corte pode ser do tipo inteiriça, quando apresenta perfil contínuo ou do tipo seccionada, quando o perfil é construído em segmentos. As matrizes seccionadas são utilizadas quando o estampo apresenta grandes dimensões, a fim de melhorar as condições de manutenção e reduzir os custos de produção da ferramenta.

- *Placa base*: Tem como função sustentar a matriz e os outros elementos do conjunto inferior, além de absorver os efeitos causados pelos golpes da prensa, como é o caso da placa de choque do conjunto superior.
- *Punção de corte*: Elemento que apresenta perfil idêntico ao da matriz de corte. O punção de corte pode ser de tipo simples, quando o perfil se estende por todo o corpo do elemento, ou de tipo seccionado, quando é fabricado em mais de uma parte. O punção de corte seccionado é utilizado no caso de perfis de corte extensos, como mostrado na Figura 11.

Figura 11 - Punção de corte seccionado



Fonte: SENAI (2016)

- *Facas de avanço*: O sistema de avanço do estampo é responsável por posicionar o material que será cortado, controlar o avanço da tira no caso de ferramentas de corte progressivo e definir o passo da ferramenta. As facas de avanço são punções utilizados para realizar cortes nas extremidades laterais da tira de metal, determinando a largura dos *blanks* cortados.

## 2.3 Estampagem de corte na indústria automobilística

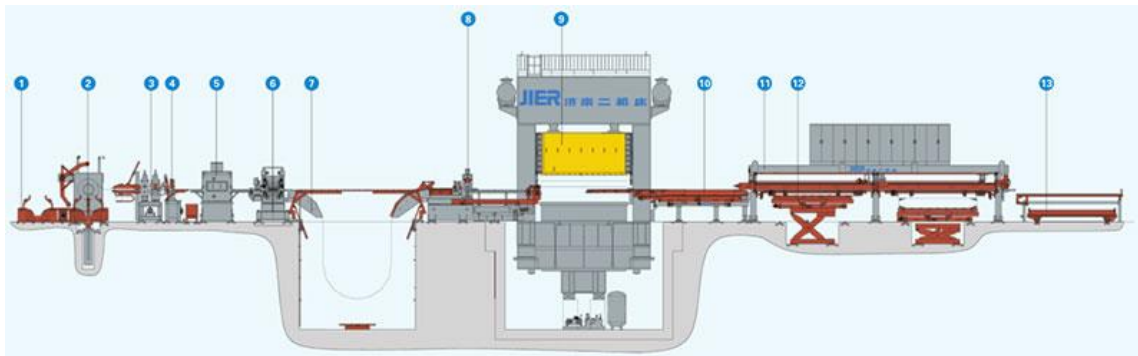
### 2.3.1 Planta de estampagem de corte

As plantas de estampagem, também chamadas de estamparias, abrigam as máquinas necessárias para realizar os processos de corte, dobra e embutimento das chapas metálicas. No caso da estampagem de corte, o processo pode ser feito em linhas de corte ou *blanking*.

As bobinas utilizadas têm espessuras de 0,5 a 3,0 mm e pesam entre 5 e 15 toneladas (SCHULER, 1998).

Para a produção de *blanks* com médias e grandes dimensões, emprega-se máquinas chamadas de *Blanking Lines* ou Linhas de *Blanking* (SCHULER, 1998). Essa máquina apresenta um dispositivo chamado desbobinador, responsável por desenrolar a chapa da bobina e esticá-la para o corte, uma prensa de corte por cisalhamento e empilhadores, para armazenar as chapas conforme são cortadas. Na Figura 12, é apresentado um esquema dos elementos de uma linha de *Blanking*.

Figura 12 - Esquema de uma *Blanking Line*

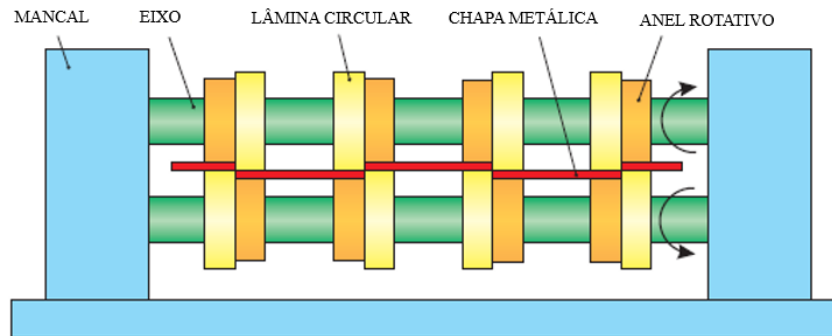


Fonte: JIER (2022)

A tira pode ser cortada por meio de elementos de corte estacionários ou rotativos. No caso de *blanks* com geometria trapezoidal, é recomendável a utilização de ferramentas com superfícies de corte móveis a fim de agilizar o processo (SCHULER, 1998).

O elemento de corte rotativo é chamado de Tesoura Rotativa ou *Slitter*, presente em linhas de corte chamadas *Slitting Lines*. A diferença entre esse tipo de linha e uma *Blanking Line* é o elemento de corte, as tesouras rotativas apresentam discos de metal em um eixo, os quais são responsáveis pelo corte da tira da bobina em tiras de largura menor, produzindo *blanks* de pequenas dimensões (SCHULER, 1998). Na Figura 13, é apresentado um esquema de tesoura rotativa.

Figura 13 - Representação de uma Tesoura Rotativa



Fonte: Schuler (1998)

Outro elemento existente nas estamparias automobilísticas são as ferramentarias. As ferramentarias são responsáveis pelo projeto, construção e testagem dos conjuntos de ferramentas de cada peça estampada pela montadora. A produção de uma peça automotiva por meio de estampagem inclui, geralmente, quatro operações de conformação e a operação de *blanking*, o que significa que para cada peça, existe um conjunto de pelo menos quatro ferramentas, chamado de família de ferramentas (SAKURAMOTO, 2002).

De acordo com Sakuramoto (2002), a confecção de uma ferramenta de estampagem passa por algumas etapas, sendo elas o projeto, a modelagem e fundição, a usinagem 2D e 3D e por fim a fase de testes. O projeto da ferramenta inclui o projeto mecânico dos elementos do estampo necessários para realizar a conformação da chapa na peça desejada. A modelagem das ferramentas inclui o desenho dos elementos em softwares de modelagem 3D, enquanto a fundição utiliza moldes gerados através da modelagem para a criação dos blocos da ferramenta. A usinagem 2D é feita nas áreas planas dos elementos do estampo, que entrarão em contato entre si. A usinagem 3D é feita para dar a forma final dos elementos da ferramenta, feita em máquinas CNC. O teste do estampo é a etapa na qual a ferramenta é montada em uma prensa de testes, que simula os parâmetros da prensa de produção, e são feitos os ajustes necessários na ferramenta.

### 2.3.2 Materiais

Os principais materiais utilizados na indústria automobilística para produção de peças por estampagem são, de acordo com Schuler (1998): aços não ligados, ligas de aço e fósforo, aços endurecidos, aços cromo-ferríticos e aços microligados. A norma que

regulariza os metais utilizados na estampagem de aços-carbono é a NBR 5915, a qual define os graus de estampagem dos aços, a composição química dos aços de acordo com o grau de estampagem, bem como outras características das chapas.

Um conceito muito importante em relação aos aços utilizados na indústria automobilística é a formabilidade dos metais. A formabilidade de um aço pode ser quantificada pelas propriedades mecânicas no metal, determinadas a partir de ensaios de tração. Também é levado em consideração o efeito da espessura, do revestimento do metal e do processo de fabricação da bobina nas propriedades mecânicas para a determinação da formabilidade de um aço. Os requisitos de formação da peça influenciam no nível de qualidade requerida do aço, que pode ser de Qualidade Comercial, Estrutural ou de Deformação. A escolha do aço a ser utilizado é da engenharia de manufatura da planta (FEKETE, 1997).

De acordo com Fekete (1997), os aços endurecidos são aplicados nos painéis externos da carroceria de veículos devido a serem materiais com alta resistência e boa formabilidade, permitindo sua ampla utilização nas etapas da estampagem. Esse tipo de aço também apresenta boa resistência ao envelhecimento, o que se prova útil devido ao tempo que ficam estocados em bobinas antes do processo de estampagem. Além disso, os processos de estampagem aos quais esses aços são submetidos para formar as peças dos painéis externos promovem o envelhecimento do metal, que é completo durante a pintura das peças prontas.

### **2.3.3 Qualidade e defeitos**

Os defeitos mais comuns presentes na estampagem de peças automotivas são o desgaste da ferramenta, engripamento, sujeira, marcas da ferramenta na peça, caroços, rugas e rachaduras. A fim de contornar esses defeitos, uma técnica bastante utilizada é a cromagem das ferramentas de estampagem. Ao revestir a ferramenta por eletrodeposição de cromo, protegem-se os elementos mecânicos do estampo da corrosão e desgaste, responsáveis por defeitos de superfície nas peças estampadas e por encurtar a vida útil do estampo. A cromagem de ferramentas de estampagem também reduz a necessidade de lubrificação dos *blanks*, uma vez que o cromo tem um baixo coeficiente de atrito (MOURA, 2014).

