



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



**CAIO GONÇALVES LIMA ALMEIDA**

**JULIANO NUNES DA SILVA**

**TIAGO DOS SANTOS NASCIMENTO**

**USO DO SOFTWARE CAE PARA O PROJETO DE UM ESTAMPO**

**VOLTA REDONDA, 2020**

CAIO GONÇALVES LIMA ALMEIDA

JULIANO NUNES DA SILVA

TIAGO DOS SANTOS NASCIMENTO

## **Uso do Software CAE para o Projeto de um Estampo**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica do UniFOA como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador:

Prof. Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira

VOLTA REDONDA

2020

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

CAIO GONÇALVES LIMA ALMEIDA

JULIANO NUNES DA SILVA

TIAGO DOS SANTOS NASCIMENTO

### **USO DO SOFTWARE CAE PARA O PROJETO DE UM ESTAMPO**

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
“ENGENHEIRO MECÂNICO”**

**APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE ENGENHARIA  
MECÂNICA**

---

**Prof. MSc. Diniz Felix dos Santos**  
**Coordenador**

#### **BANCA EXAMINADORA:**

---

**Prof. Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira**

1º Membro da banca/Orientador/UniFOA

---

**Profa. Dr. Alexandre Fernandes Habibe**

2º Membro da banca/UniFOA

---

**Profa. Msc. Rui Aurélio Barbosa**

3º Membro da banca/UniFOA

Outubro de 2020.

## **DEDICATÓRIA**

Este trabalho é dedicado primeiramente a DEUS por mais este sonho realizado.

Dedicamos ainda a todos aqueles que de certa forma nos ajudaram ao longo de toda a nossa caminhada.

Aos nossos pais, familiares, amigos, professores e todos aqueles que torceram por nós.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradecemos primeiramente a Deus por nos conduzir nesta jornada sem fraquejar mediante as dificuldades.

Aos nossos pais que nos apoiaram e incentivaram e, jamais permitiram que abandonássemos nossos sonhos, por meio, do amor, nos incentivando e sendo nosso alicerce na nossa vida.

Aos nossos orientadores Professores Alexandre Alvarenga Palmeira e Alexandre Fernandes Habibe, por nos orientar e auxiliar com muita sabedoria e eficiência para o progresso do nosso trabalho final.

E a todos que colaboraram direta e indiretamente.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Processo de Conformação Mecânica de Estampagem.....	15
<b>Figura 2</b> - Processos Básicos de Estampagem.....	16
<b>Figura 3</b> - Ferramenta de estampo realizando repuxo .....	17
<b>Figura 4</b> - Operação de Repuxo .....	18
<b>Figura 5</b> - Fluxo do Material .....	18
<b>Figura 6</b> - Desenho de Lamina (Ferramenta utilizada no Processo de Corte).....	19
<b>Figura 7</b> - Simulação de peça repuxada .....	20
<b>Figura 8</b> - Peça após a operação de corte .....	20
<b>Figura 9</b> - Processo de Estampagem de Dobramento .....	21
<b>Figura 10</b> - Representação da Linha Neutra e Tensões de Tração e Compressão .....	22
<b>Figura 11</b> - Fase da Têmpera .....	25
<b>Figura 12</b> - Revenimento em peças de aço .....	26
<b>Figura 13</b> - Cromagem de Escapamentos .....	28
<b>Figura 14</b> - Cromagem do Punção e Matriz.....	29
<b>Figura 15</b> - Aços para Ferramenta .....	32
<b>Figura 16</b> -Varetas de aço AISI D2 .....	33
<b>Figura 17</b> - Diagrama ternário Fe-C-Cr para teor de 13% de Cromo .....	35
<b>Figura 18</b> - Operação de Corte.....	37
<b>Figura 19</b> - Processo de Corte.....	39
<b>Figura 20</b> - Variáveis para o cálculo de corte .....	39
<b>Figura 21</b> - Chapa retangular de aço.....	40
<b>Figura 22</b> - Norma para limite de escoamento e resistência à tração.....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>Figura 23</b> - Ângulo da matriz .....	43
<b>Figura 24</b> - Padrão de Folga .....	<b>Erro! Indicador não definido.</b>
<b>Figura 25</b> – Modelagem da Arruela M16 no Software.....	46
<b>Figura 26</b> - Desenho Arruela M16.....	47
<b>Figura 27</b> - Estudo das tensões fundamentais .....	48
<b>Figura 28</b> - Círculo de Mohr.....	49
<b>Figura 29</b> - Estado Tri-axial .....	50
<b>Figura 30</b> - Elipse da falha de Von Mises .....	52
<b>Figura 31</b> - Redes de Elementos Finitos.....	54
<b>Figura 32</b> - Peça qualquer dividida em elementos finitos .....	55
<b>Figura 33</b> - Elemento finito tetraédrico de dez nós .....	56
<b>Figura 34</b> - Estampo de corte simples.....	59
<b>Figura 35</b> - Estampo aberto com guia para o punção .....	60
<b>Figura 36</b> - Estampo fechado com guias para o punção e suporte para fita.....	60
<b>Figura 37</b> - Estampo com colunas de guias, extrator fixo e suporte para fita .....	61
<b>Figura 38</b> - Estampo com extrator flutuante e porta.....	62
<b>Figura 39</b> - Defeito encontrado no pino guia .....	64
<b>Figura 40</b> - Placa de Choque .....	65
<b>Figura 41</b> - Exemplos de furos na própria peça.....	65
<b>Figura 42</b> - Mola Helicoidais.....	66

<b>Figura 43-</b> Mola Múltipla.....	67
<b>Figura 44-</b> Molas Prato .....	68
<b>Figura 45 –</b> Dados do Material utilizado na simulação .....	69
<b>Figura 46 -</b> Modelagem do Extrator fixo em 3D .....	70
<b>Figura 47 -</b> Extrator Fixo com a malha e posição das forças.....	70
<b>Figura 48 -</b> Modelagem do Extrator móvel em 3D .....	71
<b>Figura 49 -</b> Extrator Móvel com a malha e posição das forças .....	71
<b>Figura 50 -</b> Modelagem do Punção em 3D .....	72
<b>Figura 51-</b> Extrator Móvel com a malha e posição das forças.....	72
<b>Figura 52-</b> Tipos de malhas de elementos finitos .....	74
<b>Figura 53 -</b> Tensão de Von Mises no Extrator Fixo .....	77
<b>Figura 54 -</b> Local de maior sollicitação de tensão no extrator fixo .....	77
<b>Figura 55 -</b> Força Resultante no Extrator Fixo .....	78
<b>Figura 56 -</b> Deslocamento em mm no Extrator Fixo.....	78
<b>Figura 57 -</b> Tensão de Von Mises no Extrator Móvel .....	79
<b>Figura 58 -</b> Local de maior sollicitação de tensão no extrator móvel .....	80
<b>Figura 59 -</b> Força Resultante no Extrator Móvel .....	81
<b>Figura 60 -</b> Deslocamento em mm no Extrator Móvel .....	81
<b>Figura 61 -</b> Tensão de Von Mises no Punção.....	82
<b>Figura 62 -</b> Força Resultante no Punção .....	83
<b>Figura 63 -</b> Deslocamento em mm no Punção .....	83
<b>Figura 64 -</b> Tensão de Von Mises na Chapa .....	84
<b>Figura 65 -</b> Força Resultante na Chapa .....	84

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Estruturação química do aço AISI D2 .....	33
<b>Tabela 2</b> - Propriedades Mecânicas dos Aços .....	41

## LISTA DE EQUAÇÕES

<b>Equação 1</b> – Cálculo da força de corte ( $P_x \times \sigma$ ) .....	33
<b>Equação 2</b> – Cálculo da espessura da matriz de corte (em $=\sqrt[3]{F}$ ).....	35

## RESUMO

O projeto de ferramentas de corte está presente no mundo da engenharia desde muito tempo, nos primórdios todo o cálculo do projeto era feito manualmente e não se haviam meios para simular os valores calculados pelos engenheiros. Com o avanço tecnológico e o avanço industrial, hoje é possível realizar simulações em softwares especializados para se verificar a eficácia dos cálculos realizados manualmente. Nesse cenário, este trabalho tem o propósito de projetar um estampo de corte para a fabricação de arruelas M16 de aço SAE1020, este trabalho teve seu desenvolvimento desde a parte de escolha de materiais para o ferramental e os cálculos de esforços e dimensões de forma analítica, até a parte do desenho e da simulação dos esforços realizados utilizando-se do software Solidworks. Após o projeto do ferramental, o mesmo passou por tratamentos térmicos e superficiais de modo a dar a dureza e aumento de vida útil necessárias para a produção em grande escala das arruelas. Na análise de resultados, foi constatado que os cálculos de esforços foram adequados e que atendiam o projeto do estampo de forma a realizar esforços na chapa de aço maiores que o seu limite de escoamento.

**Palavras-chave:** Software CAE, Simulação, Processo de Conformação, Estampagem.

## **ABSTRACT**

The design of cutting tools has been present in the engineering world for a long time, in the early days all the design calculation was done manually and not earlier to simulate the values calculated by the engineers. With technological and industrial advances, today it is possible to perform simulations using specialized software to verify the effectiveness of calculations performed manually. In this scenario, this work has the purpose of designing a cutting pattern for the manufacture of M16 steel washers SAE1020, this work had its development from the part of choosing materials for the tooling and the calculations of efforts and dimensions in an analytical way, up to the part of the design and simulation of the efforts made using the Solidworks software. After the tooling design, it underwent thermal and surface treatments in order to give the hardness and increase the useful life for the large-scale production of the washers. In the analysis of results, it was found that the effort calculations were adequate and that they met the design of the die in order to make efforts on the steel plate greater than its yield limit.

**Keywords:** CAE Software, Simulation, Forming Process, Stamping.

# SUMÁRIO

## Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	14
1.1. Objetivo.....	15
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	15
2.1. Processos Básicos de Estampagem .....	15
2.1.1. Estampagem .....	15
2.1.2. Repuxo .....	16
2.1.3. Corte.....	19
2.1.4. Processo de Dobramento .....	21
2.2. Software na Indústria .....	22
2.2.1. Vantagens na aplicação do CAE .....	23
2.2.2. Desvantagens na aplicação do CAE.....	24
2.3. Tratamentos Térmicos .....	24
2.3.1. Têmpera .....	25
2.3.2. Revenimento.....	26
2.4. Tratamento Superficial .....	27
2.4.1. Tratamento de Cromagem .....	27
2.4.2. Decomposição em Ferramental de Estampagem de Cromo Duro .....	29
2.5. Aço Empregado na Ferramenta .....	30
2.5.1. Aço AISI D2.....	31
2.5.2. Composição Química.....	33
2.6. Processo de Corte .....	36
2.6.1. Deformação plástica .....	37
2.6.2. Força de Corte .....	39
2.6.3. Cálculo da espessura da matiz de Corte .....	42
2.6.4. Folga do Corte .....	43
2.6.5. O Produto: Arruela .....	45
2.7. Critérios de Falhas .....	47
2.7.1. Círculo de Mohr.....	47
2.7.2. Teoria de Von Mises .....	50

2.8.	Elementos Finitos .....	53
2.8.1.	Fundamentos .....	53
2.8.2.	Métodos dos elementos finitos.....	53
2.8.3.	Formulação do elemento Tetraédrico de dez nós.....	55
2.9.	Componentes Comuns na Estampagem .....	58
2.9.1.	Espigas .....	58
2.9.2.	Local da Espiga e do Extrator .....	62
2.9.3.	Coluna de Guia .....	63
2.9.4.	Buchas .....	63
2.9.5.	Parafusos e Pinos de fixação.....	63
2.10.	Placa de Choque .....	64
2.12.2.	Molas Múltiplas.....	66
<b>3.</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>68</b>
	- Principais parâmetros utilizados na simulação .....	73
<b>4.</b>	<b>RESULTADO E DISCURSSÃO .....</b>	<b>75</b>
4.1.	Resultado do Método Analítico .....	76
4.2.	Resultados da Simulação .....	76
4.2.1.	Extrator Fixo .....	76
4.2.2.	Extrator Móvel.....	78
4.2.3.	Punção .....	82
4.2.4.	Chapa .....	84
4.3.	Discursão dos Resultados .....	85
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>85</b>
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>86</b>

## 1. INTRODUÇÃO

A operação de conformação mecânica de estampagem é definida pela ação de processos de deformação, corte e dobramento de materiais metálicos para a fabricação de modelos com pequenas espessuras compostas de chapas ou tiras.

As chapas tem que ser preparadas antes de entrar no processo de estampagem, geralmente passando por uma prensa de corte que transforma a bobina em “blanks” ou slitters (tiras menores da bobina que são cortadas longitudinalmente).

Os programas CAE (Computer Aided Engineering – Engenharia Assistida por Computador), muito comum na área da engenharia mecânica, as primeiras ideias sobre o software foi por volta da década de 50, mediante de um grupo de cientistas da Boeing (que associaram com a Academia de Berkeley) por meio da aplicação da metodologia de MEF elaboraram um software que buscava apoiar na determinação numérica dos esqueletos das (trazendo mais facilidade para modelos práticos).

A reprodução virtual busca realizar estudos e testes para um equipamento ou produto no campo virtual, através da construção de um modelo cibernético da proposta em progresso. O aumento da aplicação deste recurso é proveniente da enorme gama de variedades de programas de simulação que o mercado disponibiliza e o fato que o os resultados obtidos trazem grande confiança para o projeto. Devido ao seu alto grau de dificuldade e gasto com ferramental, os softwares no início da sua aplicação no mercado era apenas aplicado nos campos aeroespacial e automobilístico. Como a plataforma dos softwares sofreu uma drástica evolução, o programa apresenta um grau de dificuldade baixo e uma maior opção de suas competências apresentando disponibilidade para estudos de fluxo, estática, vibração, etc.

Ao usar o engenheiro pode elaborar modelos computacional para realizar estudos da performance de todos os elementos do conjunto para determinar ações que antecede a projeção dos objetos físicos. O ensaio computacional permite o porte para realizar um estudo do conjunto uma maneira como um todo para reconhecer algum cenário que pode não ter sido previstos. O prazo para inserir o material no comercio sofre uma diminuição radical por conta da produção e testes que podem ser realizados com os modelos virtuais muito mais rapidamente quando comparado aos protótipos físicos e também apresenta a possibilidade de pesquisar a performance de outros pontos do traçado permitindo que não haja perda com investimento e tempo que irá demandar a fabricação de modelos ou fazer contas manualmente. Esta

característica de realizar estudo de vários pontos do conjunto de uma maneira mais rápida garante um desempenho: aperfeiçoar o projeto, que é fundamental atualmente na engenharia.

### 1.1. Objetivo

Objetivo do trabalho é uma análise de um processo de conformação utilizando o corte para fabricação de arruelas, no processo para fabricação faz uso do Software Solidwork para realizar desenhos e simulações para avaliar a estrutura e o material durante e ao termino do processo de corte.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Processos Básicos de Estampagem

#### 2.1.1. Estampagem

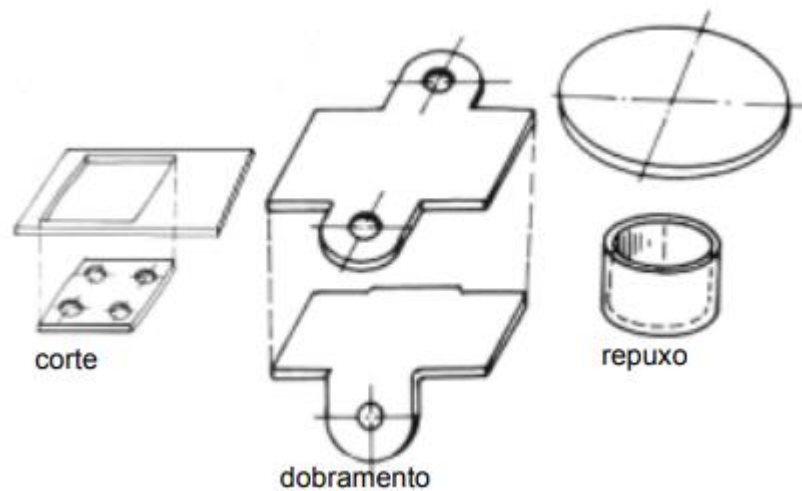
Na busca por formas desejadas, se utiliza processos de conformação mecânica, esse processo recebe a nomenclatura de estampagem. O processo de conformação mecânica de estampagem, em sua grande maioria ocorre a frio, no qual uma chapa obtenha a forma estrutural desejada, por meio de um agrupamento procedimentos.



**Figura 1** - Processo de Conformação Mecânica de Estampagem

O processo de estampagem pode ser de operação simples, isto ocorre quando apenas é efetuada uma ação. Por meio do processo de conformação mecânica é possível confeccionar objetos de diferentes estruturas metálicas como aço inoxidável, de aço de baixo carbono, cobre, alumínio e ligas não ferrosas.

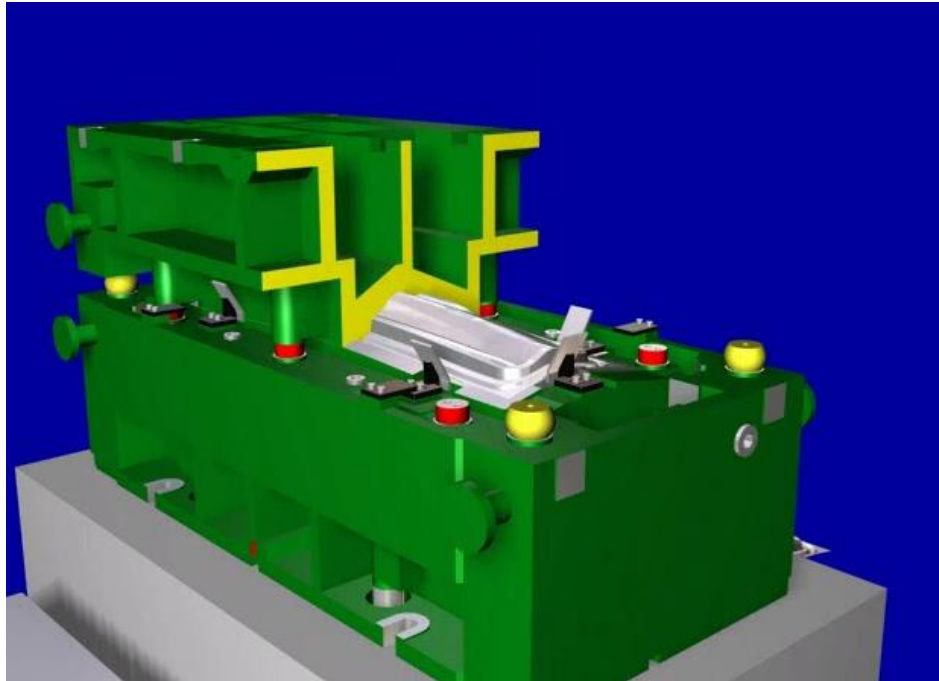
O processo de conformação mecânica de estampagem pode ser dividido em basicamente três subgrupos, são elas: repuxo, dobramento e corte.



**Figura 2** - Processos Básicos de Estampagem

### 2.1.2. Repuxo

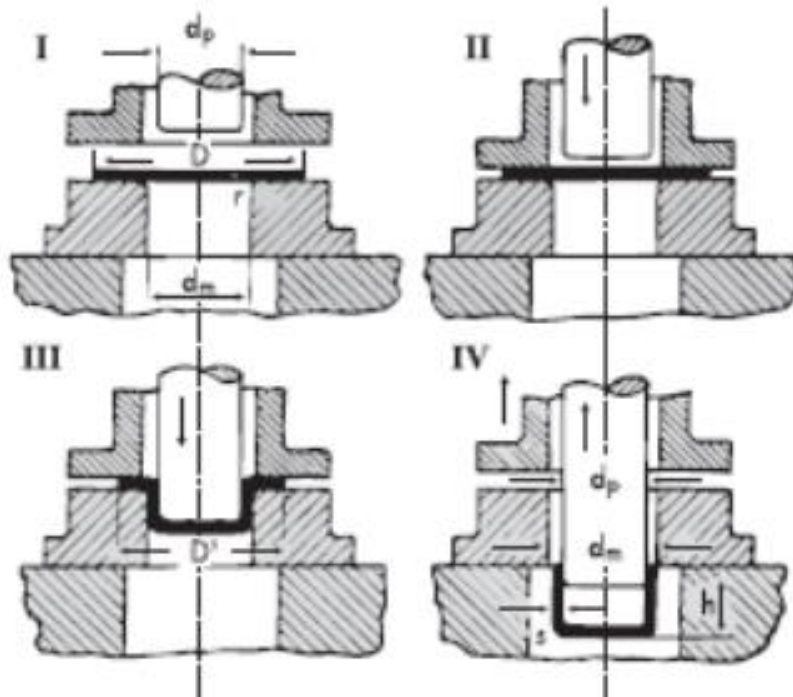
Operação onde se deseja conformar a chapa em um formato de um recipiente, aplicando-a uma pressão através de um ferramental. Nessa operação a chapa sofre um processo de estiramento, ou seja, o material escoa para dentro do ferramental para a realização do embutimento e com isso há uma redução da espessura da chapa.



**Figura 3-** Ferramenta de estampo realizando repuxo

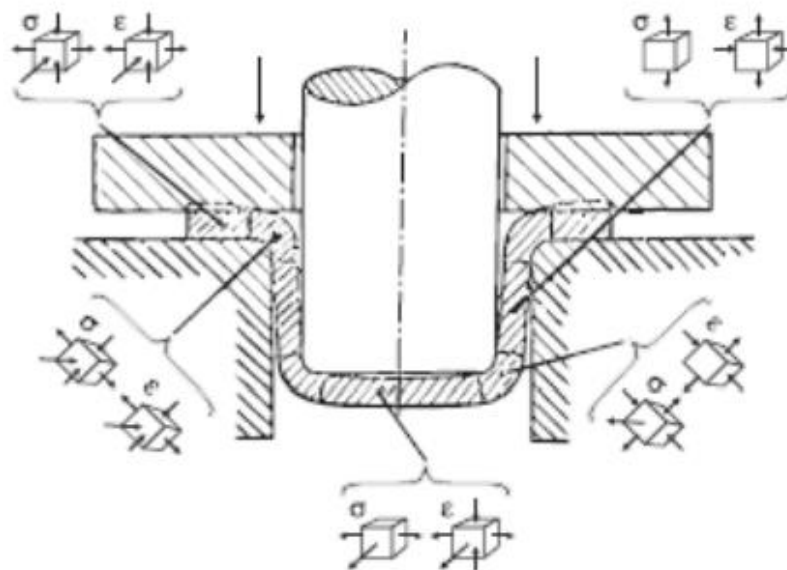
Um fato que deve ser muito bem analisado no processo de repuxo por conta da sua complexidade é o seu fluxo, porque os estados da tensão podem acontecer em duplos ou triplos, como podemos verificar na Figura 4.

As probabilidades do processo de repuxo ocorrer iniciam no estágio do limite elástico e tem o seu fim antes que o material atinja o seu limite de ruptura. Com isso, podemos determinar que um material que apresente uma maior faixa entre o limite elástico e de ruptura, apresentará uma maior probabilidade de ocorrer o processo de repuxo. Alguns exemplos de produtos finais deste processo capôs, painelas, para-lamas, entre outros.



**Figura 4 - Operação de Repuxo**

Na Figura 5, podemos identificar as tensões que a peça está submetida devido ao processo de conformação de repuxo. Como podemos analisar, as tensões provenientes do processo atuam diferentemente em cada localidade, com isso, desigualdades podem ser notadas na espessura.



**Figura 5 - Fluxo do Material**

### 2.1.3. Corte

No processo de estampagem de corte, é proveniente quando a chapa sofre uma força de cisalhamento provocada por duas superfícies de uma ferramenta (Figura 6), no qual ela aplica uma força que é superior à resistência cisalhante da chapa, causando uma ruptura e posteriormente a divisão da chapa.

