

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS**

DIEGO DA SILVA BOFF

**SIMULAÇÃO DA MATRIZ DE ESTAMPAGEM PROFUNDA DE UM RECIPIENTE
INDUSTRIAL UTILIZANDO AÇO EEP 19**

**CAXIAS DO SUL
2019**

DIEGO DA SILVA BOFF

**SIMULAÇÃO DA MATRIZ DE ESTAMPAGEM PROFUNDA DE UM RECIPIENTE
INDUSTRIAL UTILIZANDO AÇO EEP 19**

Trabalho de Conclusão do curso, apresentado como requisito parcial para conclusão do curso de Engenharia Mecânica na Universidade de Caxias do Sul.

Orientador: Prof. Dr. Eng. Alexandre Fassini Michels

CAXIAS DO SUL

2019

DIEGO DA SILVA BOFF

**SIMULAÇÃO DA MATRIZ DE ESTAMPAGEM PROFUNDA DE UM RECIPIENTE
INDUSTRIAL UTILIZANDO AÇO EEP 19**

Trabalho de conclusão do curso, apresentado à Universidade de Caxias do Sul como requisito parcial à obtenção do grau de Engenheiro Mecânico. Área de concentração: Conformação Mecânica.

Aprovado em: 12/ 12 /2019

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Eng. Alexandre Fassini Michels
Universidade de Caxias do Sul - UCS

Prof. Dr. Eng. Alexandre Vieceli
Universidade de Caxias do Sul – UCS

Prof. Me. Eng. Celso Ferrarini
Universidade de Caxias do Sul - UCS

RESUMO

O processo de estampagem eleva a competitividade da produção de produtos metálicos quando comparado com outros processos produtivos, devido à alta produção, baixa perda de material e baixo nível de retrabalho. A grande maioria das indústrias que utilizam o processo de estampagem profunda tem como base a experiência dos profissionais que atuam na preparação dos equipamentos e dos responsáveis pela fabricação das ferramentas. Entretanto, o método de tentativa e erro para obtenção do produto acabado, exige retrabalho da ferramenta, impactando na produtividade do componente. Diante disto, este trabalho teve como objetivo, projetar o conjunto da matriz conformadora e simular o processo de estampagem profunda do componente abordado utilizando o software CAE Abaqus, usando como conceito uma análise de tripla não-linearidade (geometria, contato e material). Através do ensaio de tração com extensômetro foram obtidas as propriedades mecânicas do material de estampagem extra profunda (EEP 19), e assim, chegando à curva de escoamento plástica verdadeira dele. A partir dos requisitos do projeto e da definição dos parâmetros de pré-processamento, foi realizada a simulação do processo e posteriormente análises em diferentes regiões da peça, com o intuito de avaliar o comportamento do material durante todo o processo de conformação, tendo como critérios as tensões máximas de Von Mises e Máxima Principal para verificar a possibilidade de rugas e rupturas.

Palavras chave: Conformação Mecânica. Simulação Numérica. Abaqus. Análise Não-Linear. Método dos Elementos Finitos. Estampagem Profunda.

ABSTRACT

The forming process increases captivity in the production of metallic components when compared to other manufacturing processes, due to the high rate of production, small loss of material and low rate of rework. The vast majority of industries using the deep drawing process is based on the experience of professionals working in the preparation of equipment and those responsible for the manufacture of tools. Therefore, the trial and error method to obtain the finished product requires rework on the tool, impacting the component productivity. Given this, this work aimed to design the conformal matrix and simulate the deep drawing addressed using CAE Abaqus software, using as a concept a triple nonlinear analysis (geometry, contact and material). Through tension test by extensometer, the mechanical properties of the deep drawing material (EEP 19), and so, coming to its true plastic flow curve. Based on the design requirements and the definition of the preprocessing parameters, the process was simulated and later analyzed in different parts regions, in order to evaluate the material behavior during the whole forming process, having Von Mises stress and Maximum Principal stress to check for the possibility of fails.

Key words: Forming. Numeric Simulation. Abaqus. Non-linear Analysis. Finite Elements Method. Deep Drawing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Peça modelada.....	14
Figura 2 - Principais elementos de uma ferramenta de estampagem.....	17
Figura 3 - Ilustração do ferramental com prensa chapa e freio de estampagem	21
Figura 4 - Estampagem profunda.....	21
Figura 5 - Deformação em x e y de um volume de controle	23
Figura 6 - Tipos de elementos finitos	27
Figura 7 - Corpo de prova padrão para ensaio de tração.....	28
Figura 8 - Curva tensão-deformação verdadeira.....	29
Figura 9 - Projeto da ferramenta	33
Figura 10 - Projeto da ferramenta contemplando freio de estampagem	33
Figura 11 - Fluxograma da simulação CAD/CAE	34
Figura 12 - Discretização do contato e interação entre superfícies	35
Figura 13 - Elemento linear C3D8R (a).....	36
Figura 14 - Malha refinada do blank.....	36
Figura 15 - Malha geral dos componentes da matriz conformadora.....	37
Figura 16 - Carga do punção	38
Figura 17 - Carga do prensa-chapa	38
Figura 18 - Curva plástica verdadeira à 0° do sentido de laminação.....	40
Figura 19 - Curva plástica verdadeira à 45° do sentido de laminação.....	41
Figura 20 - Curva plástica verdadeira à 90° do sentido de laminação.....	41
Figura 21 - Layout da matriz conformadora no software	42
Figura 22 - Progresso da deformação ao longo do processo	43
Figura 23 - Regiões críticas	43
Figura 24 - Regiões de máxima tensão ao final do processo - Von Mises	44
Figura 25 - Região de máxima tensão ao fim do processo - Máx. Principal	44

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais tipos de prensa-chapa utilizados em estampagem	19
Quadro 2 - Total de elementos	36
Quadro 3 - Contato dos componentes	37

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Pressão nominal exercida pelo prensa-chapa.....	18
Tabela 2 - Propriedades mecânicas e composição química do material	31
Tabela 3 - Quantidade de corpos de prova utilizados	32
Tabela 4 - Pontos da região de estrição.....	39
Tabela 5 - Propriedades mecânicas.....	41
Tabela 6 - Dimensional dos corpos de prova	49

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAE	Computer-Aided Engineering
FR	Força de retenção
MEF	Método dos elementos finitos

LISTA DE SÍMBOLOS

F_{enc}	Força de encosto
r_{cc}	Raio do canto do punção
d_c	Diâmetro do punção
r_{cm}	Raio do canto da matriz
j	Folga radial entre o cunho e a matriz
d_m	Diâmetro da matriz
p_{enc}	Pressão de encosto
A_n	Área nominal de encosto
σ_e	Tensão limite de elasticidade
σ_R	Tensão de ruptura do material
l_0	Comprimento inicial
A_0	Área inicial
l_t	Comprimento total do corpo de prova
l_c	Comprimento da zona calibrada do corpo de prova
σ	Tensão
ε	Deformação
n	Coefficiente de encruamento
K	Constante de rigidez do material
σ_v	Tensão verdadeira
ε_v	Deformação verdadeira
F_1	Força instantânea
A_1	Área instantânea
a	Espessura da chapa
R	Raio de curvatura da estrição
$\sigma_{méd}$	Tensão média
σ_{vc}	Tensão verdadeira corrigida
$\varepsilon_{Qmáx}$	Deformação verdadeira correspondente à carga máxima Q de tração
ε_{xx}	Deformação ao longo de x
ε_{yy}	Deformação ao longo de y
γ_{xy}	Deformação cisalhante
σ_{xx}	Tensão normal ao longo de x, em corpo bidimensional
σ_{yy}	Tensão normal ao longo de y, em corpo bidimensional
σ_{xy}	Tensão cisalhantes na direção x-y, em corpo bidimensional

σ_{yx}	Tensão cisalhantes na direção y-x, em corpo bidimensional
F	Força aplicada
${}^{t+\Delta t}R$	Vetor das forças
ΔF	Forças externas
δ	Alongamento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO E ESTRUTURA DO TRABALHO.....	14
1.2	AMBIENTE DE TRABALHO.....	14
1.3	JUSTIFICATIVA.....	15
1.4	OBJETIVOS.....	16
1.4.1	Objetivo geral	16
1.4.2	Objetivos específicos	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
2.1	ESTAMPAGEM.....	17
2.1.1	Prensa chapa	18
2.2	CONFORMAÇÃO DE CHAPAS METÁLICAS.....	20
2.2.1	Estudos experimentais e modelos analíticos comparados com simulação computacional	22
2.2.2	Método dos elementos finitos	22
2.2.3	Simulação numérica por elementos finitos	25
2.2.3.1	Tipos de elementos finitos.....	27
2.2.4	Obtenção da curva tensão-deformação real	27
3	METODOLOGIA E MATERIAL	31
3.1	PROPRIEDADES DO MATERIAL.....	31
3.1.1	Ensaio de tração	32
3.2	PROJETO DO FERRAMENTAL.....	32
3.3	MODELAGEM PELO MEF.....	34
3.3.1	Contato entre superfícies	35
3.3.2	Tipos de elementos	35
3.3.3	Parâmetros da simulação	37
4	ANÁLISE E RESULTADOS	39
4.1	ENSAIOS DE TRAÇÃO.....	39
4.2	RESULTADOS DA SIMULAÇÃO.....	42

5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	45
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	46
	APÊNDICE A – FLUXOGRAMA DE TRABALHO.....	48
	ANEXO A – CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DE TRAÇÃO.....	49
	ANEXO B – RELATÓRIOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO.....	50

1 INTRODUÇÃO

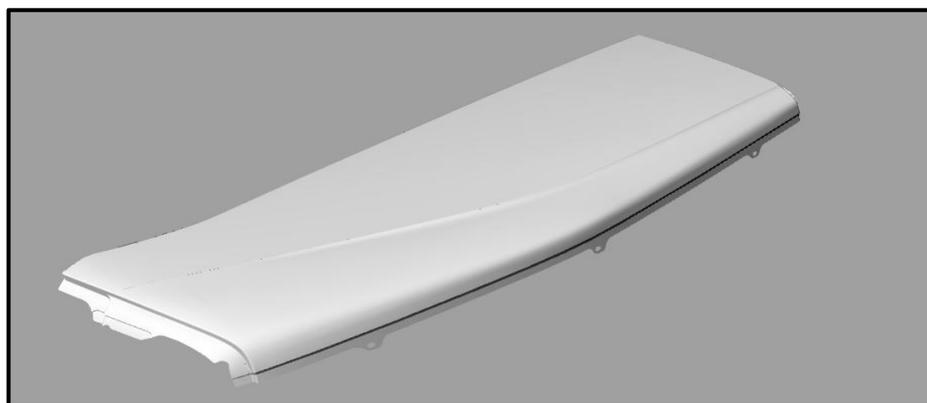
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E ESTRUTURA DO TRABALHO

A conformação mecânica consiste em alterar a geometria de um determinado material por meio da aplicação de forças por ferramentas, para atingir o design modelado. Se tratando de alteração da forma, são praticados diversos tipos de estampagem, as quais são realizadas por máquinas do tipo prensas, ferramentas com matrizes ou estampo. A área da conformação de materiais é ampla e tem inúmeras aplicações na indústria metalúrgica.

Hoje, a conformação mecânica proporciona grande competitividade na produção de produtos metálicos devido à redução de custos de produção pelo seu processo, conseguindo exclusivamente atingir certas exigências de propriedades mecânicas (SCHAEFFER, 2004).

Um dos processos de conformação mecânica é a estampagem profunda mostrada na Figura 1, utilizando laminados delgados de aço como matéria prima. A qualidade do produto final é, entretanto, “dependente do fluxo de material conformado para dentro da matriz”. (DUARTE, 2007). O prensa chapa tem como finalidade exercer as forças necessárias para suprir a necessidade do produto final e, quando não atingidas, se faz necessário controlar o fluxo através de recursos denominado de freios de estampagem. O resultado do freio de estampagem é obter o produto final desejado através de uma única prensagem, eliminando retrabalhos, e assim, tornando o produto mais competitivo comercialmente (DUARTE, 2007).

Figura 1 - Peça modelada



Fonte: Autor (2019)

1.2 AMBIENTE DE TRABALHO

Fundada em 1985, a empresa Boff Indústria de Autopeças atua no segmento de peças para veículos automotores, tendo como visão o reconhecimento no segmento de

atuação como uma empresa de referência nacional no fornecimento de peças para veículos automotores. No setor de engenharia da empresa são desenvolvidos moldes e ferramentas para estampagem dos produtos, os quais são submetidos a testes para aprovação.

Hoje o setor de engenharia é coordenado por Salomão Prandi, pessoa diretamente envolvida nas atividades do referido trabalho juntamente com o acadêmico Diego da Silva Boff.

1.3 JUSTIFICATIVA

Apesar do constante crescimento de materiais cerâmicos e poliméricos utilizados nas indústrias da transformação, os metais, e em especial o aço, mantém elevada importância no processo industrial.

Com uma tecnologia para produção em larga escala, especialmente para aplicações automotivas, a conformação de metal fornece possibilidades para fabricação rentável de materiais leves para componentes (KLEINER, GEIGER, & KLAUS, 2003).

Ao desenvolver a operação de estampagem, onde ocorre transformação de um material, se faz necessário estudo dele para eliminar estiramento ou esmagamento excessivo, os quais resultam em variações na espessura comprometendo o produto (BRITO, 2005).

O processo de estampagem profunda, na maioria dos casos, é baseado em experiências dos profissionais que atuam na preparação dos equipamentos e dos responsáveis pela fabricação das matrizes. Isto exige grande retrabalho por utilizar o método de tentativa e erro até a obtenção do produto acabado. Tal modelo de produção assegura qualidade, contudo prejudica a produtividade (TEKKAYA, 2000). Neste sentido, com avanço dos recursos computacionais, através dos softwares de simulação, o retrabalho tornou-se menor em relação ao processo empírico.

Dentro dos componentes metálicos da indústria de utensílios, o processo de estampagem profunda abrange grande relevância na obtenção desta linha de produtos. Estes componentes apresentam elevada complexidade geométrica, representando grande desafio no desenvolvimento de matrizes que garantam as dimensões e tolerâncias.

Desta forma, este estudo visa avaliar o processo de estampagem profunda de um utensílio industrial, partindo do projeto do conjunto da matriz conformadora para simular a estampagem através do software de elementos finitos Abaqus, e assim, fornecer alterações no projeto da ferramenta.

Para realizar a simulação de estampagem da peça, foi disponibilizado uma licença do software CAE Abaqus, pela Universidade de Caxias do Sul.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 Objetivo geral

Simular via Método dos Elementos Finitos (MEF) a conformação de um componente de utensílio industrial, por meio de estampagem profunda, e avaliar as tensões nas regiões críticas do componente com objetivo de ajustar o projeto da ferramenta gerando assertividade no processo.