Moura (2014) propõe a utilização de uma técnica eletroquímica para avaliar o comportamento dos revestimentos de cromo nas ferramentas de estampagem de peças automotivas. A técnica proposta permite estudar os parâmetros da deposição de cromo tais

como a composição química, a composição da fase, a microestrutura e espessura da camada de cromo depositada. Após a aplicação do cromo nas ferramentas utilizando a técnica proposta, foi observado redução da interrupção do processo produtivo das peças devido aos problemas de superfície gerados pelas ferramentas, além de significativa redução de peças inutilizáveis devido a defeitos após o processo.

#### **2.4. Estudos relacionados com a temática da monografia**

Nesse subcapítulo serão abordados estudos recentes feitos no campo de projetos de ferramental de estampagem e estampagem de corte de chapas metálicas.

##### *I) Projeto de Ferramenta de Estampagem de Corpos de Prova para Ensaio de Tração em Alumínio Corrugado (ORTIGARA, 2019)*

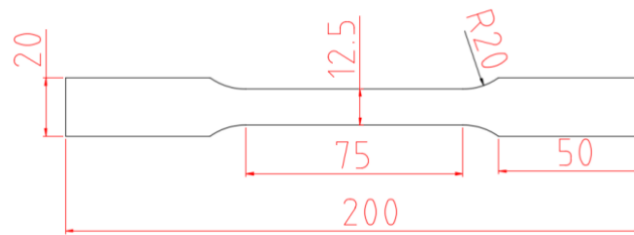
Em seu estudo, Ortigara (2019) propõe um pré-projeto de um estampo de corte para a confecção de corpos de prova para ensaio de tração de alumínio corrugado, utilizado em defletores de calor automotivos.

A primeira etapa do projeto foi coletar as especificações do produto e as informações referentes aos usuários do produto e seu regime de operação. No caso de corpos de prova de ensaio de tração, as dimensões e as características do produto são normatizadas pelas normas ASTM E8E 8M, ASTM E517 e DIN EM 485-2. A partir dos dados recolhidos das normas e da literatura, foi possível definir as características necessárias para o estampo de corte a ser projetado: segurança na operação, qualidade dimensional dos produtos, atendimento aos requisitos de projeto, custos de fabricação, custo de operação, resistência e durabilidade, portabilidade da ferramenta, aproveitamento da capacidade da prensa e necessidade de ajuste da chapa. Além de atender aos requisitos do produto, a ferramenta de corte deve ser adequada à norma NR12 de segurança no trabalho em máquinas e equipamentos.

A segunda etapa do estudo consistiu no projeto conceitual da ferramenta, levando em consideração os dados do produto. O primeiro passo foi o dimensionamento preliminar dos componentes do estampo, que é feito de acordo com a geometria do produto a ser cortado. A dimensão do corpo de prova foi adotada de acordo com as normas ASTM mencionadas e pode ser vista na Figura 14. A espessura da chapa de alumínio foi adotada de acordo com a norma DIN EM 485-2.



Figura 14 - Dimensões dos corpos de prova

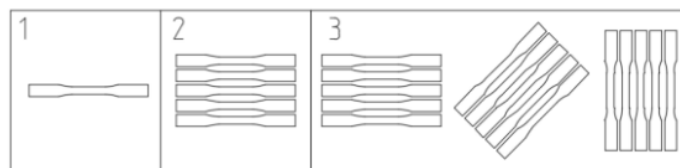


Fonte: Ortigara (2019)

Após o dimensionamento dos elementos do estampo, o segundo passo foi calcular o esforço necessário para o corte de um corpo de prova, levando em consideração o perímetro do produto, a espessura da chapa e a tensão de cisalhamento do material.

O terceiro passo no pré-projeto do estampo de corte foi a simulação do conceito da matriz, gerando três conceitos diferentes, esquematizados na Figura 15: o primeiro, com matriz com cavidade simples, produzindo um produto por vez; o segundo, com matriz com cavidades múltiplas; podendo produzir mais de um produto por golpe e o terceiro, com matriz com cavidades múltiplas orientadas para o ensaio de anisotropia.

Figura 15 - Conceitos para a matriz de corte



Fonte: Ortigara (2019)

O conceito do projeto foi escolhido aplicando o método de Matriz de Decisão, levando em consideração as características do estampo necessárias levantadas na primeira etapa do projeto. O conceito que melhor se adequou, seguindo a metodologia adotada, foi o conceito de matriz com cavidades múltiplas orientadas para o ensaio de anisotropia.

Definidos o conceito e o esforço de corte, foi feito então o detalhamento do conceito, dimensionando a espessura da matriz, o ângulo de saída das peças e a espessura superior da matriz para garantir o ângulo adequado. Também foi determinada a folga entre o punção e a matriz e o material utilizado para a confecção do conjunto.

O quarto passo foi o dimensionamento dos componentes estruturais da ferramenta. As bases inferiores e superiores do estampo de corte foram dimensionadas e o material para a confecção delas também foi selecionado de acordo com a norma SAE/ABNT 1045. Foi determinado o diâmetro das colunas a partir da espessura das bases. Ortigara (2019) aponta que os conjuntos de colunas e buchas devem ser padronizados, a fim de diminuir o custo de produção do estampo, escolhendo um conjunto catalogado por fabricantes que atenda as tolerâncias dimensionais do projeto da ferramenta.

Ortigara (2019) concluiu que um estampo de corte é uma solução eficaz e viável para a produção de corpos de prova para ensaios de tração. Após o dimensionamento dos componentes e simulação do processo, também foi concluído que devem ser feitos estudos futuros levando em consideração o custo dos materiais, da fabricação e o consumo de matéria-prima dos produtos.

## II) *Análise de elementos finitos aplicado ao projeto de punção para corte por cisalhamento em perfis de alumínio (GOEDERT, 2022)*

Goedert (2022) propôs um modelo de simulação para otimização de um punção de corte, a partir do estudo dos concentradores de tensão e de pontos de fragilidade no elemento de uma ferramenta de estampagem de corte. O modelo proposto tem como objetivo a validação de projetos de punção de corte, avaliando o fator de segurança do projeto e otimizando o projeto com a utilização do método de elementos finitos.

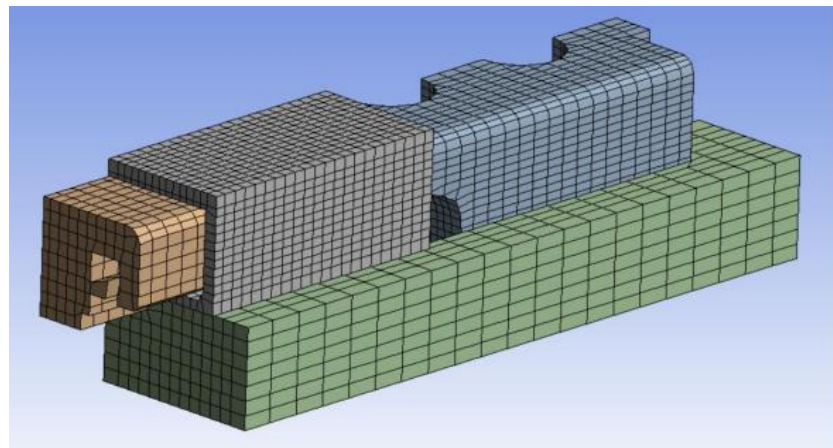
O estudo foi feito em cinco etapas. A primeira etapa consistiu na introdução do estudo de caso: uma ferramenta de corte responsável por retirar uma grande quantidade de material de uma chapa com grossura de alta dimensão. Além disso, a geometria do *blank* cortado é de alta complexidade, sendo necessária a utilização de duas matrizes e um punção. Essas características implicam em regiões concentradoras de tensão no punção, que somadas a um elevado esforço de corte, fazem com que o punção trabalhe sob uma tensão próxima a tensão máxima suportada pelo material.

A segunda etapa do estudo baseou-se na descrição da falha do punção. Foi constatado que ocorre fratura do punção após quatro golpes da prensa na chapa. A terceira etapa foi entrar com os dados e restrições no software Ansys para realizar o estudo pelo método de elementos finitos. Os principais dados fornecidos ao programa são referentes aos materiais simulados: o coeficiente de Poisson e o módulo de elasticidade dos componentes da simulação. Outro fator importante é a escolha do modo de falha do material, definida como

o de máxima tensão de compressão para o punção e as tensões principais para o perfil. Os materiais utilizados para a simulação foram alumínio A6061 para o perfil cortado e aço D6 para o conjunto de matrizes e punção. Após a entrada dos dados, a geometria simplificada foi importada por meio de Solidworks para a criação da malha.