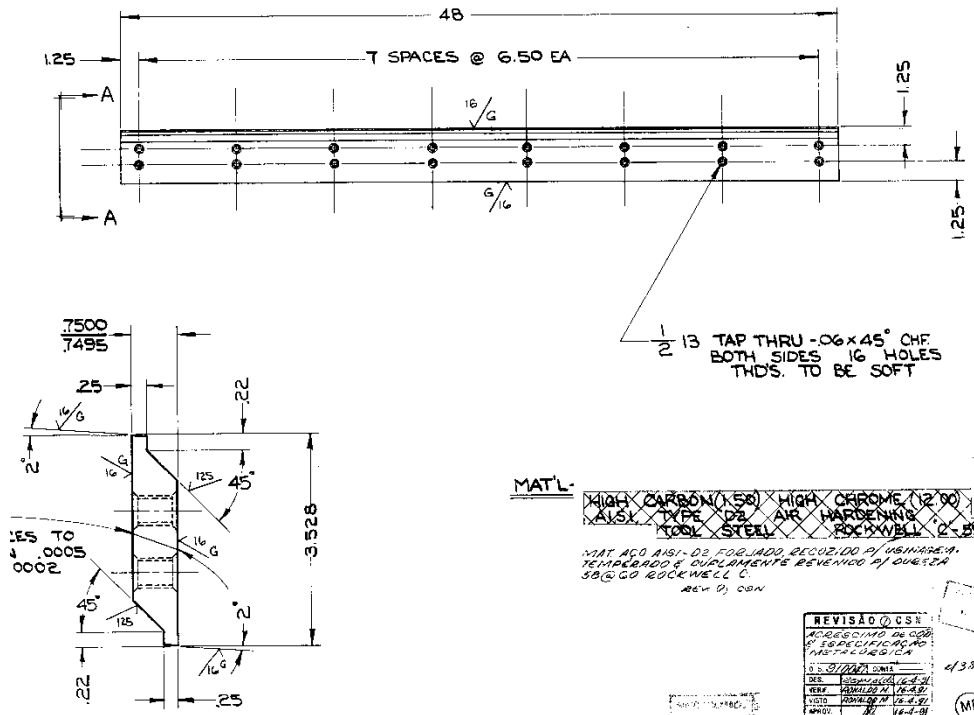
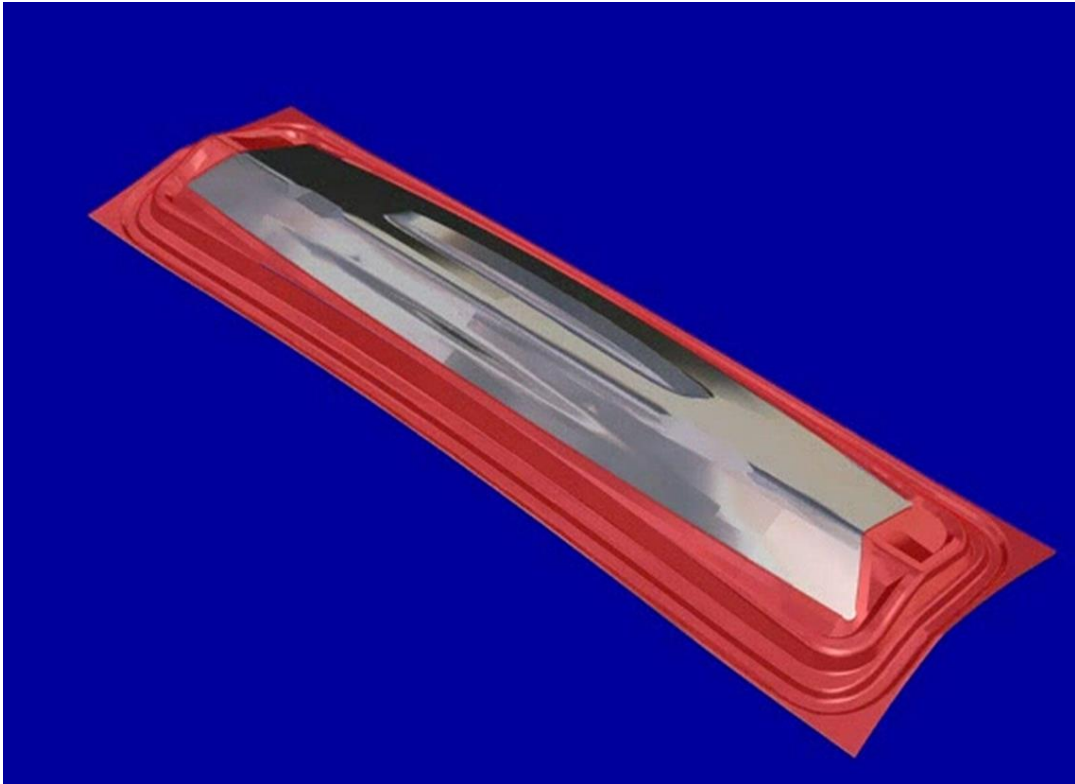


Figura 6 - Desenho de Lamina (Ferramenta utilizada no Processo de Corte)

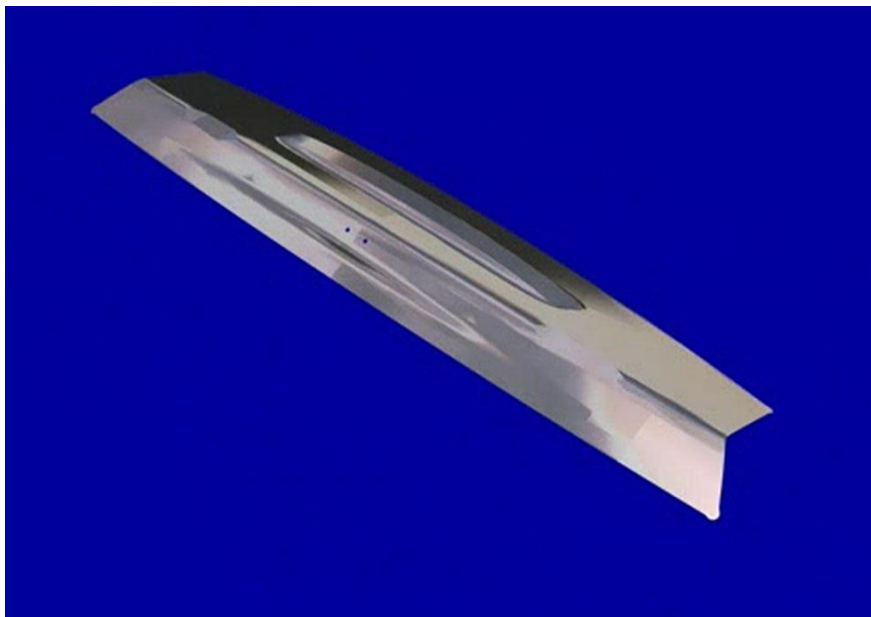
Consiste em uma operação realizada por um ferramental de corte, onde se separa uma parte do material que não será utilizada na peça final (retalho) do resto da peça. Esta operação acontece por forças de cisalhamento aplicadas pelos dois cantos da ferramenta.

Na Figura 7 temos uma simulação de uma peça que sofreu processo de repuxe, no qual, a parte em vermelho será o local onde o processo de corte irá ocorrer após a operação de corte este material se tornará retalho e deverá ser descartado.



**Figura 7-** Simulação de peça repuxada

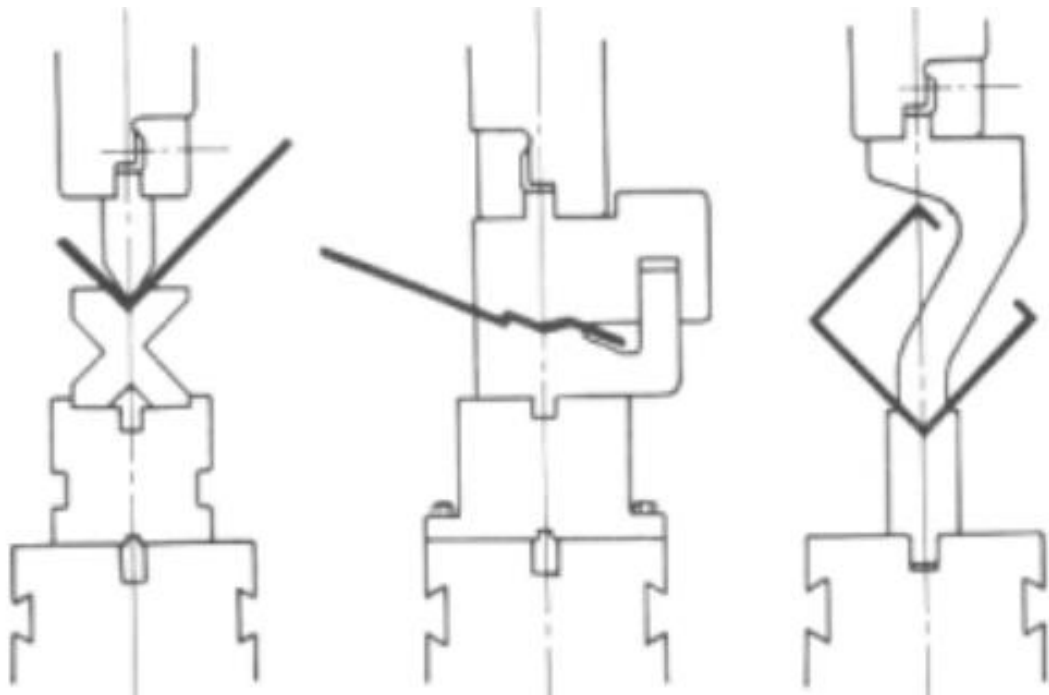
Na Figura 8 temos o material após o processo de corte, analisando podemos verificar que o material sobressalente foi retirado e sobrando apenas a peça desejada.



**Figura 8-** Peça após a operação de corte

#### 2.1.4. Processo de Dobramento

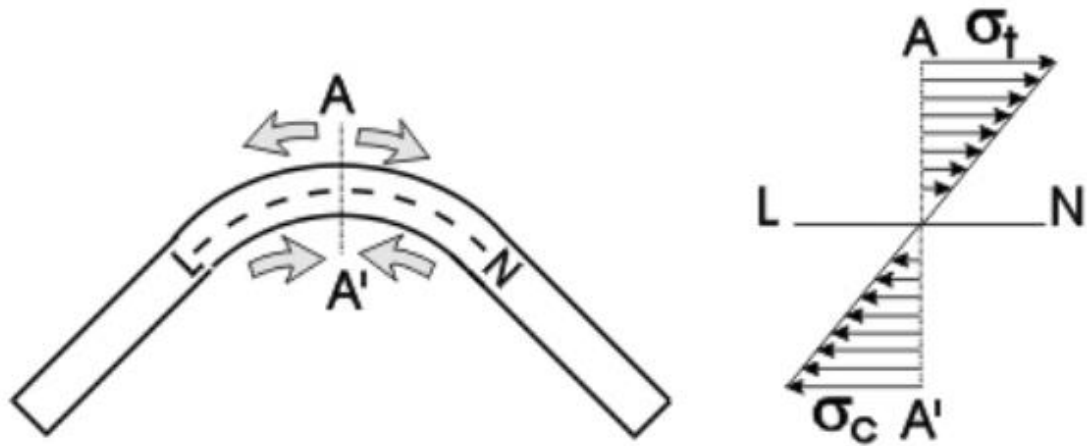
Neste processo de estampagem ocorre uma operação em que se utiliza um estampo de dobra para chapas planas, geralmente esta operação é mais utilizada no final do processo a fim de conseguir as dimensões e formas que se deseja obter no fim do processo. Neste processo buscamos realizar no material algumas curvas por meio da aplicação de forças por flexão, conforme a Figura 9.



**Figura 9** - Processo de Estampagem de Dobramento

O processo de dobramento aplica uma flexão sobre a chapa, com isso na região externa sofre uma tração e a região interna sofre uma compressão, este fenômeno é caracterizado como um estado duplo tensão.

Temos uma linha neutra que se localiza entre as duas tensões, dizendo em outras palavras é a localização aonde ocorre à anulação dessas tensões, Figura 10. A linha neutra é muito importante porque dela é calculada a dimensão do “blank”, anteriormente ao processo de dobramento.



**Figura 10** - Representação da Linha Neutra e Tensões de Tração e Compressão

## 2.2. Software na Indústria

Sabendo que a máquina para se deslocarem produzem forças elas realizam uma transformação de energia, entendemos que a potência e o deslocamento são componentes muito importantes. O engenheiro deve determinar por meio de cálculos os componentes, tais como, potência, deslocamento, transformação de energia, através da definição do dimensionamento, a forma e os componentes essenciais para as peças que irão esta presente na máquina. Este é o fundamento para realizar o projeto de máquina. Na engenharia auxiliada por computador (CAE), temos uma categoria que sua definição é análise de uma forma corriqueira peça, esta categoria é o CAD. Contudo as diferenças entre o CAE e o CAD tornam-se cada vez, mas confusas por conta das novas atualizações que ambos recebem.

No detalhamento da programação do CAD que contém modelação sólida e serviços de FEA, é um tipo de CAE. Quando se realiza um estudo de tensão, deflexão, força ou outra condição desempenho físico do esboço, independentemente do modo da forma da estrutura solida, esta metodologia é determinada de CAE. Ensaio podem ser realizados aplicando forças dinâmicas por vários programas, alguns apresentam semelhança com a plataforma do CAD oferecendo análise como um todo, como o que será utilizado neste projeto Solidwork. Esses são instrumentos aplicados comumente que possibilitam realizar associações de modelos matemáticos e posteriormente manipular esta associação de modelos matemáticos para dissemelhantes montantes dos dados e expor as soluções de maneira tabular e graficamente.

As possibilidades de modelos matemáticos são incalculáveis para a resolução dos modelos matemáticos para tensão, força e deflexão para impasses de projeto de máquina, pois possibilitam análises para situações do tipo “o que poderia ocorrer caso...”, sejam realizados com mais agilidade. As causas da variação das grandezas ou dos componentes sobre as deflexões e tensões no modelo imediatamente pode ser visualizado.

Na ausência de um verídico grupamento de modelo sólido, o sistema de equações similarmente pode ser aplicado para alcançar características de inércia do modelo ao mesmo tempo em que reproduz a forma e características do material no ensaio do projeto da peça. A repetição ligeira até um resolução admissível é, desta maneira, simplificada. Contudo, deve ter um entendimento que estes recursos computacionais são apenas recursos, sendo assim, não podem ser realizados a substituição do intelecto humano. É necessário ter um conhecimento das noções da engenharia, caso contrário às soluções oferecidas pelo computador não serão satisfatórias. Sistemas computacionais e calculadores trazem uma maior facilidade na busca de soluções analíticas que tem grandes cotações relevantes. Recomendável que lembre a exatidão da sua tese inicial e informações oferecidas, antes de digitar os seus valores.

### 2.2.1. Vantagens na aplicação do CAE

Os softwares CAE apresentam os subsequentes benefícios:

- A redução do investimento e do prazo de o desenvolvimento do modelo, por conta das alterações possíveis de maneira segura e ágil com a aplicação do software, sempre buscando o aprimoramento do projeto e resolvendo suas falhas;
- A redução da perda de tempo na fabricação do modelo, por conta da aplicação do software, sempre realizando uma análise buscando a correção de suas falhas;
- Atenuação na duração para fabricação do material através da aplicação dos softwares fazendo com que haja uma expressiva diminuição ou omissão no número de modelos para experiência;
- Fazendo a aplicação do software CAE a eficácia do modelo sofre um aumento significativo no seu desempenho;
- Ocorre um significativo acréscimo no tempo de produção com a aplicação nos modelos matemáticos complicados durante o período de engenharia computadorizada;

- A redução com investimento durante o momento da engenharia evitando falhas e consequentemente atrasos no projeto;
- Um software CAE proporciona uma maior confiança e eficiência para a peça;
- Possibilita a ampliação da concorrência;

### 2.2.2. Desvantagens na aplicação do CAE

Os softwares CAE apresentam as subseqüentes inconveniências:

- Carece de posto para o desenvolvimento das expressões algébricas complexas;
- Os dados obtidos com a análise do software não determina o local da falha, com isso, carece de colaboradores com qualificação para analisar e determinar o local da falha;
- Aplicação do software não possibilita uma garantia total, por conta que o mesmo não é capaz de desenvolver todos os testes possíveis, por este motivo o modelo físico é muito importante para a garantia da qualidade;
- Conforme desejo de sua aplicação, o investimento para o software é elevado;

### 2.3. Tratamentos Térmicos

Os tratamentos térmicos são muito empregados no meio industrial, para se obter um controle da estrutura dos metais, e são aplicados para se obter uma determinada propriedade desejada para sua aplicação ao termino do processo do tratamento térmico.

Chiaverini nos informa que os tratamentos térmicos como a têmpera e o revenimento são direcionados para as ligas metálicas, este processo faz com que a estrutura do material adquira características de dureza e resistência mecânica fazendo com que seu desempenho seja aumentado.

### 2.3.1. Têmpera

O que se busca ao realizar o tratamento térmico da têmpera é o endurecimento do metal que é provocado pelo resfriamento rápido da substância que se encontra austenitizada, após este resfriamento se obtém a substância martensita. Onde a martensita é uma substância supersaturada, no qual esta supersaturação é proveniente da colocação cristalina tetragonal de corpo centrado (TCC). Esta alteração da substância ocorre de maneira grosseira, ocorre um resvalo dos planos atômicos e maclação.



**Figura 11-** Fase da Têmpera

O primeiro passo para a têmpera é levar a substância para o forno, para que a mesma seja aquecida a uma temperatura específica para o aço em processo, ao final deste processo de aquecimento o material realiza uma nova organização dos cristais este processo recebe nome de austenitização.

O segundo passo é um resfriamento severo, este resfriamento pode ocorrer em água, óleo ou no ar. Após esta etapa a substância deve ser submetida ao processo de revenimento. Depois de ocorrer estes processos a característica do material ferro/carbono é chamada de martensita, esta fase pode-se obter através de um aço que tenha um ponto de mutação A1 necessitando da excitação do mesmo. Quando ocorre a liberação do carbono destas áreas, elas possibilitam que a substância reviva as suas tensões internas e que se deforme plasticamente. Após ocorrer estes processos a substância irá ter uma organização de forma agulhada, assim

teremos uma dureza elevada, e ocorrendo o revenimento, essas tensões serão aliviadas e a dureza necessitada do projeto será alcançada.

### 2.3.2. Revenimento

A técnica de revenimento é posterior da de têmpera, ela busca realizar um alívio das tensões residuais do processo e busca a elevação da ductilidade e a tenacidade para sua aplicação, este processo busca uma alteração da estrutura e um escape das tensões provenientes do processo da têmpera. A temperatura deste processo ocorre abaixo da temperatura A1 da Fig.1, e processo busca realizar um aumento da tenacidade e ductilidade e a resistência mecânica, assim, obtendo os dados desejados para o projeto.

Neste processo o aquecimento abaixo da temperatura A1, beneficia modifica da martensita nos estágios mais próximos. Este processo tende a um abaixamento da dureza/resistência e um aumento da ductilidade /tenacidade.



**Figura 12-** Revenimento em peças de aço

## 2.4. Tratamento Superficial

O tratamento superficial é uma estratégia muito abordada por conta de alguns materiais metálicos sofrerem com o desgaste. Este processo consiste em dar um “banho” com a funcionalidade dar um revestimento ao material metálico para dar uma camada protetora.

Temos como principais processos de tratamento superficial a aplicação de camada de níquel e a aplicação de cromo.

### 2.4.1. Tratamento de Cromagem

Na tabela periódica o cromo (Cr) se localiza próximo ao tungstênio (W), urânio (U) e molibdênio (Mo), sua aparência metálica é branca azulada, entretanto, quando passa por um processo de polimento passa a ter uma aparência espelhada. Se tratando de aplicação, o cromo é muito mais utilizado que o W, U e Mo, por conta de suas propriedades mecânicas e de resistência que trazem para o componente.

Representa uma pequena parcela dos metais que pode ser aplicado por meio de eletrólitos aquosos material com elevada dureza. O tratamento de cromagem conforme sua utilidade se consegue realizar a separação duas classes fundamentais: Temos a classe de Cromo Duro Industrial e a classe do Cromo Decorativo.

- **Cromo Decorativo:** apresenta uma qualidade para reflexão da luminosidade proveniente da sua face cromada, fazendo com que os objetos revestidos tenham um aprimoramento significativo no seu aspecto. Com a qualidade reflexiva permanece constantemente, isso reflete em um material que não embace. Outra qualidade muito importante é a resistir à corrosão. O objeto ganha vinte micrometros de espessura de níquel, isso ocorre, após o corpo passar por tratamentos na sua superfície. Após este tratamento superficial de níquel, o objeto passa para o tratamento de cromagem que pode recebe de espessura de dois a dez micrometros de cromo.



**Figura 13** - Cromagem de Escapamentos

- **Cromo Duro Industrial:** recebe este nome, quando o material tem uma camada de espessura superior a cinco micrometros direcionados no metal de origem. Este cromo que foi introduzido pelo processo de eletrólise apresenta como propriedades uma dureza Vickers que pode variar de 800 a 1200, apresenta ordenação cristalina cúbica, apresenta  $7,2\text{g/cm}^3$  de densidade, apresenta um valor de coeficiente de dilatação térmica quase igual o do aço e apresenta um valor de fusão de  $1903^\circ\text{C}$ . A fim de impedir um excedente de tensões na superfície, não é sugestionado que o material apresente uma espessura de cromo duro muito elevado, por conta do seu valor de elevado de dureza. Temos como propriedades a resistência ao desgaste, contra oxidação, um coeficiente de atrito pequeno, entre outras são provenientes da pequena espessura de cromo na sua face. Mesmo que o material trabalhe com uma temperatura superior ao ponto de fusão, as características que protege o material à corrosão e repelência do óxido de cromo não são afetadas.



**Figura 14** - Cromagem do Punção e Matriz

#### 2.4.2. Decomposição em Ferramental de Estampagem de Cromo Duro

Com o setor automobilístico e outros buscam sempre aprimorar seus produtos para oferecer ao consumidor sempre mais segurança, aumento na resistência a corrosão, etc. fez com que muitos aplicassem níquel e zinco como revestimento na busca por estas características. Com esta mudança nas características superficiais do aço, grandes problemas foram gerados na operação de estampagem, uma das maiores dificuldades encontradas foi à rápida degradação das ferramentas de estampo, por conta das ferramentas não serem apropriadas para a superfície do material uma grande quantidade de sujeira era depositada nas matrizes, sendo assim, havendo necessidade de parada operacional para realizar limpeza das matrizes, entre outros problemas que foram gerados. Estes problemas mencionados acabam trazendo muitos defeitos de qualidade para o material final, como rebarbas, rugas, pontos que não existe revestimento o que causa muitos retrabalhos.

Para eliminar estes problemas um estudo foi realizado por uma montadora automotiva japonesa, o que trouxe um aumento na qualidade, competência e uma diminuição nos investimentos de insumos para produção. Neste estudo foi constatado que aplicando uma camada de cromo duro na superfície do conjunto (ferramenta e matriz) eliminaria estas condições.

### ➤ **Vantagens do Processo de Cromagem**

Segue algumas vantagens que o processo de cromagem adiciona no ferramental e matriz:

- Aumento na resistência ao desgaste dando ao material uma dureza por volta de 900HV;
- Quando processo de estampagem é em chapas zincadas, o ferramental cromado impossibilita que partículas de zinco agarrem na superfície do ferramental;
- Uma maior vida útil da ferramenta, por meio do menor desgaste da ferramenta;
- O produto final apresenta um acabamento excelente;

### 2.5. Aço Empregado na Ferramenta

Os materiais empregados para a construção de ferramentas que irão realizar o trabalho a frio que deveriam realizar um trabalho na temperatura ambiente. O sistema AISI determina uma nomenclatura para os aços ferramentas que irão realizar um trabalho a frio são elas as séries D, O, A e W. A classificação D apresenta uma característica onde a matéria expressa um elevado teor de cromo e de carbono, com isso a substância irá apresentar uma elevada resistência ao desgaste e uma baixa alteração enquanto o processo de tratamento térmico. No Brasil, os materiais mais comuns apresentados são os aços D2 e D6.

