

INSTITUTO FEDERAL
Santa Catarina

Ministério da Educação
Secretaria de Educação Profissional e Tecnológica
INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA

INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS LAGES
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Matheus Goedert

Análise de elementos finitos aplicado ao projeto de punção para corte por cisalhamento em perfis de alumínio

LAGES
2022

Matheus Goedert

**Análise de elementos finitos aplicado ao projeto de punção para corte por cisalhamento
em perfis de alumínio**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em
Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Santa
Catarina como requisito para a obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Mecânica
Orientador: Prof. Rafael Gustavo Schreiber, MSc.

Lages

2022

Matheus Goedert

Análise de elementos finitos aplicado ao projeto de punção para corte por cisalhamento em perfis de alumínio.

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Mecânica e aprovado em sua forma final pelo Curso de graduação em Engenharia Mecânica

Lages, 23 de fevereiro de 2022.

Prof. Matheus Fontanelle, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Rafael Gustavo Schreiber, MSc
Orientador
Instituto Federal de Santa Catarina

Profa. Natalia Madalena Boelter, MSc
Avaliadora
Instituto Federal de Santa Catarina

Profa. Angela Selau Marques, Dra
Avaliadora
Instituto Federal Sul-Rio-Grandense

Este trabalho é dedicado aos meus colegas de classe e aos meus queridos pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a execução deste trabalho.

Agradeço aos meus pais por me apoiarem durante toda a faculdade.

Ao professor Rafael Gustavo Schreiber pelas oportunidades e orientação durante o TCC.

Ao Lucas Pereira de Jesus pela orientação técnica referente aos estampos e fornecimento de materiais para as etapas práticas.

Agradeço ao Mauricio Kiniz Jr por me auxiliar e se dispor em diversos momentos do estudo.

Agradeço ao Manoel Juliano por me ensinar e apresentar conhecimentos teóricos e práticos de estampos.

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento do método de elementos finitos, aplicado a um projeto de punção que apresenta falhas em sua etapa de testes, por meio da elaboração de um modelo de simulação, válido para otimização e projeto de estampos de corte por cisalhamento, por meio do software *Ansys Student 2021 R2*, tendo como base trabalhos desenvolvidos na área de simulações. O presente estudo por sua vez utiliza do modo de dinâmica explícita, levando em consideração os esforços e restrições desenvolvidas a fim da obtenção de pontos críticos e seus respectivos valores de tensão. A aplicação de simulação numérica utilizou como considerações principais o tempo de corte, as características dos materiais utilizados, o atrito entre o punção e o perfil de alumínio, além do deslocamento do punção durante a execução do corte, sendo o dado referente ao coeficiente de atrito obtido de forma experimental por meio do ensaio do anel, e os demais estipulados a partir de características construtivas. Posteriormente a definição de parâmetros e restrições é simulado os dados de tensão, para então desenvolver a análise de falha e sua proposta de solução embasada em conhecimento teórico, referente a projetos e processos de fabricação. A solução por sua vez é constituída pela substituição do material de fabricação e seu processo de têmpera, sendo seguida da execução de uma etapa de validação perante a realização de testes práticos.

Palavras-chave: Método de Elementos Finitos, Punção, Corte por cisalhamento, Ansys.

ABSTRACT

This work presents the development of the finite element method, applied to a punching project that presents flaws in its testing stage, through the construction of a simulation model, valid for the optimization and design of cutting stamps by means of stretching, through of the Ansys Student 2021 R2 software, based on the work developed in the area of simulations. The study in turn explicit of dynamics mode, taking into account the exercises and presented the use of the critical points analysis end and their respective verification values. The application of simulation applied as main characteristics of the materials used, the friction between the punch during the execution of the cut, in addition to the displacement of the punch during the execution of the cut, being the friction coefficient occurred experimentally through the ring test, and the others stipulated from constructive characteristics. Subsequently, a definition of parameters and solution is simulated to develop an analysis of failure data and its proposal of projects based on theoretical knowledge, referring to an attempt to elaborate projects and manufacturing processes. The in turn consists of the replacement of the manufacturing material and its tempering process, followed by the execution of a validation step before carrying out practical tests.

Keywords: Finite element analysis, Punch, Shear cut, Ansys.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Corte por cisalhamento.....	19
Figura 2 - Gráfico tensão x deformação.....	20
Figura 3 - Dimensões para folga Matriz x Punção.....	23
Figura 4 - Metodologia de projetos.....	27
Figura 5 - Corte por cisalhamento.....	28
Figura 6 - Representação 2D de deformação por cisalhamento.....	32
Figura 7 - Comparação entre método de Lagrange e de Euler.....	34
Figura 8 - Metodologia de estudo.....	39
Figura 9 - Perfil de alumínio a ser cortado.....	40
Figura 10 - Vista frontal do conjunto completo.....	41
Figura 11 - Punção do estudo.....	42
Figura 12 - Falha de punção durante etapa de teste.....	43
Figura 13 - Dados para o Aço D6.....	44
Figura 14 - Dados para o Alumínio 6061T6.....	45
Figura 15 - Malha em conjunto bipartido.....	47
Figura 16 - Fabricação de anéis por eletro erosão a fio.....	49
Figura 17 - Conjunto de corpos de prova.....	50
Figura 18 - Execução do ensaio do anel.....	51
Figura 19 - Deslocamentos atribuídos.....	53
Figura 20 - Curva de calibração para coeficiente de atrito.....	54
Figura 21 - Qualidade de malha por tamanho dos elementos.....	56
Figura 22 - Análise inicial de tensões.....	58
Figura 23 - Valores de tensões ao longo do tempo.....	59
Figura 24 - Aplicação do Probe.....	60
Figura 25 - Gráfico de tensões no ponto crítico.....	61
Figura 26 - Corte de seção em zona crítica X-Y.....	63
Figura 27 - Corte de seção em zona crítica Z-Y.....	64
Figura 28 - Punção otimizado.....	66

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD - *Computer Aided Design* (Desenho assistido por computador)

FEM - *Finite Element Method* (método de elementos finitos)

PVI – Problema de Valor Inicial.