A quarta etapa do estudo consistiu na criação da malha por método cartesiano a fim de reduzir as deformações sofridas pela malha durante a simulação, optando, portanto, por uma malha quadrada. Essa geometria de malha foi escolhida por Goedert (2022) devido ao modelo de dinâmica explícita utilizado nas simulações, que, quando associado a esse tipo de geometria, apresenta baixas distorções. Dessa forma, foram evitadas interrupções durante a simulação. A malha foi criada utilizando o mesmo método para os quatro componentes simulados (perfil, duas matrizes e o punção), visando a uniformidade e proporcionalidade dos elementos, como mostrado na Figura 16. Essas simplificações foram adotadas para facilitar os cálculos e minimizar os efeitos de distorção durante a simulação. Por fim, a quinta etapa do estudo compreendeu a simulação do processo de corte.

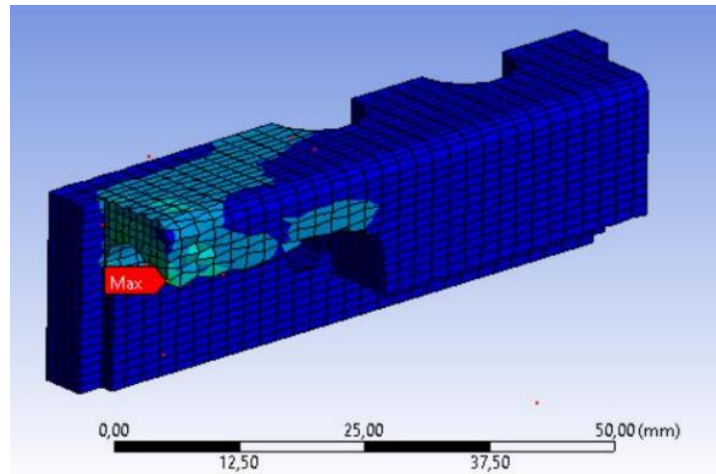
Figura 16 - Malha em conjunto bipartido



Fonte: Goedert (2022)

Após as simulações, foi constatado que o punção era submetido a solicitações simétricas, possibilitando simplificar o modelo para a etapa de solução. A avaliação dos pontos críticos foi feita por meio da tensão equivalente de Von Mises e disponibilizada em escala de cores para melhor identificação dos pontos, como pode ser observado na Figura 19.

Figura 17 - Análise inicial de tensões



Fonte: Goedert (2022)

As hipóteses de falha estipuladas foram: falha por sobrecarga, descartada uma vez que as tensões geradas na simulação levam a um coeficiente de segurança em torno de 3,8; falha devido a fadiga, descartada uma vez que a falha no punção ocorre no início do processo, após quatro golpes; falha devido a problemas de fabricação do punção em relação a inadequação da têmpera, uma vez que não foram constatadas trincas ou fissuras no punção. A geometria do punção estudado corrobora para a ineficiência do tratamento térmico, devido a presença de paredes finas em algumas regiões do punção, levando a irregularidades na dureza e geração de tensões internas elevadas.

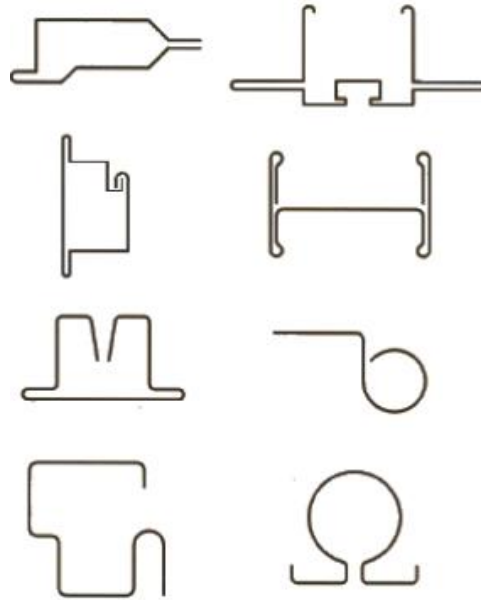
A proposta para a solução da falha encontrada foi a substituição do aço D6 pelo aço SAE 4340 e tratamento térmico feito de forma controlada. Após a mudança desses parâmetros, a simulação foi validada e foram feitos testes práticos, também validados. Goedert (2022) concluiu que a aplicação do método de elementos finitos é viável para a obtenção dos pontos críticos e que a substituição do material e controle do tratamento térmico foi suficiente para solucionar o problema apresentado.

### III) Projeto de matrizes de corte por cisalhamento transversal aplicado ao corte de perfis de aço (SIRTOLI, 2013)

Em seu estudo, Sirtoli (2013) investigou o projeto de matrizes de estampos de corte de perfis para identificar a viabilidade do emprego desse tipo de ferramental no processo de conformação de perfis de seção com geometria especial, exemplificados na Figura 18. O estudo realizado consistiu na análise computacional, através da aplicação do método de

elementos finitos, para a resolução do problema e especificação dos critérios de projeto de novas matrizes de corte.

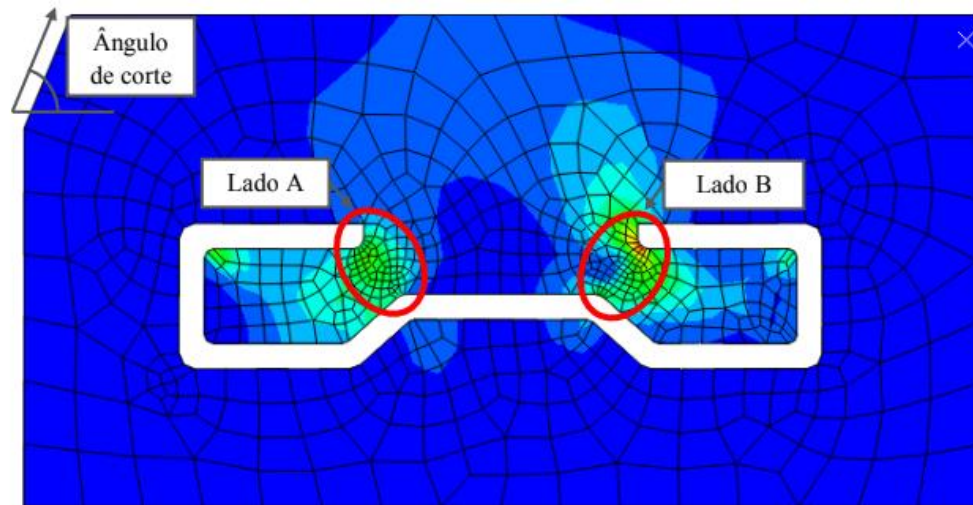
Figura 18 - Seções com geometrias especiais



Fonte: Sirtoli (2013)

A fim de realizar a simulação, o primeiro passo do estudo foi levantar as características do perfil do problema: o dimensionamento do perfil e as propriedades mecânicas do aço que constitui o perfil estudado. Também foram levantadas as informações pertinentes à prensa utilizada no processo, a fim de determinar os esforços de corte. Sirtoli (2013) considerou a folga entre a matriz e o punção, o ângulo de corte, a espessura da matriz e as propriedades mecânicas do material da matriz como variáveis do projeto. Após a determinação das variáveis, a proposta de solução foi desenvolvida de forma iterativa, avaliando o estado de tensões na matriz pelo critério de tensão normal máxima nas regiões de tensão crítica da matriz. Na Figura 19, são apresentados os resultados encontrados por Sirtoli (2013) em relação a concentração de tensão na matriz para um perfil tipo sigma, para um determinado ângulo de corte.

Figura 19 - Regiões de tensão crítica



Fonte: Sirtoli (2013)

Sirtoli (2013) conclui que ângulos menores de corte, próximos a  $20^\circ$ , reduzem as tensões nas regiões críticas da matriz móvel, mantendo-as abaixo do limite de escoamento do material da matriz. Conclui-se que ao reduzir o ângulo de corte, reduz-se a flexão aplicada à região crítica da matriz. O estudo sugeriu também que o tratamento térmico adequado reduz o desgaste das arestas cortantes devido às fortes tensões de compressão durante o processo de corte, uma vez que aumenta a dureza da superfície de corte.

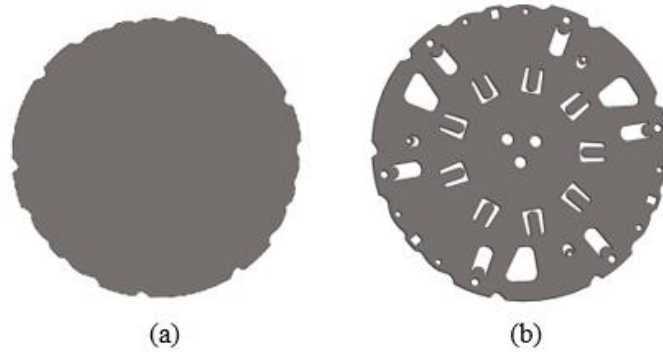
IV) *Pré-projeto de estampo para fabricação da tampa de embreagem para veículos de passeio (ANDRADAS, 2016)*

Andradas (2016) escolheu como objeto do seu estudo o projeto dos estampos necessários para a conformação da tampa de embreagem de veículos de passeio. O objetivo do estudo foi detalhar os conhecimentos necessários para realizar o projeto de ferramentas de estampagem.