Tipo AISI	Composição (%)				Aplicações
	C	Cr	Mo	Outros	
D2	1,50	12,00	1,00	1,00V	Matrizes para trefilação, estampagem, punções, mandris e matrizes de forjamento rotatório;
D3	2,25	12,00	-	1,00V 1,00W	Matrizes para trefilação, roletes formadores, punções, matrizes para prensa viradeira e para forjamento rotatório;
D4	2,25	12,00	1,00	1,00V	Matrizes para recortar, moldes para tijolo, matrizes para forjamento rotatório a quente, ferramentas para estampagem;
D5	1,50	12,00	1,00	3,00Co 1,00V	Matrizes para conformação a frio, para cunhagem, para aparar, trefilação, punções, cutelaria de qualidade, cilindros;
D6	2,15	12,00	-	0,7W	Conformação e corte a frio, moldes para materiais cerâmicos, facas, matrizes, punções, mandris, feiras de trefilação;
D7	2,35	12,00	1,00	4,00V	Matrizes para briquetadora, estampagem profunda, cilindros desempenadores, feiras para trefilação;

Fonte: COUTINHO, 1992, p.281 (adaptado).

**Tabela 3** - Características dos aços D

### 2.5.1. Aço AISI D2

O aço AISI D2 é vastamente utilizado no ramo industrial, principalmente, na aplicação de aço ferramenta para o processo de conformação de corte quando o material empregado apresenta uma boa relação com resistência mecânica e ao desgaste. A composição mais básica deste aço apresenta em torno de 11% a 12,5% de Cr, 1,4% a 1,6% de C, além de contar a soma de outros elementos como Mo e V com uma porcentagem aproximadamente em 1%. Por conta desta mistura a forma de concretização do aço AISI D2 é muito parecido com a do ferro fundido branco hipotético.

Alguns tipos de materiais são empregados para a construção de instrumentos utilizados para corte, matrizes ou qualquer processo de conformação. Os materiais de ligas frequentemente utilizados são molibdênio, cromo, tungstênio, vanádio, entre outras substâncias. A aplicação destes elementos é em função das características que se deseja buscar no projeto, como, aumento na resistência mecânica, resistência térmica, entre outros.

A determinação do tipo de material para a ferramenta deve ser realizada através de uma análise do tipo de material empregado no sistema e suas características quimicamente, esta determinação deve ser avaliada corretamente para não ocorrer um desgaste excessivo da ferramenta.

Grupos	AISI SAE ABNT	DIN WNR	Gerdau	Villares	Composição %	Recozimento		Carac. de Têmpera			Revenimento °C	Dureza de Utilização
						Temp. °C	Dureza Brinell	Temp. °C	Meio	Dureza HRC		
Aços Rápidos	-	1.3207	-	VK-10E	1,30 8W 4,5Mo 4,2Cr 2,7V 10Co	830-870	240-300	1170-1190	ar, óleo, b, sal	64-66	550-570	67-64 HRC
	M42	1.3247	-	VKM-42	1,1C 3,75Cr 9,50Mo 1,50W 1,15V 8,0Co	870-900	máx. 270	1180-1210	ar, óleo, b, sal	64-66	520-550	68-64 HRC
	M35	1.3243	-	VK-5E	0,92C 6,3W 4,1Cr 5Mo 4,8Co 1,8V	820-860	240-300	1190-1220	ar, b, sal, óleo	60-65	550-570	67-63 HRC
Aços para trabalho a quente	M2	1.3343	M2	VWM-2	0,90C 6,2W 5Mo 4,2Cr 1,9V	820-870	máx. 248	1200-1230	óleo, ar, b, sal	60-64	550-580	65-63 HRC
	H20/21	1.2581	H20	VW-9	0,30C 8,5W 2,6Cr 0,35V	730-750	máx. 250	1070-1150	b, sal, ar, óleo	44-54	540-680	50-40 HRC
	H12	1.2606	H12	VPCW	0,35C 5Cr 1,50Mo 1,35W 1Si 0,25V	840-880	máx. 235	1000-1050	b, sal, ar, óleo	52-56	560-650	50-40 HRC
	H13	1.2344	H13	VH-13	0,40C 5Cr 1,5Mo 1V 1Si	860-880	máx. 235	980-1070	b, sal, ar, óleo	50-56	500-650	50-40 HRC
	H11	1.2343	H11	VPC	0,38C 5Cr 1,3Mo 1Si 0,4V	840-880	máx. 235	980-1030	b, sal, ar, óleo	52-56 óleo 50-54 ar	550-650	50-40 HRC
	H10	1.2365	H10	VCM	0,32C 2,9Cr 2,8Mo 0,5V	720-750	máx. 230	1000-1050	ar, óleo, b, sal	50-54	500-700	48-35 HRC
	6F 3	1.2714	2714	VMO	0,57C 1,6Ni 0,7Mn 1,1Cr 0,5Mo + Nb	660-680	máx. 250	830-880	óleo	52-58	450-650	50-31 HRC
Aços para trabalho a frio	S1	1.2542	S1	VW-3	0,45C 2W 1,4Cr 1Si 0,2Mo 0,2V	780-800	máx. 229	900-960	óleo	55-59	250-650	55-38 HRC
	-	1.2721	2721	VCO	0,50C 3,2Ni 1Cr 0,3Mo	660-680	máx. 250	810-850	óleo, ar	55-59 54-58	300-450	52-44 HRC
	-	-	-	VF800AT	0,85C 1,0Si 0,40Mn 8,0Cr 2,0Mo 0,5V	860-880	máx. 250	1010-1050	b, sal, ar, óleo	58-63	500-530	62-56 HRC
	D2	1.2379	D2	VD-2	1,50C 12Cr 0,9Mo 0,9V	870-900	máx. 255	980-1020	b, sal, ar, óleo	62-64	160-300	62-58 HRC
	D6	1.2436	D6	VC-131	2,1C 11,5Cr 0,7W 0,2V	840-860	máx. 250	930-970	b, sal, ar, óleo	63-65	100-520	64-56 HRC
	W2	1.2833	-	VETD	1C 0,25V	690-760	máx. 200	780-800	água	63-66	100-320	65-54 HRC
	O1	1.2510	O1	VND	0,95C 1,2Mn 0,5W 0,5Cr 0,12V	760-780	máx. 212	780-820	óleo, b, sal	63-66	150-300	63-58 HRC
Aços para moldes	S1	1.2542	S1	VW-3	0,45C 2W 1,4Cr 1Si 0,2Mo 0,2V	780-800	máx. 229	900-960	óleo	55-59	100-350	58-52 HRC
	-	1.2516	-	VW-1	1,2C 1W 0,2Cr 0,1V	730-750	máx. 230	810-840 780-810	< 10mm esp: óleo > 10mm esp: água	64-65 65-66	150-300	63-58 HRC
	420	1.2083	420	VC-150	0,38C 13Cr 1Si Máx. 1Mn Máx.	780-850	máx. 250	1000-1050	óleo, ar	54-58	200-400	54-48 HRC
	P20	~1.2738	-	VP20IM	0,36C 1,30Mn 1,8Cr 1,00Ni 0,20Mo	Fornecido Temperado e Revenido na Faixa de 28-34 HRC						34-28 HRC
	P20	~1.2738	P20	VP20ISO	0,36C 1,60Mn 1,80Cr 0,70Ni 0,20Mo	Fornecido Temperado e Revenido na Faixa de 28-34 HRC						34-28 HRC
P20	~1.2311	-	VP20ISOF	0,36C 1,60Mn 1,80Cr 0,20Mo	Fornecido Temperado e Revenido na Faixa de 28-34 HRC						34-28 HRC	
-	-	-	VP50IM	0,15C 1,55Mn 3,00Ni 0,30Mo	Fornecido solubilizado na faixa de 30-35 HRC para envelhecimento após usinagem de acabamento com dureza de 40-42 HRC						42-38 HRC	

Figura 15- Aços para Ferramenta

No projeto a ferramenta irá apresentar um aço AISI D2, no qual o material apresenta um alto cromo e carbono, com uma excelente resistência à abrasão, sua deformação de uma maneira geral é pequena quando ocorre a tempera ao ar.



**Figura 16** -Varetas de aço AISI D2

Temos alguns processos que podem causar alteração na resistência à fratura, são os ciclos de tratamento térmico de tempera e revenimento. A temperatura na fase de austenização tem que ser inspecionada para garantir uma boa relação de dureza, resistência ao desgaste e a fratura.

### 2.5.2. Composição Química

A estruturação química do aço AISI D2 é apresentada pela Tabela 1. Alguns componentes tem propriedade fundamental para influenciar na microestrutura, propriedades e desempenho.

<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>Si</b>	<b>Cr</b>	<b>Mo</b>	<b>V</b>	<b>P</b>	<b>S</b>
1,40 - 1,60	0,60 máx.	0,60 máx.	11,00 - 13,00	0,70 - 1,20	1,10 máx	0,035 máx	0,030 máx

**Tabela 1** - Estruturação química do aço AISI D2

Vamos detalhar algumas das mais importantes influências que alguns componentes contidos na estrutura mostrada acima:

- **Carbono (C):** componente incumbido da organização do eutético na fase de solidificação, durante o tratamento térmico de têmpera ocorre o endurecimento da martensita e secundariamente o tratamento térmico de revenimento causa a precipitação de carbonetos no seu endurecimento;
- **Cromo (Cr):** componente incumbido da organização do eutético na fase de solidificação, durante o tratamento térmico de têmpera ocorre o endurecimento da martensita e secundariamente o tratamento térmico de revenimento causa a precipitação de carbonetos no seu endurecimento;
- **Molibdênio (Mo):** componente incumbido da precipitação dos carbonetos durante o tratamento térmico de revenimento ocorrido secundariamente;
- **Vanádio (V):** componente incumbido da precipitação dos carbonetos durante o tratamento térmico de revenimento ocorrido secundariamente;
- **Fósforo (P):** componente cuja inspeção deve ser rigorosa para que o mesmo fique abaixo de 0,035% evitando assim que o elemento cause fragilidade do aço;
- **Enxofre (S):** este elemento não apresenta um papel importante no desempenho ou no processo de fabricação da matriz/ferramenta;

A composição química é submetida com os desejos que pretende encontra nas propriedades da matriz/ferramenta e a responsabilidade está na Siderurgia que irá fabricar o material.

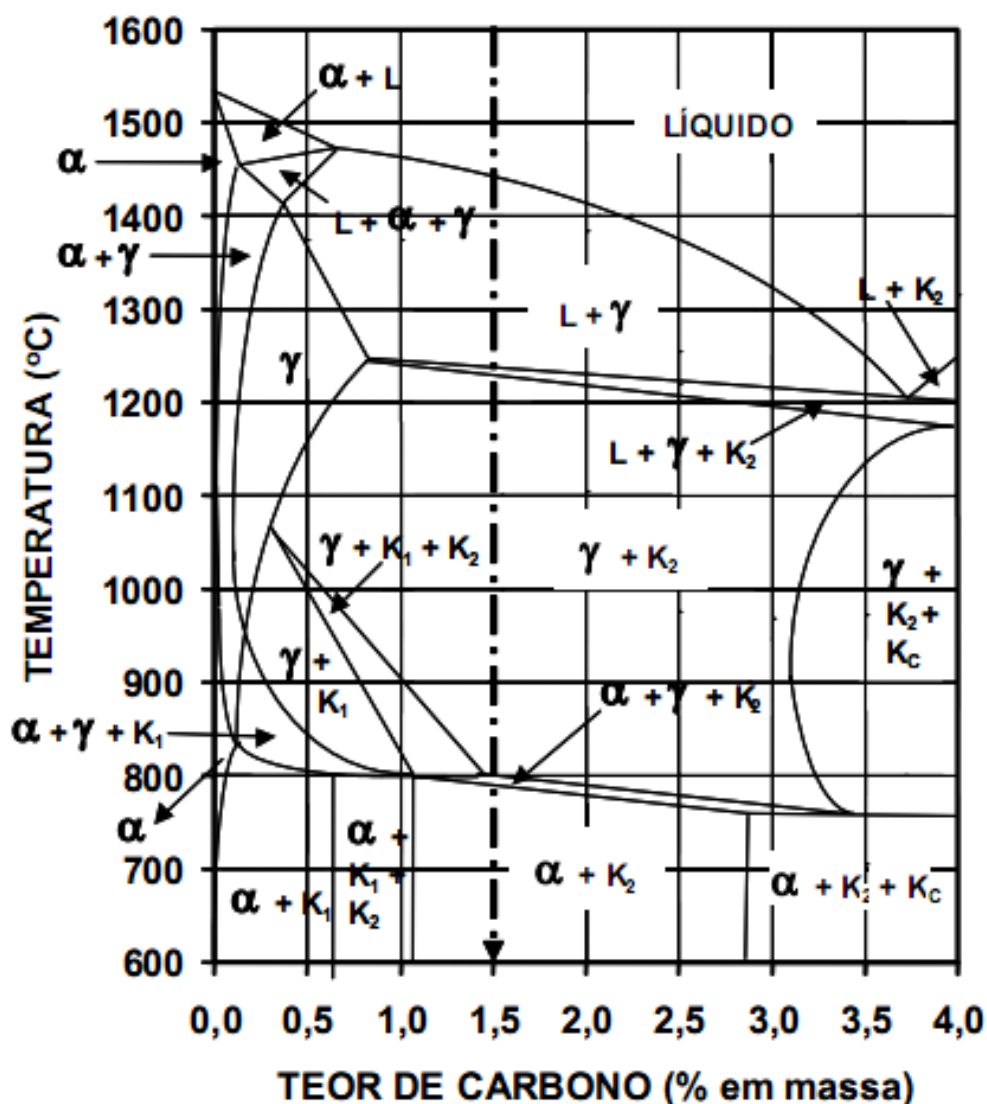


Figura 17- Diagrama ternário Fe-C-Cr para teor de 13% de Cromo

Quando se busca selecionar a matéria prima é muito importante ter no detalhe do projeto que a resistência à fratura do aço AISI D2, após o mesmo ser submetido ao processo térmico de têmpera e revenimento, é muito maior no sentido longitudinal, fazendo a comparação com a direção transversal.

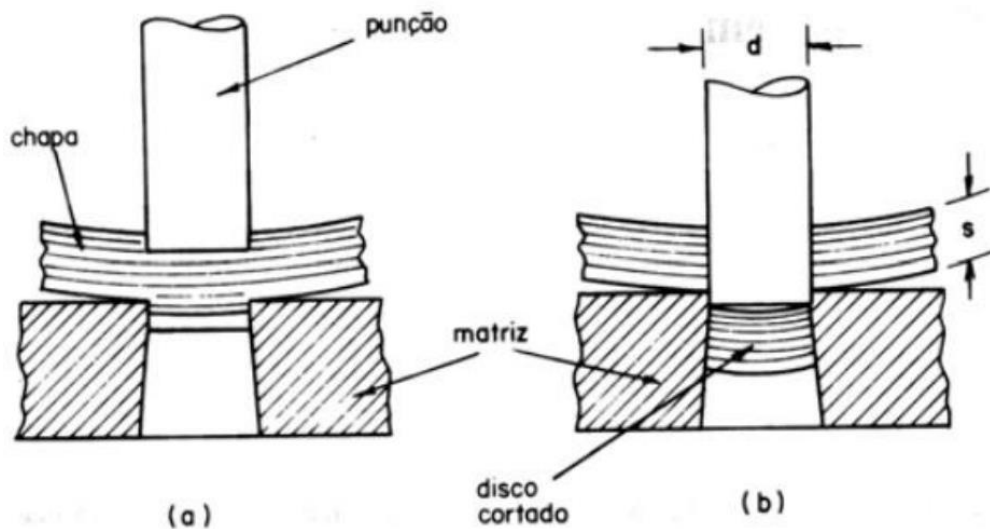
Temperaturas de austenização podem modificar o comportamento da fratura, quando elas ficam em torno de 1000°C e 1040°C consegue obter melhores desfechos. Quando a temperatura fica superior à da austenização acaba gerando uma diminuição da resistência a fratura.

## 2.6. Processo de Corte

A operação tem como finalidade adicionar um furo à peça estampada ou então retirar o retalho (excesso de material) da chapa no processo. A ferramenta de corte (estampo) é composta de um punção e uma matriz. O procedimento ocorre da seguinte maneira: uma chapa rasa ou uma peça repuxada é posicionada entre o punção e a matriz, após isso, o punção desce e com ele o pisador (que tem a função de segurar a chapa) desce junto, após o contato do pisador com a chapa, a faca desce e realiza o corte da chapa.

Nos processos de corte e perfuração, a chapa é estressada por cisalhamento entre as arestas de corte, esse estresse se dá até ocorrer a fratura. No corte, à medida que o punção vai avançando na chapa, este vai deformando a chapa plasticamente até um determinado ponto, onde a resistência máxima é excedida e a chapa se rompe. As fraturas partem das arestas de corte do punção e da matriz. Se houver folga entre as ferramentas, as fraturas se encontram quase instantaneamente, e a porção fraturada da borda cortada parece bastante limpa. Se a folga for insuficiente, as primeiras fraturas não se encontram e o cisalhamento secundário irá apresentar uma caracteristicamente irregular e áspera em torno da borda. Quando o corte está limpo, uma banda brilhantemente polida ao redor da borda do blank indica a que distância o perfurador precisou penetrar antes da fratura ocorrer. O corte da chapa é feito por pressão, que levam as fibras do material acima do limite de escoamento e o material se rompe por cisalhamento. Quando essa pressão ultrapassa a resistência ao cisalhamento, verifica-se o aparecimento de estiramentos e trincas na peça (ou blank) próxima aos cantos da ferramenta.

Em seguida, no decorrer do processo, a pressão contínua exercida pelo punção, faz com que essas trincas comecem a se unir em uma mesma região e por fim ocorre o corte da peça.



**Figura 18-** Operação de Corte

Devem-se tomar algumas precauções no processo de corte. Um exemplo é a degradação do punção, se chegar a níveis críticos, pode gerar divergências dimensionais dos furos. Outro fator é a folga entre o punção e matriz, um excesso de folga pode gerar rebarbas que comprometem a qualidade da peça, e em casos de um processo de estampagem posterior, podem gerar problemas de qualidade como picos e cavacos, além de danificar o ferramental posterior.

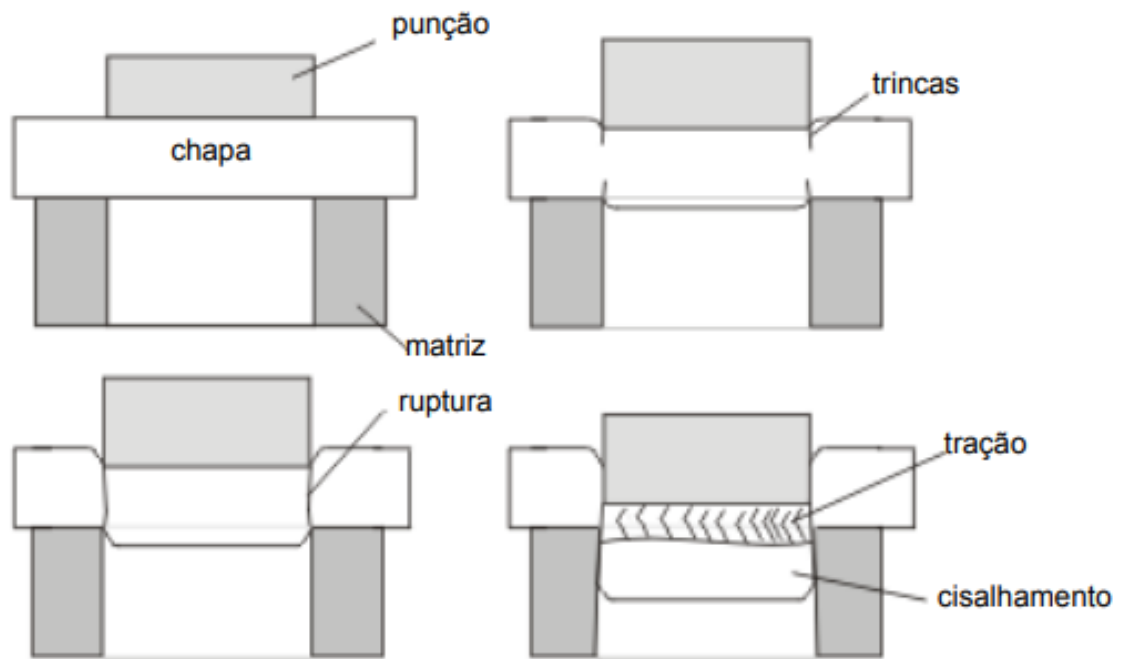
O processo de corte de chapas funciona com a aplicação de forças cisalhantes nos dois cantos da ferramenta, essas forças ultrapassam os limites de escoamento e ruptura do material, ocasionando o seu rompimento.

Esta operação pode ser classificada em três passos:

### 2.6.1. Deformação plástica

Quando o punção exerce a força sobre a chapa, inicia-se o processo de deformação elástica, porém a força continua a ser aplicada pelo ferramental na chapa e então se inicia o processo de deformação plástica do material e a chapa passa a se deformar permanentemente.

- **Redução de área** - Devido à força exercida pelo punção o material escoava para dentro da ferramenta, para que se possa deformar o material plasticamente, com isso, a espessura da chapa diminui e penetração do material permanece ocorrendo na matriz, ocasionando a redução da área na região do corte (estricção).
- **Fratura** - Essa fase se inicia logo após a estricção da região de corte. Conforme o punção vai penetrando o material, as fraturas (uma na superfície da chapa e outra na parte inferior da chapa) se prolongam até se encontrarem, por isso pode-se assegurar que a operação de corte é decorrente de um cisalhamento puro. Se isso não ocorrer, a chapa irá romper-se por tração, existe uma diferença visual no acabamento dos dois tipos de ruptura, a que ocorre por meio do cisalhamento garante um acabamento brilhoso na superfície, em contra partida, a superfície que foi rasgada apresenta uma superfície áspera e sem brilho.

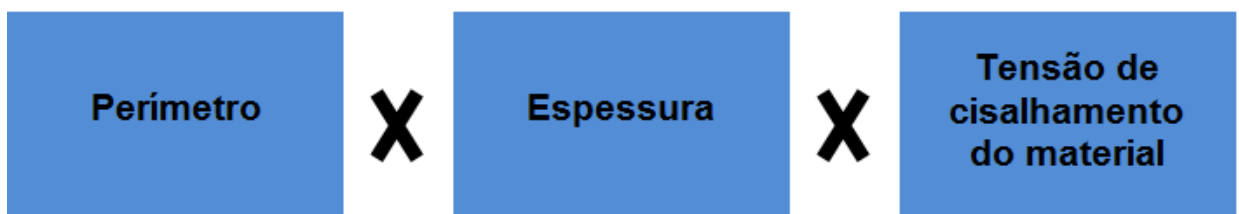


**Figura 19-** Processo de Corte

### 2.6.2. Força de Corte

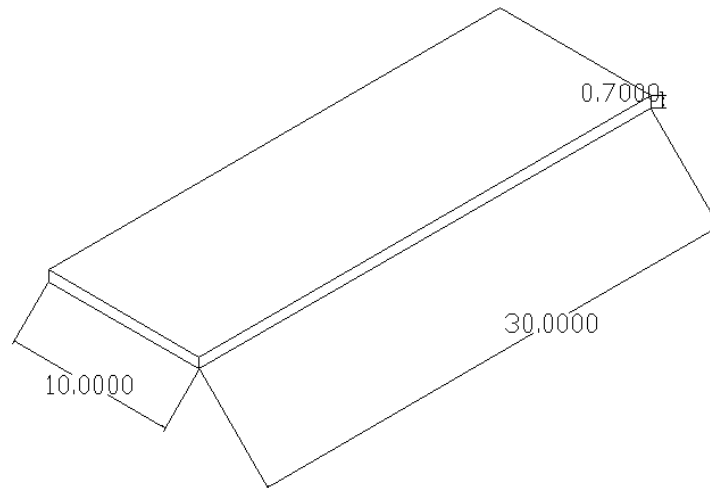
É necessário estimar o valor da máxima força de corte necessária para as ferramentas, com isso, sabe-se o efeito dessa força no punção e na matriz e através desse valor, pode-se determinar para a realização do trabalho a exigência da energia e potência.