CNC- Controle Numérico Computadorizado.

LISTA DE SÍMBOLOS

s	Espessura de chapa (mm)
d	Diâmetro do Punção (mm)
P_m	Pressão média de deformação (Pa)
u	Coefficiente de atrito (-)
a	Comprimento de trina (mm)
r	Distância radial (mm)
F	Esforço de corte (N)
p	Perímetro (mm)
P	Carga Normal (N)
E	Módulo de elasticidade (GPa)
G	Modulo de Cisalhamento (GPa)
A_c	Área de Corte (mm^2)
l	Aresta de Corte (mm)
F_t	Força Tangencial (N)
L_1	Comprimento 1 inicial (mm)
L_2	Comprimento 2 inicial (mm)

L3 Comprimento 3 inicial (mm)

L'1 Comprimento 1 final (mm)

L'2 Comprimento 2 final (mm)

L'3 Comprimento 3 final (mm)

V0 Volume inicial (mm^3)

Vf Volume final (mm^3)

Símbolos gregos:

ϵ_1 Deformação linear 1 (mm)

ϵ_2 Deformação linear 2 (mm)

ϵ_3 Deformação linear 3 (mm)

ν Coeficiente de Poisson (-)

σ_0 Tensão limite de escoamento (MPa)

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ Tensões principais (MPa)

σ_{max} Tensão Máxima de Cisalhamento (MPa)

σ_c Tensão de Cisalhamento (MPa)

φ_c Deformação angular (Graus)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVO GERAL.....	16
1.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	PROCESSO DE CORTE POR CISALHAMENTO	18
2.2	PRINCÍPIOS DE TENSÃO E DEFORMAÇÃO.....	19
2.3	PARÂMETROS DE CORTE.....	21
2.4	TEORIA DA FRATURA EM UMA ÓPTICA DE PROJETOS.....	25
2.5	PROJETO DE FERRAMENTAL	27
2.5.1	Processamento dos Metais	29
2.6	MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.....	30
2.6.1	Simplificações e Tratamentos	31
2.6.2	Esforços e Deformações Desenvolvidas.	31
2.6.3	Criação e Refinamento de Malha.....	33
2.6.4	Modelos Matemáticos de Solução.	36
3	MATERIAIS E MÉTODOS	38
3.1	MÉTODO ANALÍTICO	38
3.2	DESCRIÇÃO DA FALHA.....	42
3.3	DADOS E RESTRIÇÕES INICIAIS	43
3.4	CRIAÇÃO DE MALHA E REFINAMENTOS	46
3.5	ENSAIO DO ANEL	47
3.6	DINÂMICA EXPLÍCITA	52
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	54
4.1	COEFICIENTE DE ATRITO.....	54
4.2	RESULTADOS DE MALHA	55
4.3	SOLUÇÃO E ANÁLISE INICIAL DE DADOS	56

4.4	PONTOS CRÍTICOS.	57
4.5	HIPÓTESE DE FALHA.....	61
4.6	PROPOSTA DE SOLUÇÃO.....	62
5	CONCLUSÃO.....	67

1 INTRODUÇÃO

O sucesso de um projeto está ligado a validade e adequação dos modelos de engenharia utilizados em sua elaboração. Sendo assim, a criação de um modelo de engenharia útil para dado problema corresponde ao maior desafio em um desenvolvimento de projeto, dependendo da habilidade e experiência de quem o elabora, é necessário o levantamento de princípios básicos e limitações que estejam ligados ao problema. Algumas ferramentas computacionais podem trazer maior praticidade e repetibilidade para as soluções através da definição de padrões, tanto pela utilização de modelos CAD como por meio do FEM (*Finite Element Method*) (NORTON, 2013).

Comumente os projetos de estampo são desenvolvidos com base unicamente empírica, principalmente quando associado a punções e cortes de geometrias complexas, está submetida a uma validação posterior a etapa de construção e teste, acarretando em frequentes retrabalhos quando não se obtém êxito na primeira idealização, levando a elevados custos para sua solução. Em muitos dos casos, mesmo após a observação da falha, não é possível determinar sua origem. Com isso são elaboradas hipóteses e soluções embasadas na experiência prática a fim de solucioná-las.

Ao observar essa metodologia há a constatação da necessidade de métodos de pré validação em projetos, com a determinação de pontos críticos bem como o estudo preciso do modo de falha e soluções mais eficazes pautado em conhecimento científico.

O corte por cisalhamento é um processo de conformação mecânica cujo objetivo é dar uma nova forma geométrica a uma chapa mecânica através da separação de material (SCHAEFFER, 2004), correspondendo a um dos processos mais versáteis na indústria metal mecânica, podendo ser classificada de acordo com as forças atuantes no processo (DIETER, 1981),

Em específico o corte por cisalhamento com a utilização de estampas apresenta grande versatilidade de aplicação em diversos setores produtivos, como na indústria aeronáutica, automobilística e fabricação de componentes de precisão, muito por sua grande praticidade, e possibilidade de fabricação de peças em série, além geometrias complexas, e possibilitar precisão de medidas finais.