1.4.2 Objetivos específicos

Para atingir o objetivo geral, os seguintes objetivos específicos abaixo associados deverão ser executados:

- a) Avaliar o índice de encruamento da matéria prima mediante ensaio de tração com extensômetro.
- b) Projetar o conjunto da matriz conformadora.
- c) Simular o processo de conformação do produto via MEF considerando não linearidade de contato, de geometria, e material.
- d) Avaliar tensões críticas do componente.
- e) Avaliar alterações no projeto da ferramenta, gerando maior assertividade no processo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

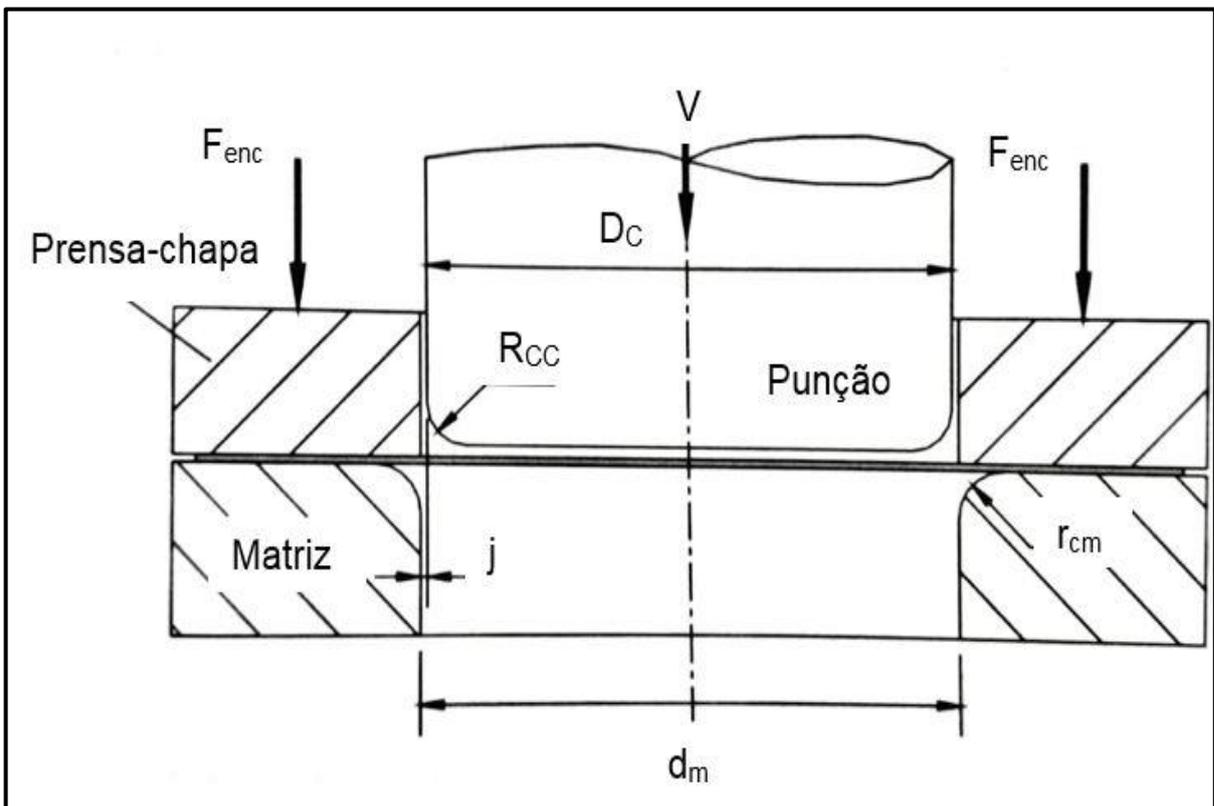
2.1 ESTAMPAGEM

A operação de estampagem é definida pela transformação de chapa, iniciado por uma chapa de material metálico sendo forçada por um punção, através de uma prensa. A chapa escoa então, de forma controlada, pela ação de um prensa-chapa para o interior de uma matriz, originando uma peça oca com a geometria definida pelo cunho e pela matriz. A espessura da chapa metálica sofre pouca variação ao final do processo comparado ao seu valor inicial (RODRIGUES; MARTINS, 2010).

Na operação de estampagem realizada por intermédio de uma prensa, é necessário a execução de dois movimentos. Primeiro o prensa-chapa se move de modo a fixar a chapa na posição inicial. No segundo movimento, o punção se desloca em direção a matriz, dando origem a forma da peça estampada (DUARTE, 2007).

Os principais elementos de uma ferramenta para estampagem, ilustrados na Figura 2, são um punção, uma matriz e um prensa-chapa. A folga radial j identificada na Figura 2 normalmente é superior a espessura da chapa metálica, podendo também vir a ser inferior (RODRIGUES; MARTINS, 2010).

Figura 2 - Principais elementos de uma ferramenta de estampagem



Fonte: Rodrigues, Martins (2010), adaptado

2.1.1 Prensa chapa

Segundo Rodrigues e Martins (2010), o prensa-chapa tem relevante importância na operação de estampagem pelo fato da pressão exercida sobre a chapa ter grande influência na formação ou não de rugas no produto. O nível das tensões que se desenvolvem ao longo da peça está diretamente ligado a tensão radial provocada pelo prensa-chapa.

Rugas, rupturas e dobras podem ser evitadas pelo controle do material através de uma força de retenção (FR). A FR é oriunda do prensa-chapa devida fricção gerada entre ele e a chapa. Em alguns casos, a força obtida pelo prensa-chapas pode vir a ultrapassar a capacidade da prensa (DUARTE, 2007).

Segundo Rodrigues, Martins (2010), para obtenção do desempenho ideal do prensa-chapa, a pressão exercida deve ser variável ao longo do processo. Até que a deformação plástica da chapa se inicie, a pressão deve ser relativamente baixa, seguindo por um aumento ao início da estampagem e então podendo voltar a decrescer, à medida que o risco da geração de rugas vai baixando. Isso ocorre devido a redução da espessura da aba a medida que a chapa escoá para dentro da matriz.

Devido a maior parte dos ferramentais de estampagem não possuírem prensa-chapas eficazes e que sejam capazes de proporcionar regulagens e gerar variações de força de encosto ao longo da chapa, estes são projetados para que proporcionem uma pressão média de atuação. A pressão média de atuação é calculada pela equação (1) de acordo com o caso, onde F_{enc} é a força aplicada pelo prensa-chapa, A_n é a área nominal de encosto, σ_e o valor da tensão limite de elasticidade e σ_R o limite de resistência à tração.

$$p_{enc} = \frac{F_{enc}}{A_n} = \left(\frac{1}{200} a \frac{1}{150} \right) (\sigma_e + \sigma_R) \quad (1)$$

A força ideal exercida pelo prensa-chapa é dependente da relação de estampagem da operação, espessura da chapa, atrito e das características mecânicas do material. A Tabela 1 mostra a pressão nominal do prensa-chapa para materiais frequentemente utilizados na estampagem, fazendo-se necessários ajustes de acordo com a aplicação.

Tabela 1 - Pressão nominal exercida pelo prensa-chapa

(continua)

Material	Pressão do Prensa Chapa (N/mm ²)
Aço estampagem profunda	2,1 a 3,1

(conclusão)

Material	Pressão do Prensa Chapa (N/mm²)
Aço baixo teor de carbono	3,4
Alumínio e ligas de alumínio	0,8 a 1,4
Ligas especiais de alumínio	3,4
Aço inoxidável	2,1 a 5,2
Aço inoxidável austenítico	6,9
Cobre	1,2 a 1,7
Latão	1,4 a 2,1

Fonte: Rodrigues, Martins (2010), adaptado

O uso do prensa-chapa nem sempre é necessário, podendo ser dispensado à medida que risco de geração de rugas se mostra baixo. Existem diversos tipos de prensa-chapa utilizados em operações de estampagem, que podem ser classificados de acordo com a Quadro 1, sendo o prensa-chapa do tipo fixo o mais usual devido sua simplicidade.

Quadro 1 - Principais tipos de prensa-chapa utilizados em estampagem

Tipo de prensa-chapa	Elemento ativo	Observações
Fixo	Superfície direita	Deixa folga entre a chapa e a superfície do prensa-chapa. Difícil de determinar e de manter a folga ideal.
	Superfície cônica	Evitar o problema da folga ideal.
Acionado pela ferramenta	Molas Borrachas (elastômeros) Cilindros a gás	Têm a desvantagem de aumentar a força com o curso da ferramenta.
	Cames ou articulações	Não tem o inconveniente dos anteriores, mas são dispendiosos e difíceis de projetar.
Independente	Hidráulicos	Aplicados quando a prensa é de duplo ou triplo efeito.

Fonte: Rodrigues, Martins (2010)

2.2 CONFORMAÇÃO DE CHAPAS METÁLICAS

Os processos de conformação plástica de chapas se dividem basicamente em conformação em geral e estampagem profunda. Tais processos necessitam primeiramente do corte das chapas metálicas com determinado arranjo e posteriormente o dobramento. Esses processos eventualmente são feitos a quente a fim de atingir necessidades técnicas, entretanto é mais comum serem realizados a frio (PALMEIRA, 2005).

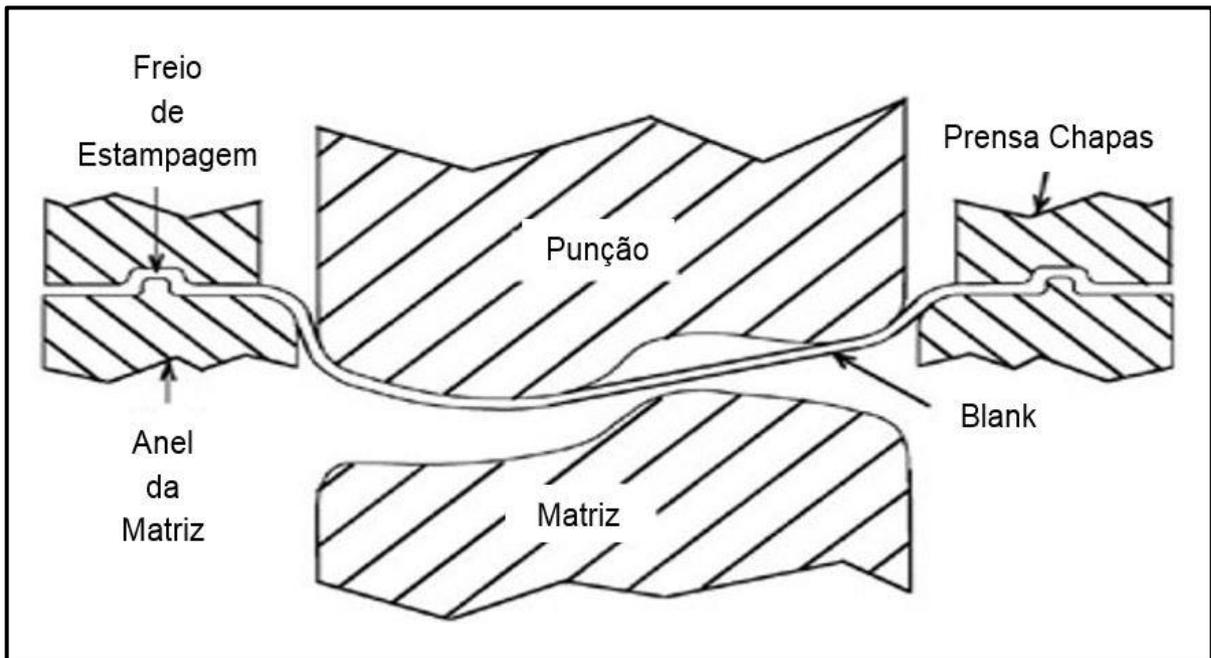
A estampagem profunda é um dos processos mais utilizados na fabricação de peças tridimensionais de geometrias complexas a partir de chapas. Tal processo utiliza ferramentas do tipo prensa-chapa, punção e matriz para se obter o produto. O prensa-chapa é um acessório utilizado em muitas das ferramentas e, como propriamente se diz, restringe o escoamento da chapa para dentro da matriz evitando assim enrugamento e ruptura (SCHAFFER, 2004).

Especialmente é utilizada a deformação de chapas por expansão em estampagem de produtos complexos que necessitam atingir profundidades altas para adquirirem o formato da matriz. Estes tipos de peças são fabricados quase sempre em uma única operação, ou seja, o produto final resultando em uma prensagem única. As ferramentas para este tipo de processo recorrem a freios de estampagem e prensa chapa exercendo pressões mais elevadas, dificultando o escoamento da chapa para dentro da matriz e, exclusivamente, reduzindo de forma uniforme a espessura ao longo de toda peça (RODRIGUES; MARTINS, 2010).

Segundo Tekkaya (2000), a experiência dos profissionais diretamente ligados à fabricação do ferramental e preparação das máquinas, tem grande importância no processo de estampagem. Esta característica empírica acaba utilizando o método de tentativa e erro exigindo retrabalho e, embora garanta qualidade, prejudica a produção e gera gastos.

Os freios de estampagem são ressaltos dispostos na matriz, como pode ser visualizado na Figura 3, que tem como função controlar a quantidade de material para dentro da cavidade, gerando assim a força de retenção (FR). A geometria dos freios impacta diretamente sobre a força de retenção resultante, podendo ser esta retangular, semicircular, trapezoidal ou assimétrica. A geração da força de retenção é devido ao atrito entre a chapa e o freio de estampagem (DUARTE, 2007).