Para calcular a força de corte necessária ocorrer a operação de corte, devem-se levar em conta três variáveis:



**Figura 20-** Variáveis para o cálculo de corte

Em posse dessas três informações, é possível determinar a força necessária para a realização do corte, será usado uma chapa retangular de aço SAE1020, conforme a figura abaixo.



**Figura 21-** Chapa retangular de aço

O perímetro da chapa é de 80 mm, com uma espessura de 3 mm. De acordo com tabela fornecida por um dos fornecedores da Companhia Siderúrgica Nacional apresentada abaixo, é possível verificar das propriedades mecânicas de alguns aços, entre eles, está o aço SAE1020.

Neste projeto optou-se por usar um aço SAE1020 laminado, pois além de ser um aço encontrado facilmente no mercado é também o aço mais difícil de realizar o processo de corte, quando comparado com o aço SAE1020 recozido ou normalizado.

Tabela de Propriedades Mecânicas							
SAE AISI (1)	Condição	Resistência à tração (Mpa)	Limite de escoamento (Mpa)	Alongamento (%)	Redução de área (%)	Dureza (HB)	Impacto (J)(*)
1015	Laminado	420,6	313,7	39	61	126	110,5
	Normalizado	424	324,1	37	69,6	121	115,5
	Recozido	386,1	284,4	37	69,7	111	115
1020	Laminado	448,2	330,9	36	59	143	86,8
	Normalizado	441,3	346,5	35,8	67,9	131	117,7
	Recozido	394,7	294,8	36,6	66	111	123,4
1030	Laminado	551,6	344,7	32	57	179	74,6
	Normalizado	520,6	344,7	32	60,8	149	93,6
	Recozido	463,7	341,3	31,2	57,9	126	69,4
1040	Laminado	620,5	413,7	25	50	201	48,8
	Normalizado	589,5	374	28	54,9	170	65,1
	Recozido	518,8	363,4	30,2	57,2	149	44,3
1050	Laminado	723,9	413,7	20	40	229	31,2
	Normalizado	748,1	427,5	20	39,4	217	27,1
	Recozido	636	365,4	23,7	39,9	187	16,9
1060	Laminado	813,6	482,6	17	34	241	17,6
	Normalizado	775,7	420,6	18	32,7	229	13,2
	Recozido	625,7	372,3	22,5	38,2	179	11,3

**Tabela 1** - Propriedades Mecânicas dos Aços

Como se pode ver para o aço SAE1020 laminado, tem-se um limite de resistência à tração de 448,2 Mpa. Para a aplicação é de suma importância que tenha o conhecimento da cotação da fronteira da resistência ao cisalhamento, por isso aplicamos um valor de 60 a 80% do valor de limite de resistência à tração.

Por questões de segurança, para não subdimensionar a carga da prensa e sobrecarregá-la, usa-se a maior porcentagem (80%). Logo, teremos um limite de resistência ao cisalhamento de 358.56 Mpa.

Em posse desses dados temos:

$P_{xex\sigma}$ :

$$80 \times 3 \times 358,56 = 86054.4 \text{ N ou } 8772.11 \text{ Kgf.}$$

Nota-se que mesmo para uma chapa relativamente pequena e de pouca espessura, é necessária uma grande quantidade de força para a realização do corte.

### 2.6.3. Cálculo da espessura da matriz de Corte

3. A espessura da matriz deve ser bem calculada para que a força exercida pelo punção não a danifique. Para calcular a espessura da matriz é necessário saber a força de corte, a fórmula é dada pela seguinte função:

$$em = \sqrt[3]{F}$$

4. Desta forma, se utilizar a cotação da força de corte do exemplo mostrado no item anterior, terá:

5.

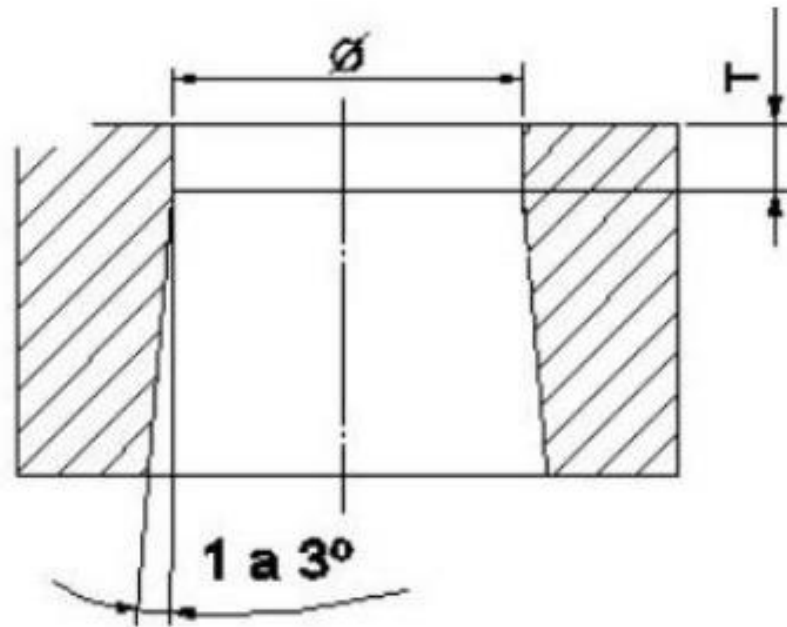
$$em = \sqrt[3]{8772.11}$$

6.  $em = 20,62 \text{ mm}$

7. Porém, geralmente usa-se um valor de espessura maior do que o encontrado pelos cálculos, para evitar que se trabalhe no limite do admissível, ganhando assim uma maior segurança, nesse caso usaremos 21 mm.

8.

Além da espessura da matriz, tem-se que levar em consideração a parte paralela da matriz que é representado pela letra T na figura abaixo:



**Figura 22-** Ângulo da matriz

O cálculo de T depende da espessura da chapa ( $e_c$ ) que será cortada.  
O cálculo de T se baseia em:

- i.**  $e_c < 1,5 \text{ mm}$   $T \leq (3 \times e_c)$
- ii.**  $1,5 \text{ mm} < e_c < 6 \text{ mm}$   $T \cong 1,5 \times (e_c)$
- iii.**  $e_c > 6 \text{ mm}$   $T = 1 \times e_c$

Na região de formato cônico na matriz, é usado um ângulo entre  $1^\circ$  a  $3^\circ$ . Esse valor serve para facilitar a saída da peça cortada.

#### 8.1.1. Folga do Corte

Deve existir no meio do conjunto margem controlada que é importante para o acabamento da peça, é necessário ter um valor calculado da folga, pois o excesso de folga pode gerar rebara na peça e a insuficiência de folga gera um excesso de carga na matriz.

A folga pode se localizar tanto no punção quanto na matriz, isso vai depender exclusivamente do seu produto final. Se o produto final ficar sobre a matriz (a peça toma medida pelo punção) a folga é colocado na matriz, caso o produto caia (a peça toma a medida da matriz) a folga tem que se localizar no punção. As expressões abaixo nos permite determinar a folga que deve conter no corte:

- i. Para chapas com uma espessura de até 3 mm:

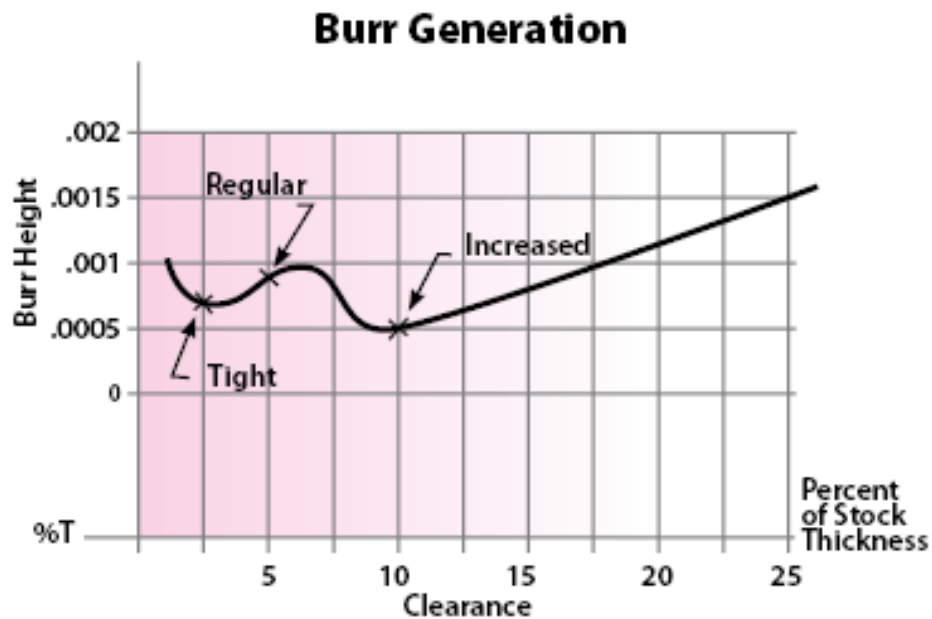
$$f = (0,01 \times ec - 0,015) \times \sqrt{Kc}$$

- ii. Para chapas com espessura maior de 3 mm:

$$f = 0,005 \times ec \times \sqrt{Kc}$$

- iii.  $Kc$  simboliza para o material a tensão de ruptura por cisalhamento.

Para calcular a folga do ferramental, foi usado o gráfico de rebarba por folga da empresa Dayton. A Dayton é a maior fabricante de punções para ferramentais do mundo e em seu site é possível ter acesso ao gráfico abaixo.



**Figura 23** - Padrão de Folga

No gráfico é possível verificar três pontos (tight, regular e increased) cada um deles com um valor de folga e rebarba diferentes.

No ponto tight é um ponto onde se tem pouca folga (em torno de 2,5% da espessura da chapa) e uma rebarba que varia entre 0,005 e 0,01 mm. Esse valor de rebarba não é considerado ruim ou prejudicial para o ferramental, porém o baixo percentual da folga indica que a faca sofrerá desgaste em menor tempo.

O ponto regular possui uma folga maior (5%) porém seu valor de rebarba é maior também, chegando próximo a 0,01 mm, o que indica um aumento do valor da rebarba quando comparado ao ponto tight.

O ponto Increased é o considerado o melhor ponto de escolha, pois nele é possível verificar o maior valor de folga (10% da espessura da chapa) e a menor rebarba (0,005 mm).

Para o projeto foi escolhido o ponto increased, com isso o valor do diâmetro do nosso punção de corte foi de 30,3 mm com isso, garantindo uma folga de 0,3 do punção na matriz.

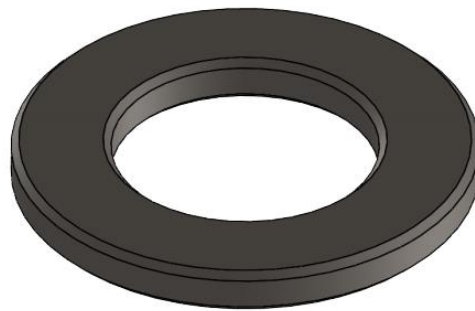
### 8.1.2. O Produto: Arruela

Para a fabricação de arruelas M16 são usadas chapas de espessura entre 2 a 3 mm de um material com baixo carbono, sendo este revestido ou não. Com o uso de uma guilhotina para cortar a chapa numa medida acessível ao ferramental e também para evitar maiores perdas de material (scrap) usaremos uma chapa de 300x300x3.

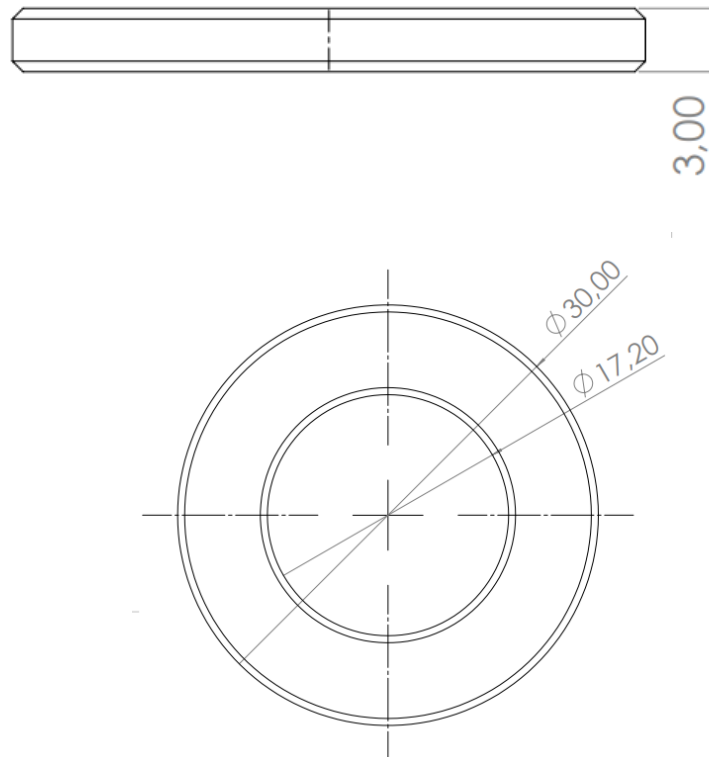
O material de estudo é um conjunto de estampo de arruela lisa M16:

- i. Modulo Elástico = 205GPa
- ii. Coeficiente de Expansão Térmica= 11.7  $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$
- iii. Densidade = 7.87  $\text{g}/\text{cm}^3$
- iv. Resistencia a Tração = 420MPa
- v. Limite de Escoamento = 350Mpa

Em relação ao material utilizado foi escolhido o aço SAE 1020, por apresentar valores de tensões relativamente baixos e por ser um aço bastante comercializado. É possível visualizar o produto a ser fabricado pelo ferramental de corte nas imagens abaixo. Uma imagem retirada do software e outras duas imagens das vistas da peça:



**Figura 24** – Modelagem da Arruela M16 no Software



**Figura 25** - Desenho Arruela M16

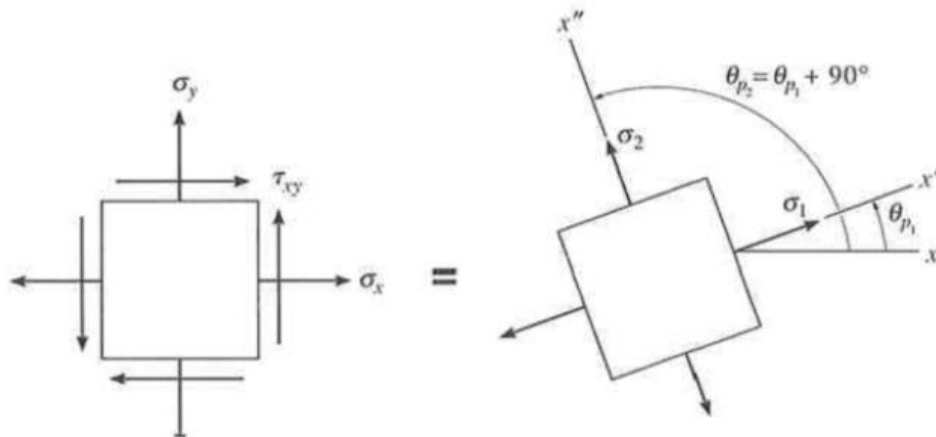
## 8.2. Critérios de Falhas

### 8.2.1. Círculo de Mohr

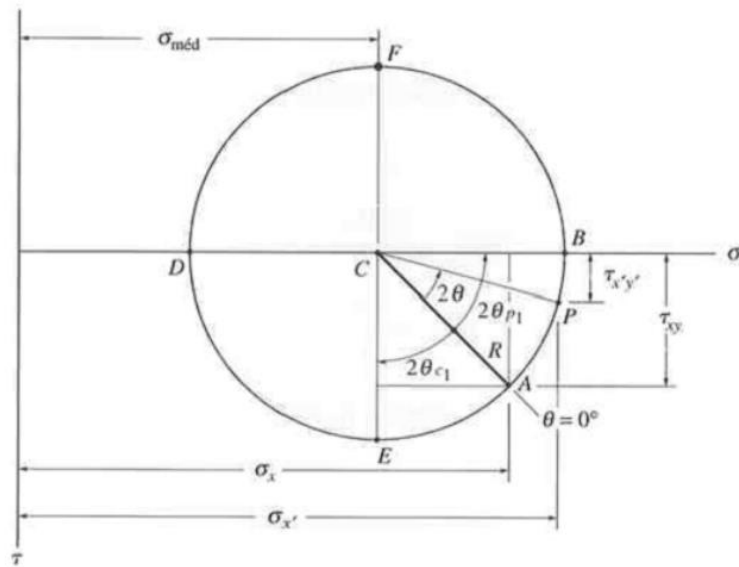
Podemos ter o entendimento do círculo de Mohr que ele é edificado por meio de conjuntos eixos reto com o das abscissas simbolizando a tensão normal  $\sigma$  e simbolizando a tensão cisalhante  $\tau$  temos o eixo das ordenadas conforme Beer. Se tratando de um domínio particular as tensões  $\sigma$  e  $\tau$  são representadas por uma localização referente a Mohr; com intuito de se estabelecer as formas das tensões graficamente, foi estabelecido um modelo, de forma que uma localização N genérica, tem suas tensão como  $\sigma_n$  e  $\tau_n$ , assim como somos capazes de averiguar na Figura 27.

Na Figura 28, podemos verificar as localizações no Mohr, com a igualdade da representação da face determinada. A ilustração do plano cartesiano  $x$  esta expressada pela localização  $X$  na circunferência; na localização  $N$  esta expressada o plano cartesiano  $n$  e consecutivamente irá seguir. Na utilização de modelos matemáticos para adquirir os valores de  $\sigma_\theta$  e  $\tau_\theta$ , as normas para os sinais das tensões necessitam ser meticulosamente estudadas:

- Os valores para as Tensões normais de tração serão positivos;
- Tensão de Cisalhamento,  $\tau_{yx}$  ocorrendo na posição positiva do eixo  $y$  é sempre positiva;
- Tensão de Cisalhamento,  $\tau_\theta$  ocorrendo na posição horaria seu valor sempre será positivo  $\tau_{yx} > 0$ ;



**Figura 26-** Estudo das tensões fundamentais



**Figura 27-** Círculo de Mohr

A representação em um projeto dos extremos de suas tensões age sobre um determinado plano influenciado acima do montante da tensão cisalhante que exerce sobre os planos cartesianos fundamentais, estes valores são determinados através de expressões que devem ser cuidadosamente resolvidas na fase de projeto e engenharia. Temos um modelo matemático que podemos determinar as tensões fundamentais:

$$\sigma_{1,2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

Temos a representação do cálculo da tensão máxima abaixo:

$$\tau_{\text{máx no plano}} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

Tensão média:

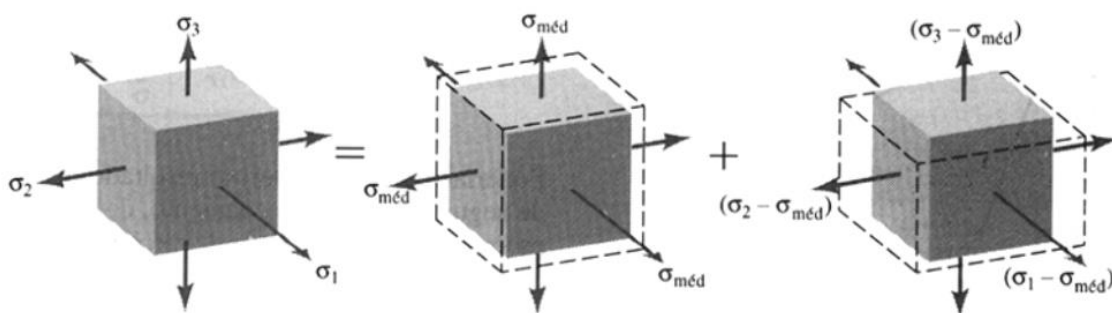
$$\sigma_{\text{méd}} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}$$

Quando são dimensionadas as partes morfológicas e que integram o equipamento, os mesmos tem que obter características manejáveis a fim de evitar que quando sofrerem ação de uma carga não venha escoar. Evitando que a estrutura rúptil sofra uma fratura. No caso de um dimensionamento de uma estrutura com que tenha algum aparato singular, o engenheiro deve nos seus cálculos determinar os limites de tensão do material prevenindo falha do mesmo. No caso do aparato com características mais dúcteis, comumente a ocorrência será uma fratura.

Na prática da Engenharia estudam de forma a determinar as tensões que o material possa receber de maneira multiaxial através de modelos matemáticos a fim de determinar as tensões admissíveis que o componente irá suportar conforme as normas. Através do conceito de Misses, um estudo virtual pode ser realizado, a forma com que este conceito atua será detalhada abaixo.

### 8.2.2. Teoria de Von Mises

Ainda que o conceito da tensão cisalhante máxima ofereça fundamentos admissíveis para o fluxo em elementos dúcteis, o conceito da energia de distorção máxima se entrelaça mais satisfatoriamente com os valores preferida. Nesta hipótese, estima relacionada à alteração da geometria do corpo de acordo com a carga multiaxial igualmente à energia de deformidade em uma estrutura física de teste de tração,  $q$  na tensão de escoamento uniaxial. Admitindo que o esforço de deformidade armazenado em algum objeto vultoso, como mostrado abaixo na Figura 29 - Estado tri axial.



**Figura 28-** Estado Tri-axial

Temos o modelo matemático que expressa a carga proveniente da deformidade ocasionada por um fardo de sistema multiaxial, aplicando os três planos fundamentais, desse modo:

$$U_0 = \frac{1}{2}(\sigma_1 \varepsilon_1 + \sigma_2 \varepsilon_2 + \sigma_3 \varepsilon_3)$$

Aplicando a Lei de Hooke no modelo matemático iremos obter:

$$U_0 = \frac{1}{2E}[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1 \varepsilon_1 + \sigma_2 \varepsilon_2 + \sigma_3 \varepsilon_3)]$$

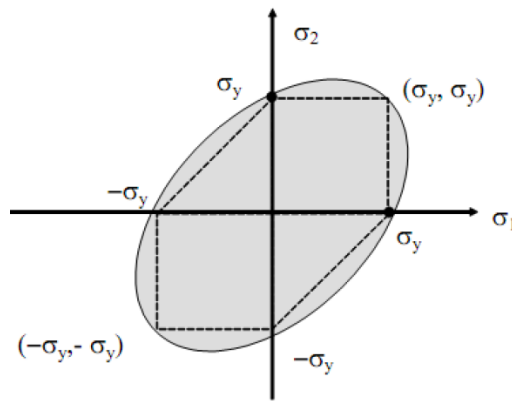
Podemos determinar que esta energia está relacionada a basicamente a dois fatores, um a variação de seu aspecto e a capacidade do objeto. Determinamos que a tensão mediana seja a causadora da alteração da capacidade. A capacidade do objeto não sofre qualquer alteração com as tensões decorrentes. Quando submetidos a pressões hidrostáticas de elevado porte, os objetos não apresentam um escoamento, isto foi determinado em testes. Apenas são capazes de motivar o escoamento no material as tensões que executam a alteração do mesmo. A teoria apresentada é fundamentada no conceito de escoamento da energia de distorção máxima, expressada como: “Quando ocorre um escoamento em um ensaio de tração em um mesmo material e a potência da alteração pela parcela de sua capacidade torna-se igualmente ou supera a energia de distorção por unidade de volume, ocorre então um escoamento do material dúctil”. O critério para ocorrência da energia de distorção máxima pode ser apresentado em condições das três tensões fundamentais como:

$$\sigma_y^2 = \frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]$$

Na situação de tensão plana, as variáveis equivalentes para parâmetros de ocorrência do conceito de distorção máxima são determinadas simplesmente através dos modelos matemáticos acima:

$$\sigma_y^2 = -\sigma_1 \sigma_2 + \sigma_1^2 + \sigma_2^2$$

Este modelo matemático para determinação da elipse indicado nos planos  $\sigma_1 - \sigma_2$ . Com desejo de realizar uma acareação, aplica-se a teoria de Tresca que utiliza valor da tensão de cisalhamento extrema do escoamento no hexágono identicamente apresentado, em retas tracejadas. Em todos os pontos das extremidades do hexágono, as hipóteses de ocorrência de falha compatibilizam, isto é, as duas hipóteses preveem que se algum valor na condição de tensão processar-se em algum dos vértices do hexágono irá acarretar no escoamento. Em contra partida, o conceito de tensão cisalhante máxima dá um cálculo aproximado de maneira mais reacionária no material escoado proveniente das tensões indispensáveis, visto que a localização do hexágono pode ser acima ou adentro da elipse, Figura 30.