Em geral, um estampo é composto por um conjunto de matriz e punção, montados por meio de bases, fixadas por hastes e colunas, que possibilitam o deslocamento linear ao longo da etapa de corte. O punção por sua vez, funciona como a ferramenta de corte, tendo uma carga

aplicada em si, cuja função é aplicar forças cisalhantes a um perfil ou chapa, que em conjunto com a matriz, e uma folga pré determinada agem de forma a possibilitar o corte por cisalhamento.

Desta forma, os componentes presentes em um estampo como o conjunto de matriz e punção necessitam de boa resistência ao desgaste, boa temperabilidade, além de possuírem uma tensão limite obrigatoriamente superior à do material a ser cortado.

Sobretudo, no que toca a indústria fabricante de estampas de corte para perfis de alumínio, a etapa de projeto constitui como processo indispensável, desenvolvendo-se punções e matrizes específicos para a utilização na montagem de portas e janelas em geral. Podendo haver a necessidade de elaboração de ferramentas de geometria complexas, que devem possuir viabilidade construtiva para a empresa em questão.

No entanto, grande parte das indústrias utiliza unicamente do conhecimento empírico para a elaboração de estampas, e sua validação ocorre somente com a realização de testes práticos. Com isso o presente estudo busca por elaborar um modelo de simulação numérica, para obtenção de dados críticos e validação de projetos previamente a sua etapa de teste.

Para êxito do estudo, é utilizado o *Ansys Student 2021 R2*, para simulação de esforços durante o corte de chapas por meio do modo de dinâmica explícita. Nesta simulação é identificando os pontos de fragilidade e concentradores de tensão, bem como o comportamento do estampo durante sua utilização. Posteriormente há a elaboração de uma proposta de solução, está visando a eliminação dos problemas, e somente então ocorre a comparação prática dos resultados obtidos por meio de testes práticos.

1.1 OBJETIVO GERAL

O principal objetivo do presente trabalho é a determinação de um modelo de simulação para um estudo de caso na otimização de um punção, com base na determinação de concentradores de tensão e pontos de fragilidade.

1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Desenvolver um modelo de simulação para a validação de um punção de corte;
- Avaliar o fator de segurança aplicado ao projeto do punção de corte;

- Aplicar o FEM na simulação visando a otimização de um punção.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentada uma revisão de conceitos envolvidos nos processos de conformação mecânica, além de analisar o corte por cisalhamento, relacionando as suas forças envolvidas e parâmetros de corte.

2.1 PROCESSO DE CORTE POR CISALHAMENTO

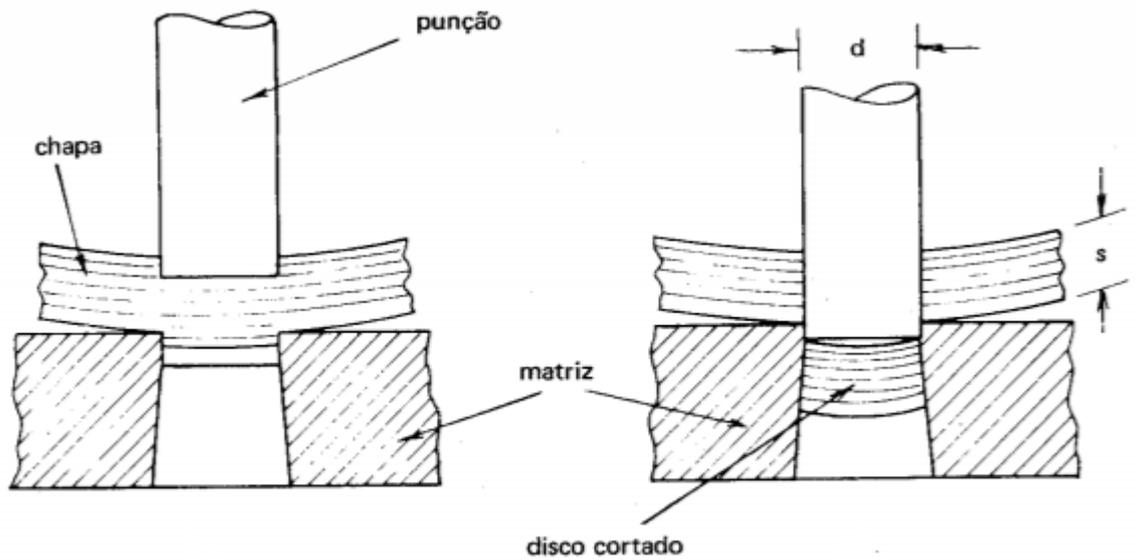
Dentro do estudo da conformação, a classificação quanto as operações ocorrem de acordo com as forças aplicadas ao material a medida que este é trabalhado até sua forma final. O processo de corte por cisalhamento é o processo onde ocorre a aplicação de forças até o ponto de ruptura do material no plano de cisalhamento (DIETER, 1981).

O processo de corte por cisalhamento é um processo de separação de material, geralmente sendo estudado juntamente com a estampagem em função de algumas semelhanças. Ambos processos ocorrem por ferramentas acionadas por prensas, tendo o corte originado através da passagem de dois cantos afiados um por entre o outro, com uma certa folga entre eles (SCHAEFFER, 2004).

O corte por cisalhamento por sua vez é um processo de fabricação a frio que utiliza de uma prensa para aplicar uma força em um punção através de uma matriz criando um orifício por meio do cisalhamento, podendo ser aplicável a uma ampla variedade de materiais (VALI; RAJU, 2019)

A figura 1 apresenta um estampo durante a aplicação de uma carga em um processo de corte por cisalhamento, sendo o lado esquerdo referente a etapa anterior ao destacamento de material, e o lado direito correspondendo ao material já cisalhado.