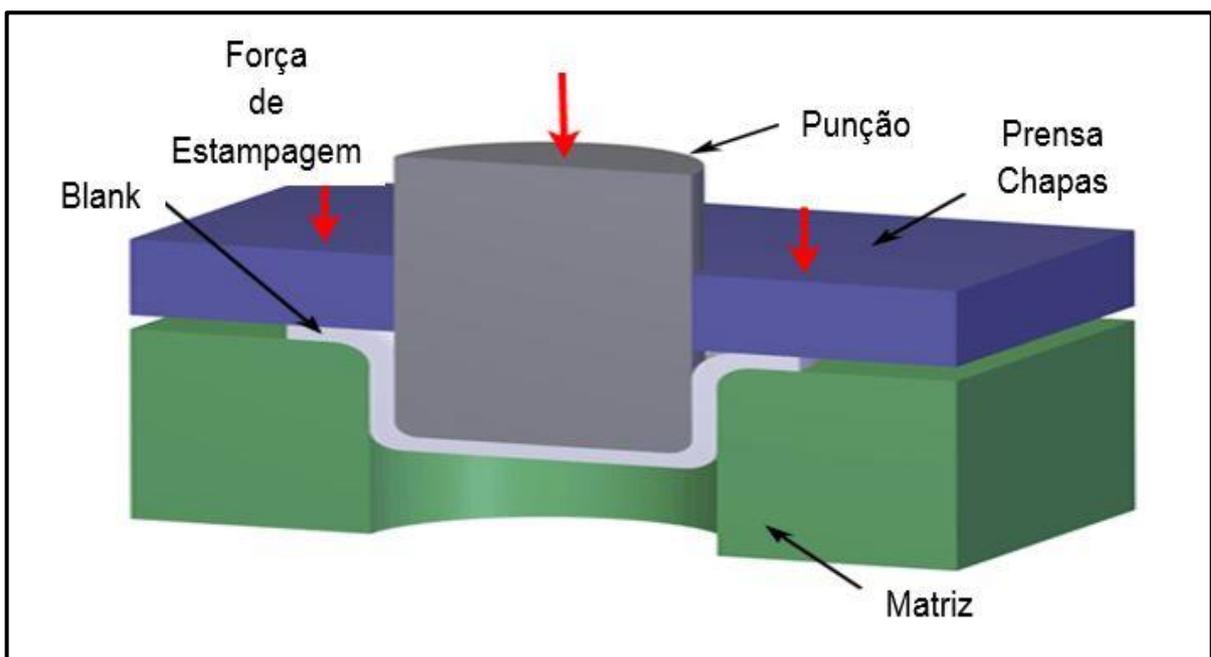
Figura 3 - Ilustração do ferramental com prensa chapa e freio de estampagem



Fonte: Hosford, Cadel (2007), adaptado

A qualidade do produto final no processo de estampagem profunda, mostrado na Figura 4, é dependente do fluxo de material que entra para dentro da matriz. O prensa-chapa, quando eficiente, gera a força adequada para permitir o fluxo de material, e assim, garante as especificações do produto final. Nesse sentido, para limitar o fluxo se faz necessário o uso de dispositivos exemplificado na Figura 3, chamados freios de estampagem (DUARTE, 2007).

Figura 4 - Estampagem profunda



Fonte: CUSTOMPART.NET (2009), adaptado

2.2.1 Estudos experimentais e modelos analíticos comparados com simulação computacional

Duarte (2007) realizou estudos para analisar o comportamento da força de retenção em freios de estampagem através da teoria da similitude. Teoria esta que, através de parâmetros físicos, modela matematicamente um fenômeno. Não obteve todos os parâmetros analiticamente, necessitando assim métodos experimentais. Comparou então o método experimental com o método numérico simulado por elementos finitos, atingindo um erro máximo de 7% em relação aos dados experimentais obtidos por NINE (1978).

Shaikh e Rao (2013) afirmam que o projeto de ferramentas de conformação mecânica gera maiores complicações à medida que as geometrias ficam mais complexas e os materiais menos moldáveis. Sendo assim, viabilizaram a implementação de um software de simulação antes da confecção da ferramenta, objetivando evitar rupturas e rugas severas. Relatam também que antes da simulação o produto era quase impossível de se formar sem romper e que, sem a simulação, a ferramenta nunca seria fabricada por apresentar riscos e alto valor envolvido.

Song et al. (2007) realizaram um estudo comparando a simulação com o processo real. Nas simulações foram estudados os efeitos dos parâmetros de projeto de estampagem (força do prensa-chapa, força de retenção dos freios de estampagem e tamanho do blank) no fluxo de metal para dentro do molde. Para isso, utilizaram a análise de falhas de ruptura, enrugamento e efeito mola. A cada simulação um dos parâmetros eram alterados. Perceberam então o quão influente são os parâmetros do processo no resultado do produto acabado. Ao final os resultados simulados e os experimentais foram comparados chegando à conclusão que a simulação é completamente viável.

2.2.2 Método dos elementos finitos

Ao simular o processo de conformação de chapas metálicas, é aplicada a análise de aproximação numérica pelo MEF, proporcionando a eficiência no processo através da drástica redução do número de ciclos, testes e ajustes ao desenvolver o ferramental. O satisfatório resultado é dado pelo atendimento do produto conforme o especificado, menor prazo e custo (FIRAT, 2007).

Este método proporciona a análise macroscópica do comportamento dos materiais metálicos ao serem conformados plasticamente. Tem como base a aplicação das equações de derivadas parciais que descrevem de forma aproximada o comportamento macroscópico dos materiais mediante subdomínios denominados elementos. Cada elemento compõe

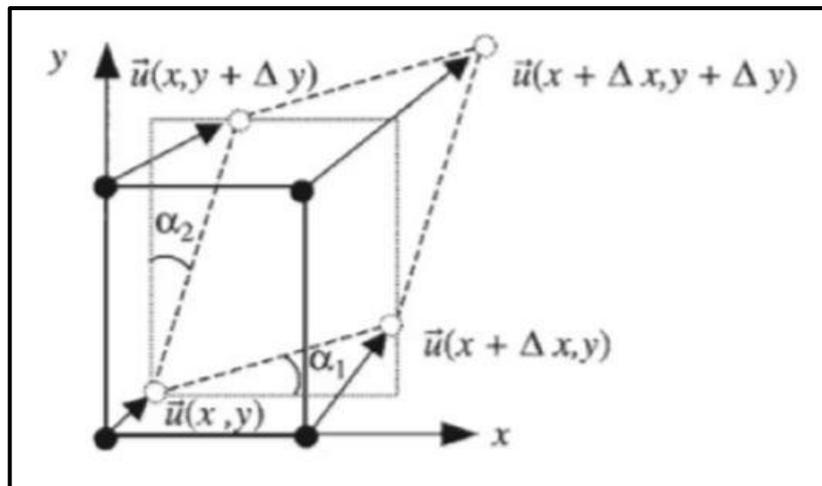
pontos nodais, nos quais as variações físicas são definidas, sendo o valor destas interpolado entre os pontos nodais (ZHANG; ZHANG; WU, 2015).

Segundo Fish e Belytschko (2009), o MEF é baseado nos deslocamentos, u , causados pelas deformações provenientes de tensões normais e cisalhantes. De acordo com o sistema de coordenadas cartesianas, as componentes deste deslocamento são componentes x e componentes y , podendo ser descritas de forma matricial conforme a equação (2).

$$u = \begin{bmatrix} u_x \\ u_y \end{bmatrix} \quad (2)$$

A deformação de um volume de controle $\Delta x \times \Delta y$ nas respectivas direções (x e y), combinadas, é ilustrada na Figura 5, sendo levados em consideração, pequenos gradientes de deslocamento. Podem-se utilizar variáveis independentes de deformação para descrever a deformação de um volume de controle.

Figura 5 - Deformação em x e y de um volume de controle



Fonte: Fish, Belytschko (2007)

As equações para as deformações que ocorrem ao longo da extensão, ε_{xx} e ε_{yy} , podem ser deduzidas em uma dimensão. As deformações, ε_{xx} e ε_{yy} , são variações nos comprimentos dos segmentos de linhas infinitesimais nas direções x e y , Δ_x e Δ_y , respectivamente, as quais são divididas pelos comprimentos iniciais dos segmentos de linha. As equações (3a), (3b), são baseadas nestas definições. A deformação cisalhante, γ_{xy} , mede a variação entre os vetores unitários nas direções x e y em radianos conforme a equação (3c).

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\partial u_x}{\partial x} \quad (3a)$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\partial u_y}{\partial y} \quad (3b)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} = a_1 + a_2 \quad (3c)$$

As equações 3a, 3b e 3c podem ser descritas em termos de deslocamentos, através de uma única equação matricial, equação (4).

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (4)$$

O estado de tensão é descrito por duas tensões normais, σ_{xx} e σ_{yy} e duas cisalhantes, σ_{xy} e σ_{yx} , quando o corpo é bidimensional. Partindo do equilíbrio do momento de um quadrado unitário, pode ser definido que $\sigma_{xy} = \sigma_{yx}$.

As equações de elementos finitos utilizadas na simulação numérica para processos de deformação plástica, são desenvolvidas a partir das equações de derivadas parciais, as quais caracterizam os equilíbrios quase-estáticos ou dinâmicos. Para o equilíbrio quase-estático, as equações de derivadas parciais não levam em conta os efeitos de inércia, conforme as seguintes equações, (5a), (5b) e (5c), ou pela forma abreviada, conforme a equação (6) (RODRIGUES; MARTINS, 2010).

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = 0 \quad (5a)$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} = 0 \quad (5b)$$

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = 0 \quad (5c)$$

onde, σ_x e σ_y – Tensões normais; τ_{xy} , τ_{yx} – Tensões cisalhantes

2.2.3 Simulação numérica por elementos finitos

A simulação numérica tem como propósito entender o comportamento de um sistema real projetado computacionalmente e, avaliar o melhor caminho para operação (PEGEDEN; SADOWSKI; SHANNON, 1995).

Conforme Kim e Sankar (2011) e Rodrigues e Martins (2010), o método dos elementos finitos consiste na divisão, da peça ou da estrutura, em um conjunto de elementos contíguos. Tal divisão é denominada de discretização. Rodrigues e Martins (2010, p. 497) afirmam que o fundamento do MEF dispõe “na discretização do domínio de aplicação das equações de derivadas parciais que descrevem o comportamento macroscópico dos materiais metálicos através de subdomínios de tamanhos finitos (denominados elementos)”.

As ferramentas de simulações numéricas têm como base o MEF, o qual é aplicado desde problemas elasto-plástico a problemas de deformação plástica de maior complexidade. Este último envolvendo não-linearidades a fenômenos como o encruamento do material, velocidade de deformação, contato com atrito entre materiais e ferramentas e o dano ou a temperatura de serviço (PEARCE, 1991).

A principal metodologia de solução dos softwares de simulação é baseada em integração explícita ou implícita do tempo. O método implícito gera uma solução completa e natural do problema, não fazendo simplificações, utilizando-se mais recursos computacionais e conseqüentemente maior tempo de processamento (ROSSI, 2007).

Conforme Costa (2003) e Söderberg (2006), na estrutura de integração de tempo estático implícito, a cada passo de integração de tempo realizado a condição de equilíbrio é executada, possibilitando a solução estática completa do problema de conformação com o controle de convergência. A operação de processamento da simulação exige memória e velocidades elevadas. Possíveis dificuldades de convergência podem ocorrer em consequência da grande quantidade de nós criado e a contínua mudança de contato a cada interação realizada.

No método implícito, as equações de equilíbrio são formuladas nas proximidades do instante de tempo $[t, t + \Delta t]$, constituindo a incógnita do problema e assim garantindo a satisfação do equilíbrio do corpo ao final do incremento de tempo Δt . Para o cálculo de deslocamento Δx , deste método, é feito pela resolução não-linear do problema através da equação (6).

$${}^{t+\Delta t}R(\Delta t) = 0 \quad (6)$$

onde, ${}^{t+\Delta t}R$ – Vetor das forças

Deve-se também escrever o sistema de equações não-linear conforme a equação (7):

$${}^{t+\Delta t}K \cdot \Delta x = {}^{t+\Delta t}\Delta F \quad (7)$$

O sobrescrito $(t + \Delta t)$ representa o instante no qual a rigidez K é calculada e o vetor incremento das forças externas ΔF . As grandezas matriciais ${}^{t+\Delta t}K \cdot \Delta x$ e ${}^{t+\Delta t}\Delta F$ são elas próprias função do incremento de tempo final, a partir do qual se pretende determinar o vetor Δx . Por tratar-se de um problema não-linear, a sua resolução acarreta na escolha de um método iterativo de resolução. Para prosseguir à determinação das correções sucessivas até atingir a condição de equilíbrio estático do corpo no incremento final, é utilizado o algoritmo de Newton-Raphson para resolução do problema não linear dado pela equação 6, sendo expressada conforme a equação (8).

$${}^{t+\Delta t}R \cdot (\Delta x^{t+\Delta t}) + \frac{\partial {}^{t+\Delta t}R \cdot (\Delta x^{i-1})}{\Delta x^{(i)}} \cdot (\Delta x^{(i)} - \Delta x^{(i-1)}) + \dots = 0 \quad (8)$$

A equação 8 gera um sistema de equações não lineares no qual temos como incógnita $dx^{(i)} = \Delta x^i - \Delta x^{(i-1)}$, podendo ser espessa conforme a equação (9).

$${}^{t+\Delta t}K \cdot dx^{(i-1)} = - {}^{t+\Delta t}R^{(i-1)} \quad (9)$$

O vetor das forças não equilibradas nas interações de equilíbrio $(i - 1)$ se refere a expressão ${}^{t+\Delta t}R^{(i-1)}$, sendo obtido pela equação (10).

$${}^{t+\Delta t}R (\Delta x^{i-1}) = {}^{t+\Delta t}K^{(i+1)} \cdot \Delta x^{(i-1)} - {}^{t+\Delta t}\Delta F^{(i-1)} \quad (10)$$

O vetor $\Delta x^{(i)}$ corresponde a correção da interação i do vetor deslocamento Δx vindo a ser determinado iterativamente até a satisfação de um critério de convergência, equação (11) (SENA, 2009).

$$\Delta x^i = \Delta x^{(i-1)} + dx^i \quad (11)$$

2.2.3.1 Tipos de elementos finitos

Segundo Kim e Sankar (2011), existem diversas espécies de elementos, cada um com suas capacidades e particularidades, sendo de responsabilidade do usuário a escolha do mais adequado para seu problema. A Figura 6 ilustra os tipos de elementos. Os elementos de viga e barra são os pertencentes aos elementos lineares, enquanto os elementos sólidos e de casca/placa são pertencentes aos elementos triangulares e retangulares bidimensionais. Para modelar sólidos tridimensionais, os elementos tetraédricos e hexaédricos são os mais empregados.

Os elementos lineares possuem dois nós ao longo de cada borda, os elementos parabólicos possuem três e os elementos cúbicos possuem quatro. Sendo assim, o elemento de ordem maior dará maior precisão comparado a outro de ordem menor (KIM; SANKAR, 2011).