**Figura 29-** Elipse da falha de Von Mises

Segundo a hipótese de Lima uma maneira eficaz de empregar é extrair dos elementos que se localizam a esquerda a raiz quadrada, como resultado será encontrado uma tensão de nomenclatura de tensão correspondente de Von Mises.

$$\sigma_{vm} = \frac{\sqrt{2}}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]^{1/2}$$

ou

$$\sigma_{vm} = \frac{\sqrt{2}}{2} [(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_x - \sigma_z)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)]^{1/2}$$

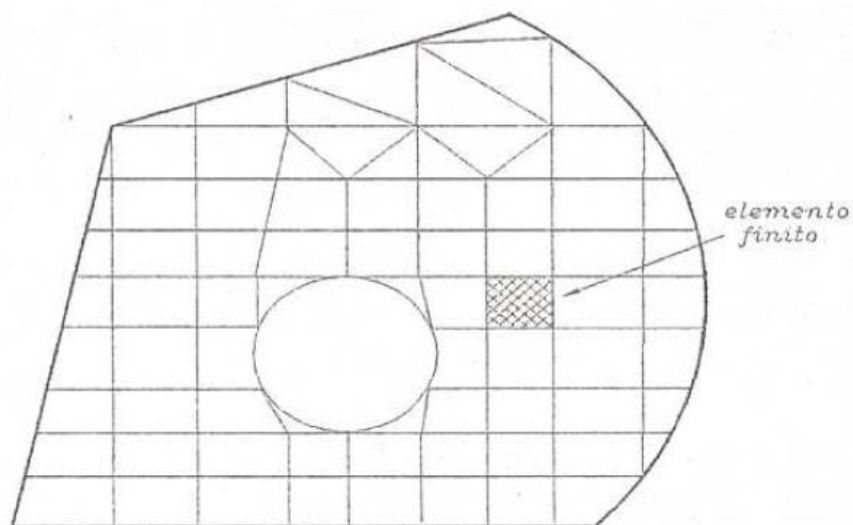
### 8.3. Elementos Finitos

#### 8.3.1. Fundamentos

Diversos pesquisadores tiveram sua parcela na cooperação no sistema de elementos finitos. Com o objetivo de um cálculo aproximado para as resoluções dos impasses matemáticos, o matemático Gauss sugestionou o emprego de funções de aproximação, surge então à metodologia dos elementos finitos (MEF). Por mais de 10 anos, na busca para as resoluções das questões muitas hipóteses e metodologias analíticas foram desenvolvidas, contudo, foi possível notar que ocorreu pouco avanço proveniente dos obstáculos e das barreiras. Apenas por volta do Século 20 que esta teoria efetivada. “Em 1950, o desenvolvimento prático desta análise, a criação e desenvolvimento de modelos matemáticos confusos fora possível com o surgimento do computador”. Engenheiros sugestionaram uma hipótese de análise estrutural quando projetavam aviões para o Boeing, esta hipótese é muito parecida da hipótese do MEF. Finalmente por volta de 1960 escritores aplicavam a nomenclatura de MEF.

#### 8.3.2. Métodos dos elementos finitos

O MEF comumente utilizados apresenta fundamentos na teoria Rayleigh-Ritz e prenuncia a separação do domínio de inserção, transformando a região contínua modesta, através da aplicação de algarismos finitos em apertadas localidades chamadas de elementos finitos.



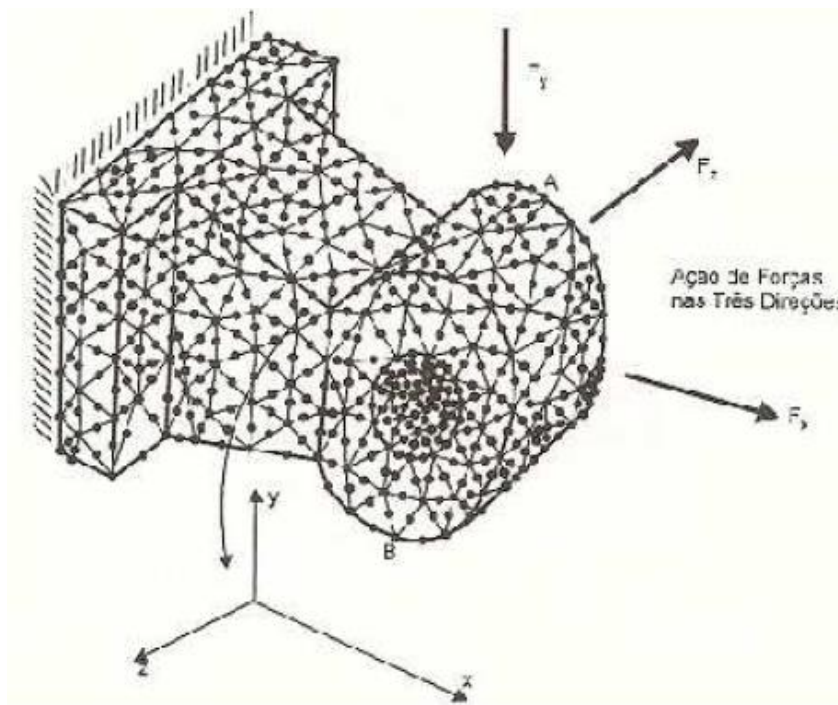
**Figura 30-** Redes de Elementos Finitos

Recebe a nomenclatura de malha de elementos finitos a separação do domínio, conforme a figura acima. Conforme a alteração do volume dos elementos esta rede quadriculada sofrerá alteração na sua dimensão. Na busca por soluções esperadas, sistemas diferenciais são solucionados por meio de modelos matemáticos para se retratar os elementos. Recebe a nomenclatura de nó os segmentos de encontro das retas das malhas. Dentro da esfera de cada elemento temos a manifestação por meio de modelos matemáticos admissíveis.

A aplicação dos elementos tridimensionais necessita respeitar que suas extensões ultrapassem os outros elementos e/ou a obediência às teses sobre teorias simplificadas sejam negativas. A elaboração das teorias aplicadas na metodologia dos elementos finitos é identificada em autores especializados no tema, entretanto a atual obra contém conteúdo de elemento tetraédrico linear, com maior aplicação nos eventos e na sequencia desta obra para finalização acadêmica.

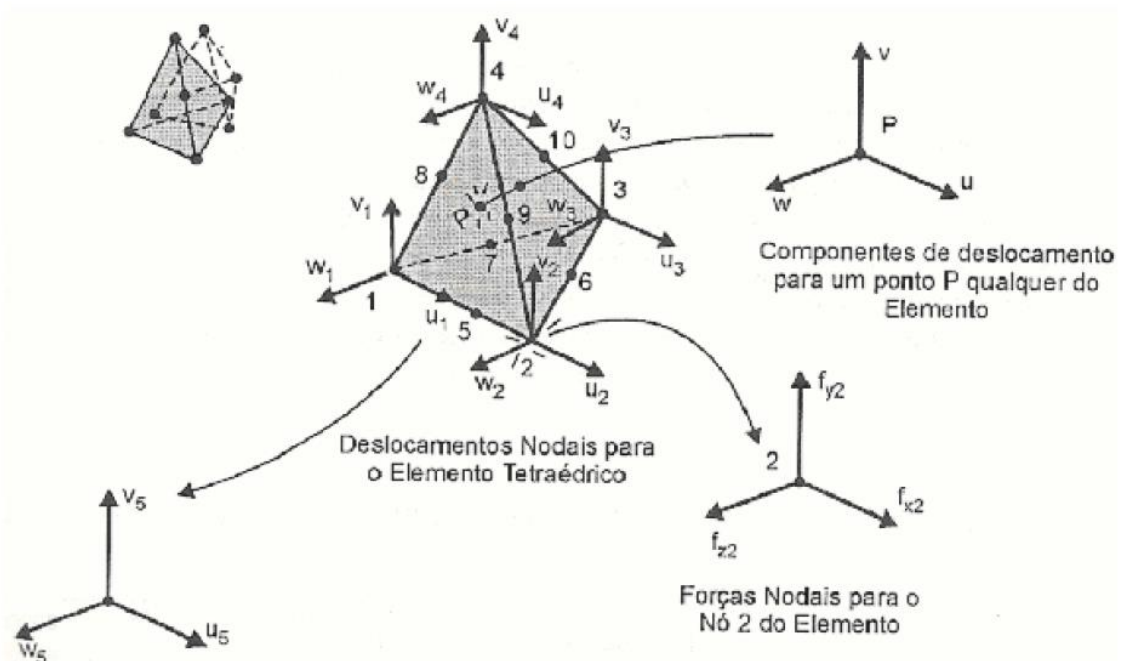
### 8.3.3. Formulação do elemento Tetraédrico de dez nós

O elemento finito tetraédrico de dez nós, conforme Figura 12, e através dos componentes podemos detalhar sua movimentação,  $u$ ,  $v$  e  $w$ , conforme estabelece a metodologia da elasticidade, de movimentação de um corpo no estado tri axial de tensão é efetuada por três componentes de deslocamento. Assim o elemento tetraédrico parabólico apresenta dez nós, possui 3 graus de liberdade em cada nó, possuindo um total de 30 graus de liberdade, com isso a matriz coluna representada pelas forças nodais, ou seja, forças atuantes nos nós, tem dimensão  $30 \times 1$ , e da mesma forma a matriz coluna representada pelos deslocamentos nodais tem dimensão  $30 \times 1$ . A consequência é uma matriz de rigidez, que relaciona o comportamento entre as forças e os deslocamentos, tem dimensão  $30 \times 30$ , como segue:



**Figura 31-** Peça qualquer dividida em elementos finitos

$$\{g\}_{30 \times 1} = [k]_{30 \times 30} \times \{\delta\}_{30 \times 1}$$



**Figura 32-** Elemento finito tetraédrico de dez nós

Na formulação da modelagem, segue três principais passos:

- I. Definição das funções de interpolação - O grau do polinômio de interpolação é definido pelo número de categorias de autonomia do elemento tetraédrico, assim, o polinômio escolhido deverá conter 30 coeficientes desconhecidos. No estado tri axial de tensões, o deslocamento de um ponto qualquer é definido pelas componentes  $u$ ,  $v$  e  $w$  nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$  respectivamente e o deslocamento do ponto depende da localização do mesmo no sólido. Como se tem três componentes de deslocamento em cada nó, tem-se três funções a fim de indicar a região de mobilidade. Assim, com os 30 coeficientes têm-se três funções para os deslocamentos  $u$ ,  $v$  e  $w$  respectivamente e cada função utilizará quatro coeficientes. Como cada uma das funções depende de  $x$ ,  $y$  e  $z$ , ou seja, o deslocamento varia linearmente com  $x$ , com  $y$  e com  $z$ , as funções serão de três variáveis. O conjunto das três funções é expressa por:

$$\begin{aligned}
u(x, y, z) &= a_1 + a_2x + a_3y + a_4z + a_5xy + a_6xz + a_7yz + a_8x^2 + a_9y^2 + a_{10}z^2 \\
u(x, y, z) &= a_{11} + a_{12}x + a_{13}y + a_{14}z + a_{15}xy + a_{16}xz + a_{17}yz + a_{18}x^2 + a_{19}y^2 + a_{20}z^2 \\
u(x, y, z) &= a_{21} + a_{22}x + a_{23}y + a_{24}z + a_{25}xy + a_{26}xz + a_{27}yz + a_{28}x^2 + a_{29}y^2 \\
&\quad + a_{30}z^2
\end{aligned}$$

II. Cálculo das Deformações - Na teoria da elasticidade, adotando a teoria das funções de interpolações, conseguimos determinar uma localização que esteja adentro do elemento finito através de modelos matemáticos de deformações. Tem-se então:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial u}{\partial y}, \quad \varepsilon_z = \frac{\partial u}{\partial z}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}, \quad \gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial x}, \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial y}$$

Essas funções contêm derivadas parciais, assim, efetuando as derivadas das funções u, v e w que fornecem o deslocamento em todos os pontos, tem-se:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} = a_2 + a_5y + 2a_8x$$

$$\varepsilon_y = \frac{\partial u}{\partial y} = a_{13} + a_{15}x + a_{17}z + 2a_{18}y$$

$$\varepsilon_z = \frac{\partial u}{\partial z} = a_{24} + a_{26}x + a_{27}y + 2a_{30}z$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = a_3 + a_5x + a_7z + 2a_9y + a_{12} + a_{15}y + a_{16}z + 2a_{18}x$$

$$\gamma_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial x} = a_3 + a_5x + a_7z + 2a_9y + a_{12} + a_{15}y + a_{16}z + 2a_{18}x$$

$$\gamma_{yz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial v}{\partial y} = a_{14} + a_{16}x + a_{17}y + 2a_{20}z + a_{23} + a_{25}x + a_{27}z + 2a_{29}x$$

Assim o elemento sólido tetraédrico parabólico é um elemento de deformações que variam linearmente com x, y e z.

III. Cálculo das Tensões - O cálculo das tensões decorre imediatamente a partir do cálculo das deformações, utilizando, da teoria da elasticidade, a equação:

$$\{\sigma(x, y, z)\} = [D].\{\varepsilon(x, y, z)\}$$

As expressões para o cálculos das tensões são válidas para qualquer ponto submetido a um estado tri axial de tensões e, foi desenvolvido a partir da teoria da elasticidade. Em particular no caso do elemento tetraédrico, foram utilizados os valores de deformações  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$  e  $\varepsilon_z$ . que resultam no campo de deslocamento.

#### 8.4. Componentes Comuns na Estampagem

##### 8.4.1. Espigas

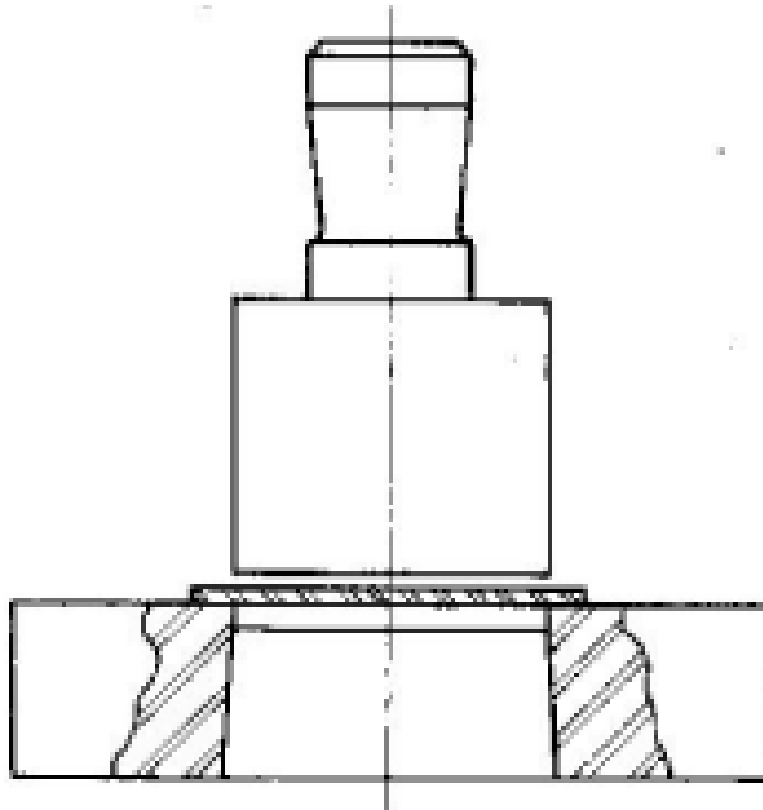
A parte móvel do estampo do martelo da prensa é presa fazendo da utilização de uma espiga (a mesma é um pino enroscado). Este componente é penetrado em um orifício presente no martelo, faz da utilização de um parafuso para realizar a fixação do conjunto.

Este componente apresenta uma geometria cilíndrica e tanto sua extensão como o diâmetro da espiga deve ser compatível com o orifício que já este presente no martelo da prensa, local que será realizado a montagem do sistema. Usualmente, o material mais comumente utilizado para a espiga é aço comum SAE 1010 e SAE 1020, existe alguns sistemas especiais que será necessário que a espiga receba um tratamento térmico de acordo com as aplicações necessitadas pelo sistema.

A especificação da espiga deve ser realizada de tal forma que a mesma possa atender o esforço do peso móvel juntamente com o esforço da extração. Realizando uma análise da estrutura da espiga, é possível determinar que a localização mais frágil se encontra no diâmetro menor, por esta razão deve ser realizado um cálculo considerando as cotações do núcleo da rosca como o local mais escrupuloso.

Segue alguns exemplos de estampos para a sua construção e execução:

- **Estampo de corte simples:** Utilizado para sistemas no qual a necessidade de corte é sem muita precisão, a tolerância permitida para a precisão do corte está entre  $\pm 0,2$  mm;



**Figura 33-** Estampo de corte simples

- Estampo aberto com guia para o punção:

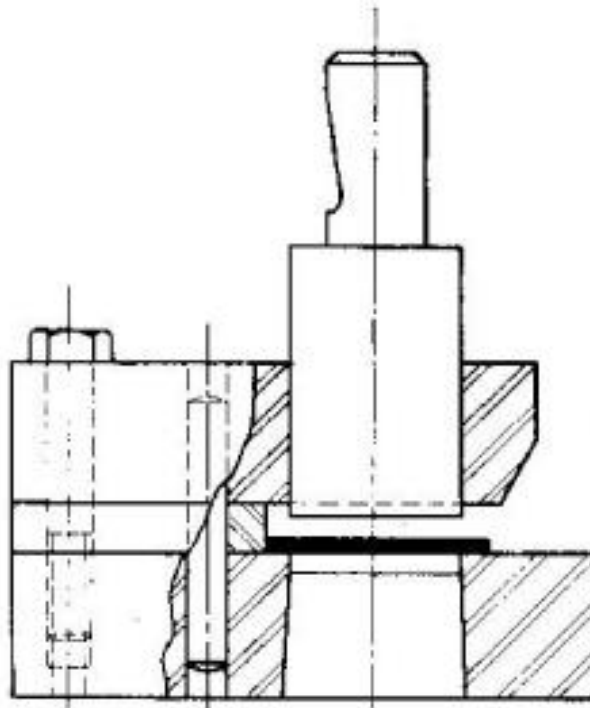


Figura 34- Estampo aberto com guia para o punção

- Estampo fechado com guias para o punção e suporte para a fita:

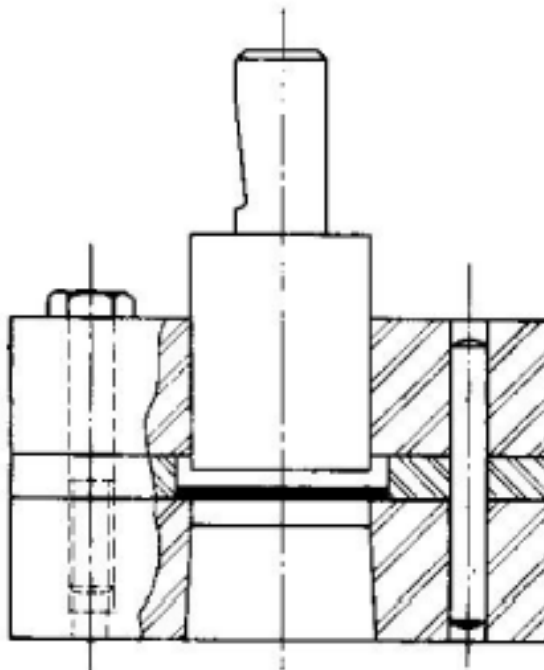
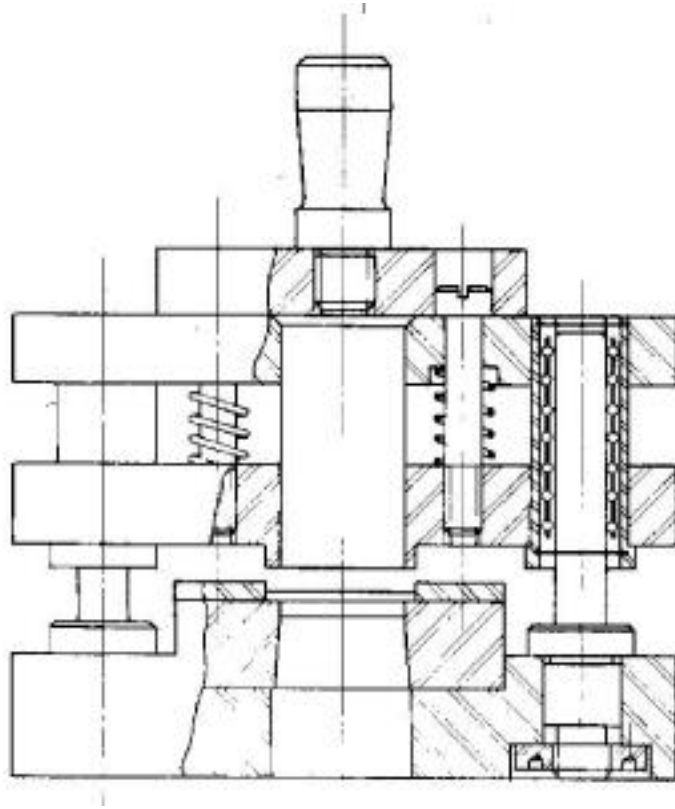


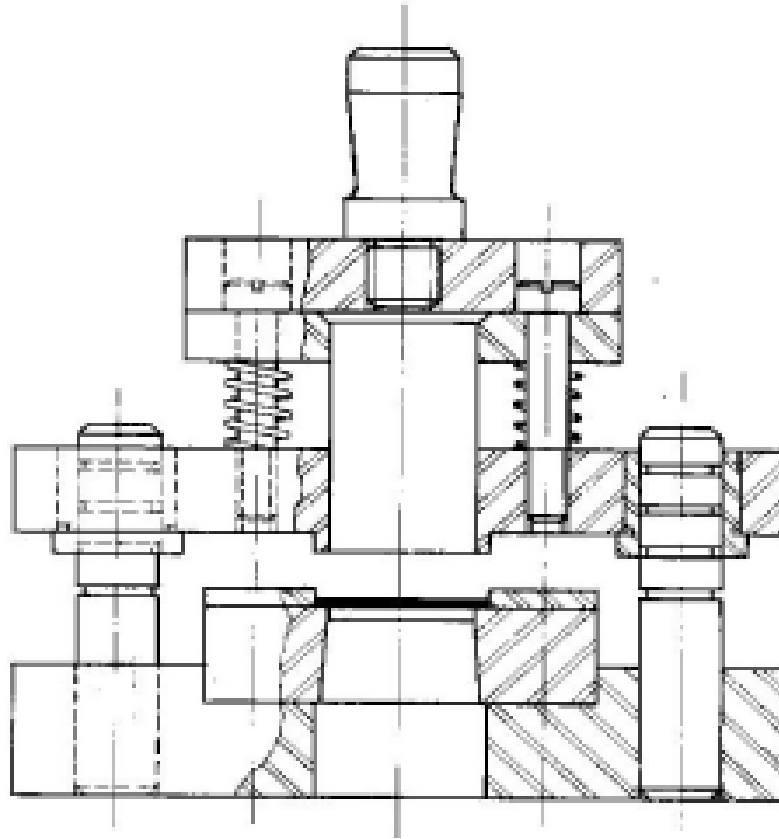
Figura 35- Estampo fechado com guias para o punção e suporte para fita

- Estampo com coluna de guias, extrator fixo e suporte para fita:



**Figura 36-** Estampo com colunas de guias, extrator fixo e suporte para fita

- Estampo com extrator flutuante e porta – punção guiado por colunas:



**Figura 37-** Estampo com extrator flutuante e porta

#### 8.4.2. Local da Espiga e do Extrator

A localização da espiga encontra-se na parte central dos esforços e não precisamente na parte central do sistema, caso esta localização esteja de maneira mal posicionada um lado acabará realizando um esforço maior que o outro, com isso um desnivelamento no punção ocorrerá proveniente dessa carga mal distribuída e das distancias desiguais das guias do cabeçote. Esta carga mal distribuída na matriz e na ferramenta irá trazer para o material defeito como rebarba ou fissuras, sem contar que um lado da espiga sofrerá um desgaste maior que o outro, podendo levar até a quebra do sistema dependendo do esforço sofrido.