Para a concepção dos estampos necessários no processo, foram levantadas quais operações seriam necessárias e elaborou-se croquis dos estampos e dos *blanks* da peça a ser produzida. Foi definido que as etapas de estampagem utilizadas para a fabricação do produto seriam o corte do *blank* e furação, embutimento e furação da peça embutida. Na Figura 20, é apresentado o croqui do *blank* antes e depois da furação. Andradas (2016) concebeu o desenho do *blank* visando a geometria final da peça, com o perfil da borda do *blank* sendo o

perfil da peça já pronta, ilustrado na Figura 20.a. Na Figura 20.b, é apresentado o *blank* após o processo de furação.

Figura 20 - Geometria do *blank*



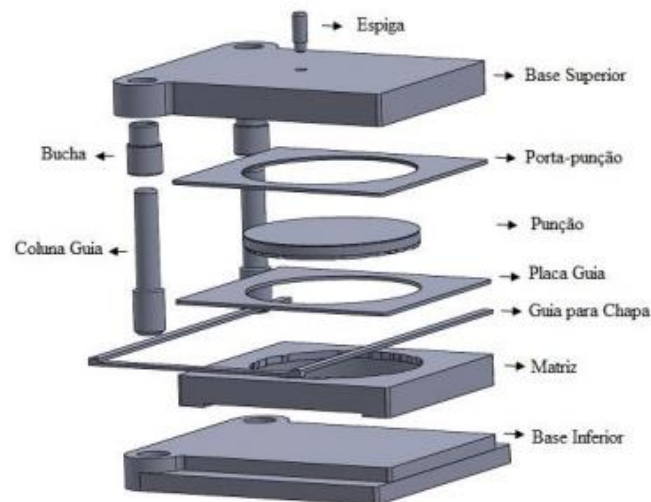
Fonte: Andradas (2016)

A definição da geometria do *blank* foi feita através de medições de um modelo da tampa de embreagem já pronta, determinando-se o diâmetro e a espessura da chapa usada no processo de corte. A escolha do material cortado foi feita a partir do contato com fornecedores do setor automotivo fabricantes dessa peça, sendo escolhido o aço SAE 1008. Uma vez feita a definição do material a ser processado e da geometria do *blank*, pôde-se calcular a força necessária ao corte, levando em consideração o limite de existência a ruptura do aço, o perímetro do *blank* e a espessura da chapa.

Após as definições iniciais dos conceitos envolvidos na produção da tampa da embreagem, foram feitos os cálculos para o dimensionamento correto dos elementos das ferramentas e os desenhos em 3D dos conjuntos. Para o dimensionamento do estampo de corte, o material adotado para matriz e punção foi o aço AISI D2, escolhido por Andradas (2016) por ser apropriado para trabalho a frio sob grandes esforços. Foram calculados os elementos principais do dimensionamento de estampos de corte: a espessura da matriz, a folga entre o punção e a matriz, a altura e a largura da guia da chapa, o diâmetro do punção – o qual foi aproximado à uma circunferência para simplificação dos cálculos – e o comprimento de flambagem do punção. Também foi escolhido o material da placa guia, do porta punção e das bases superior e inferior do estampo: aço SAE 1020 devido a disponibilidade do material no ambiente fabril. Esses elementos também foram dimensionados no projeto, sendo calculadas a espessuras de cada um e as larguras das bases. Foi concluído por meio dos cálculos que a placa de choque não seria necessária, uma vez

que a relação entre a força de corte e a pressão específica exercida sobre o punção teve valor calculado inferior ao valor mínimo necessário para a utilização desse elemento. Andradadas (2016) ainda realizou os cálculos de dimensionamento das colunas de guia, das buchas e da espiga. Na Figura 21, é apresentado o esquema do estampo de corte dimensionado.

Figura 21- Desenho do conjunto do estampo de corte



Fonte: Andradadas (2016)

A matriz do estampo de repuxo foi concebida levando em consideração os elementos do *blank*, como o perfil da borda e os furos. O dimensionamento dos estampos de furação e de embutimento não serão abordados por se distanciar do tema proposto nesse trabalho.

Andradadas (2016) concluiu que é pertinente a realização de análises dos elementos dos estampos via método dos elementos finitos antes da confecção das ferramentas. Os dados calculados durante o dimensionamento podem ser utilizados como dados de entrada para as simulações. A importância da realização dessas simulações se dá na realização da necessidade de modificações dos materiais escolhidos ou dos conceitos iniciais adotados na geometria do *blank*.

V) *Design and Analysis of an Industrial, Progressive Die for Cutting and Forming* (SKAMPARDONIS, 2021)

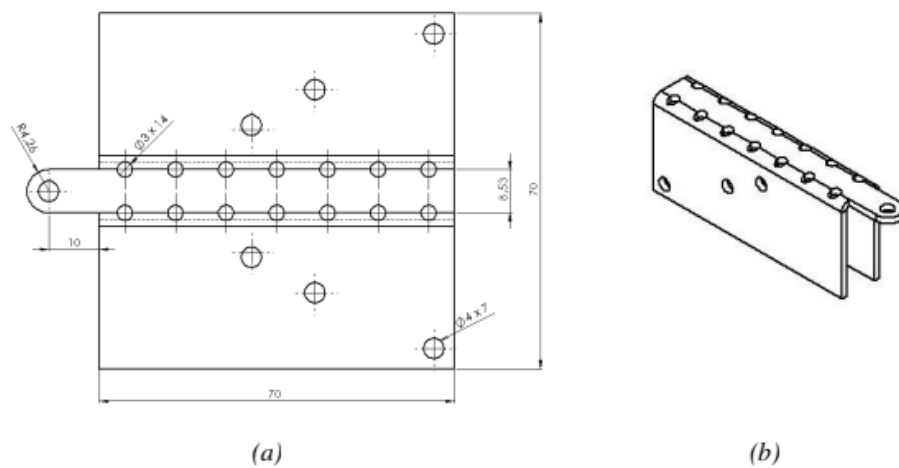
O objetivo do estudo de Skampardonis (2021) foi projetar uma ferramenta de estampagem para reduzir a quantidade de estágios do processo de conformação de uma peça. O projeto do estampo visou unir os processos de corte, furação e dobra em uma única



etapa de processo, a partir do dimensionamento da ferramenta e simulações pelo método dos elementos finitos.

As etapas de corte e furação formam o *blank* da peça em questão, apresentado na Figura 22.a, enquanto o dobramento finaliza a conformação da peça, apresentada na Figura 22.b. A geometria do *blank* foi determinada pelo comprimento, largura, diâmetro dos furos e espessura da chapa e o material da peça foi escolhido como aço inoxidável 316L. De posse desses dados, foram calculadas as forças envolvidas no processo e as dimensões dos elementos do estampo.

Figura 22 - Esquema da peça a ser estampada



Fonte: Skampardonis (2021)

A força total envolvida no processo foi considerada por Skampardonis (2021) como a somatória entre a força de dobramento e a força de corte, sendo a primeira acrescida de 20% do seu valor para levar em conta a ação do atrito entre os componentes da ferramenta. Devido à combinação de dois processos de estampagem em uma única etapa, o centro de pressão da ferramenta precisou ser definido a fim de garantir o funcionamento da ferramenta.

Por se tratar de um processo envolvendo dobramento, Skampardonis (2021) precisou levar em consideração o efeito mola, ou recuperação elástica. A fim de evitar que o efeito mola aconteça, é necessário dobrar a chapa em um raio menor do que o desejado para obter a peça. Para tal, o raio do efeito mola foi calculado com base no raio inicial, na espessura da chapa e nas propriedades do material da chapa: resistência ao escoamento e módulo de Young. Esse raio foi então utilizado para calcular o ângulo do efeito mola e o fator de

recuperação elástica, o qual resultou em um valor inferior à 1, garantindo que não ocorrerá o efeito mola durante o processo.

Após o cálculo das forças e das variáveis do processo, deu-se início ao dimensionamento do estampo. Foram definidos todos os elementos do estampo, bem como seus materiais. Para as bases inferior e superior do estampo, foram calculadas a espessura e a margem. Para o conjunto matriz-punção, calculou-se a folga entre os elementos e as dimensões de comprimento e largura, além das espessuras da placa superior e da placa porta-punção. O comprimento dos punções de furação, corte e dobra foi calculado separadamente. Também foram determinados os diâmetros das colunas do estampo.

A etapa seguinte do estudo foi a simulação do estampo dimensionado através do método de elementos finitos aplicado aos principais componentes da ferramenta. Skampardonis (2021) aplicou o critério de falha de Von Mises aos elementos do estampo em simulação e concluiu, com o auxílio do software, que os elementos estavam todos sob tensão inferior ao limite de ruptura, aprovando então o projeto de estampo proposto.