Figura 6 - Tipos de elementos finitos

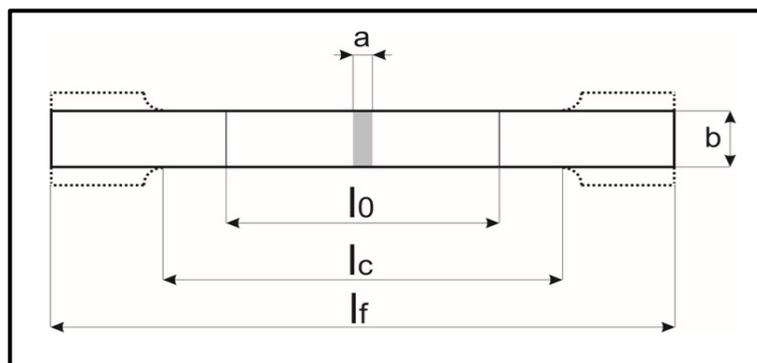
Elemento	Nome
	Elemento linear 1D
	Elemento triangular 2D
	Elemento retangular 2D
	Elemento tetraédrico 3D
	Elemento hexaédrico 3D

Fonte: Kim, Sankar (2011)

2.2.4 Obtenção da curva tensão-deformação real

O ensaio de tração é um dos mais utilizados pela rapidez e simplicidade, trazendo como resultado informações relevantes para projetar e fabricar peças e componentes. Ao fim deste ensaio obtém-se o levantamento da curva de tensão de tração pela deformação do corpo ensaiado. Os corpos de prova são preparados segundo as normas técnicas convencionais de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) para materiais metálicos a temperatura ambiente. A Figura 7 mostra o corpo de prova citado, sendo l_0 o comprimento inicial e A_0 a área inicial, ou seja, antes de ser ensaiado (GARCIA; SPIM; SANTOS, 2000).

Figura 7 - Corpo de prova padrão para ensaio de tração



Fonte: Rodrigues, Martins (2010)

Segundo Garcia, Santos e Carlos (2000), a curva tensão-deformação (convencional), obtida pelo ensaio de tração, toma como base as dimensões originais do corpo de prova. Sendo assim, não traz informações reais do comportamento de tensão e deformação do material, fazendo-se necessário medidas de tensão e deformação baseadas nas dimensões instantâneas do ensaio.

Conforme Alves Filho (2012), através da curva de escoamento do material obtemos a tensão de escoamento plástico verdadeiro até que se inicie a estricção. Sendo assim, foram desenvolvidos diversos caminhos para ajuste das equações matemáticas à curva. A equação 12 é a mais conhecida, sendo desenvolvida por Holloman.

$$\sigma = K \varepsilon^n \quad (12)$$

onde, σ – Tensão; K – Constante do material; n – Coeficiente de encruamento; ε – Deformação.

Conforme Garcia, Santos e Carlos (2000) e Rodrigues e Martins (2010), a tensão verdadeira e a deformação verdadeira (σ_v e ε_v), podem ser obtidas através das equações 13 e 14, podendo ser aplicadas tanto na região elástica quanto na região plástica de encruamento uniforme.

$$\sigma_v = \sigma(\varepsilon + 1) \quad (13)$$

$$\varepsilon_v = \ln(\varepsilon + 1) \quad (14)$$

Conforme Rodrigues e Martins (2010), pode-se determinar a curva de escoamento do material na zona de deformação plástica não uniforme através das equações 15 e 16. Estas, devem ser corrigidas devido a alteração da zona de estricção a qual gera diferentes tensões triaxiais a cada alteração.

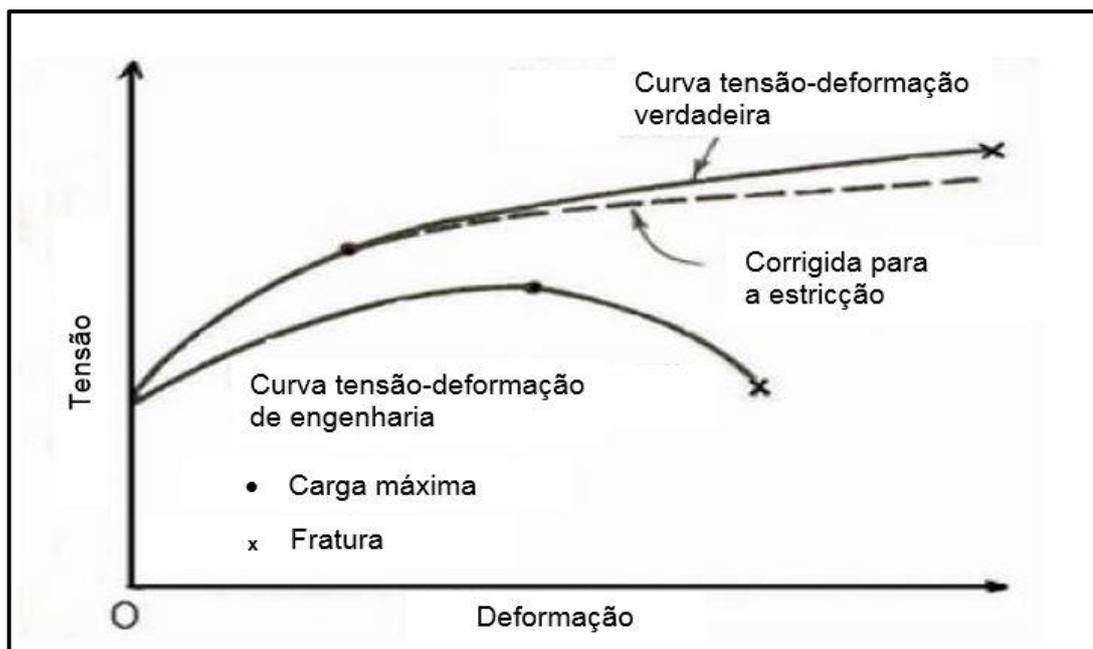
$$\sigma = \frac{F_1}{A_1} \quad (15)$$

$$\varepsilon = \ln \frac{A_0}{A_1} \quad (16)$$

onde, F_1 – Força instantânea; A_0 – Área inicial; A_1 – Área instantânea.

Segundo Nemoto (2004), o corpo de prova ao ser ensaiado, se deforma tanto na direção longitudinal quanto transversal ao carregamento, respeitando o efeito de Poisson. Em virtude disto, ocorre a variação da área da seção transversal. Entretanto a curva tensão-deformação de engenharia necessita ser corrigida uma vez que se limita ao relacionar a tensão com o valor da área da seção transversal inicial ao longo de todo o ensaio. A Figura 8 indica cada uma das curvas, as quais se diferem pelas correções realizadas.

Figura 8 - Curva tensão-deformação verdadeira



Fonte: Nemoto (2004), adaptado

Segundo Nemoto (2004), visando corrigir a curva na região da estricção, Bridgman apresentou a equação 6 com embasamento em análises matemáticas, pela necessidade de acompanhar a alteração do raio de curvatura da estricção (R) e o decréscimo da distância entre as extremidades da estricção (a). Bridgman desenvolveu então a equação 17 com base nestas variáveis e na tensão média na estricção ($\sigma_{média}$), onde $\sigma_{média}$ é dada pela equação 18.

$$\sigma_{vc} = \frac{\sigma_{m\acute{e}dia}}{\left(1 + \frac{2R}{a}\right) \ln\left(1 + \frac{a}{2R}\right)} \quad (17)$$

$$\sigma_{m\acute{e}dia} = \frac{F}{\pi a^2} \quad (18)$$

onde, σ_{vc} – Tensão verdadeira corrigida; $\sigma_{m\acute{e}dia}$ – Tensão média na estrição

Conforme Rodrigues e Martins (2010), nos corpos de prova planos, ocorre uma instabilidade na força, gerando a formação de uma estrição e seguidamente vindo a fraturar. Esta estrição ocorre de modo difuso se estendendo por um comprimento não inferior ao da largura da chapa.

Conforme Nemoto (2004), devido a estrição difusa e assim gerando a necessidade da correção do comportamento da curva para corpos de prova planos, Le Roy et al. desenvolveram uma equação empírica para descrever o comportamento da relação $a/2R$, equação 19, simplificando o uso da equação 12 de Bridgman na correção da tensão axial média.

$$\frac{a}{2R} = 0,555(\varepsilon - \varepsilon_{Qm\acute{a}x}) \quad (19)$$

Segundo Rodrigues e Martins (2010), é demonstrado na Figura 9 a instabilidade plástica em corpos de provas planos, a estrição difusa, e a estrição localizada para um material isotrópico, fazendo um ângulo de 54,7° com a direção de tração. A instabilidade plástica ocorre em condições de estado plano de deformação, segundo a direção da largura, enquanto a estrição localizada, segundo a espessura. Deste modo, a deformação plástica fica confinada apenas a região de estrição localizada.

3 METODOLOGIA E MATERIAL

O referido trabalho teve como objetivo simular a operação de estampagem profunda de um utensílio industrial, através do fluxograma de trabalho conforme o Apêndice A. Para tal fim, foi realizada primeiramente, a análise das propriedades mecânicas do material através do ensaio de tração com extensômetro e se obteve a curva de escoamento plástica verdadeira. Juntamente a isto, a análise dos parâmetros geométricos da peça para o projeto da ferramenta. Por fim, foi utilizado o software de MEF para simular o processo e realizar análises das tensões geradas na peça.

3.1 PROPRIEDADES DO MATERIAL

O material escolhido para confecção do componente é o aço EEP 19 em forma de chapa. Material este que permite a confecção de peças com elevado nível de complexidade em estampagem extra profunda, segundo fabricantes. Propriedades mecânicas e químicas estão descritas conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas e composição química do material

Propriedades Mecânicas		Composição Química (%)	
Parâmetro	Especif.	Elemento	Especif.
Limite de Res. a Tração [MPa]	350 (Máx.)	C	0,08
Limite de Escoamento [MPa]	230 (Máx.)	Mn	0,45
Alongamento [%]	36 (Mín.)	P	0,03
Dureza [HRB]	50	S	0,03
		Al	0,02

Fonte: Companhia Siderúrgica Nacional (2019)

3.1.1 Ensaio de tração

Para o material utilizado na simulação e ensaio experimental, foram realizados ensaios de tração para definição das propriedades mecânicas, tais como: coeficiente de encruamento (n), limite de resistência a tração (σ_R), tensão de escoamento (σ_e) e alongamento (δ). O programa foi calibrado através dos dados obtidos do ensaio de tração, e assim, proporcionando maior semelhança entre a simulação e o procedimento experimental.

Nos ensaios de tração foram utilizados corpos de prova com dimensões conforme a norma ABNT NBR 6892-1 (2013). Esta norma determina o padrão dimensional para corpos de prova para tal ensaio. Foram adotadas amostras retangulares que atendem as dimensões exigidas pela norma (ver Anexo B), sem rebaixe central. Os corpos de prova foram obtidos através do processo de corte a laser e posteriormente retificados para isenção de rebarbas. Foram cortados cinco corpos de prova para cada direção de laminação (0° , 45° e 90°), conforme a Tabela 3.

Tabela 3 - Quantidade de corpos de prova utilizados

Direção de laminação	Ensaio convencional com extensômetro	Dimensional na região de estricção	Total de copos de prova
0°	3	2	5
45°	3	2	5
90°	3	2	5
Total de corpos de prova			20

Fonte: Autor (2019)

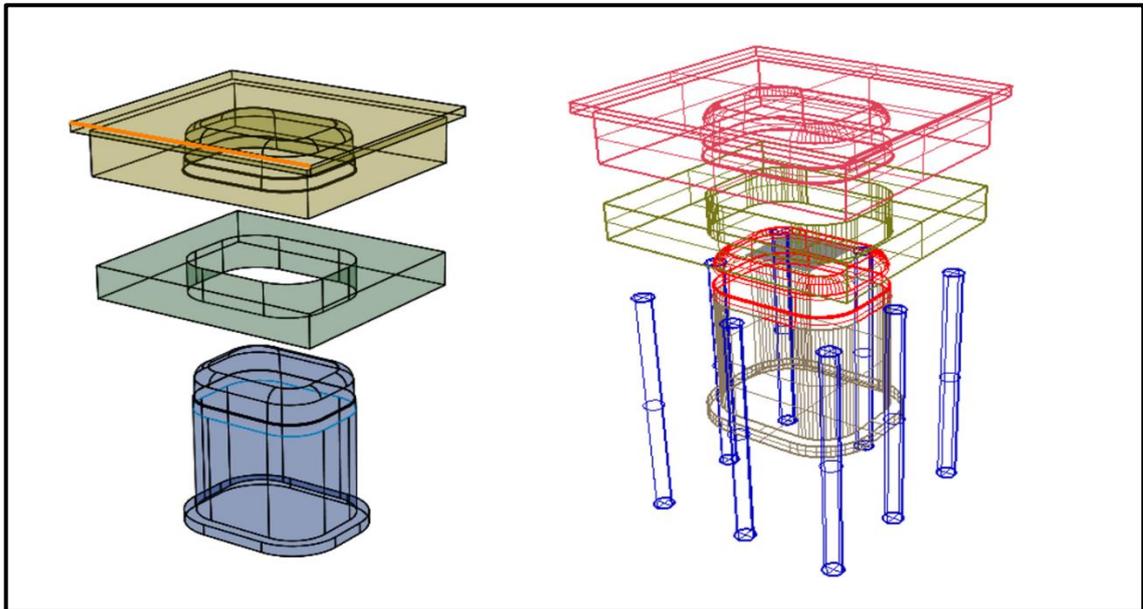
O equipamento utilizado para os ensaios foi o EMIC Modelo DL 20000, disponibilizado pela Universidade de Caxias do Sul e localizado no Laboratório de Ensaios Mecânicos de Engenharia Mecânica. Os ensaios foram realizados de acordo com a norma NBR 6673:1981 com velocidades constantes de 8,0 mm/min à temperatura de 22,5 °C.

3.2 PROJETO DO FERRAMENTAL

A ferramenta foi modelada virtualmente através de um software CAD, de acordo com as dimensões requeridas. Foram necessárias duas etapas para se atingir o produto final. Primeiramente, o blank é prensado pelo anel na matriz, finalizando com o movimento do punção contra a matriz.

O projeto da ferramenta com seus principais componentes pode ser visto na Figura 9.