Figura 1 - Corte por cisalhamento.

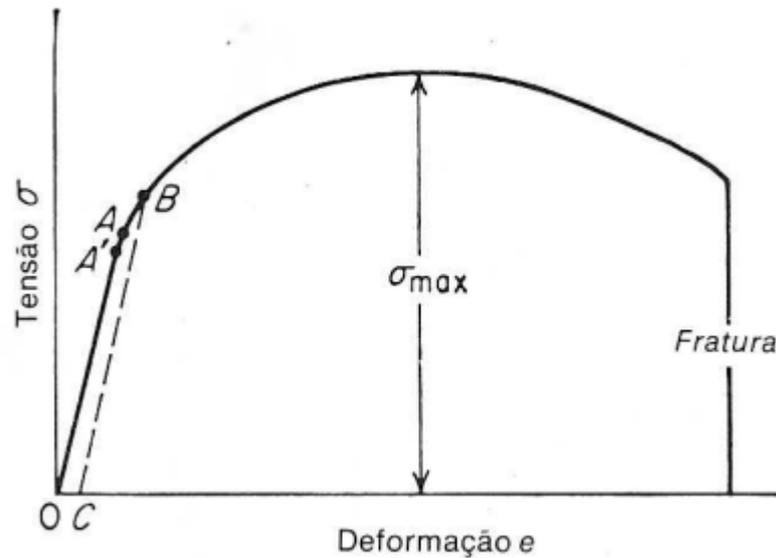


Fonte: (CHIAVERINI, 1986)

2.2 PRINCÍPIOS DE TENSÃO E DEFORMAÇÃO

Os principais dados referentes a propriedades mecânicas em metais dúcteis, advêm de um ensaio de tração, através da aplicação de uma carga axial crescente a um corpo de prova padronizado, até o momento de sua ruptura, ao longo do teste são medidas as tensões e deformações, o que gera o gráfico de engenharia presente na figura 2 (DIETER, 1981).

Figura 2 - Gráfico tensão x deformação.



Fonte:(DIETER, 1981)

O gráfico presente na figura 2 representa os principais pontos para as características dos materiais, o ponto A representa o limite elástico do material, enquanto o ponto A' é a tensão para a qual o comportamento do material se desvia de sua linearidade. O Módulo de elasticidade E é o coeficiente angular para esta região, o ponto B, é o limite de escoamento convencional, o qual após a carga ser retirada ocorre uma deformação plástica admissível de 0,002 representado por OC. Ao ultrapassar o limite elástico ocorre a deformação plástica, com o crescimento da deformação plástica, a resistência aumenta devido ao encruamento do material, até atingir o ponto de tensão máxima, gerando o efeito de estricção, o qual reduz o diâmetro inicial, ocasionando em uma redução da tensão medida no gráfico de engenharia até o ponto de ruptura (DIETER, 1981).

A Lei de Hook estabelece que para a maioria dos metais submetidos a uma tensão de tração relativamente baixa a deformação ocorrida em um corpo é proporcional a tensão imposta ao mesmo, dando origem ao conceito do módulo de elasticidade (E) (WILLIAN D. CALLISTER; DAVID G. RETHWISCH, 2018).

O módulo de elasticidade é resultado direto da região elástica dos materiais, que caracteriza a parcela a qual um material submetido a uma dada tensão retorna ao seu estado original, correspondendo a uma deformação não permanente, podendo ser descrita em um gráfico de engenharia por meio da tensão (Eixo das ordenadas) e deformação (Eixo das

abscissas). Para questões práticas o módulo E pode ser considerado como a rigidez do material a deformação elástica (WILLIAN D. CALLISTER; DAVID G. RETHWISCH, 2018).

A partir de determinado ponto, a Lei de Hooke deixa de ser válida, e o comportamento dos materiais submetidos a tensão deixa de ser linear, além disso, quando ocorre a retirada da carga a qual o material está submetido, a deformação desenvolvida não recupera-se por completo, a esta zona contida em um gráfico de engenharia dá-se o nome de região plástica de deformações, sendo o volume constante durante todo o processo caracterizando o fenômeno de viscoelasticidade (HELMAN; CELTIN, 2010).

O comportamento de um material, durante a aplicação de uma tensão gera uma deformação na mesma direção, arbitrariamente nomeada como Z , como principal reação e em virtude a constância do volume inicial do corpo, ocorre obrigatoriamente contrações nas direções opostas, X e Y , que são perpendiculares a tensão aplicada. Para materiais isotrópicos a deformação em um estado de aplicação de tensão uniaxial irá resultar em deformações iguais nas direções tanto de X quanto de Y , uma vez que as características do material são independentes da direção, a partir disto tendo a relação entre as deformações laterais e axiais, é possível a determinação do coeficiente de Poisson ν , que é uma constante adimensional representando as relações de deformação para dado material (WILLIAN D. CALLISTER; DAVID G. RETHWISCH, 2018).

O módulo de cisalhamento G é outra característica de importância para a previsão de falha nos materiais, representando a inclinação da região elástica linear de uma curva tensão-deformação cisalhante, gerado através da razão entre a tensão de cisalhamento e a deformação; para os materiais isotrópicos os módulos E e o coeficiente ν estão relacionados entre si através do módulo G (WILLIAN D. CALLISTER; DAVID G. RETHWISCH, 2018).

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (1)$$

Onde a equação 1 apresenta E como o Módulo de elasticidade, G representa o módulo de cisalhamento, e ν é o coeficiente de Poisson.