## **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **3.1 Detalhamento e análise do problema**

O problema proposto é baseado na adequação da planta de estampagem ao processo de manufatura enxuta, eliminando gargalos de processo e movimentações sem valor agregado no chão de fábrica. O foco é no processo de preparação das chapas para estampagem, visando absorver todas as etapas do corte da bobina em uma única máquina a partir do projeto de uma ferramenta para corte por cisalhamento dos *blanks*. Essa ferramenta deve possuir dimensões que atendam à geometria das peças selecionadas para o projeto e deve também se adequar ao maquinário já existente na planta.

### **3.2 Exigências normativas de projeto**

A montadora onde foi realizado o projeto possui as suas próprias normas de fabricação de estampos, a fim de manter a padronização das ferramentas utilizadas em todas as suas plantas na América Latina. Além das normas da empresa, também foram levadas em consideração as normas que abordam a segurança das operações e equipamentos no Brasil, como a NR 12 que regulamenta a Segurança no trabalho em máquinas e equipamentos, utilizada para pintar os elementos móveis da ferramenta e realizar os travamentos de segurança necessários.

### **3.3 Seleção das peças para o projeto**

A primeira etapa do projeto do novo estampo foi a seleção das peças cujas geometrias permitiriam a realização do corte em uma única ferramenta. A fim de realizar essa seleção, foi feito um levantamento de todas as peças cortadas inicialmente na prensa de corte automática e que passam pelo corte final na prensa manual. Observou-se que existiam pelo menos cinco *blanks* de peças diferentes, porém com linhas de corte semelhantes e dimensões de passo próximas, que poderiam ser cortadas no mesmo estampo de corte. Na Tabela 1 estão dispostas as dimensões dos *blanks* selecionados para o projeto. As peças têm geometria retangular, conforme mostrado na Figura 23, na qual o comprimento do *blank* é o

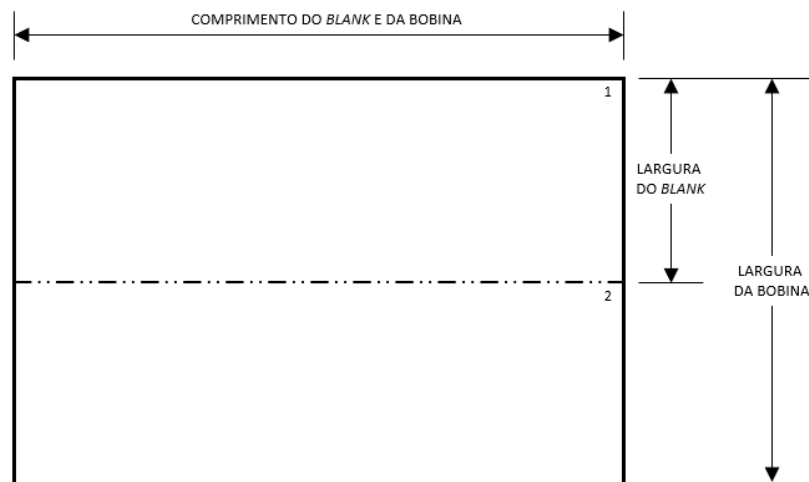
passo da bobina e a largura é a metade da largura da bobina. São produzidos dois *blanks* a cada golpe da prensa.

Tabela 1 - *Blanks* selecionados para o projeto do estampo de corte

Peça	Largura da peça (mm)	Comprimento da peça (mm)	Largura da bobina (mm)	Passo da bobina (mm)	Espessura da peça (mm)
A	750	1690	1500	1690	0,8
B	500	1680	1000	1680	0,8
C	710	1695	1420	1695	0,8
D	620	1670	1240	1670	1,0
E	390	1725	780	1725	0,8

Fonte: Autora

Figura 23 - Geometria dos *blanks* selecionados para o projeto



Fonte: Autora

Uma vez adquirido o conhecimento em relação à geometria das chapas, pôde-se obter um conceito inicial para a linha de corte da ferramenta, sendo necessário apenas cortes retos.

### 3.4 Seleção da base ferramental para o projeto

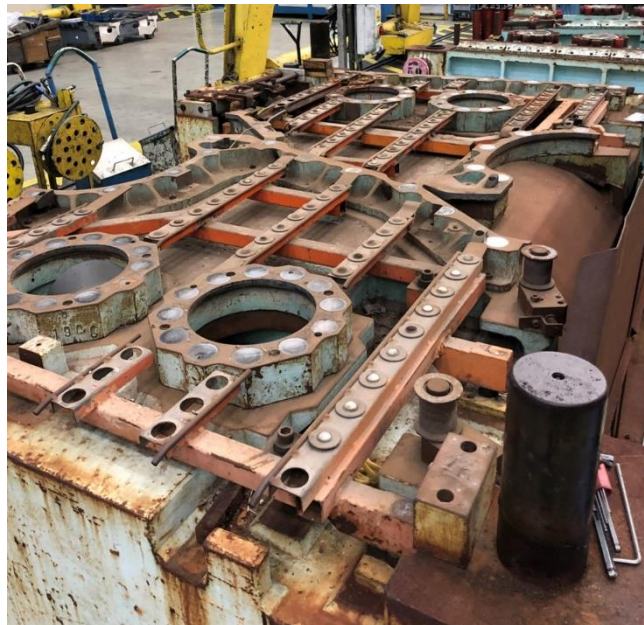
O projeto deve estar alinhado ao sistema de manufatura da montadora e aos conceitos de *Lean Manufacturing*, portanto deve visar o menor custo de execução e baixos impactos ambientais. A solução para esse primeiro requisito foi a reutilização de estampos em desuso pela montadora para a base e os diferentes elementos da ferramenta. As ferramentas entram em *status* de desuso, chamado *disposal*, quando o modelo do veículo deixa de ser fabricado e permanecem armazenadas na planta aguardando o correto descarte.

As ferramentas candidatas a serem reutilizadas foram aquelas que atendiam ao dimensional das peças que seriam cortadas e ao dimensional da prensa de corte:

- Distância mínima entre colunas: 1650 mm
- Comprimento máximo: 3000 mm

A ferramenta escolhida foi aquela que possuía dimensionais imediatamente próximos às limitações impostas. Na Figura 24, é apresentada a ferramenta escolhida para a realização do projeto, em seu estado inicial.

Figura 24 - Ferramenta de *blank* selecionada para a reutilização

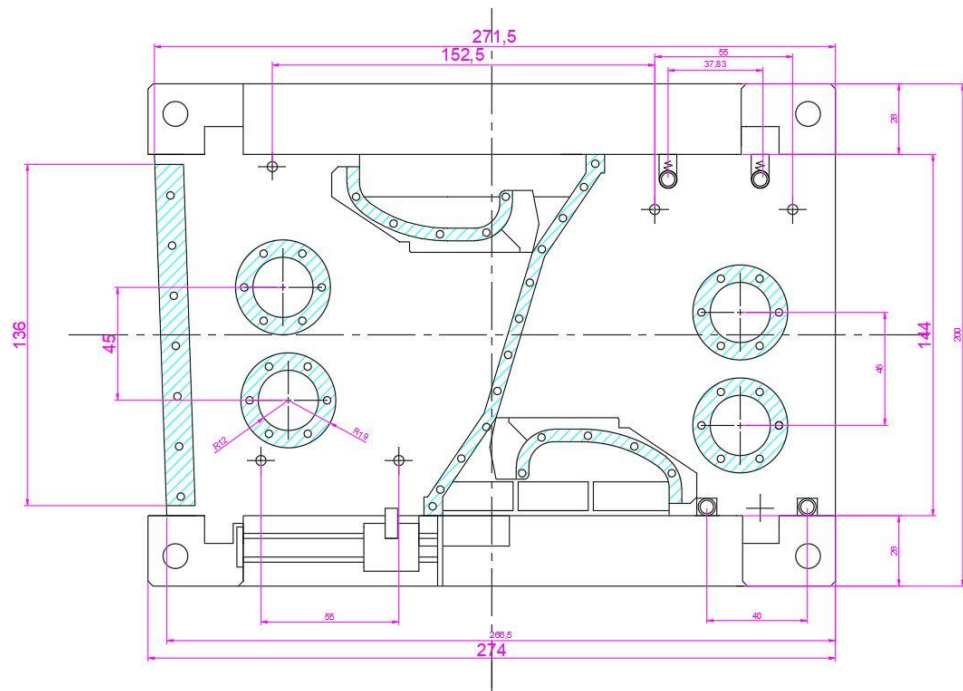


Fonte: Autora

### 3.5 Desenho do ferramental de corte

Na Figura 25, é apresentado o desenho realizado em CAD da base inferior da ferramenta em *disposal*, contendo as colunas, pontos de fixação dos pinos de guia da chapa e da cama de esferas, a pinça de movimentação dos *blanks* e as facas de corte.