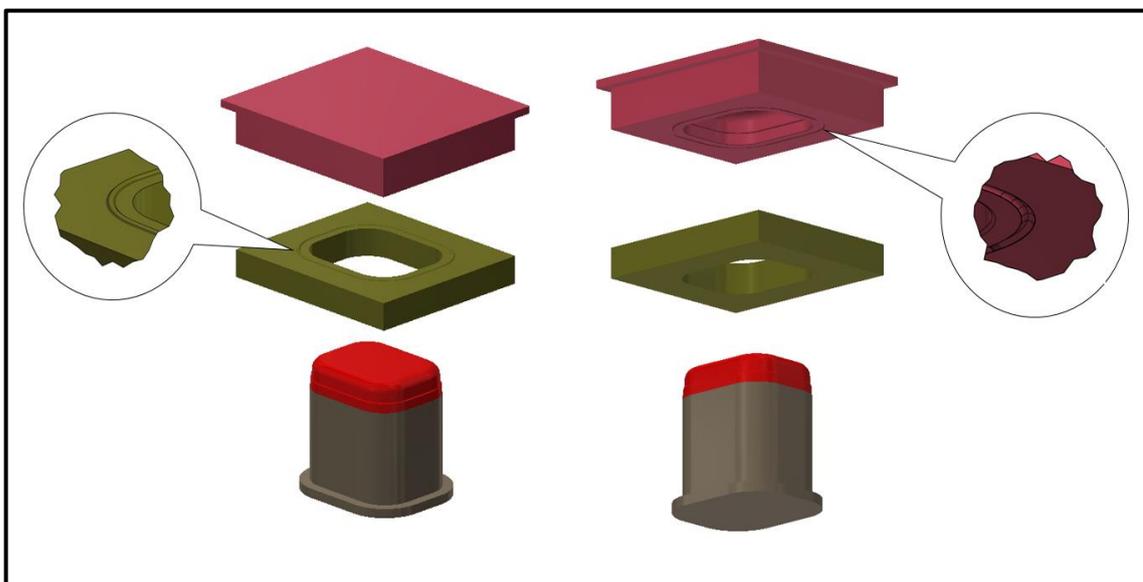
Figura 9 - Projeto da ferramenta



Fonte: Autor (2019)

A ferramenta é composta pelo punção, matriz e prensa chapa. No anel a na matriz foi prevista canaleta, caso seja necessária a restrição do escoamento do material para dentro da matriz. A canaleta do freio de estampagem será acrescentada, em caso de necessidade, com geometria semicircular em ambas as peças, possibilitando o uso localizado da restrição do material, conforme a Figura 10.

Figura 10 - Projeto da ferramenta contemplando freio de estampagem



Fonte: Autor (2019)

3.3 MODELAGEM PELO MEF

A simulação pelo MEF é composta pelos estágios de pré-processamento, processamento e pós processamento.

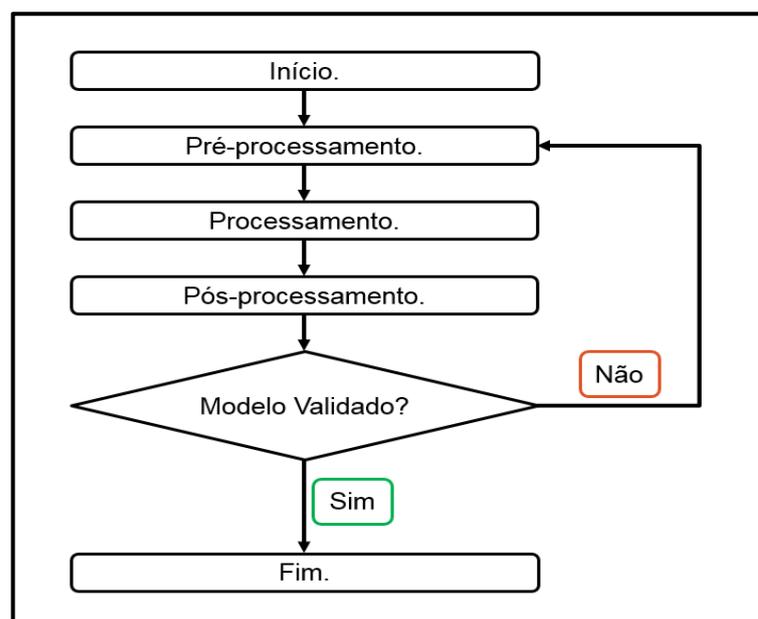
No estágio de pré-processamento, o modelo do problema é criado de forma gráfica através do software de modelagem tridimensional Rhinoceros 3D. O modelo geométrico é um dos dados de entrada no software CAE Abaqus, assim como as propriedades físicas dos materiais. As condições de contorno e de carregamento mais críticos para a realização da conformação também são definidos em uma das operações do software.

A etapa de processamento envolve a análise não-linear da conformação, assumindo condições não lineares de contato entre as superfícies, plasticidade e grandes deslocamentos. O software CAE Abaqus resolve neste método o problema numérico que foi estabelecido no pré-processamento. A complexidade do problema numérico define o tempo para que todo o processamento seja realizado, entregando então a resposta. Para a situação proposta, será utilizado o método implícito do software CAE Abaqus.

Por fim, na etapa de pós-processamento é avaliado os resultados gerados no processamento. A interface do software nos traz variedade de informações para análise, tais como tensões ao longo de todo o componente, deslocamentos, entre outros. Estes dados são mostrados através de gráficos, tabelas e contorno de cores. Para análise como critério de falha avaliando tensões será usado Von Misses.

A Figura 11 ilustra o fluxograma projetado para desenvolvimento das etapas. Ao final destas, resultará no produto da estampagem profunda simulado pelo MEF através do software Abaqus.

Figura 11 - Fluxograma da simulação CAD/CAE



Fonte: Autor (2019)

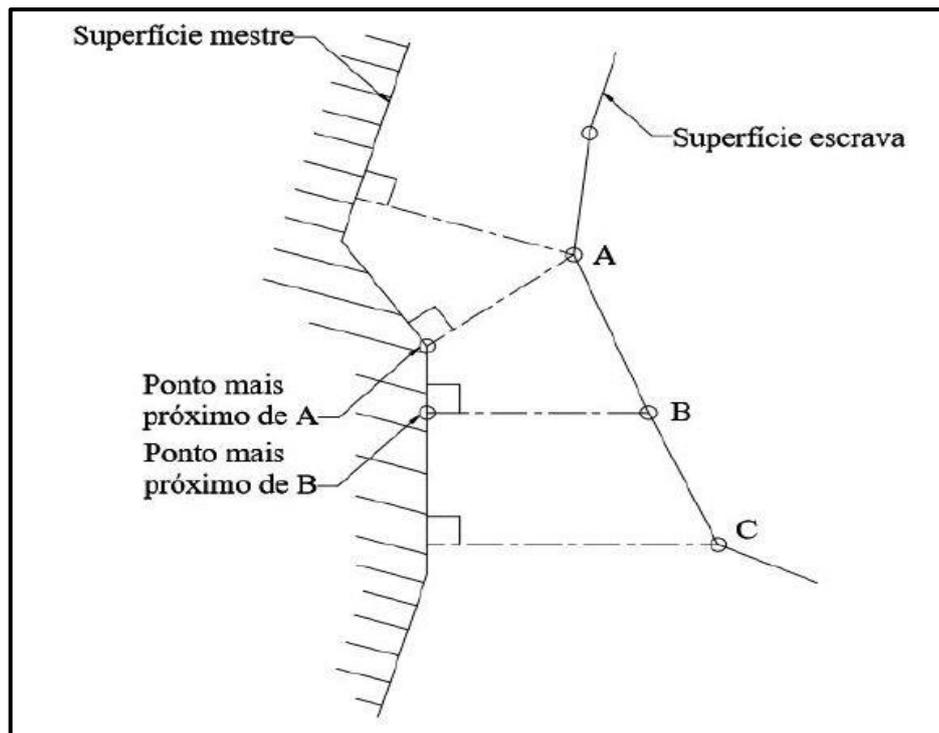
3.3.1 Contato entre superfícies

Para o valor de fricção dado pelo contato entre as superfícies, foi definido o valor de 0,07, devido a utilização do lubrificante composto por aditivos de pressão e lubricidade, e o material do punção e da matriz fabricados em ferro fundido variando com durezas entre 82 e 142 Vickers.

As superfícies de contato definem a forma como os componentes interagem entre si durante a simulação, fazendo-se necessário definir uma superfície escrava e outra superfície mestre.

De acordo com o manual do software Abaqus (2012), cada nó da superfície escrava faz interação com o ponto mais próximo da superfície mestre do par de contatos, demonstrado na Figura 12. No decorrer da simulação, os nós escravos não penetram na superfície mestre, sendo que esta pode eventualmente penetrar na superfície escrava.

Figura 12 - Discretização do contato e interação entre superfícies

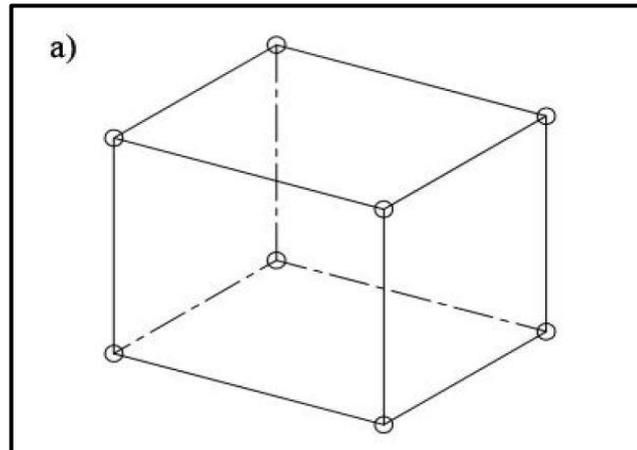


Fonte: Abaqus (2012), adaptado

3.3.2 Tipos de elementos

A malha utilizada para os elementos deste estudo será composta por um elemento estrutural contínuo sólido, linear com oito nós e integração reduzida (C3D8R), contido na biblioteca do Abaqus, conforme mostrado na Figura 13.

Figura 13 - Elemento linear C3D8R (a)



Fonte: Abaqus (2012), adaptado

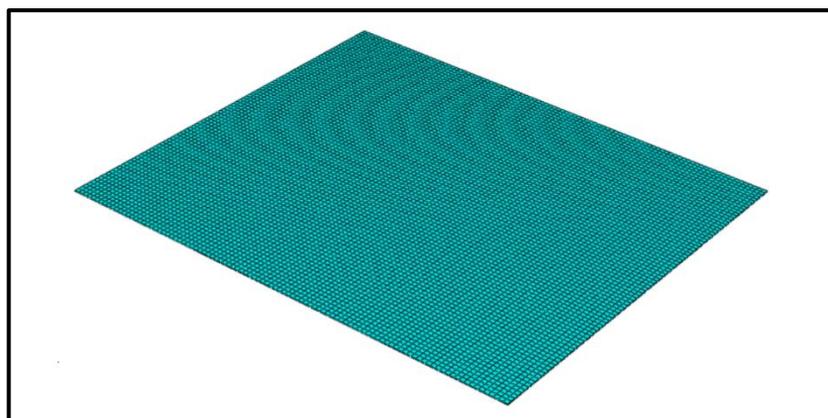
A malha da chapa, utilizada como matéria prima para estampagem do produto, foi refinada por ser a região onde ocorrem altos gradientes de tensão, proporcionando maior precisão na simulação. O total de elementos hexaédricos lineares foi de 8800, como pode ser visto no Quadro 2 e na Figura 14.

Quadro 2 - Total de elementos

```
Total number of nodes: 17978
Total number of elements: 8800
      8800 linear hexahedral elements of type C3D8R
```

Fonte: Autor (2019)

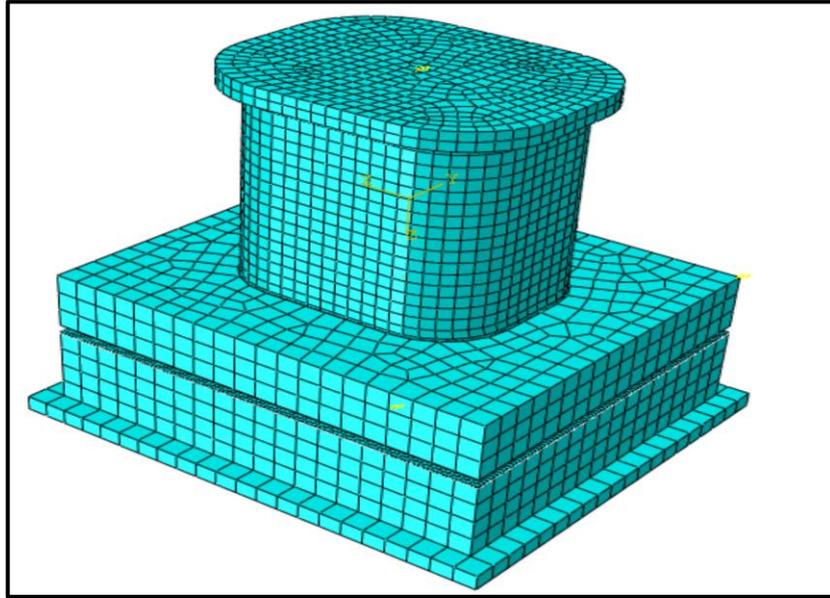
Figura 14 - Malha refinada do blank



Fonte: Autor (2019)

A malha geral dos componentes da matriz conformadora foi utilizada de forma grosseira por não terem importância na análise, como pode ser visto na Figura 15.

Figura 15 - Malha geral dos componentes da matriz conformadora



Fonte: Autor (2019)

3.3.3 Parâmetros da simulação

Para a realização da simulação, os componentes da matriz foram inseridos como sólidos rígidos, livres de deformação, uma vez que estes não fazem parte do objetivo da análise.