#### 8.4.3. Coluna de Guia

As colunas de guia podem conter ou não buchas, as colunas fazem a garantia do alinhamento do conjunto da base e cabeçote. A constituição dessas guias geralmente é de aço de alto teor de carbono (Aço 1040 e 1050) e são temperadas e passam por retífica, ou de Aço 1010 e 1020 que são cementadas, temperadas e retificadas. Em algumas circunstâncias, estas guias podem ser trocadas por outros componentes, onde os mesmos possam assegurar um perfeito alinhamento das bases inferiores e superiores.

Estas colunas tem que possuir extensão a fim de impossibilitar a divisão do cabeçote da base durante o processo, às dimensões das colunas deve estas aptas para atender o sistema para oferecer rigidez ao sistema.

#### 8.4.4. Buchas

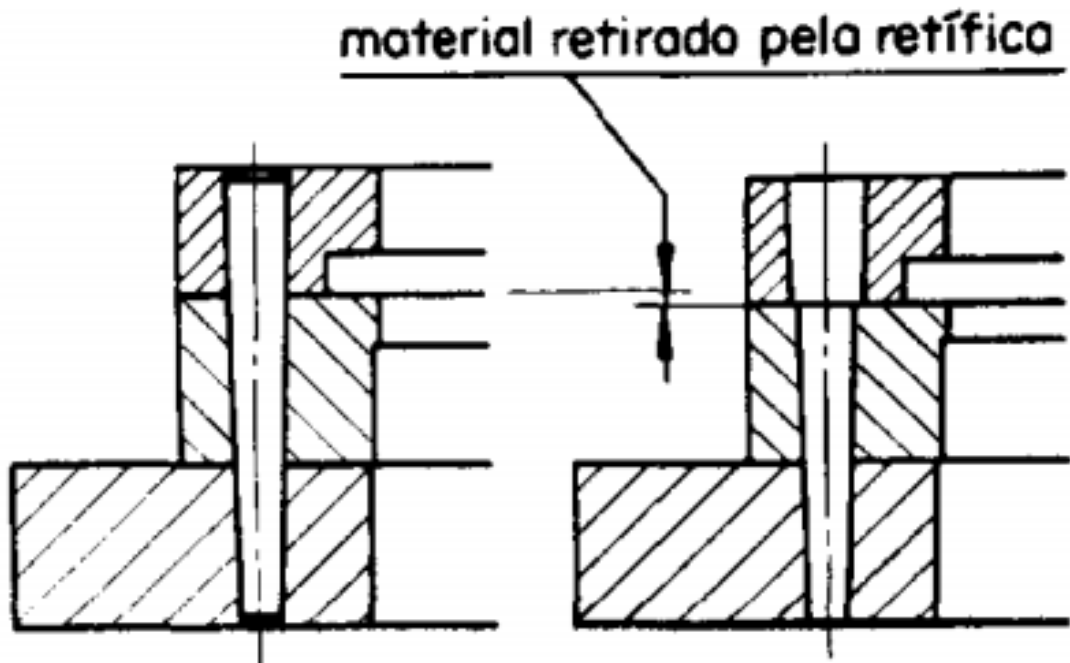
Estes componentes trazem para o sistema uma melhoria das ferramentas, para sua confecção é necessário uma análise do material da coluna porque o mesmo é tem que ser aço com uma resistência inferior das colunas. As buchas se movimentam nas colunas utilizando gaiola de esferas. A fim de evitar erro na hora da montagem, na especificação as colunas devem ter os diâmetros diferentes. Normalmente as buchas são constituídas de Aço 1020 temperado, cementado e retificado.

#### 8.4.5. Parafusos e Pinos de fixação

Componentes como parafusos e pinos para fixação, apresentam uma finalidade de realizar a união de diversos elementos reciprocamente com suas específicas bases. Os parafusos são dimensionados para aguentarem apenas parte da força provocada pelo sistema. Os parafusos e pinos usualmente apresentam o mesmo dimensionamento.

Os pinos por sua vez são superdimensionados porque são componentes que serve de referência e absorvem a maior parte da força provocada pelo sistema operacional, em sua grande maioria, são constituídos de aço 1010 ou aço 1020 cementados e retificados, ocasiões na qual os pinos tem uma função de enorme obrigação sua constituição deve ser de aço prata. Para evitar que ocorra quebra ou fissuras nos pinos, recomenda-se a utilização de pinos cilíndricos. Para prender a matiz a sua respectiva base recomenda a utilização de pinos

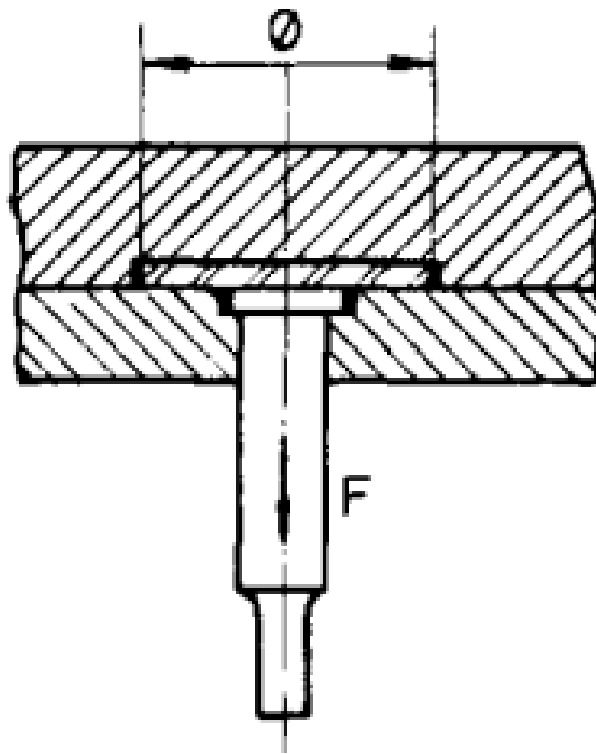
cilíndricos para evitar problemas como a afiação da matiz, pode ocorrer ainda um desalinhamento dos componentes.



**Figura 38** - Defeito encontrado no pino guia

#### 8.5. Placa de Choque

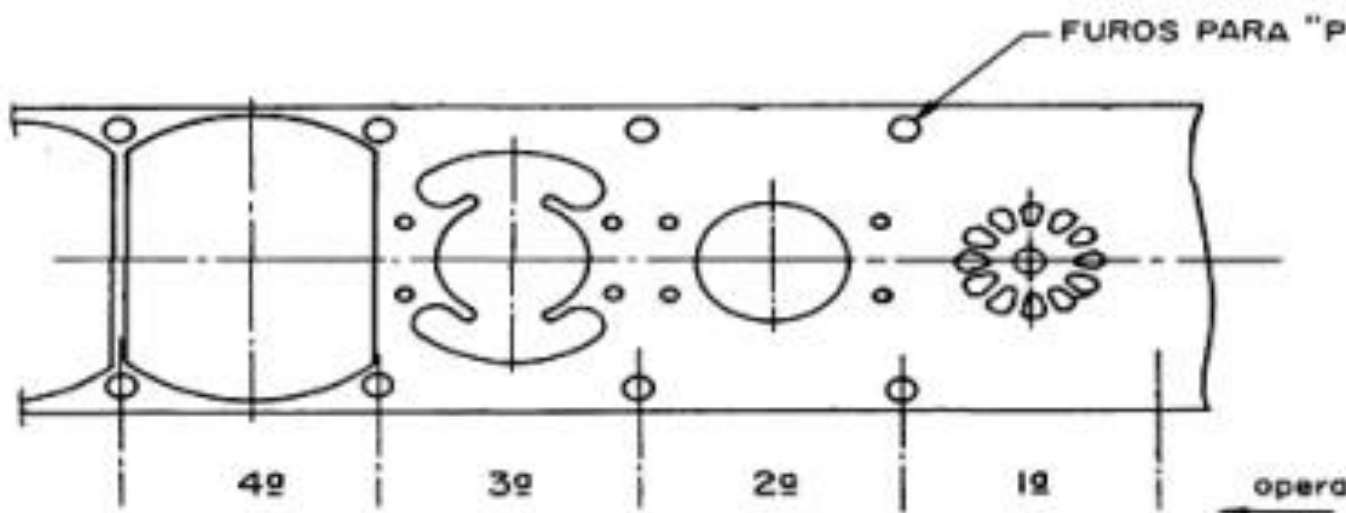
No dimensionamento do sistema deve-se inserir entre a cabeça do punção e o cabeçote do ferramental uma chapa de aço com uma dimensão limite de 5 mm, afim de não permitir que a cabeça do punção não adentre o cabeçote.



**Figura 39-** Placa de Choque

### 8.6. Pinos Pilotos

Estes dispositivos possibilitam adentrar os rasgos ou furos do respectivo objeto ou em furos que se deseja realizar na parte de fora.



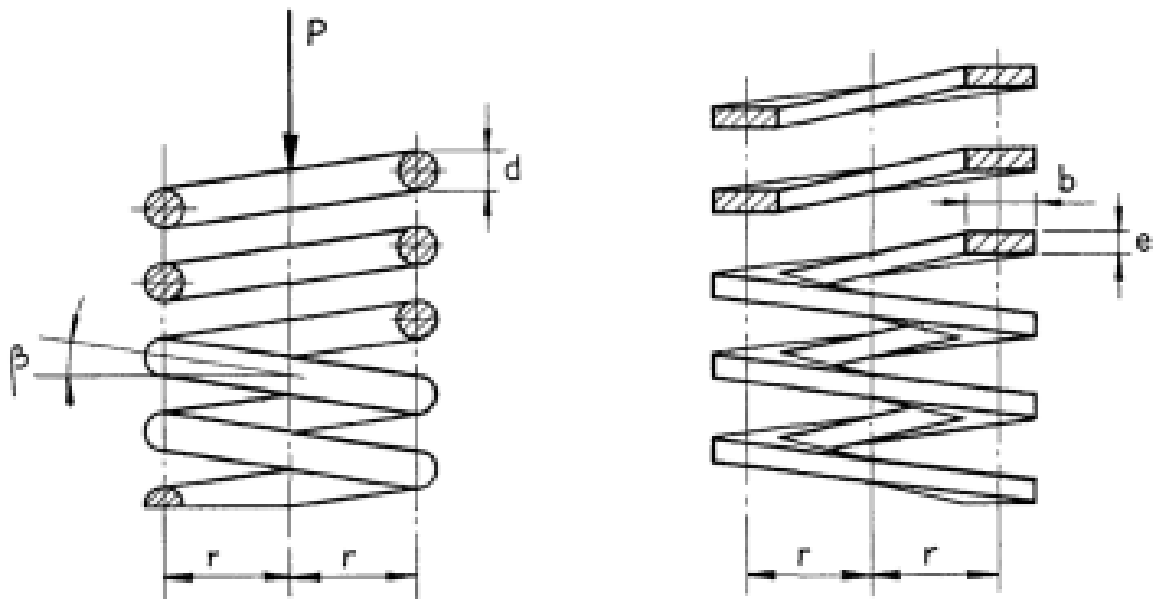
**Figura 40-** Exemplos de furos na própria peça

## 8.7. Molas

No processo de dimensionamento uma análise dos tipos de molas deve ser realizada a fim de determinar qual irá atender ao sistema empregado. Iremos detalhar algumas molas abaixo

### 8.7.1. Molas Helicoidais

Sua característica construtiva é de inúmeras voltas de fio de aço com sua seção interna circular. Na aplicação de um esforço axial ( $P$ ), a mola sofre uma deformação que faz com que a mesma possa ser alongada ou encurtada, fazendo com que o ângulo  $\beta$  aumente ou venha a diminuir.



**Figura 41-** Mola Helicoidais

### 8.7.2. Molas Múltiplas

Quando o sistema gera um esforço muito grande em uma localização bastante reduzida é necessária a aplicação das molas múltiplas concêntricas. Entretanto todas as molas tem que conter uma mesma flecha.

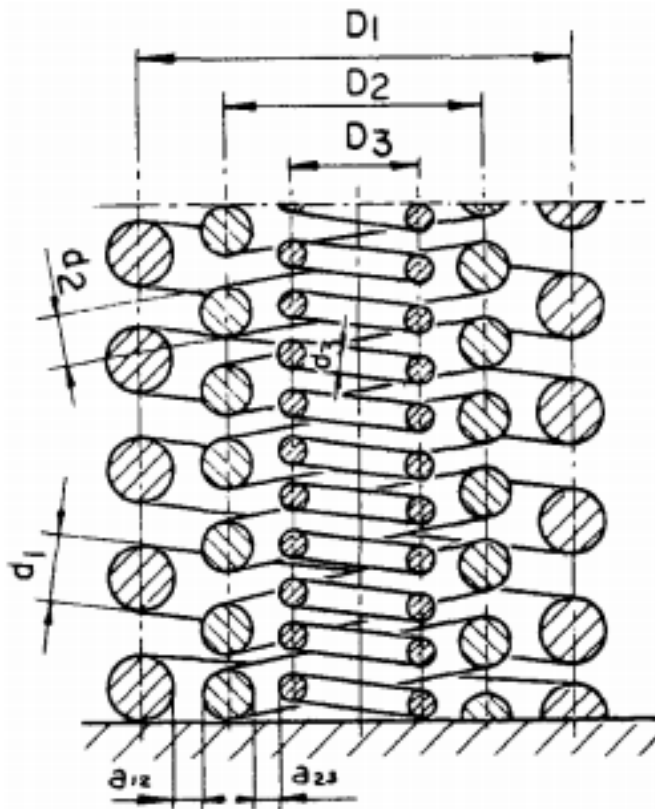
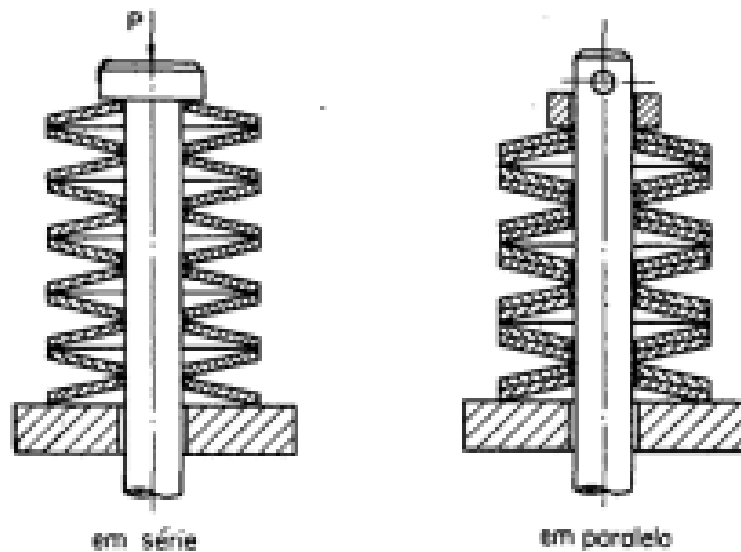


Figura 42- Mola Múltipla

### 8.7.3. Molas Prato

Este conjunto de molas apresenta na sua característica construtiva inúmeras arruelas empilhadas, no qual, a montagem deve apresentar suas cavidades opostas, a maior vantagem da aplicação é a variação da rigidez, sua mobilidade e a eficiência para cargas, estas aplicações está diretamente ligada ao número de arruelas empregadas e a seu posicionamento no sistema.



**Figura 43-** Molas Prato

## 9. METODOLOGIA

Esta seção apresenta o relato das atividades realizadas para se chegar nos resultados finais. Estas atividades seguiram o que foi proposto na fase de planejamento, contudo devido a algumas limitações, alguns parâmetros foram alterados. Além disso, são apresentados os dados referentes aos materiais utilizados nas análises.

### 9.1. Simulação

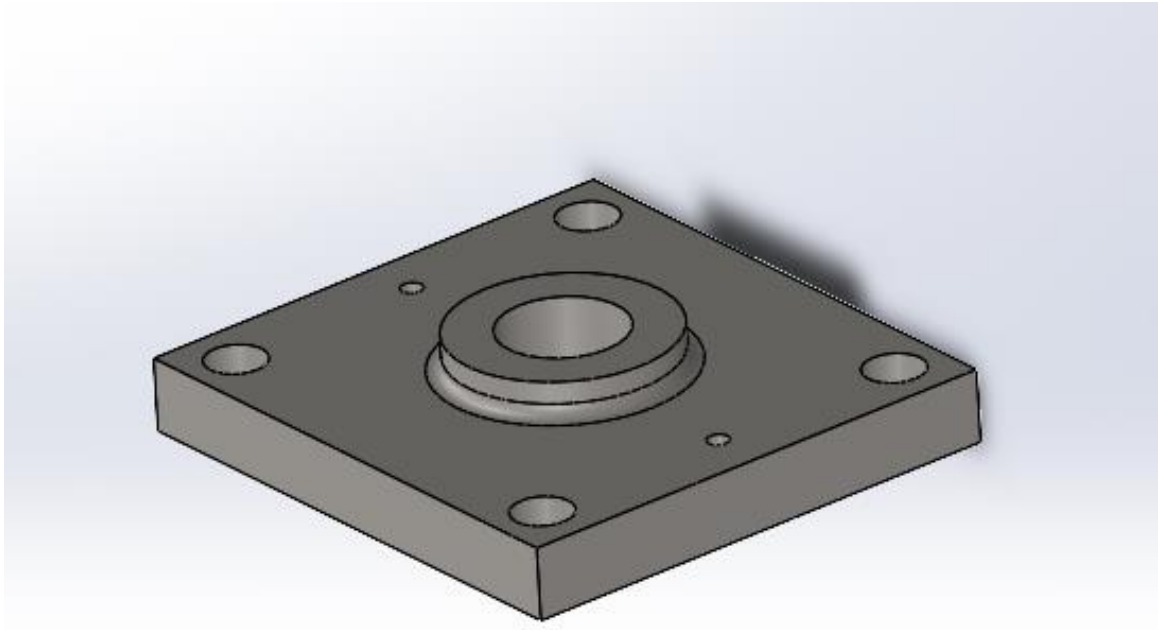
Escolheu-se o SolidWorks para simulação devido a versatilidade do software, além da fácil utilização do programa. Realizou-se a modelagem em 3-D de toda a estrutura da prensa, como a matriz que realiza o corte como extrator fixo, extrator móvel, punção. Os passos de simulações foram realizados no pacote Simulation do SolidWorks, criando um estudo novo e escolhido o elemento 3-D por considerar concentradores de tensão, com objetivo de trazer um resultado mais apurado e que garanta uma maior convergência dos dados e simulação estática.

O primeiro passo consistiu em associar o material de acordo com a Figura 45, que neste caso é o Aço 1.2210, é um material da biblioteca do SolidWorks era o que mais se aproximava do nosso material o Aço AISI D2. pois o software não possuía as especificações deste material.

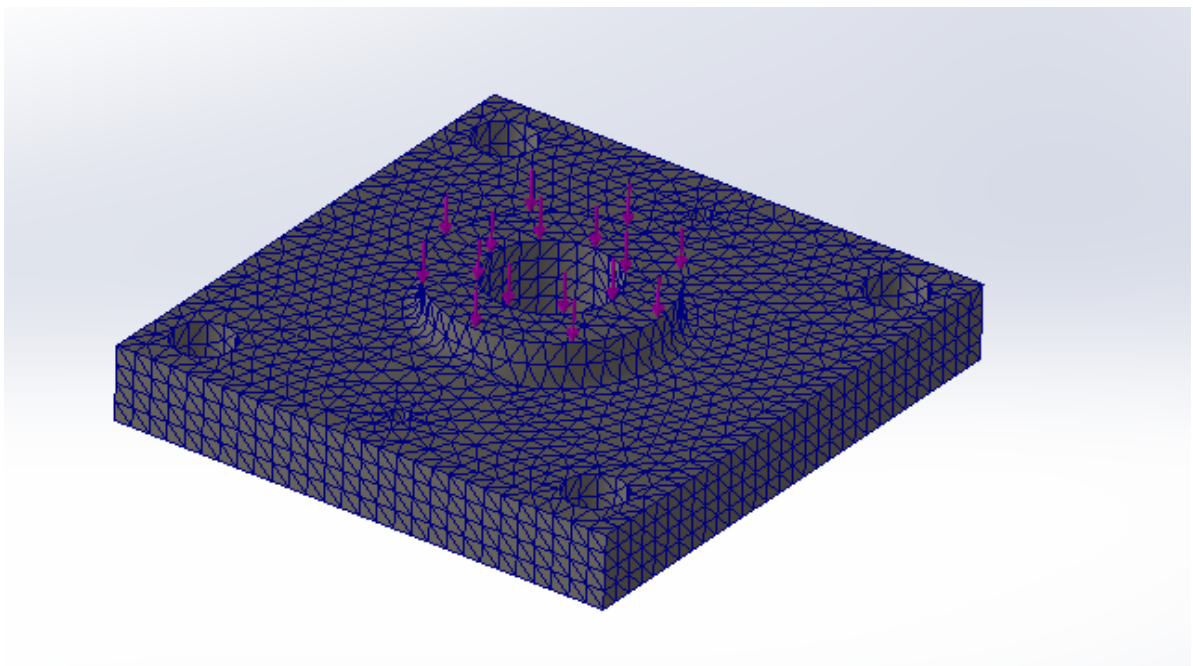
Propriedade	Valor	Unidades
Módulo elástico	200000	N/mm <sup>2</sup>
Coefficiente de Poisson	0.29	N/A
Módulo de cisalhamento	80000	N/mm <sup>2</sup>
Massa específica	7870	kg/m <sup>3</sup>
Resistência de tração	670	N/mm <sup>2</sup>
Resistência à compressão		N/mm <sup>2</sup>
Limite de escoamento	370	N/mm <sup>2</sup>
Coefficiente de expansão térmica	1.1e-05	/K
Condutividade térmica	14	W/(m·K)
Calor específico	440	J/(kg·K)
Coefficiente de amortecimento do material		N/A

**Figura 44** – Dados do Material utilizado na simulação

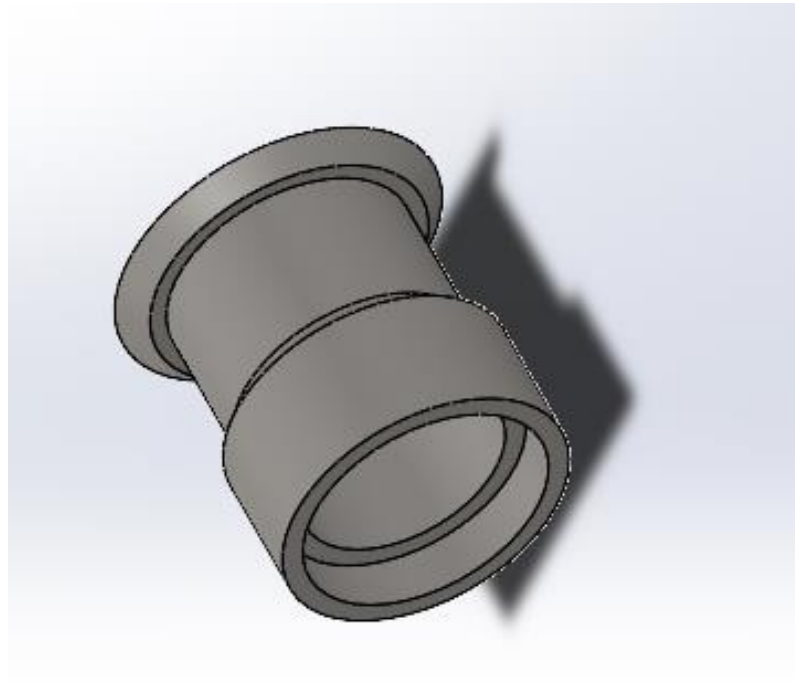
Em seguida especificou-se as ligações, ou seja, determinaram-se as faces fixas que não contém deslocamento. Depois foi aplicado o carregamento, determinando as forças atuantes na peça, sendo que são as mesmas encontradas no método analítico, calculo á mão, com o objetivo de encontrar valores similares para realização das devidas comparações. Selecionou-se a malha média, pois no software é possível selecionar malha grossa, média fina. Ao realizar a simulação as equações de análise foram calculadas diretamente pelo programa. Finalmente os resultados foram gerados, sendo eles: Tensão por Von Mises, Força de Reação Resultante e Deformação. As furas abaixo apresenta a aplicação das cargas na simulação realizada nos componentes da prensa.