2.3 PARÂMETROS DE CORTE

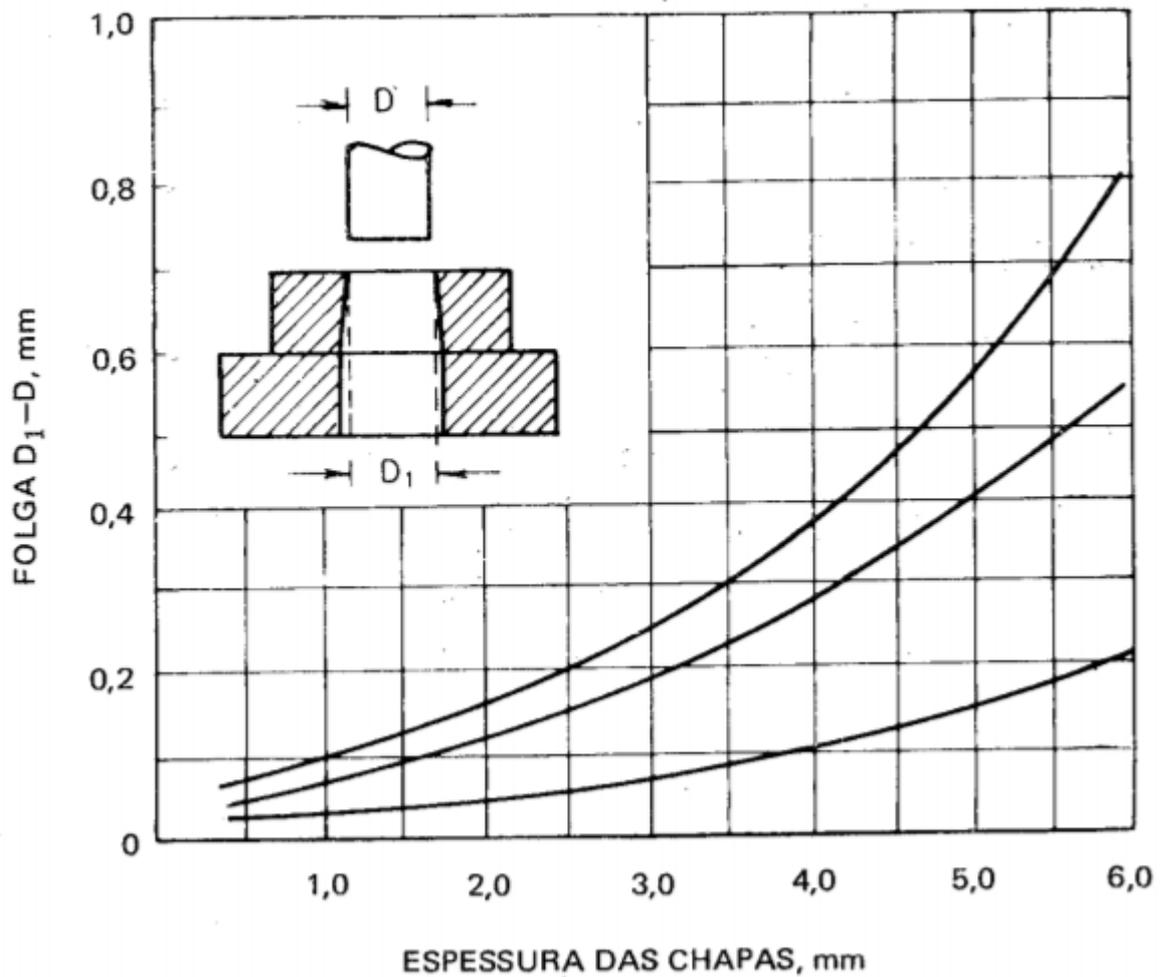
A obtenção de peças por corte tendo como princípio o cisalhamento, são obtidos através de um punção, que exerce força sob o material a ser cortado, tendo do outro lado uma

matriz. No momento em que o punção passa pela matriz há a conversão da compressão em esforço cisalhante, a força aplicada desenvolve uma tensão de cisalhamento, por onde ao fim o material irá romper de forma brusca, a partir da criação de uma trinca inicial.

Na figura 3 a curva inferior se refere ao cisalhamento de alumínio e metais leves, relacionando os parâmetros de folga entre o punção e a matriz do conjunto com as espessuras das chapas a serem cortadas no estampo.

A figura 1 tem s como a espessura da chapa, e d o diâmetro do punção, é possível realizar a correlação entre tais fatores a fim de determinar a folga ideal para um conjunto de punção e matriz. Estas folgas são mostradas na figura 3, as quais configuram como uma importante variável para a obtenção de cortes de qualidade, isto é, sem deformações exageradas, e ou a exigência de forças de grandes magnitudes para execução da operação, as folgas por sua vez podem ser determinado por tabelas, relacionando o material a ser cisalhado, sendo esta uma variável cujo estudo já se mostra amplamente presente na elaboração de estampos.

Figura 3 - Dimensões para folga Matriz x Punção.



Fonte: (CHIAVERINI, 1986)

Em cálculos de força em processos de conformação, normalmente os efeitos do atrito desenvolvidos durante o processo de corte são desconsiderados. No entanto, isso não se mostra realista, uma vez que os principais esforços desenvolvidos no processo são em decorrência do atrito e os efeitos de inércia, com o escoamento lateral do metal de seu interior para fora ao longo da compressão, gerando tensões cisalhantes na superfície da matriz em contato com a peça. Para uma simplificação, dado um corpo no formato de um disco circular, o valor para as pressões laterais terão seus pontos máximos no centro, enquanto nas arestas serão igual a zero, levando a caracterização da barreira de atrito, em virtude do aumento característico da pressão de deformação e a pressão média, ou altura média da barreira de atrito (DIETER, 1981).

$$Pm = \frac{\int_0^a 2\pi r dr}{\pi a^2} = \frac{\sigma_0}{2} \left(\frac{s}{ua}\right)^2 \left(e^{2ua/s} - \frac{2ua}{s} - 1\right) \quad (2)$$

A equação 2 se refere a pressão média da barreira de atrito Pm , dada a simplificação para um corpo no formato de um disco circular, onde σ_0 corresponde a tensão limite de escoamento, s é a espessura, u é o coeficiente de atrito, e a são o comprimento de trina.