Contatos considerados (todos do tipo *surface-to-surface*) conforme a Quadro 3:

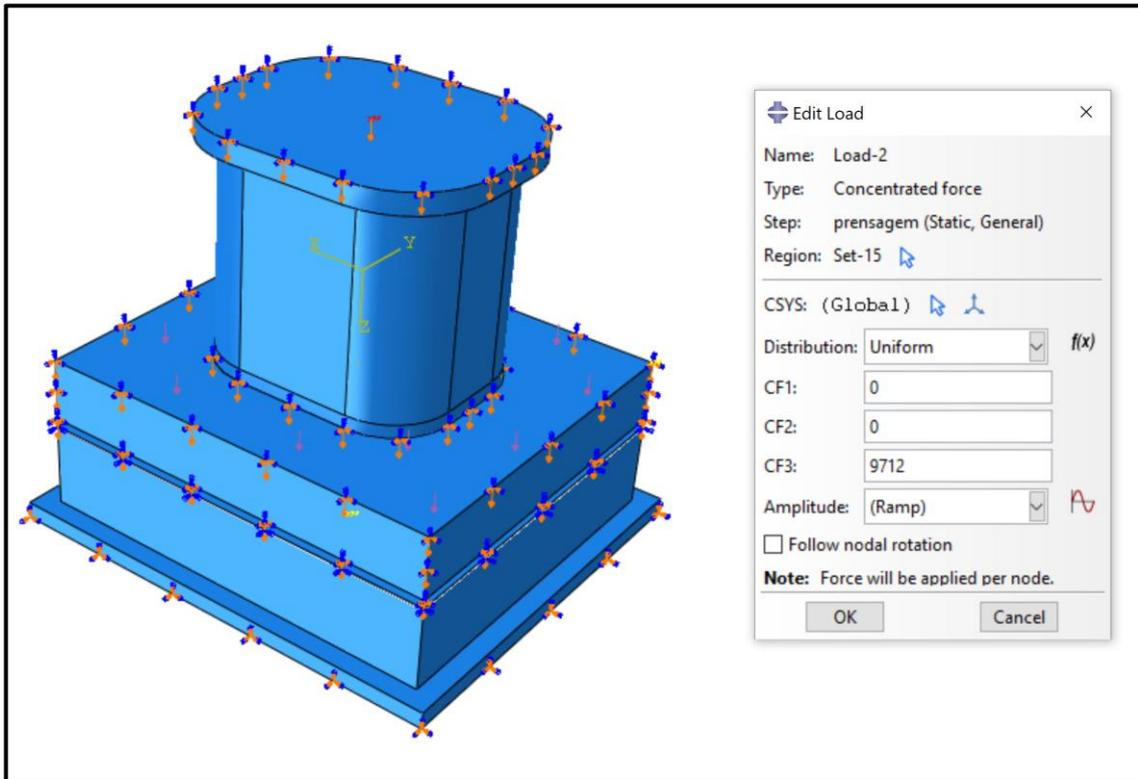
Quadro 3 - Contato dos componentes

Superfície rígida	Superfície deformável
Prensa-chapa	Blank
Matriz	Blank
Punção	Blank

Fonte: Autor (2019)

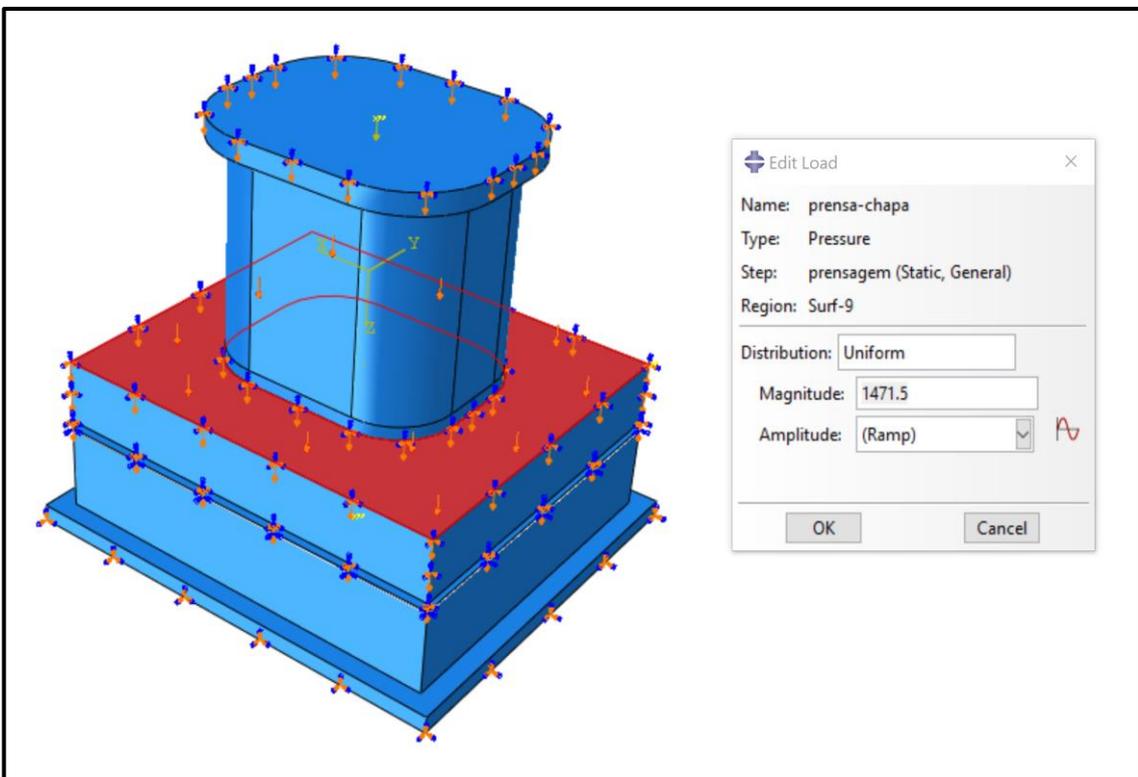
O processo tem início com o movimento do prensa-chapa contra o blank exercendo uma pressão de 1471,5 Pa, distribuída de forma uniforme sobre a base do prensa-chapa, conforme mostrado na Figura 16. Em seguida ocorre o movimento do punção contra o blank fazendo o material tomar a forma da geometria da matriz através da força concentrada de 9712 N, aplicada ao centro do punção, conforme Figura 17.

Figura 16 - Carga do punção



Fonte: Autor (2019)

Figura 17 - Carga do prensa-chapa



Fonte: Autor (2019)

4 ANÁLISE E RESULTADOS

4.1 ENSAIOS DE TRAÇÃO

Com os ensaios de tração foi determinada a tensão o limite de resistência à tração (σ_R), limite de escoamento (σ_e) e alongamento (δ) do material. Através de planilha eletrônica, os dados obtidos dos ensaios possibilitaram a criação do gráfico tensão de escoamento verdadeira (σ_v) X deformação verdadeira (ε_v) identificando assim a curva de escoamento real do material. Os relatórios dos ensaios de tração realizados estão presentes no Anexo B.

Com a planilha eletrônica foram também obtidos os valores do coeficiente de encruamento (n) e a constante do material (K) para cada direção de laminação, de acordo com as equações 20, 21 e 22.

$$y_{0^\circ} = 449,58x^{0,1688} \quad (20)$$

$$y_{45^\circ} = 485,93x^{0,187} \quad (21)$$

$$y_{90^\circ} = 447,86x^{0,1721} \quad (22)$$

Além disso, nos ensaios de tração do material, foram realizadas medições da largura e da espessura do corpo de prova, com variações constantes de força, na região de estricção, ou seja, onde estava ocorrendo redução da área. Posteriormente o método de Brigman foi aplicado para correção desta região. Os resultados obtidos, foram importantes para se obter valores da área instantânea com o decréscimo da força após a tensão máxima. Estes dados, foram utilizados para formar a curva verdadeira do material do início da deformação até o rompimento. Os dados medidos estão na Tabela 4.

Tabela 4 - Pontos da região de estricção

				(continua)
Força (N)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Área (mm ²)	Tensão (MPa)
0	20,04	1,05	21,042	0
6052,9	-	-	-	287,66
6030	17,13	1,04	17,82	338,48
6020	16,88	0,97	16,37	367,48
6000	16,77	0,97	16,27	367,67

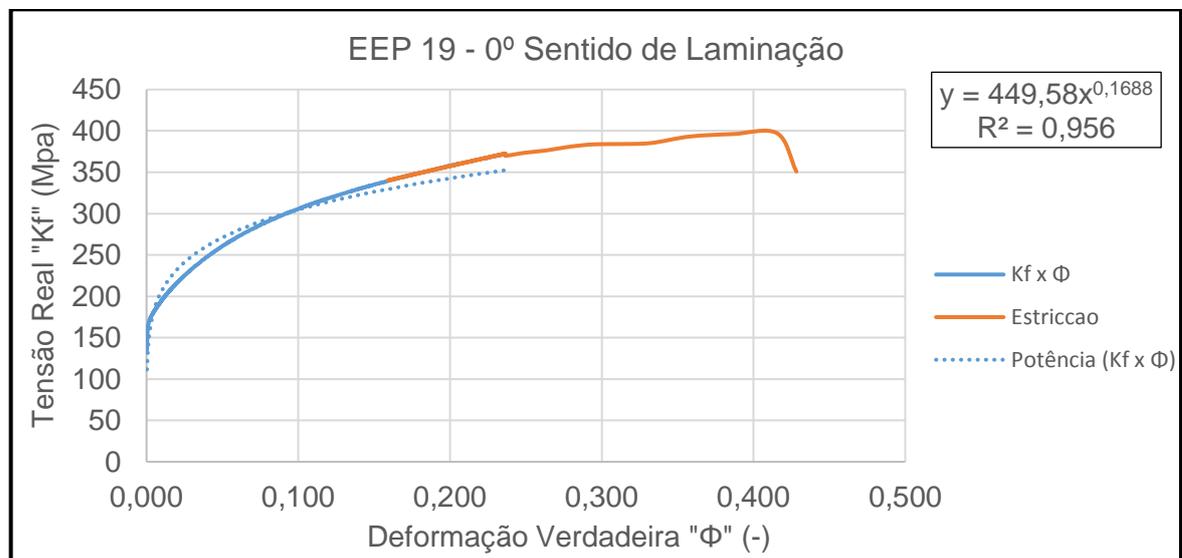
(conclusão)

Força (N)	Largura (mm)	Espessura (mm)	Área (mm ²)	Tensão (MPa)
5950	16,33	0,97	15,84	368,85
5900	16,02	0,97	15,54	379,68
5800	15,64	0,94	14,70	394,52
5700	15,23	0,94	14,32	398,15
5600	14,7	0,92	13,52	414,08
5550	14,4	0,9	12,96	428,24
5500	14,2	0,9	12,78	430,36
5450	14,05	0,89	12,50	435,84
5400	13,82	0,89	12,30	439,03
5350	13,72	0,89	12,21	438,14
5300	13,47	0,84	11,31	468,41
5200	13,2	0,88	11,62	447,66
5000	13,03	0,78	10,16	491,96
2100	12,57	0,75	9,43	222,75

Fonte: Autor (2019)

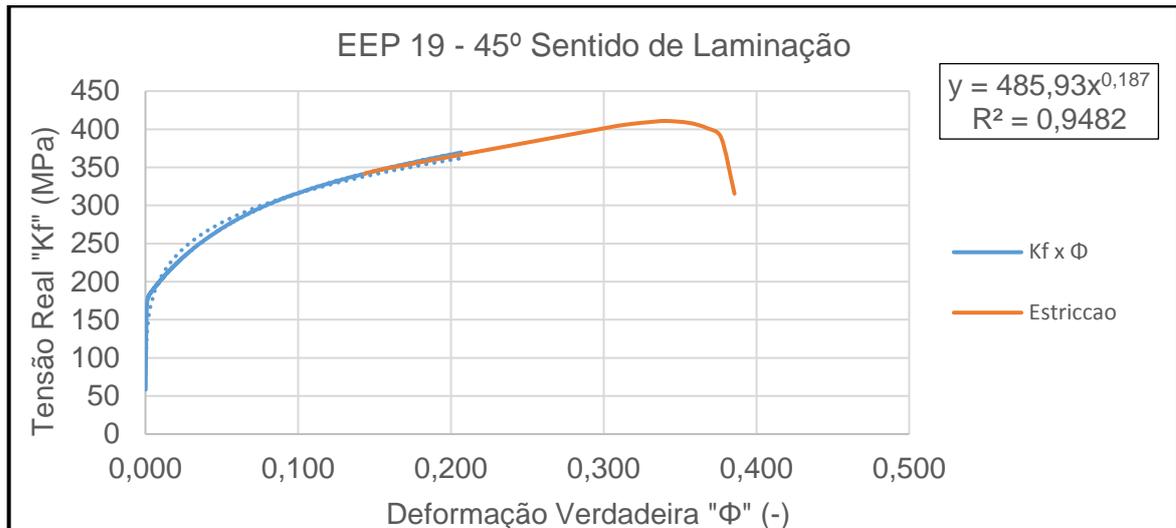
Utilizando estes dados, somados às informações da curva do material pré-estricção, foram obtidos os resultados das características mecânicas do material. As curvas Tensão Real versus Deformação Verdadeira, para: 0°, 45° e 90° em relação ao sentido de laminação, respectivamente, são apresentadas nas Figuras 18, 19 e 20:

Figura 18 - Curva plástica verdadeira à 0° do sentido de laminação



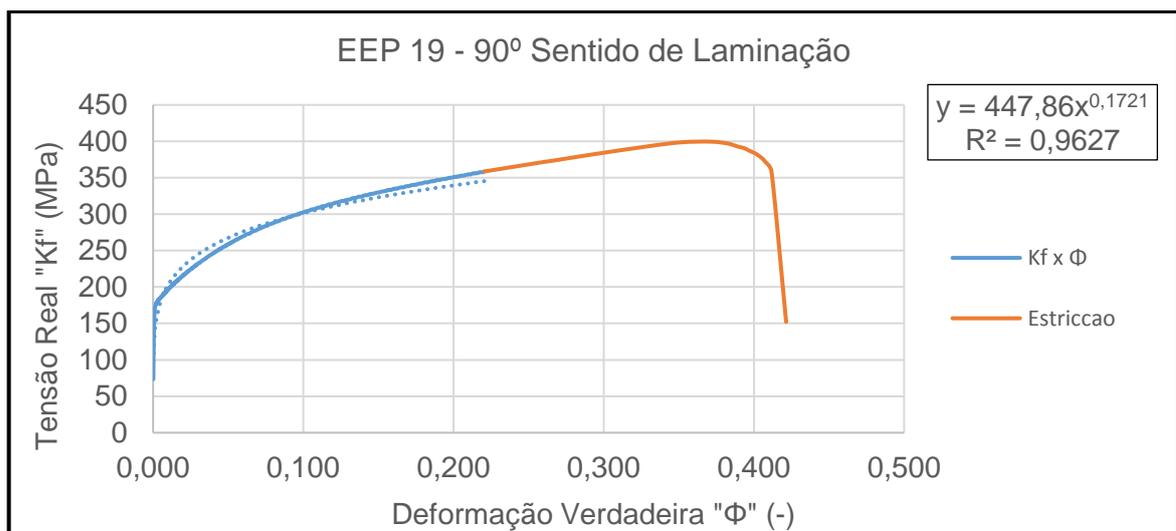
Fonte: Autor (2019)

Figura 19 - Curva plástica verdadeira à 45° do sentido de laminação



Fonte: Autor (2019)

Figura 20 - Curva plástica verdadeira à 90° do sentido de laminação



Fonte: Autor (2019)

Os resultados de tensão de ruptura (σ_R), tensão limite de elasticidade (σ_e), alongamento (δ), coeficiente de encruamento (n) e a constante do material (K) obtidos da tabela eletrônica são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5 - Propriedades mecânicas

(continua)

Direção de laminação	σ_R [MPa]	σ_e [MPa]	δ [%]	n [-]	K [MPa]
0°	295	174	53,8	0,1688	449,58

(conclusão)

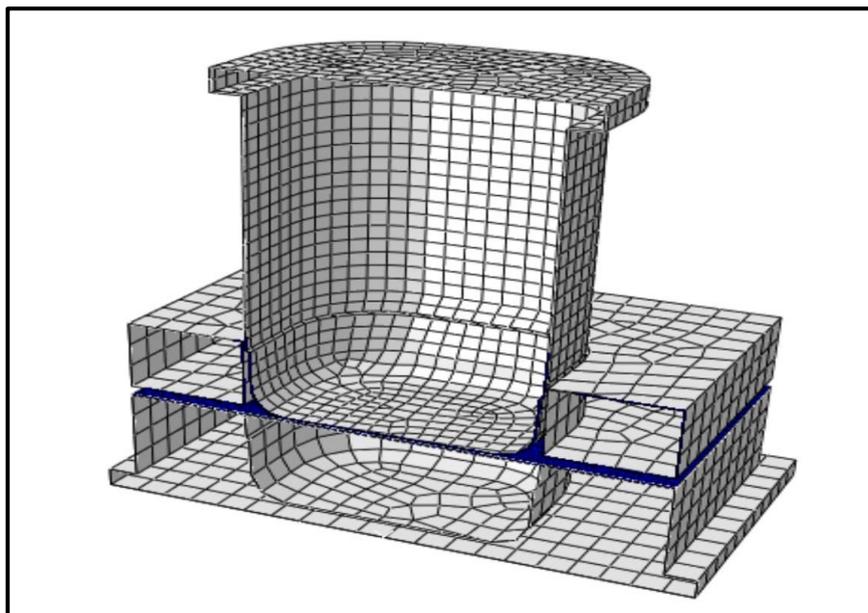
Direção de laminação	σ_R [MPa]	σ_e [MPa]	δ [%]	n [-]	K [MPa]
45°	301	183	49,2	0,187	485,93
90°	289	181	52,8	0,1721	447,86
Média	295	179,3	51,9	0,1756	461,12

Fonte: Autor (2019)

4.2 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

Utilizando os inputs obtidos das propriedades do material, foi realizada a simulação CAE para verificar o processo de estampagem profunda e o comportamento do material. O layout criado com o macho, fêmea, prensa-chapa e blank é apresentado na Figura 21.