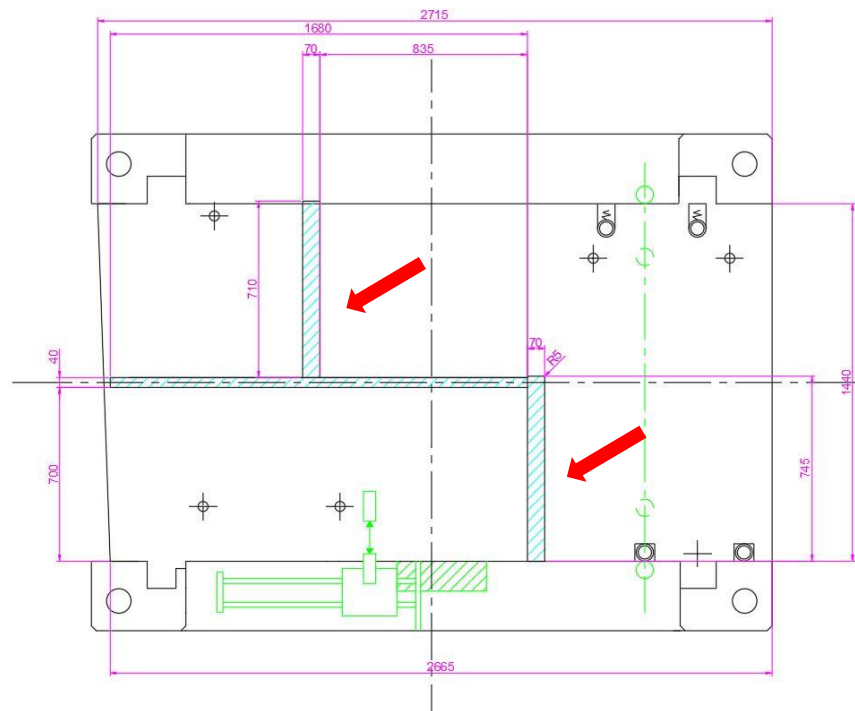
Figura 25 - Desenho da base inferior da ferramenta inicial



Fonte: Autora

Na Figura 26, é apresentado o desenho em CAD da nova linha de facas, representadas pelos elementos hachurados em azul. Os pontos de fixação das guias, da cama de esferas e da pinça foram mantidos no novo projeto. O projeto inicial propunha um dispositivo de fuso para ajuste das guias em relação às diferentes larguras cortadas na ferramenta. Esse dispositivo foi desenhado em verde, a fim de destacar o conjunto.

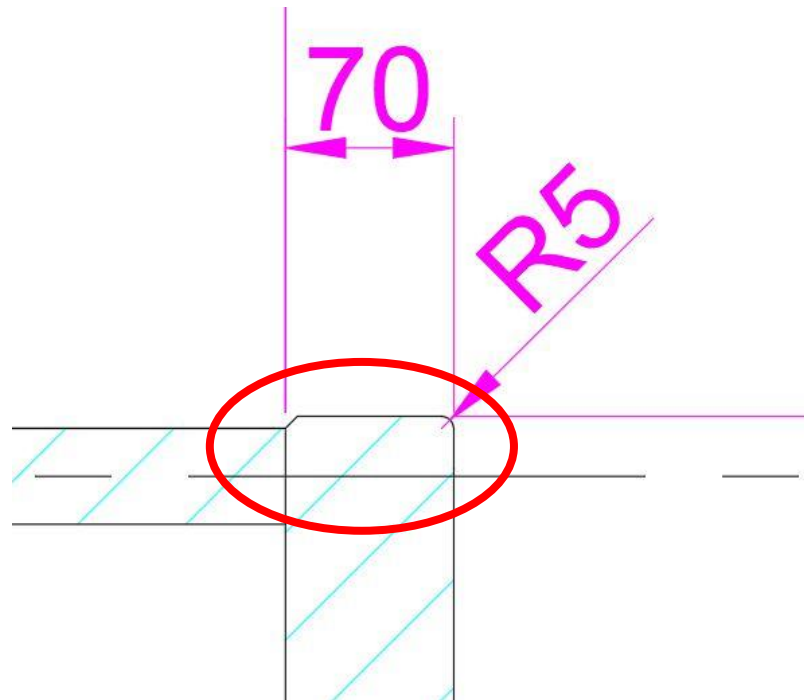
Figura 26 - Desenho da nova base inferior da ferramenta



Fonte: Autora

Na Figura 27, é apresentado o detalhe da sangria na região da aresta das facas de corte. A sangria existe nessa região para eliminar a produção de limalhas durante a operação de corte. O comprimento da sangria é a diferença entre o maior e o menor passo da bobina, a altura da sangria é máxima possível para não interferir no processo de estampagem dos *blanks* na linha de prensas. O chanfro da sangria garante que não sejam formadas arestas cortantes nas chapas, garantindo a segurança dos operadores durante o manuseio dos *blanks*.

Figura 27 - Detalhe da sangria da aresta das facas



Fonte: Autora

### 3.6 Construção da nova ferramenta de corte

Após a seleção da ferramenta em descartada para o projeto e do desenho da região de corte, o estampo entrou na fase de construção pela ferramentaria da planta. O dimensionamento dos elementos da ferramenta foi feito simultaneamente ao processo de construção. As etapas da construção do estampo seguiram a seguinte ordem:

- *Usinagem de regiões de interferência:* os elementos da ferramenta que não seriam utilizados foram retirados das bases inferior e superior para que fosse possível adicionar os novos componentes. Na Figura 28, é apresentada a base inferior da ferramenta após a etapa de retirada com componentes, enquanto na Figura 29 é apresentada a base após a usinagem.



Figura 28 - Base inferior da ferramenta após limpeza



Fonte: Autora

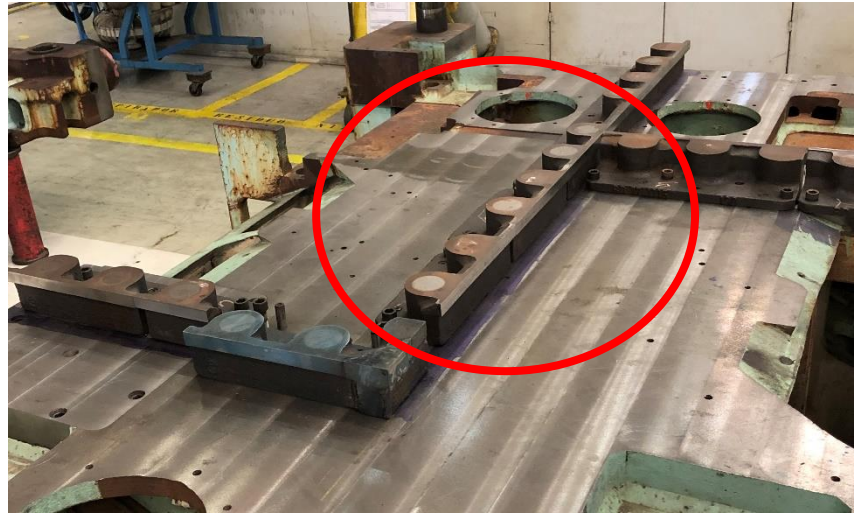
Figura 29 - Base inferior da ferramenta após usinagem



Fonte: Autora

- *Fixação das facas da base inferior:* as facas da base inferior foram fixadas utilizando coordenadas xy para melhor posicionamento e alinhamento. Na Figura 30 é apresentada a base inferior após a fixação das linhas de faca da matriz.

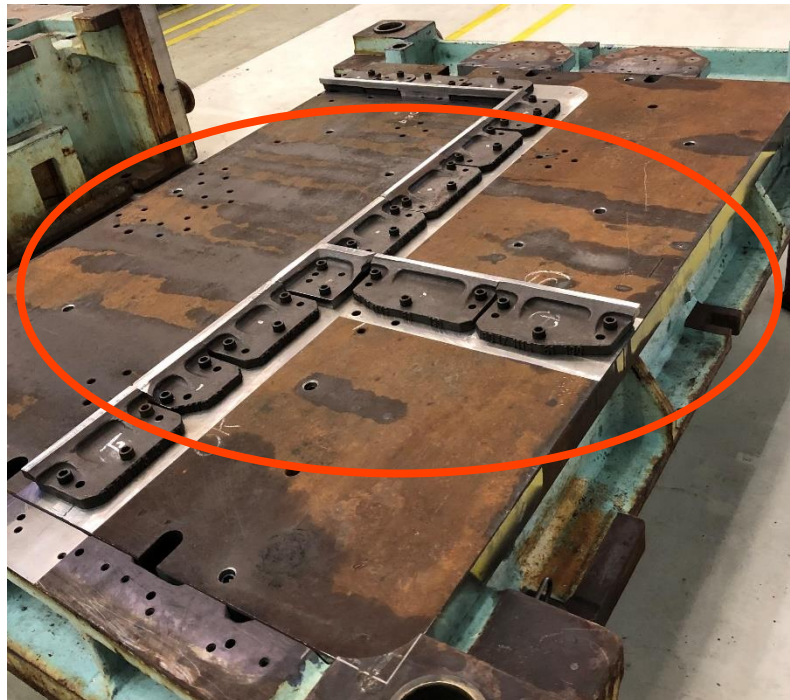
Figura 30 - Ferramenta após a fixação das linhas de facas



Fonte: Autora

- *Usinagem, fixação de placas e montagem das facas:* foi utilizado uma placa com espessura de 70 mm cobrindo toda área da base superior a fim de possibilitar a fixação das facas do punção, na base superior da ferramenta. Na Figura 31, é apresentada a base superior da ferramenta após essa etapa.