O atrito irá surgir nas interfaces onde exista movimento relativo entre o material e a ferramenta, podendo ser expressa como a divisão entre a força tangencial necessária para se vencer o atrito entre as duas superfícies, e uma carga normal aplicada ao plano (MARTINS; RODRIGUES, 2011).

$$u = \frac{Ft}{P} \quad (3)$$

A equação 3 apresenta o atrito u , pela relação com a força tangencial Ft , dividida pela carga normal P .

Para a determinação do coeficiente de atrito, uma metodologia de grande eficiência tanto pela sua ampla utilização, quanto pela não necessidade de um equipamento específico é o método do ensaio do anel. Este método tem princípio fundamental pautada na variação de um diâmetro interno ao aplicar uma dada força, gerando uma variação de altura, o atrito existente entre a interface do anel e os corpos de prova geram uma resistência, assim a medida que o atrito aumenta para uma mesma redução de altura a velocidade de expansão do diâmetro interno sofre um decaimento. (MARTINS; RODRIGUES, 2011)

Quanto a velocidade, para processos de corte por cisalhamento, sua execução normalmente ocorre por prensas mecânicas e hidráulicas. Contudo como as espessuras de corte em relação ao curso destas máquinas é relativamente pequeno, é possível assumir a velocidade de avanço como constante, seguindo tal simplificação a velocidade de deformação também irá apresentar valor constante ao longo de todo o processo, levando a utilização da teoria da plasticidade (PEDRO; CARDOSO, 2012).

Ademais, o principal fator a ser medido em um dimensionamento de projeto será o esforço necessário para realizar o corte de uma determinada geometria, que pode ser

exemplificada matematicamente pela multiplicação entre o perímetro da figura, pela espessura da chapa e a tensão de resistência ao cisalhamento (CHIAVERINI, 1986).

$$F = p s \sigma_0 \quad (4)$$

Em que a equação 4 apresenta F como o esforço de corte em N, p é o perímetro da figura em mm, s é a espessura da chapa em mm e σ_0 tensão a resistência a cisalhamento do material em MPa, cabe destacar que por meio desta fórmula é possível analisar que a área utilizada para predição de força é resultante entre a espessura de corte e o perímetro da figura .

2.4 TEORIA DA FRATURA EM UMA ÓPTICA DE PROJETOS

A não existência de uma teoria única de falha para a o caso geral de propriedades de materiais, e estados de tensão, acarretam na necessidade de diferentes formulações para diferentes modos de solicitações. Quanto ao comportamento dos metais, sua caracterização é tida como dúctil ou dúctil frágil tipicamente, tendo deformações e resistência ao escoamento identificável, enquanto que materiais frágeis são classificados segundo as suas resistências últimas de tração, e de compressão (SHIGLEY, 2018).

Um componente estrutural está associado a três critérios que podem levar o mesmo a falha mecânica, sendo estes um escoamento ou deformação plástica excessiva, e ou uma fratura. Estes comportamentos estão associados as características do material utilizado no projeto bem como as cargas aplicadas (DIETER, 1981).

Para a realização de projetos, diversas teorias para a resistência de materiais foram postuladas com base em consequências vistas em testes de tração, como a teoria de Tresca, conhecida como teoria de tensão de cisalhamento máxima para materiais dúcteis. A teoria de Tresca diz que, o escoamento sempre irá começar quando a tensão de cisalhamento máxima em qualquer elemento, se tornar igual ou excedente a tensão de cisalhamento máxima, em uma espécie de ensaio de tração do mesmo material, quando este começar a escoar, estando relacionada ao surgimento de linhas de deslizamento, a aproximadamente 45° em relação ao eixo de tração, o que em muitas vezes leva a resultados tidos como conservativos (SHIGLEY, 2018).

Para uma operação de corte por cisalhamento, o perfil obtém sua forma deformando gradualmente durante a aplicação de uma carga, ocorrendo por vezes uma deformação plástica localizada perto do conjunto de punção e matriz. A partir de determinado ponto devido a concentração de tensão esta deformação dá origem a uma fissura, à medida que a carga mantém sendo aplicada através de um deslocamento, esta rachadura se propaga até o ponto de ruptura (MAITI, 2000).

O cisalhamento puro ocorre em situações em que não existe a presença de efeitos de flexão, desta forma, casos em que há a existência de folgas geram um estado de cisalhamento com flexão, onde a distância da folga age como alavanca, o que em questões práticas acarreta em dificuldades elevadas para se obter um estado de cisalhamento puro, e está mais próximo ao estado desenvolvido em projetos (NORTON, 2013).

Embora haja a distinção entre tipos de fraturas, sendo estas vinculadas a fraturas dúcteis e ou frágeis consoante ao regime de deformação do material, os limites de deformabilidade associados a fissuração no interior ou superfície de peças são associados a ocorrência de propagação de fraturas dúcteis (MARTINS; RODRIGUES, 2011).