Figura 21 - Layout da matriz conformadora no software

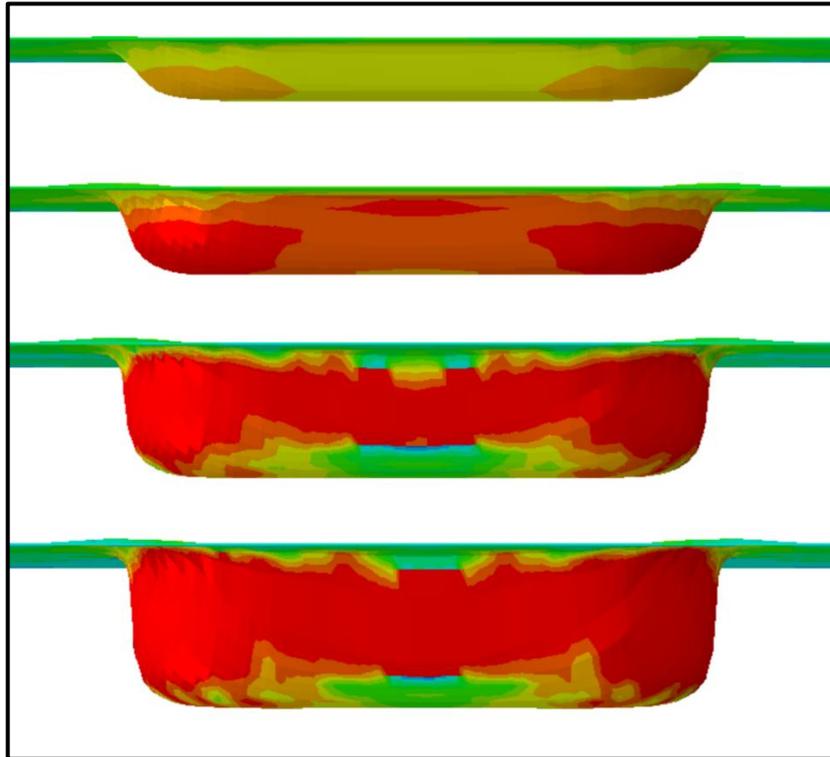


Fonte: Autor (2019)

Através da Figura 22, é possível visualizar o progresso da deformação do material ao longo de todo o processo, onde as tensões distribuídas ao longo da chapa variam com o avanço do punção, até o limite da ferramenta.

Nota-se que a concentração das maiores tensões não é restrita a um único local durante o processo, uma vez que no início as maiores tensões estavam localizadas no contato do raio do punção com o blank. Quando finalizado, as maiores tensões ficaram concentradas na parte central, onde ocorreu maior deformação do material.

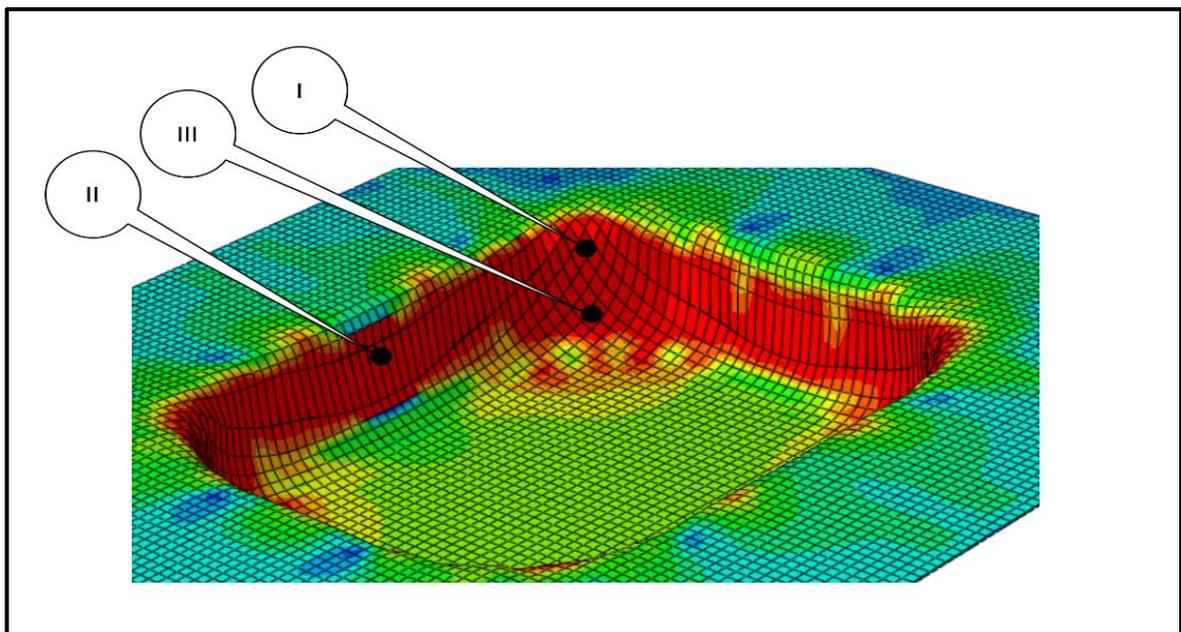
Figura 22 - Progresso da deformação ao longo do processo



Fonte: Autor (2019)

A análise dos valores de tensão ficou restrita às regiões mais críticas da peça, sendo elas classificadas como região crítica I situada no raio de entrada da matriz, a região crítica II na parte central e a região crítica III no raio interno da peça, conforme mostra a Figura 23.

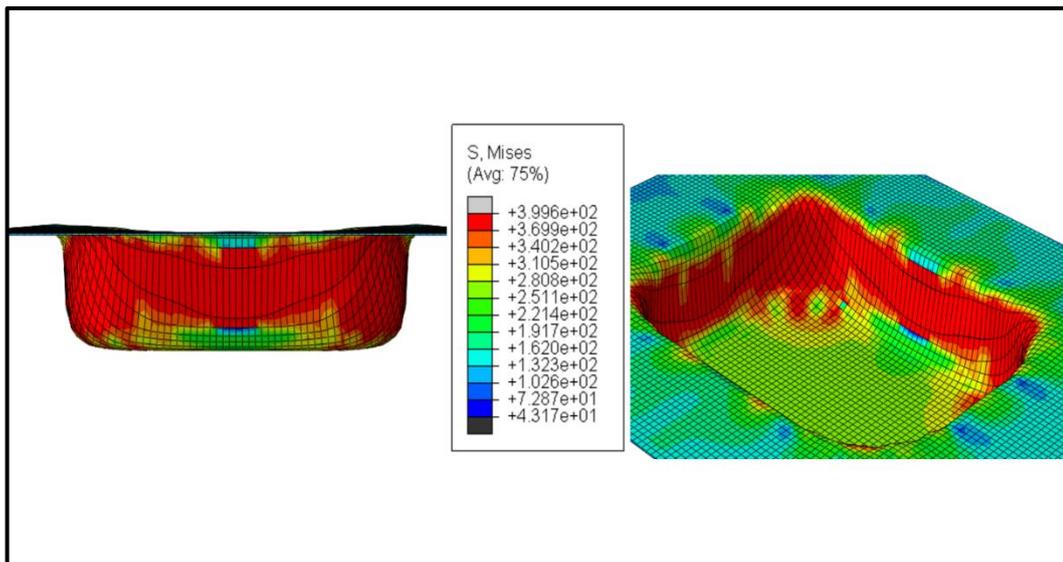
Figura 23 - Regiões críticas



Fonte: Autor (2019)

As tensões em cada região da peça, através da análise de máxima energia de distorção (Von Mises), são ilustradas na Figura 24. A maior tensão gerada na peça, segundo o critério de Von Mises, é de 399,6 MPa, não excedendo a tensão de ruptura do material de 468,4 MPa segundo o resultado obtido pelo ensaio de tração. Portanto, pode-se concluir que não ocorrerá rompimento do material durante o processo de estampagem segundo este critério.

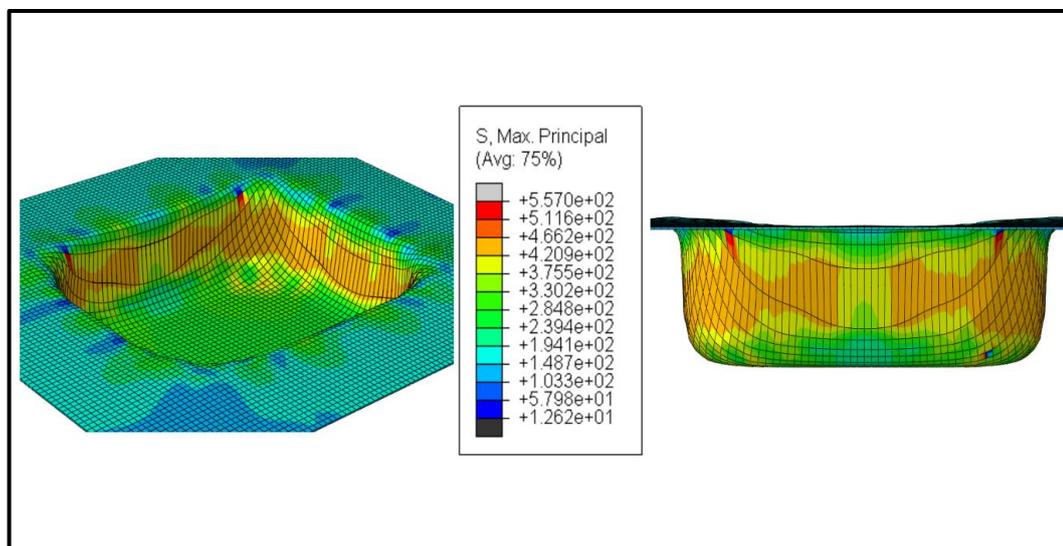
Figura 24 - Regiões de máxima tensão ao final do processo - Von Mises



Fonte: Autor (2019)

Avaliando as tensões da simulação através do critério de Máxima Principal, observou-se que a máxima tensão encontrada de 557 MPa excede a tensão máxima do material, mostrando-se diferente do critério de Von Mises.

Figura 25 - Região de máxima tensão ao fim do processo - Máx. Principal



Fonte: Autor (2019)

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos objetivos específicos, foi possível avaliar a matéria prima aço EEP 19 e obter os dados para avaliar o encruamento e as propriedades do material. Estas informações serviram como base para a correta avaliação do procedimento de estampagem em questão.

Além disso, partindo da revisão bibliográfica, com as informações pesquisadas houve embasamento técnico para o correto projeto e confecção do conjunto matriz conformadora. Esta foi uma etapa crucial para o bom desenvolvimento do estudo e da análise do processo. Utilizando este conhecimento, juntamente com a metodologia adotada, foram definidos os parâmetros e *inputs* utilizados para a simulação da conformação mecânica através do software de elementos finitos, usando como conceito uma análise de tripla não-linearidade (geometria, contato e material).

Ao realizar a análise em elementos finitos, algumas conclusões foram obtidas. O resultado do processo da simulação demonstra que, de fato a geometria da ferramenta (macho, fêmea e prensa-chapas) está coerente para a obtenção da geometria da peça estampada desejada.

Também com os resultados da simulação virtual, percebe-se a presença de elevadas tensões no processo de conformação da chapa, a importância da utilização do prensa-chapas no processo de estampagem, e, além disso, a possibilidade de desenvolver otimizações e melhorias no processo e ferramentas.

Como sugestões para trabalhos futuros, pode-se considerar as avaliações das propriedades de atrito entre os contatos presentes no processo (ferramenta com o *blank*), isso pode calibrar de forma ainda mais precisas os resultados. Também, o refinamento da parametrização de simulação que, por sua vez, apresenta elevada dificuldade de convergência, levando em consideração que estão presentes três diferentes não-linearidades. A utilização e configuração de malha adaptativa pode ser um método para aumento da precisão, embora nos testes realizados tenha apresentado dificuldades de convergência. Sugere-se também utilizar o método explícito do software CAE Abaqus para simulação. Além dos parâmetros do *software* as avaliações do freio de estampagem e outras características do processo podem também ser consideradas para maior fidelidade.