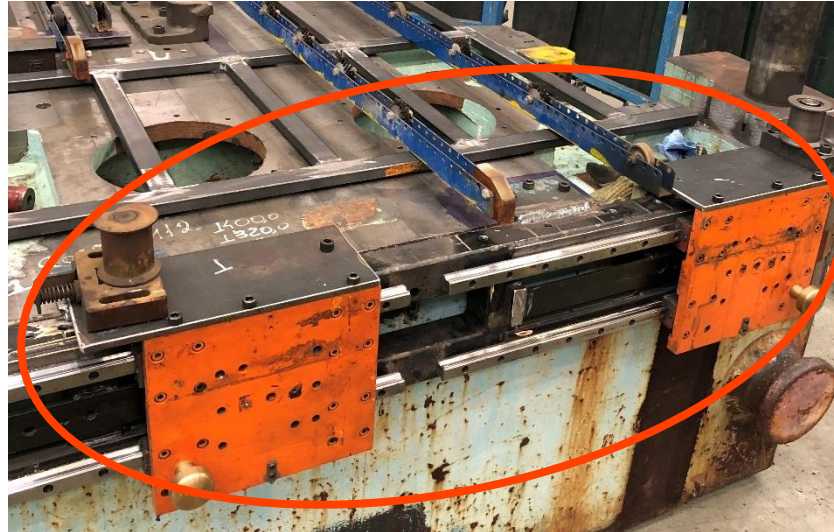
Figura 31 - Base superior da ferramenta após montagem



Fonte: Autora

- *Adição de roletes-guias para posicionamento da bobina:* confecção de um sistema de guias que permitem ajustes para atender diferentes dimensões de bobinas e fixação do sistema na região de entrada da chapa na ferramenta. Na Figura 32, é apresentado esse dispositivo já fixado na ferramenta, em laranja, seguindo a norma NR 12.

Figura 32 - Roletes guia fixados na ferramenta

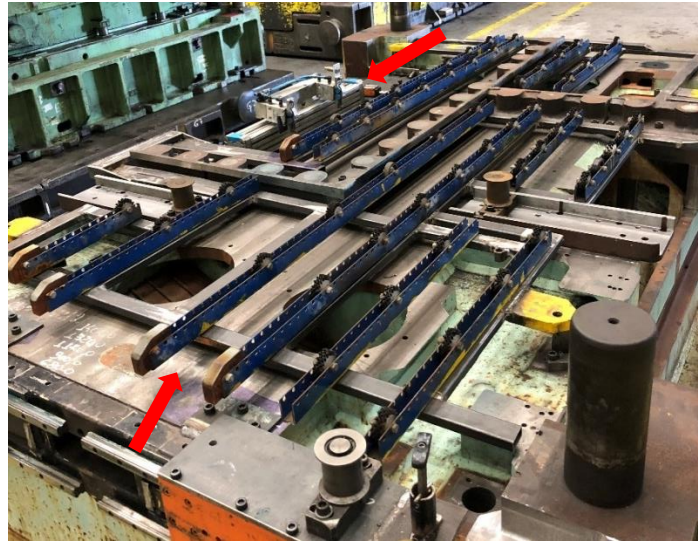


Fonte: Autora

- *Adição de pistão pneumático:* etapa de adição de pistões com pinças pneumáticas para o arraste do *blank* recortado, auxiliando a retirada dos *blanks* da ferramenta.
- *Confecção berço de transporte de blank:* foi confeccionado um berço com estrutura de Metalon de 40 x 20 mm com roldanas para auxílio do transporte do *blank* sobre a ferramenta. Na Figura 33, é apresentada a ferramenta após a edição desse componente.



Figura 33 - Ferramenta após a adição do berço de transporte de *blanks*



Fonte: Autora

- *Usinagem de alívios da placa da base superior:* nas regiões da base inferior onde foram fixados o pistão pneumático e as guias de localização de bobina, foi necessário realizar usinagem na placa da base superior para eliminar a interferência desses componentes.
- *Verificação da folga:* verificação da folga em prensa entre facas da base superior com inferior considerando espessura da bobina e teste da ferramenta.
- *Pintura da ferramenta e acabamentos:* foi realizada pintura da estrutura da ferramenta, completando a revitalização da ferramenta.

### 3.7 Cálculos do estampo de corte

#### 3.7.1 Esforço de corte

O esforço de corte pode ser calculado através da relação entre o perímetro da peça a ser cortada, a espessura da chapa e a resistência ao cisalhamento do material, de acordo com a Equação (1) (SENAI, 2016).

$$E_C = P * e * K_C \quad (1)$$

Onde  $E_C$  representa o esforço de corte em kgf,  $P$  é o perímetro do *blank* em mm,  $e$  é a espessura do *blank* e  $K_C$  é a tensão de cisalhamento do material cortado, em kgf/mm<sup>2</sup>. Rossi (1979), relaciona a tensão de tensão de tração com a tensão de cisalhamento da seguinte maneira:

$$\frac{3}{4} * \sigma_r \leq K_C \leq \frac{4}{5} * \sigma_r \quad (2)$$

Onde  $K_C$  representa a tensão de cisalhamento em MPa e  $\sigma_r$  representa a tensão de ruptura por tração material.

### 3.7.2 Espessura da placa matriz

A placa matriz deve ter uma espessura mínima, tal que resista ao esforço de corte exercido pelos punções da base superior da ferramenta sem que ocorra o rompimento da mesma. A espessura da matriz pode ser calculada pela Equação (3) (SENAI, 2016).

$$E = \sqrt[3]{E_C} \quad (3)$$

Onde  $E$  representa a espessura da matriz em milímetros e  $E_C$  corresponde ao esforço de corte, em kgf.

### 3.7.3 Folga entre punção e matriz

O punção e a matriz do estampo desenvolvido nesse projeto são as facas de corte, portando a folga se deu entre o conjunto de facas superior e inferior. A folga entre punção e matriz pode ser calculada conforme a Equação (4) (SENAI, 2016).

$$F = \frac{e}{20} \quad 4)$$

Onde  $F$  é a folga entre punção e matriz em milímetros e  $e$  corresponde à espessura da chapa a ser cortada, também em milímetros.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Dimensionamento do estampo de corte

A Tabela 2 apresenta os resultados do dimensionamento do estampo de corte para cada uma das cinco peças envolvidas no projeto. A montadora utiliza aços com limite de escoamento na faixa de 270 a 700 MPa no processo de manufatura dos veículos, de acordo com as normas internas da empresa. Dessa forma, foi adotado como valor médio 485 MPa para as peças em questão.

Tabela 2 - Memorial de cálculo para dimensionamento da ferramenta de corte

Peça	Perímetro do <i>blank</i> (mm)	Esforço de corte (kgf)	Espessura da matriz (mm)	Folga (mm)
Peça A	4880	149635	53,1	0,04
Peça B	4360	133690	51,1	0,04
Peça C	4810	147488	52,8	0,04
Peça D	4580	175545	56,0	0,05
Peça E	4230	129704	50,6	0,04

Fonte: Autora

O esforço de corte é uma variável de processo, ou seja, ajustada durante a produção, cujo valor influencia no dimensionamento da placa da matriz e da folga. De acordo com a Equação (1), o esforço de corte é o produto do perímetro do *blank* a ser cortado, apresentado na segunda coluna, pela espessura da peça e da tensão de cisalhamento do material. A peça D apresenta maior esforço de corte, embora não tenha o maior perímetro, pois apresenta a maior espessura entre as demais chapas. Dessa maneira, a espessura da matriz e a folga foram delimitadas pelos valores calculados para a peça D.

A dimensão da folga encontrada foi cinco centésimos de milímetro, de acordo com o esperado no processo de *fine blanking*, caracterizado pelo emprego de folgas muito pequenas. A variação de um centésimo de milímetro entre a folga das demais peças e a folga escolhida não interferiu na qualidade dimensional dos *blanks*, verificada durante o processo de teste da ferramenta.

Para a placa matriz, foi escolhida a maior dimensão dentre as dimensões calculadas a fim de suportar o esforço de corte exercido durante o processo de corte da peça D, que foi o maior esforço calculado. Dessa forma, a resposta da placa para os demais esforços foi positiva em relação à resistência ao esforço aplicado.

## 4.2 Construção da ferramenta de corte e testes

A construção do novo estampo de corte seguiu os passos descritos por Sakuramoto (2002): projeto, usinagem 2D e 3D e testes. A etapa de modelagem e fundição dos blocos da ferramenta não foi feita, uma vez que esses componentes foram reutilizados a partir da estrutura do estampo de corte descartado. A usinagem foi feita nas placas da matriz e do punção. Os demais componentes do estampo, como as facas de avanço, os roletes de guia da bobina, o pistão pneumático e o berço com roletes também foram reutilizados a partir de outros estampos descartados pela montadora.