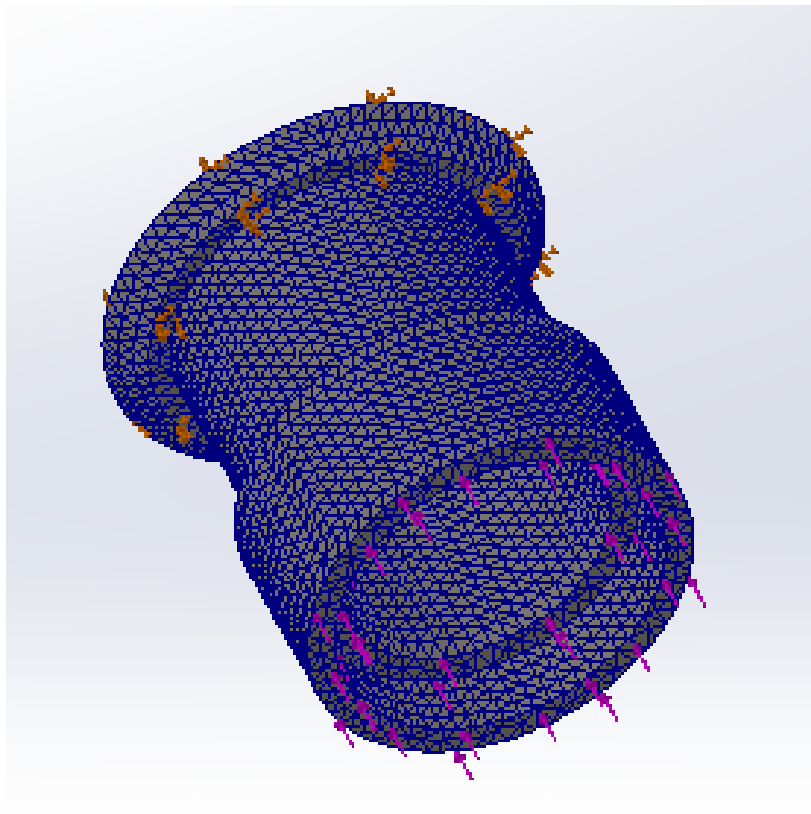
**Figura 45** - Modelagem do Extrator fixo em 3D



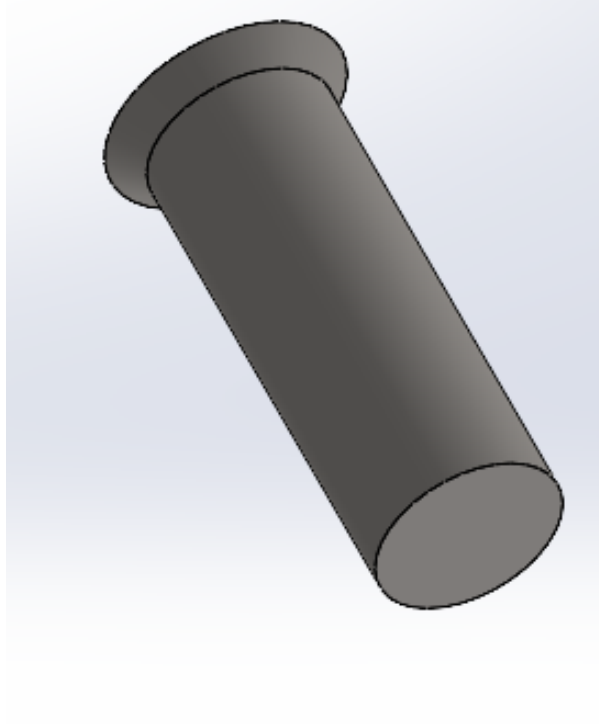
**Figura 46** - Extrator Fixo com a malha e posição das forças



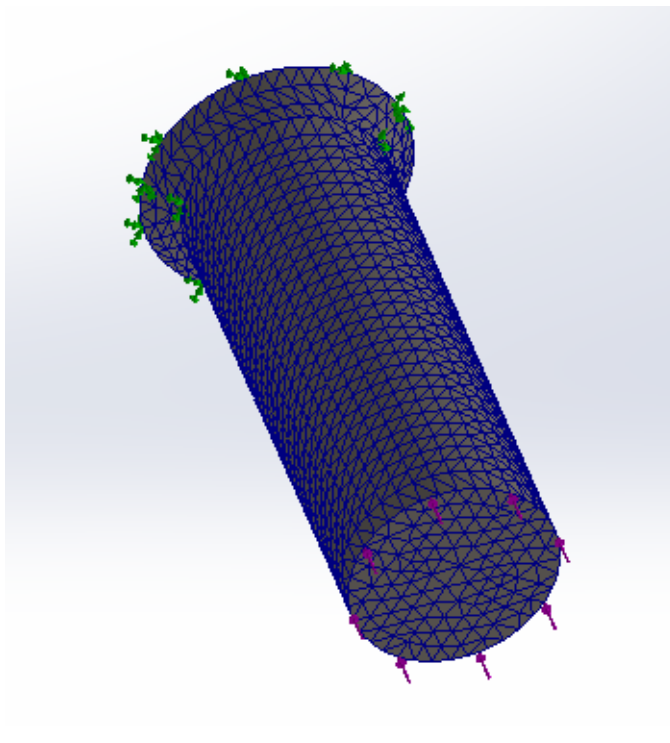
**Figura 47** - Modelagem do Extrator móvel em 3D



**Figura 48** - Extrator Móvel com a malha e posição das forças



**Figura 49** - Modelagem do Punção em 3D




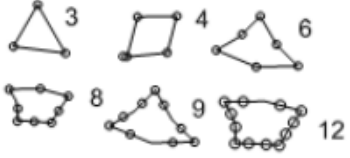
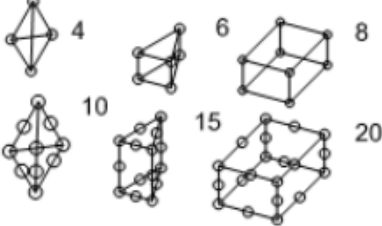
**Figura 50**- Extrator Móvel com a malha e posição das forças

## 9.2. Comparação de Resultados

Os resultados tanto do método analítico quanto da simulação foram comparados com a tensão admissível, sendo que a tensão solicitada deverá ser menor que a tensão admissível. Especificamente na simulação numérica foi possível analisar os concentradores de tensão, forças resultantes e deformação, sendo estes imprescindíveis para análise de qualquer projeto. Além disso, comparou-se qualitativamente os resultados obtidos entre os métodos com o objetivo de evidenciar a qualidade da metodologia aplicada

### - Principais parâmetros utilizados na simulação

- i. **Malha** - O processo de aplicação do método dos elementos finitos se baseia na reprodução de um sistema analítico igual ao sistema básico, compondo-se de um sistema de elementos, que mediante a sua essência estrutural do protótipo tem a capacidade de serem elementos em 1-D (unidimensionais), 2-D (bidimensionais) ou 3-D (tridimensionais), retratado na Figura 1. Os números junto ao elemento indicam o número de nós de cada um. Cada nó, dependendo do elemento, possui três ou 6 graus de liberdade. O Simulation Xpress, dado as suas limitações trabalha apenas com o elemento sólido Tetraédrico de 10 nós (3 graus de liberdade por nó), que, porém, permite um excelente resultado, pois é um elemento de alta qualidade.

ELEMENTOS 1D	LINHAS E ARCOS	
ELEMENTOS 2D	TRIÂNGULOS QUADRILÁTEROS	
ELEMENTOS 3D	TETRAÉDRICOS PENTAÉDRICOS HEXAÉDRICOS	

**Figura 51-** Tipos de malhas de elementos finitos

- ii. **Posicionamento das forças** – A posição das forças na peça é muito importante, e neste trabalho.
- iii. **Cálculo da tensão do simulador** - O Simulation Xpress calcula a tensão de Von Misses e o fator de segurança:

$$\sigma_{vm} = \sigma_{adm} = \frac{\sigma_{lim}}{C.S}$$

Onde:

$\sigma_{adm}$ - Tensão Admissível

C. S – Coeficiente de Segurança, sendo maior ou igual a 1

$\sigma_{lim}$ - Tensão Limite do material (dúctil ou frágil)

Materiais Dúcteis = Tensão de Escoamento

Materiais Frágeis = Tensão de Ruptura

A estrutura de cálculo em termos de análise do MEF, para solução dos problemas segue sempre o mesmo princípio a seguir:

- a. Construção do modelo matemático;
- b. Construção da malha (protótipo de elementos finitos);
- c. Resolução do modelo (solver);
- d. Análise de Resultados;

O grupamento das matrizes é um sistema modular que é constituído por uma porta matriz (uma placa inferior estacionária), uma porta punção (uma placa superior), no mínimo dois sistemas de postes guias e buchas que fazem parte dos sistemas das guias.

Os sistemas de matrizes que são menores são conjuntos com uma haste projetada que percorre todo o topo da superfície do alicerce do punção.

É necessário que este sistema de matrizes conserve um posicionamento de todos os seus componentes em um perfeito alinhamento ao longo do processo de elaboração da matriz estágio e durante suas atuações no sistema de produção do ciclo da matriz. Na teoria, um perfeito sistema de matrizes é projetado para aguentar os ciclos de utilização, sem precocemente não ter condições de manter o seu devido alinhamento. Algumas condições deveram ser avaliadas e verificadas a fim de se ter uma administração para manter o sistema em um bom alinhamento:

- Determinação do projeto para os limites e para os dimensionais;
- Recursos para a realização de ajustes no conjunto cilíndricos;
- Variação de elementos ligados aos sistemas de matrizes presentes;
- Estima de uma variante aceitável no alinhamento do sistema de guia e as buchas contidas nas guias;
- Particularidades para os arranjos de sistemas e para os seus respectivos componentes do conjunto;

## **10. RESULTADO E DISCURSSÃO**

### 10.1. Resultado do Método Analítico

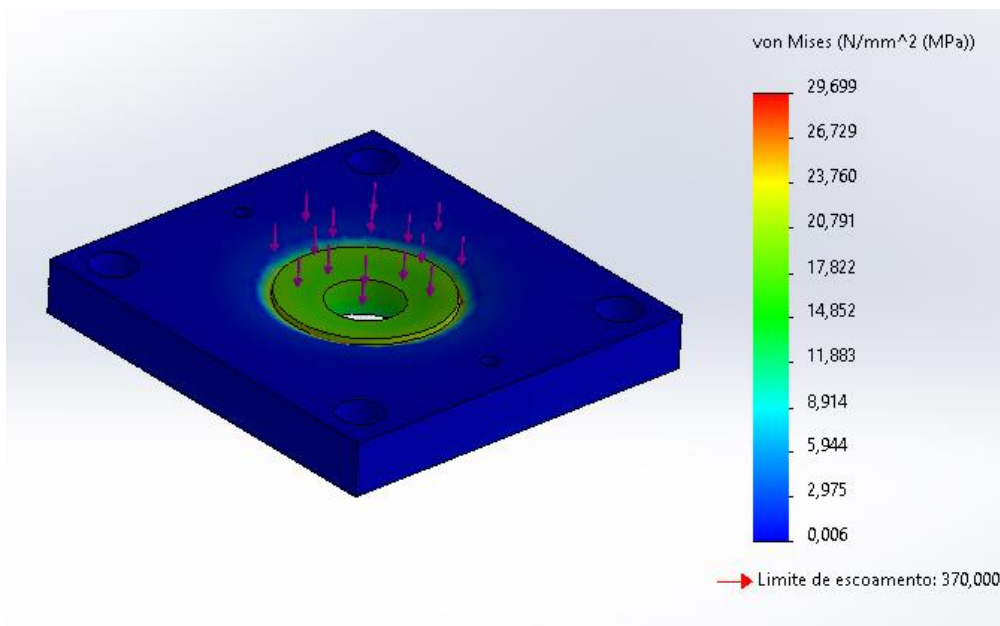
Como mostrado nos tópicos 2.6.2, a força de corte calculada para o nosso ferramental de corte exercer numa chapa de 80 mm de perímetro, 3 mm de espessura e de limite de resistência à tração de 448,2 Mpa é de:

$$F_c = 80 \times 3 \times 358,56 = 86054,4 \text{ N ou } 8772,11 \text{ Kgf.}$$

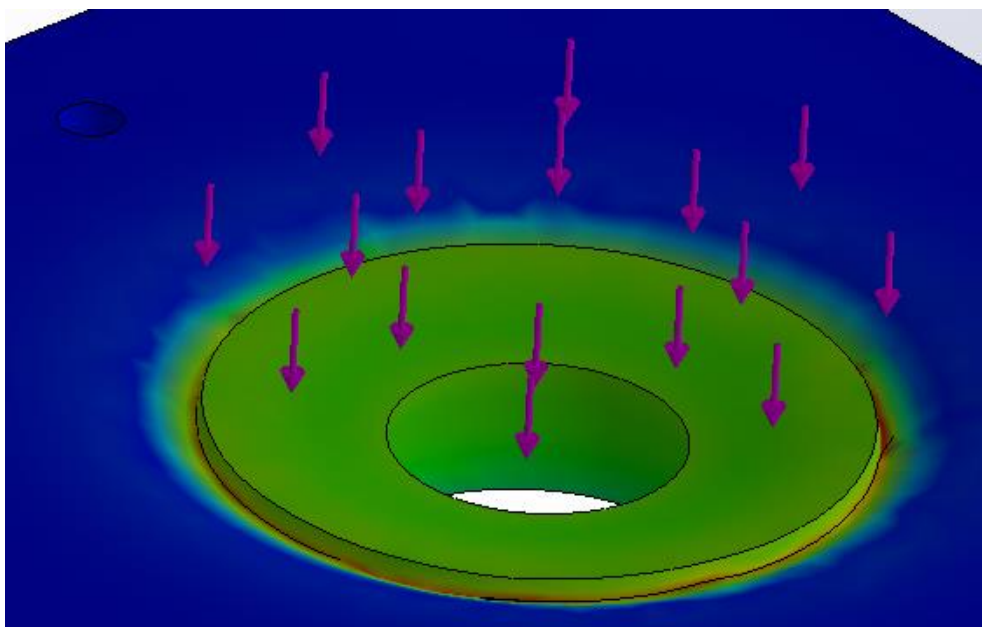
### 10.2. Resultados da Simulação

#### 10.2.1. Extrator Fixo

Foi encontrado o valor da tensão máxima de Von Mises na barra de carga de 29,699 MPa, estando localizada nas regiões entorno do formato da arruela, ou seja, sendo possível visualizar através da cor amarela para laranja do gráfico que é apresentado pela Figura 54, que é a região mais solicitada durante todo o processo de corte da peça. Ainda na Figura 53, podemos verificar que toda a base do Extrator Fixo não sofre nenhuma tensão. A informação principal que podemos agregar com esse resultado é que a tensão máxima obtida nessa simulação não ultrapassou o limite de escoamento do material, ou seja, ele não se romperá com o valor de força utilizado para o corte da chapa.

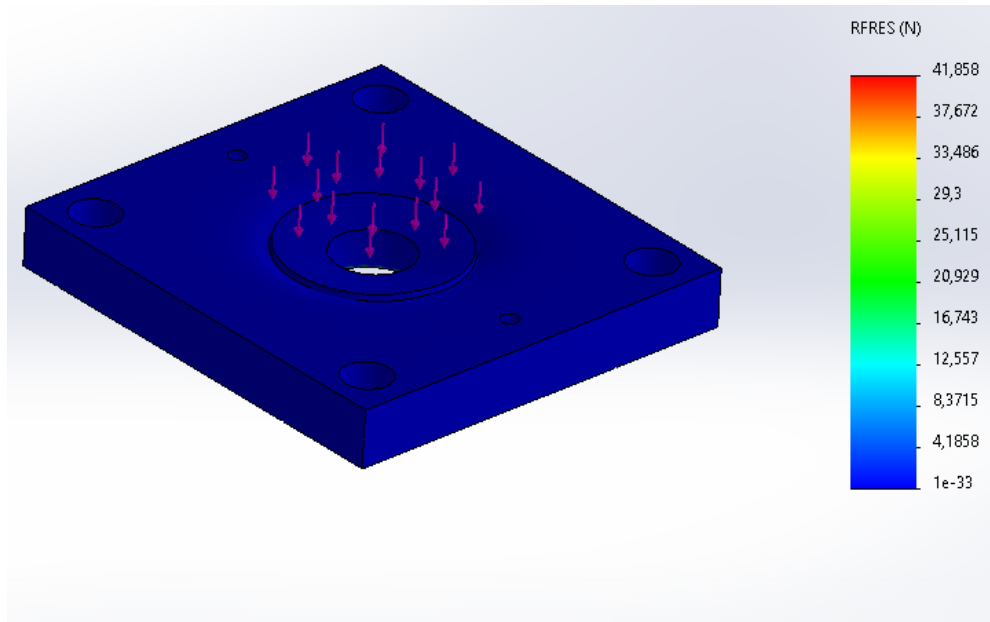


**Figura 52** - Tensão de Von Mises no Extrator Fixo

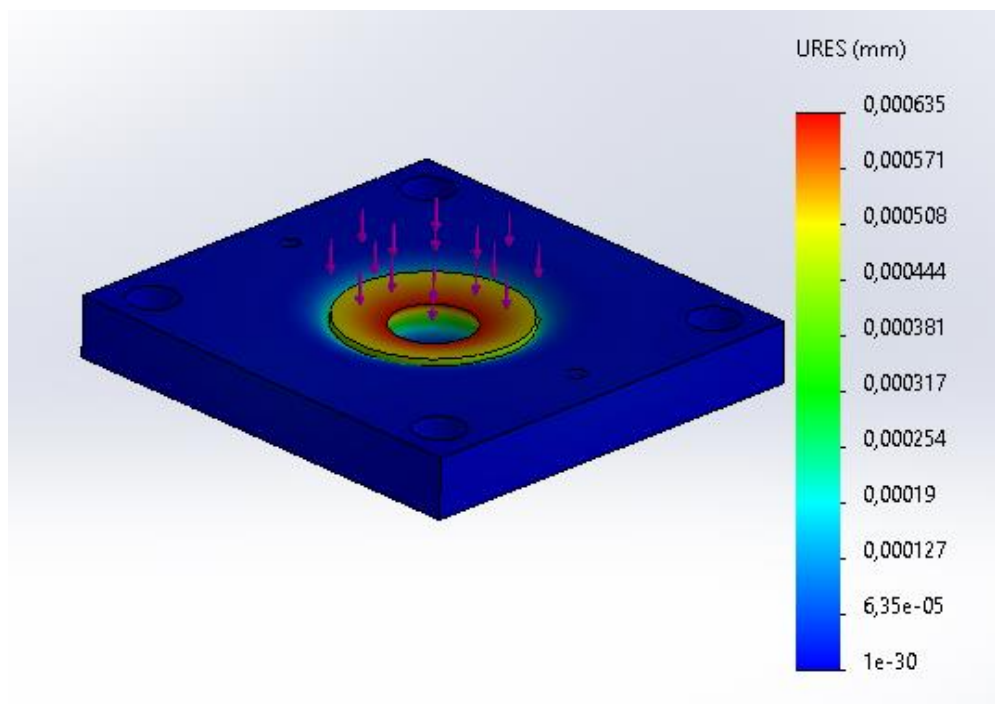


**Figura 53** - Local de maior solicitação de tensão no extrator fixo

Resultados complementares são apresentados pela Figura 55, mostrando o resultado de força resultante do extrato fixo, e pela a Figura 56, mostrando os valores de deslocamento. Estes valores não ultrapassaram os limites, mas verifica-se as regiões mais solicitadas, no deslocamento que é mais nítido já muda para a parte central do ressalto, local onde terá provável mais desgaste.



**Figura 54** - Força Resultante no Extrator Fixo

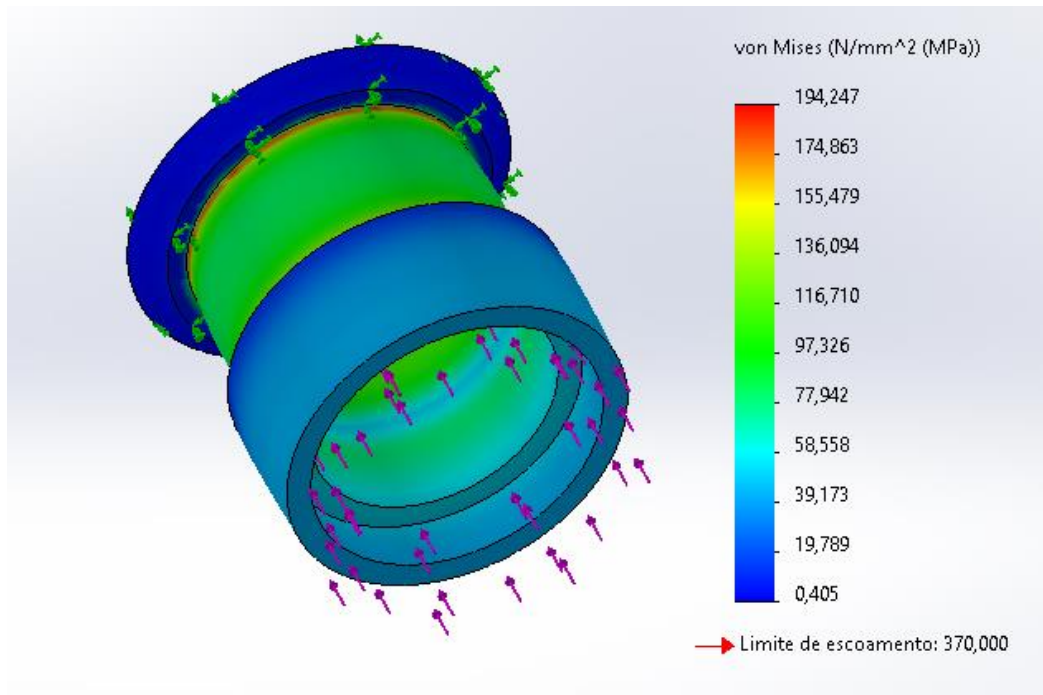


**Figura 55** - Deslocamento em mm no Extrator Fixo

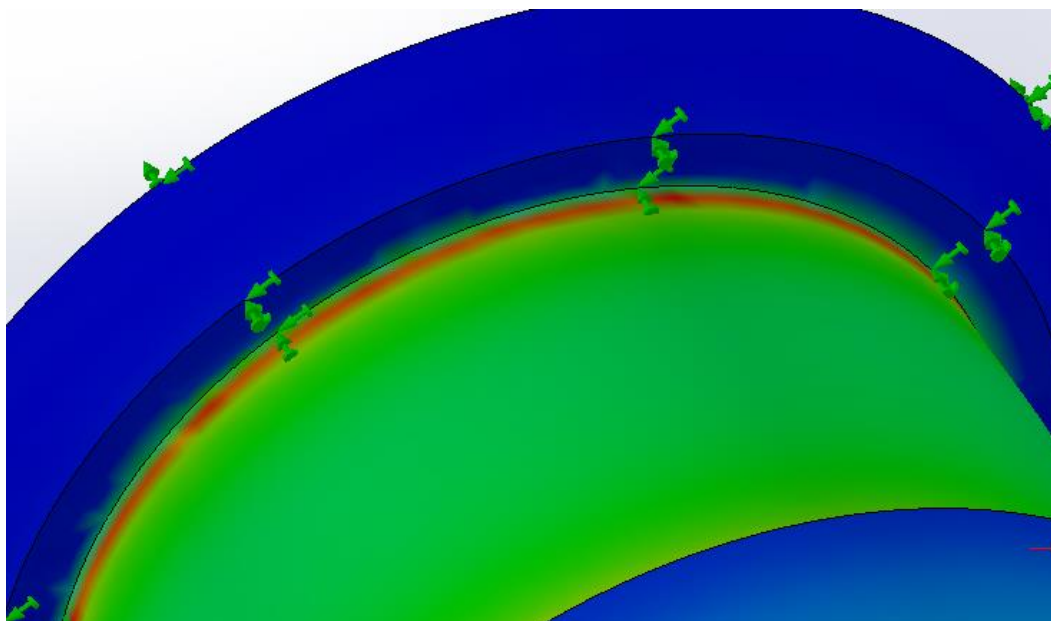
### 10.2.2. Extrator Móvel

Foi encontrado o valor da tensão máxima de Von Mises na barra de carga de 194,247MPa, estando localizada nas regiões entorno do formato da arruela, ou seja, sendo

possível visualizar através da cor amarela para laranja do gráfico que é apresentado pela Figura 57, que é a região mais solicitada durante todo o processo de corte da peça. A informação principal que podemos agregar com esse resultado é que a tensão máxima obtida nessa simulação não ultrapassou o limite de escoamento do material, ou seja, ele não se romperá com o valor de força utilizado para o corte da chapa.