Em algumas classes de análises os efeitos da inércia para altas taxas de carregamento não podem ser desconsiderados, levando conseqüentemente a uma análise dependente do tempo, com tratamentos que levam em conta o comportamento do material dependente da taxa de aplicação, e ondas de estresse refletidas. Quanto aos efeitos da inércia, sua influência será grande quando ocorrer a aplicação de cargas de forma abrupta, ou rachaduras que crescem de forma rápida. Para esses casos parte do trabalho é convertido em energia cinética (ANDERSON, 2005).

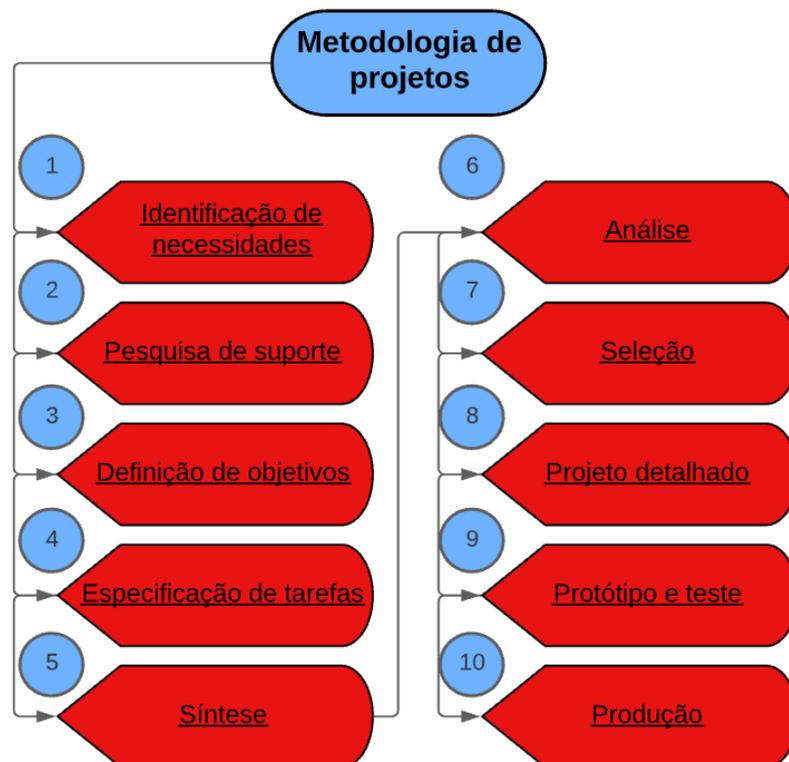
O carregamento de forma abrupta pode vir de diferentes formas, mas em geral é ocasionada por meio da colisão de outro objeto, o que gera ondas que são dissipadas com o tempo a medida que a energia cinética é dissipada. Portanto, os efeitos da inércia são mais significativos em análises de curto períodos de tempo, sendo mínimos para tempos suficientemente longos (ANDERSON, 2005).

2.5 PROJETO DE FERRAMENTAL

Um projeto se caracteriza como um exercício de criatividade, voltada a solução de um problema, comumente guiada por algumas metodologias cuja função principal é a de auxiliar a solução de casos, em que geralmente existem diversas soluções para um mesmo problema. Estas metodologias podem ser pautadas por etapas, as quais possuem função de organizar e direcionar a solução do problema que terá de ser resolvido de forma iterativa (NORTON, 2013).

A figura 4 apresenta uma metodologia de projetos pautada em etapas iterativas, podendo ser aplicado a diversos setores e formas de projeto, além de poder sofrer mudanças a depender de sua aplicação, com a implementação de características próprias de cada projeto.

Figura 4 - Metodologia de projetos.



Fonte:(NORTON, 2013)

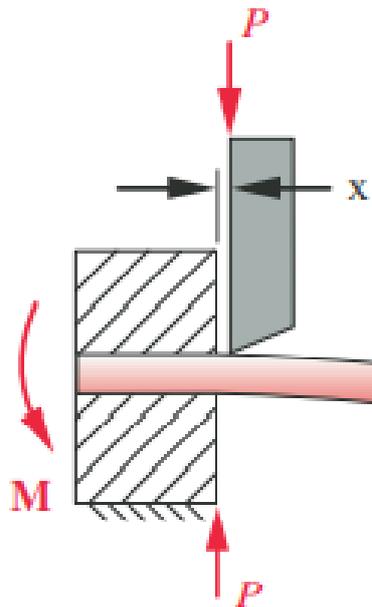
O engenheiro mecânico está associado desde, a produção ao fornecimento de meios de produção em um projeto, sendo comum a integração de diversas áreas do saber, uma vez que não basta a solução do problema, mas a garantia de sua viabilidade e execução atrelado aos

processos de fabricação disponíveis, tendo embasamento da identificação de necessidades e suas limitações (SHIGLEY, 2018).

Em projetos de ferramental para corte por cisalhamento, caso a folga entre as duas lâminas, e ou superfícies de corte puder ser mantida próxima de zero, então o estado de cisalhamento puro pode ser assumido, no entanto, em casos práticos esta necessidade dificilmente se mostra possível, e em alguns casos a necessidade de folgas mostra-se indispensável para o funcionamento adequado. Para um caso em que há uma pequena folga entre a lâmina de corte e os mordentes, ocorre o surgimento de um momento, tornando o par de forças P em um binário, e flexionando a peça durante a etapa de corte em vez de apenas cisalhar diretamente (NORTON, 2013).

A figura 5 demonstra a aplicação de forças e suas reações, com a existência de uma folga entre a matriz e o punção, durante o desenvolvimento dos esforços na etapa de corte.

Figura 5 - Corte por cisalhamento.