Os testes da ferramenta foram realizados em duas etapas: a primeira foi realizada na prensa específica para testes, simulando as condições de processo reais do estampo na linha de corte, onde foram recortados três *blanks* a partir das tiras de aço de cada uma das cinco peças. Os *blanks* passaram pela avaliação de qualidade da montadora e depois de validados seguiram para o processo de estampagem. As peças estampadas também passaram por análise de qualidade e análise dimensional. Na Figura 34, são apresentados os *blanks* de uma das peças selecionadas para o projeto, recortados a partir do novo estampo.

Figura 34 - *Blanks* recortados pelo novo estampo durante os testes



Fonte: Autora

A segunda etapa dos testes foi na linha de corte da planta de estampagem. Nessa etapa, a ferramenta foi colocada na prensa e as peças foram processadas, com alimentação contínua do estampo e corte de um mínimo de trezentos *blanks*. Foram feitas análises de qualidade

por amostragem durante o processo e o lote foi validado. O mesmo procedimento foi feito para as peças estampadas a partir desses *blanks*. Na Figura 35, são apresentadas as peças estampadas a partir dos *blanks* recortados pelo novo estampo. Após os testes, a ferramenta passou por uma avaliação estrutural pela ferramentaria da planta e foi validada. Portanto, considerou-se correto o dimensionamento do estampo.

Figura 35 - Peças estampadas a partir dos *blanks* recortados pelo novo estampo de corte



Fonte: Autora

### 4.3 Impactos no processo produtivo da planta

A alteração na cadeia de produção que se seguiu da eliminação de uma etapa do processo de corte de cinco *blanks* levou a montadora mais perto do conceito de Lean Manufacturing. O tempo de produção desses *blanks* foi reduzido em doze horas, equivalendo a pouco mais de um turno de produção. O estoque intermediário entre as duas peças foi reduzido em uma média de três mil itens por dia, o que reduziu também as movimentações dos veículos industriais no chão de fábrica. Os impactos também foram positivos na segurança do trabalho e ergonomia dentro do ambiente fabril, uma vez que houve a eliminação total do risco com a subtração das etapas do processo de corte na prensa manual.

No âmbito ambiental, a montadora reduziu a quantidade de aço descartado em sete toneladas geradas pelo descarte dos estampos. O consumo de aço e ferro também foi reduzido, uma vez que não houve necessidade de compra de material para a produção da



nova ferramenta. Os custos de fabricação foram os menores possíveis, resultando apenas do custo de mão de obra da ferramentaria da planta.

## 5 CONCLUSÃO

O estampo foi construído inteiramente a partir do reaproveitamento de ferramentas de corte que seriam descartados pela planta, gerando um baixo custo de construção. O dimensionamento foi feito com base na literatura e foi validado a partir dos testes da ferramenta e das análises dos produtos e da estrutura do estampo.

Portanto, a construção de uma nova ferramenta de corte de *blanks* a fim de concentrar a produção em uma única prensa de cortes a partir da reutilização de um estampo em desuso se mostrou possível e eficaz, atingindo os objetivos propostos a partir da eliminação de uma etapa da operação, o que eliminou os gargalos operacionais e o risco de segurança e também reduziu a quantidade de aço e ferro consumidos e descartados pela planta.

## REFERÊNCIAS

ANDRADAS, Marianna. **Pré-projeto de estampo para fabricação da tampa de embreagem para veículos de passeio**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2016. Disponível em: <https://app.uff.br/riuff/handle/1/1812>. Acesso em: 17 jul. 2022.

ARAVIND, U.; CHAKKINGAL, Uday; VENUGOPAL, P. A review of fine blanking: influence of die design and process parameters on edge quality. **Journal Of Materials Engineering and Performance**. Chennai, p. 112-144. nov. 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11665-020-05339-y>. Acesso em: 30 abr. 2022.

CHIAVERINI, Vicente. **Tecnologia mecânica: processos de fabricação e tratamento**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill Ltda., 1986.

CHOI, J. C.; KIM, B. M.; KIM, Chul. An automated progressive process planning and die design and working system for blanking or piercing and bending of a sheet metal product. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. Pusan, p. 485-497. jul. 1999. Disponível em: <https://www.proquest.com/openview/3f9447a616d263d8536401ae21eb1b49/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2044010>. Acesso em: 16 jul. 2022.

DIETER, George E. **Metalurgia mecânica**. 3. ed. Rio de Janeiro: McGraw-Hill Ltda., 1998.

FEKETE, James. Overview of sheet metals for stamping. **Journal Of Materials & Manufacturing**. Detroit, p. 699-711. set. 1997. Disponível em: <https://www.jstor.org/stable/44657613>. Acesso em: 17 jul. 2022.

GOEDERT, Matheus. **Análise de elementos finitos aplicados ao projeto de punção para corte por cisalhamento em perfis de alumínio**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Instituto Federal de Santa Catarina, Lages, 2022. Disponível em: <https://repositorio.ifsc.edu.br/handle/123456789/2440>. Acesso em: 17 jul. 2022.

HAMBLI, Ridha; CRUBLEAU, Pascal; RICHIR, Simon. Prediction of optimum clearance in sheet metal blanking processes. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. Angers, p. 20-25. jun. 2003. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-002-1437-5>. Acesso em: 17 jul. 2022.

JIER MACHINE-TOOL GROUP CO., LTD. Blanking Line. Shadong, [2022]. Disponível em: <http://m.jier1937.cn/product/92.html>. Acesso em: 30 jul. 2022.

KONINCK, J; GUTTER, D. **Manual do ferramenteiro: corte - dobragem e embutição das lâminas de metal**. 3. ed. Anvers: Editions Plantyn S.A., 1980.

LIU, Yanxiong *et al.* Investigation of a novel modified die design for fine-blanking process to reduce the die-roll size. **Journal Of Materials Processing Technology**. Wuhan, p. 1-17. abr. 2018. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013618301705>. Acesso em: 17 jul. 2022.

MINISTÉRIO DO TRABALHO. **NR 12: Segurança no trabalho em máquinas e equipamentos**. Brasília: Ministério do Trabalho, 2019.

MOURA, Robson Luiz *et al.* Feasibility study of chromium electroplating process in stamping tooling. **Scientific Research And Essays**. São Paulo, v. 9, n 15, p. 687-695. ago. 2014. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Wendell-Lamas-2/publication/273574926\\_Feasibility\\_study\\_of\\_chromium\\_electroplating\\_process\\_in\\_stamp\\_tooling/links/5cb905e24585156cd7a259f6/Feasibility-study-of-chromium-electroplating-process-in-stamping-tooling.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Wendell-Lamas-2/publication/273574926_Feasibility_study_of_chromium_electroplating_process_in_stamp_tooling/links/5cb905e24585156cd7a259f6/Feasibility-study-of-chromium-electroplating-process-in-stamping-tooling.pdf). Acesso em: 17 jul. 2022.

ORTIGARA, Tiago. **Projeto de ferramenta de estampagem de corpos de prova para ensaios de tração em alumínio corrugado**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2019. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/198365>. Acesso em: 17 jul. 2022.

ROSSI, Mario. **Estampado en frío de la chapa: estampas, matrices, punzones, prensas y máquinas**. 9. ed. Madrid: Editorial Dossat S.A., 1979.

SAKURAMOTO, Carlos. **Estratégia de operações: reposicionando a ferramentaria da General Motors do Brasil**. 2002. Dissertação (Mestrado em Administração) – Fundação Getúlio Vargas, São Paulo, 2002. Disponível em: <https://bibliotecadigital.fgv.br/dspace/handle/10438/5845>. Acesso em: 17 jul. 2022.

SCHAEFFER, Lírio. **Conformação mecânica**. 2. ed. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004.

SCHULER. **Metal forming handbook**. Berlin: Springer-Verlag, 1998.

SENAI. **Ferramentaria de corte, dobra e repuxo: planejamento e construção de estampas**. São Paulo: Senai-SP, 2016.

SIRTOLI, Samuel. **Projeto de matrizes de corte por cisalhamento transversal aplicado ao corte se perfis de aço**. 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ucs.br/xmlui/handle/11338/1839>. Acesso em: 20 ago. 2022.

SKAMPARDONIS, Nikolaos; TSIRKAS, Sotirios; GRAMMATIKOPOULOS, Spyridon. **Design and analysis of an industrial, progressive die for cutting and forming**. 2021. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – University Of The Peloponnese, Patras, 2021. Disponível em: [https://assets.researchsquare.com/files/rs-262802/v1\\_covered.pdf?c=1631858046](https://assets.researchsquare.com/files/rs-262802/v1_covered.pdf?c=1631858046). Acesso em: 20 ago. 2022.

SUCHY, Ivana. **Handbook of die design**. 2. ed. New York: McGraw-Hill Ltda., 1998.