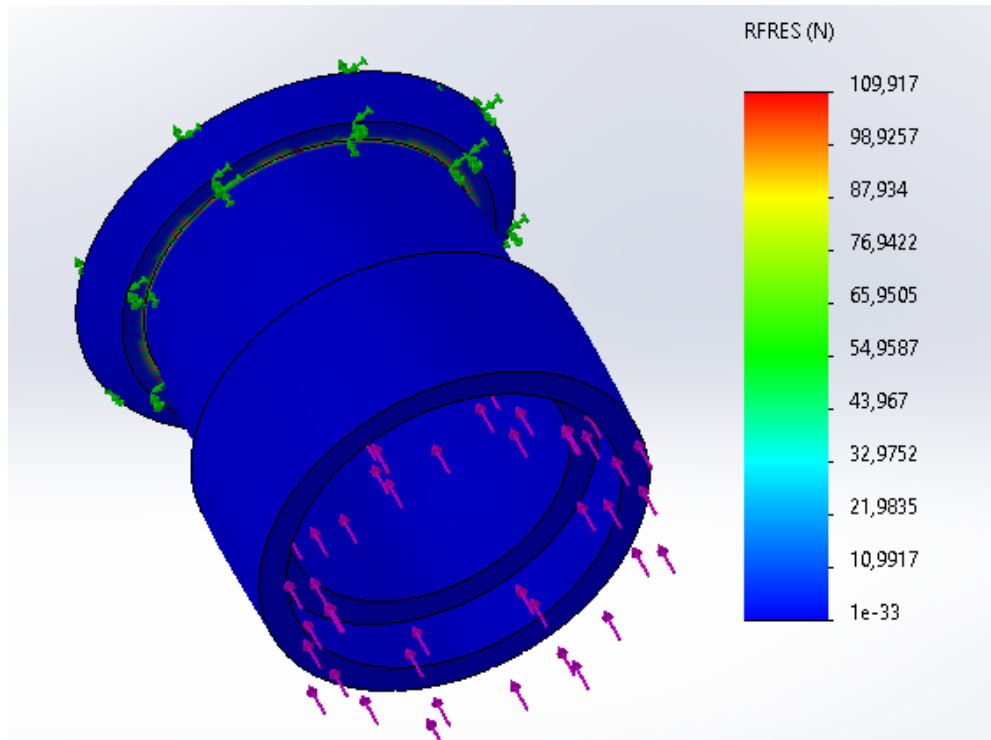


**Figura 56** - Tensão de Von Mises no Extrator Móvel

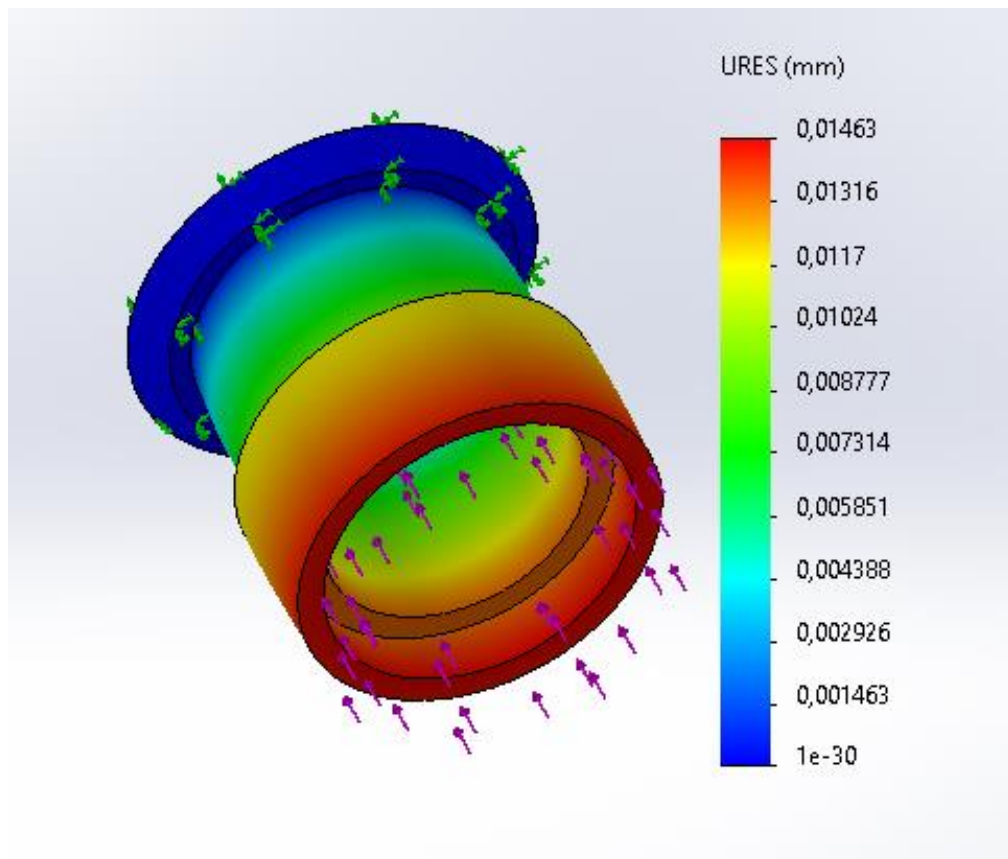


**Figura 57** - Local de maior solicitação de tensão no extrator móvel

Resultados complementares são apresentados pela Figura 59, mostrando o resultado de força resultante do extrator móvel, e pela a Figura 60, mostrando os valores de deslocamento. Estes valores não ultrapassaram os limites, mas verifica-se as regiões mais solicitadas, no deslocamento que é mais nítido já muda para a parte central do ressalto, local onde terá provável mais desgaste.



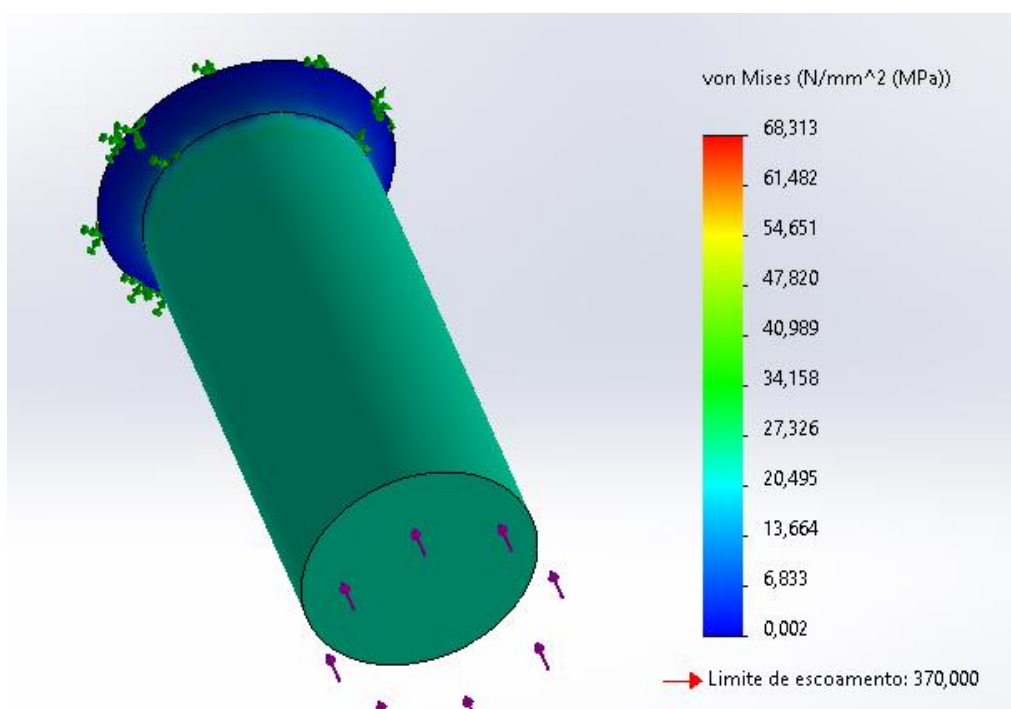
**Figura 58** - Força Resultante no Extrator Móvel



**Figura 59** - Deslocamento em mm no Extrator Móvel

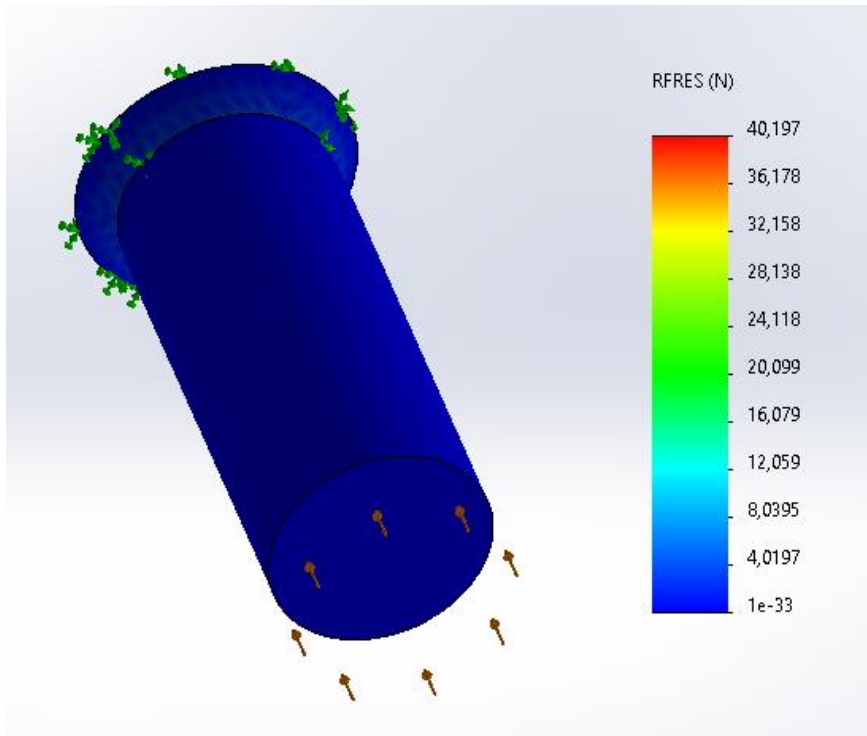
### 10.2.3. Punção

Foi encontrado o valor da tensão máxima de Von Mises na barra de carga de 29,699 MPa, estando localizada nas regiões entorno do formato da arruela, ou seja, sendo possível visualizar através da cor amarela para laranja do gráfico que é apresentado pela Figura 61, que é a região mais solicitada durante todo o processo de corte da peça. A informação principal que podemos agregar com esse resultado é que a tensão máxima obtida nessa simulação não ultrapassou o limite de escoamento do material, ou seja, ele não se romperá com o valor de força utilizado para o corte da chapa.

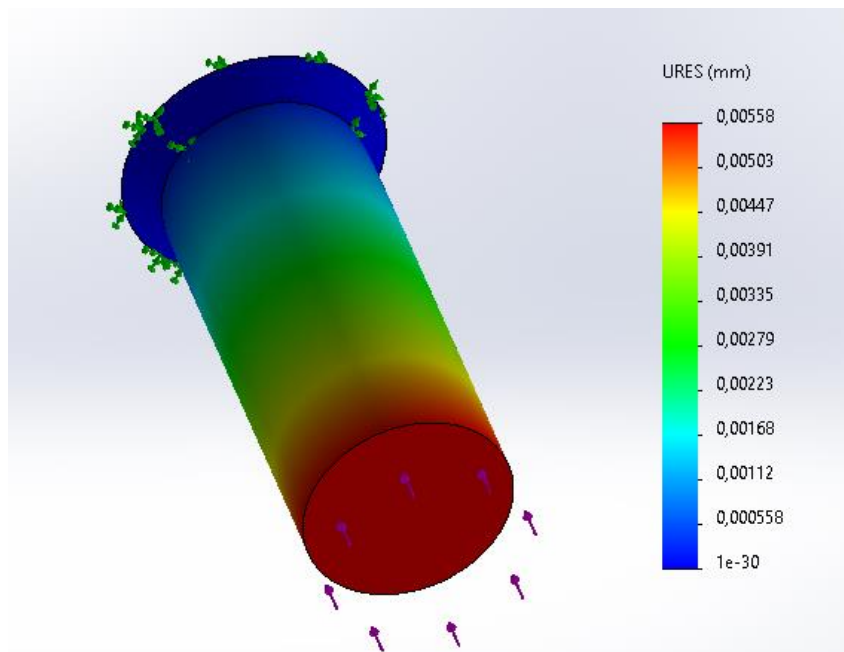


**Figura 60** - Tensão de Von Mises no Punção

Resultados complementares são apresentados pela Figura 62, mostrando o resultado de força resultante do punção, e pela a Figura 63, mostrando os valores de deslocamento. Estes valores não ultrapassaram os limites, mas verifica-se as regiões mais solicitadas, no deslocamento que é mais nítido já muda para a parte central do ressalto, local onde terá provável mais desgaste.

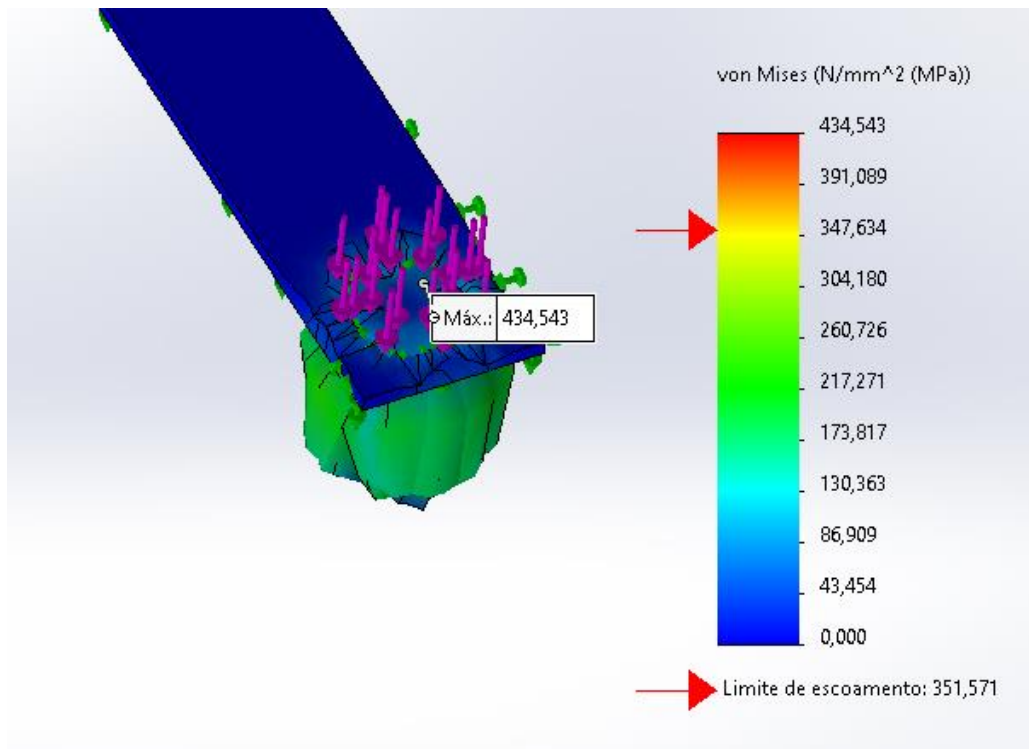


**Figura 61 - Força Resultante no Punção**

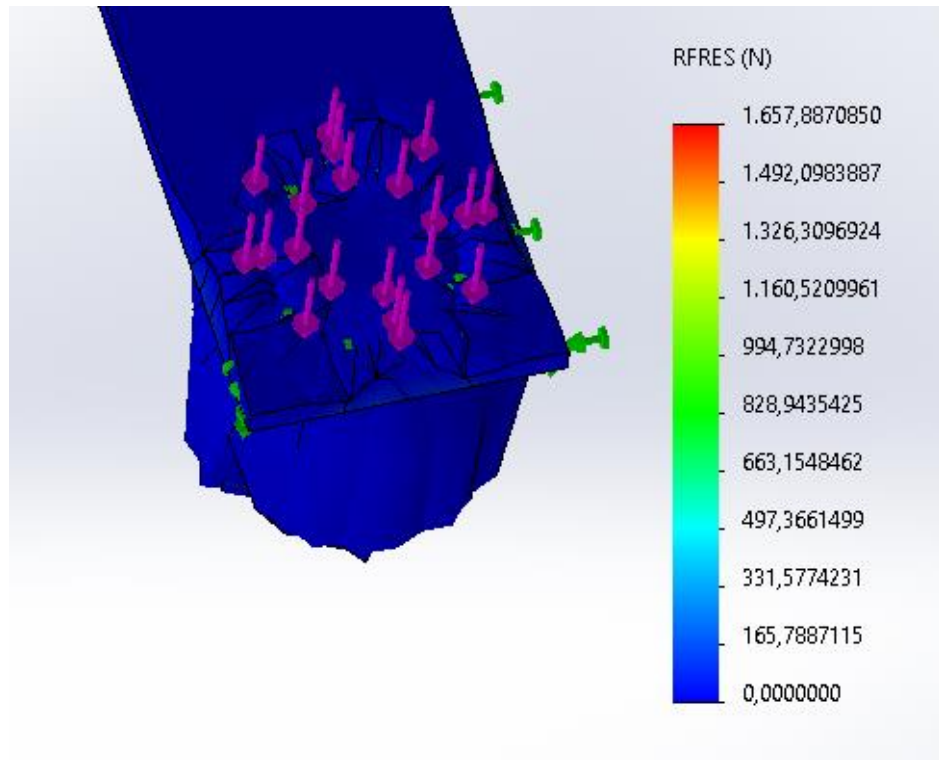


**Figura 62 - Deslocamento em mm no Punção**

10.2.4. Chapa



**Figura 63** - Tensão de Von Mises na Chapa



**Figura 64** - Força Resultante na Chapa

### 10.3. Discursão dos Resultados

Em ambos os métodos os resultados atenderam aos requisitos mínimos de resistência dos materiais, logo o projeto satisfaz aos critérios de resistência dos materiais. Em nenhuma simulação houve excesso de tensão que provocasse a fratura, ou cisalhamento de qualquer peça do principal do estampo, extrator fixo, extrato móvel e punção, no momento de exercer o trabalho através da força aplicada.

## 11. CONCLUSÃO

Análise por Elementos Finitos, através de simulação em softwares comerciais, é um método extremamente confiável, quando aplicado corretamente e tem sido utilizado cada vez mais pelos profissionais responsáveis por projetos mecânicos e estruturais devido à complexidade de vários projetos, sendo inviável realizar cálculos analíticos.

Estudos mais profundos devem ser realizados em torno do MEF em três segmentos diferentes: análises e pesquisas matemáticas, criação de softwares e aplicações dos usuários em softwares comerciais e programados pelo próprio usuário. Análises e pesquisas matemáticas são fundamentais para a compreensão da metodologia, comprovação das equações utilizadas e criações de novas equações para que as aproximações estejam mais próximas dos valores reais. Estudos dos softwares são importantes para entender o método de elementos finitos, comparação entre os softwares e principalmente aplicações em casos que necessitam de condições de contorno específicas.

Pelos resultados encontrados através dos métodos abordados pode-se verificar que a força os cálculos feitos de forma analítica que a força que será necessária para o sistema será de 8772.11 Kgf atenderam às expectativas e o projeto de forma esperada tanto em critérios de resistência, quanto a conceitos básicos. Com dados da simulação verificamos que o extrator móvel irá trabalhar com um valor de tensão máxima de 154,46 MPa, com isso, irá ficar dentro do limite de escoamento, entretanto um ponto que deve ser verificado com muita atenção e nas junções das partes verticais e horizontais. E o material que escolhemos para a arruela apresenta uma tensão máxima de 359,7 MPa este valor é superior ao limite de escoamento, com isso o material irá se romper. Podemos confirma que o material utilizado no projeto era o mais

adequado para o problema, pois através das simulações as tensões máximas que ele apresentava em seu corpo era muito inferior à sua tensão de escoamento, logo ele trabalhará sempre no limite de escoamento, em sua deformação elástica.

Por último nossa chapa de aço utilizada, na figura 64, podemos ver ela ultrapassou o Limite de Tração do Aço SAE 1020, comprovando nossos cálculos de forma analítica do problema através do software utilizado.

## 12. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

<http://ftp.demec.ufpr.br/disciplinas/TMEC016/Apostila/TM%20159%20slides%20Projeto%20de%20Ferramentas%20em%20Conforma%20E7%E3o%20de%20Chapas10.pdf>

[http://www.eterfs.com.br/material/mecanica/APOSTILA\\_DE\\_ESTAMPO\\_FATEC-220813-2.pdf](http://www.eterfs.com.br/material/mecanica/APOSTILA_DE_ESTAMPO_FATEC-220813-2.pdf)

[http://s1.iran-mavad.com/ASM%20handbooks/Vol\\_14B\\_ASM%20handbooks\\_iran-mavad.com.pdf](http://s1.iran-mavad.com/ASM%20handbooks/Vol_14B_ASM%20handbooks_iran-mavad.com.pdf)

<https://app.uff.br/riuff/bitstream/1/1812/1/Projeto%20Final%20-%20MARIANNA%20FERNANDES%20DE%20LEAIS%20ANDRADAS%20-%20SEM%20ASSINATURA.pdf>

[http://www.eterfs.com.br/material/mecanica/APOSTILA\\_DE\\_ESTAMPO\\_FATEC-220813-2.pdf](http://www.eterfs.com.br/material/mecanica/APOSTILA_DE_ESTAMPO_FATEC-220813-2.pdf)

<file:///C:/Users/Usuario/Downloads/Prote%C3%A7%C3%A3o%20Superficial%20de%20Metais.pdf>

<http://bmalbert.yolasite.com/resources/Estampagem.pdf>

<http://www.contrests.com.br/tratamento-superficial-metais.html#:~:text=O%20tratamento%20superficial%20de%20metais,as%20superf%C3%A7oes%20dos%20materiais%20met%C3%Alicos.>

<https://professormarciogomes.files.wordpress.com/2008/11/aulas-8-e-9-estampagem.pdf>

<http://www.coatingtec.com.br/tratamento-superficie-metalica>

[http://www.cascadura.com.br/uploads/portfolios/1448929174\\_cromagem\\_de\\_ferramentas.pdf](http://www.cascadura.com.br/uploads/portfolios/1448929174_cromagem_de_ferramentas.pdf)

<https://www.infoescola.com/quimica/cromagem/>

<https://pt.slideshare.net/hertzoliveira3/estampagem-25262765#:~:text=8.->

[,Processos%20da%20estampagem.,preenchimento%20das%20cavidades%20dos%20moldes.](#)