De forma geral, o estudo desenvolvido, obteve resultados dentro do esperado e foi suficientemente refinado para poder validar o projeto da ferramenta e o procedimento de estampagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABAQUS v6.12, **User's Manual**, Version 6.12. Disponível em:
<https://things.maths.cam.uk/computing/software/abaqus_docs/v6.12/pdf_books/CAE.pdf>.
Acesso em: 02 maio 2019.
- FILHO, Avelino Filho. **Elementos Finitos. A base da tecnologia CAE – Análise Não Linear**, 1. ed. São Paulo: Érica, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISSO 6892-1: Materiais Metálicos – Ensaio de Tração Parte 1: Método de ensaio à temperatura ambiente**. ABNT, 2013.
- BRITO, Osmar de. **Estampos de formar: dobramento de chapas, repuxos, desenvolvimentos técnicos: estamparia de metais**. São Paulo: Hemus, 2005. 220 p. ISBN 852890511X.
- Companhia Siderúrgica Nacional, **Laminados a Fio**. Volta Redonda, RJ, 2019.
- COSTA, Ailton. **Análise da estampagem de chapas metálicas utilizando elementos finitos**. 2003. 187 p. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2003.
- CUSTOMPART.NET. **Sheet Metal Forming**. Disponível em:
<<http://www.custompartnet.com/wu/sheet-metal-forming>>. Acesso em 15 de maio 2019.
- DUARTE, É. N. **Estudo analítico-numérico de freios de estampagem em chapas metálicas**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2007.
- FIRAT, Mehmet. Computer aided analysis and design of sheet metal forming processes: Part I – The finite element modeling concepts. **Materials and Design**, 1298-13, 2007.
- FISH, Jacob; BELYTSCHKO, Ted. **Um primeiro curso em elementos finitos**. 1. Ed. Rio de Janeiro; LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora, 2009.
- GARCIA, Amauri; SPIM, Jaime; SANTOS, CARLOS. **Ensaio dos Materiais**. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora, 2000. 247 p.
- HOSFORD, F. W.; CADDELL, M., R. **Metal Forming Mechanics and Metallurgy**. 3. ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.
- KIM, Nam-Ho; SANKAR, Bhavani. **Introdução à análise e ao projeto em elementos finitos**. 1. Ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 2011.
- KLEINER, M.; GEIGER, M.; KLAUS, A. Manufacturing of Lightweight Components by Metal Forming. **CIRP Annals – Manufacturing Technology**, v. 52, n.2, p. 521-542, jan. 2003.
- NEMOTO, Yoshihiro. **Determinação da curva tensão-deformação verdadeira de materiais isotrópicos usando corpos de prova de chapa fina**. 2004. 122 p. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.
- PALMEIRA, A. A. **Capítulo 8: Processos de Estampagem** Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005-2013.

PEARCE, Roger. **Sheet Metal Forming**. 1. ed. Philadelphia: Adam Hilger, 1991. 275 p.

PEGDEN, D. C.; SADOWSKI, R. P.; SHANNON, R. E. **Introduction to Simulation Using Siman**. 2.ed. New York, USA: McGraw-Hill, 1995.

REDDY, G.S; HUSSIAN, M.; RAO, K. S. **Latest Research on Reverse Engineering Technology: Review**. ResearchGate, Hyderabad, p. 945-948, jan. 2016.

RODRIGUES, Jorge; MARTINS, Paulo. **Tecnologia mecânica: Tecnologia da deformação plástica**. 2. ed. Lisboa: Escolar Editora, 2010. 743 p.

ROSSI, Gilvan. **Estudo de correlação do comportamento de pontos de solda em corpos de prova pelo Método de Elementos Finitos**. 2007. 113 p. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

SENA, José. **Estampagem incremental: um novo conceito de produção**. 2009. 95 p. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) – Universidade de Aveiro, Aveiro, 2009.

SCHAEFER, Lírío. **Conformação mecânica**. 2.ed. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004. 167 p. ISBN 8586647136.

SHAIKH, M. G.; RAO, A. T. B. Sheet Metal Forming Simulations for Heavy Commercial Vehicle Parts by LS-DYNA, **Global Journal of Researches in Engineering Automotive Engineering**, USA, v. 13, n. 1, p. 4-8, Abril, 2013.

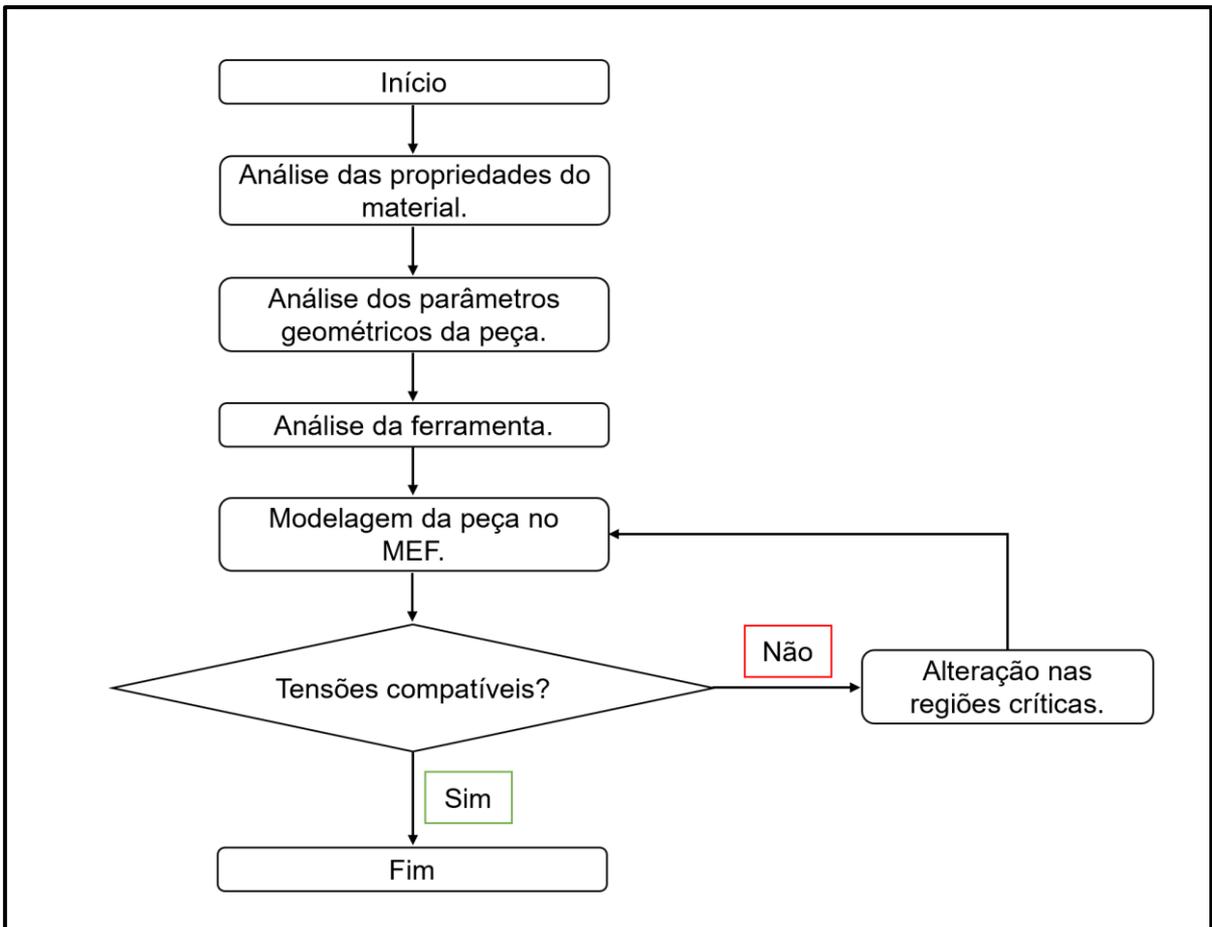
SONG, J.-H.; HUH, H.; KIM, S.-H. A simulation-based design parameter study in the stamping process of an automotive member. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 189, n. 1–3, p. 450–458, 6 jul. 2007.

SÖDERBERG, Magnus. **Finite Element Simulation of Punching**. 2006. Dissertação (Mestrado em engenharia mecânica) – Universidade Tecnológica de Luleå, 2006.

TEKKAYA, A. E. State-of-the-art of simulation of metal Forming. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 103, n. 1, p. 14-22, 2000.

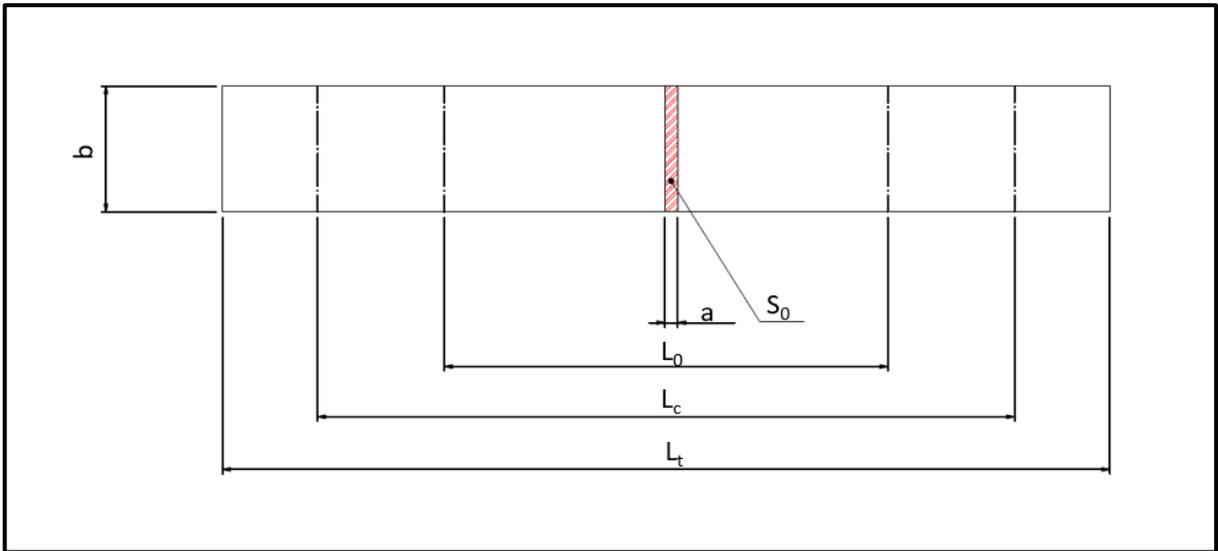
ZHANG, Li; ZHANG, Tao; WU, Kaiteng. The Nonlinear Dynamic Behavior Analysis and Research for Sheet Steel Stamping Forming Problems Based on Finite Element Method. **The Open Materials Science Journal**, 2015.

APÊNDICE A – FLUXOGRAMA DE TRABALHO



Fonte: Autor (2019)

ANEXO A – CORPOS DE PROVA PARA ENSAIO DE TRAÇÃO



Fonte: NBR 6892-1, adaptado

Onde:

a = espessura do corpo de prova [mm]

b = largura do corpo de prova [mm]

L_0 = medida inicial do comprimento [mm]

L_c = comprimento paralelo [mm]

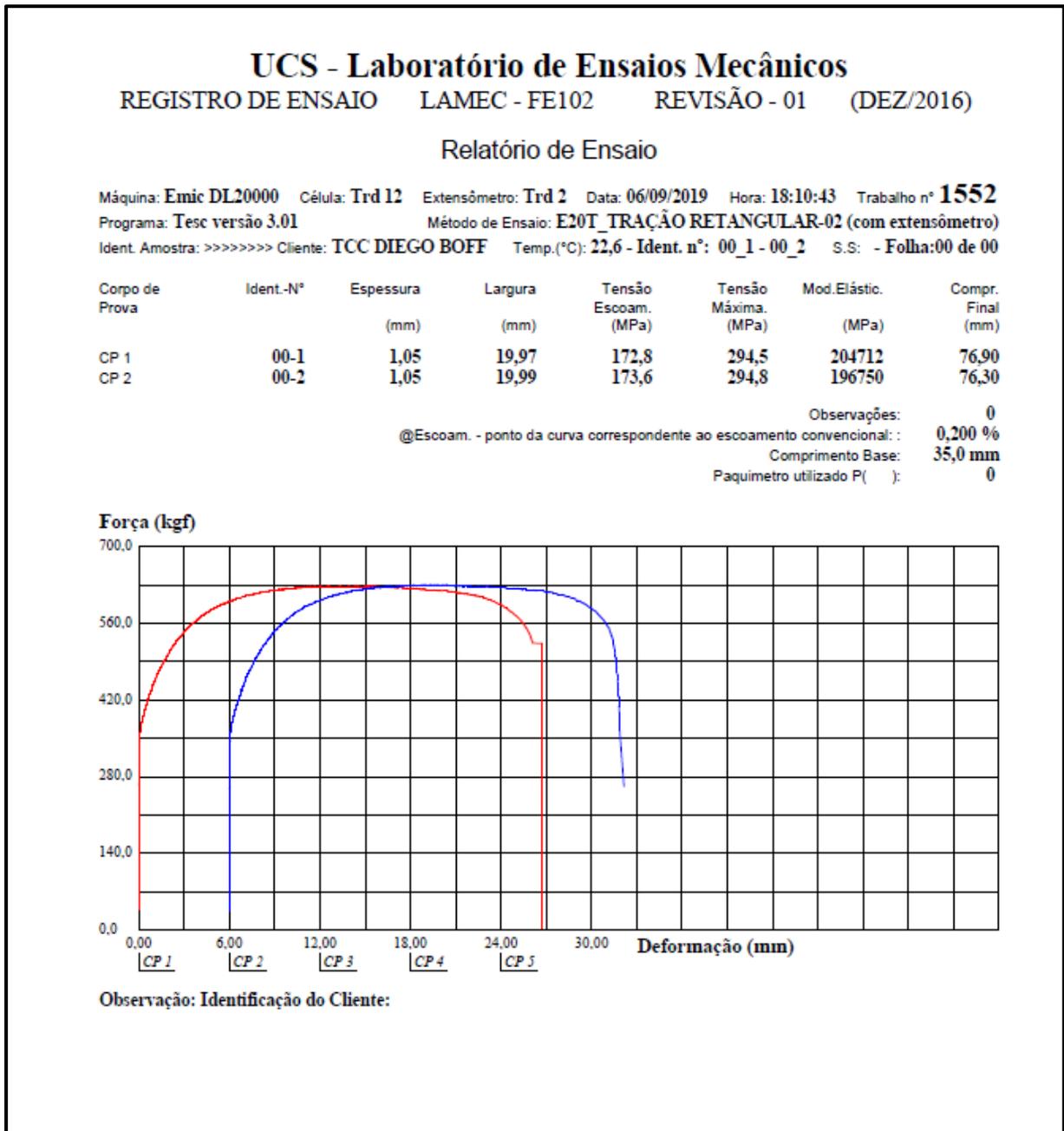
L_t = comprimento total [mm]

Tabela 6 - Dimensional dos corpos de prova

Tipo de corpo de prova	Largura (b)	Comprimento de medida inicial (L_0)	Comprimento paralelo (L_c)		Comprimento livre entre garras para corpo de prova de lados paralelos
			Mínimo	Recomendado	
1	$12,5 \pm 1$	50	57	75	87,5
2	$20,0 \pm 1$	80	90	120	140
3	$25,0 \pm 1$	50	60	-	Não definido

Fonte: adaptado de NBR 6892-1

ANEXO B – RELATÓRIOS DOS ENSAIOS DE TRAÇÃO



Fonte: Autor (2019)