Fonte:(NORTON, 2013)

Para o projeto de um estampo, diversos experimentos e estudos mostram que, o aspecto geométrico e mecânico da borda cortada é afetado pelas relações de folga de corte para um determinado material, bem como as sollicitações mecânicas impostas, e ferramentas durante o processo de corte (HAMBLI, R. *et al.*, 2003).

No entanto quanto as forças necessárias para realizar o corte das chapas é observado que os efeitos relacionados as folgas entre a matriz e o punção não são significativos em comparação ao ângulo do punção, sendo este em testes desenvolvidos com o ângulo variando entre 0°, à 16°, e a menor força registrada referente ao punção de 16°. No entanto o aumento do ângulo está associado a uma maior necessidade de aprofundamento do punção durante a etapa de corte, o que pode levar a um desgaste prematuro de ferramenta, e dificuldades de projeto (GÜRÜN; GÖKTAŞ; GÜLDAŞ, 2016).

A resistência de materiais em geral está associada a dureza do mesmo, por conta disso, comumente são desenvolvidos tratamentos térmicos a fim de aumentar a resistência mecânica, e promover uma melhor vida útil ao componente. O principal elemento responsável por permitir tais mudanças são a presença de carbono e elementos de liga no aço, no entanto, tal prática traz consigo uma maior fragilidade se comparada ao material em estado normalizado (SHIGLEY, 2018).

Muitos dos componentes em máquinas estão submetidos a carregamentos de impacto, os quais são distinguidos de carregamentos estáticos em função do tempo de aplicação do carregamento, esses tipo de carregamentos podem levar a peça a deformações permanentes por ultrapassarem o limite de elasticidade do material, para projetos de máquinas, o desejável na grande maioria das vezes é que os componentes não ultrapassem o regime elástico, pois isso pode invalidar tal componente levando a falha, portanto, cabe o dimensionamento de tal forma que a tensão limite não seja excedida (SHIGLEY, 2018) .

2.5.1 Processamento dos Metais

Os aços com alto teor de carbono normalmente apresentam teores de carbono entre 0,60 e 1,4 %p; representando uma classe de materiais de resistência mecânica superior, mas menos dúcteis entre os aços-carbono, geralmente contendo elementos como cromo, vanádio, tungstênio e molibdênio. Esses elementos de liga combina-se com o carbono para formar carbetos, muito duros e resistentes ao desgaste e a fratura, além de possibilitarem a execução de tratamento térmico (WILLIAN D. CALLISTER; DAVID G. RETHWISCH, 2018).

Em processos de têmpera em geral, a taxa de resfriamento de uma amostra depende da taxa de remoção da energia térmica, em que quanto mais rápido ocorrer o processo de resfriamento, mais severa será a têmpera para o material. (JO *et al.*, 2020)

Por sua vez, a taxa de resfriamento no interior de uma estrutura varia de acordo com a posição, e é dependente da geometria e do tamanho da estrutura, uma vez que a energia térmica deve ser transportada para a superfície antes que possa ser dissipada no meio de têmpera, com isso, diferentes tamanhos e geometrias levam a resultados dissemelhantes. (ALTAWHEEL; TOLOUEI-RAD, 2014)

2.6 MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Os métodos numéricos, assim como o método de elementos finitos FEM, fornecem uma ferramenta geral na análise de geometrias e suas condições de carregamento, fornecendo uma solução aproximada, cuja precisão depende diretamente dos tipos de elementos, e a criação de uma malha adequada, além do fornecimento de restrições impostas ao modelo de forma adequada (RAWABDEH, 2014).

Para a aplicação de um modelo válido de elementos finitos, em operações de corte por cisalhamento através de leis constitutivas do elastoplástico, a operação de corte leva ao rompimento total do perfil, para isso, um dos critérios a serem utilizados em análises de início de propagação de rachaduras é o critério de deformação equivalente (HAMBLI, Ridha;; POTIRON, 2000).

O comportamento macroscópico de materiais metálicos durante processos de deformação plástica, assim como a conformação é descrito por meio de equações de derivadas parciais, sendo a sua resolução possível por diversos métodos, quanto a análise por elementos finitos assenta na partição do domínio de aplicação das equações integrais através de subdomínios de tamanho finito, com a constituição dos elementos por pontos nodais nos quais serão definidas as variáveis físicas que serão interpolados entre si (MARTINS; RODRIGUES, 2011).

Assim como elaborado por Vali e Raju (2019) por meio do módulo de dinâmica explícita, é possível a determinação de critérios como as tensões desenvolvida durante o processo de corte, através de um deslocamento na restrição de movimento aplicado aos corpos fixos e um deslocamento constante aplicado ao punção correspondente ao curso da máquina em dado período de tempo.

Quanto a determinação de tempo utilizado durante a análise, é estipulado com base em um deslocamento necessário correspondente a operação de corte, tendo a simulação interrompida ao término do destacamento de material por meio do punção.(MAGESH; SUNDAR; KARUPPUDAIYAN, 2016)

2.6.1 Simplificações e Tratamentos

No trabalho desenvolvido por Hambli e Potiron (2000), os materiais utilizados são assumidos como isotrópico, linearmente elástico e seguem os critérios de Von Mises, tendo como base, a obtenção de tensões principais desenvolvidas no corpo a fim de determinar a ocorrência de falha, e deformações. Desta forma utiliza primeiramente de etapas de simulação, seguidas posteriormente de validação prática com o corte de perfis em um estampo.

2.6.2 Esforços e Deformações Desenvolvidas.

Para os esforços envolvidos, a principal tensão analisada será a tensão de cisalhamento, que pode ser expressa numericamente como a divisão da força tangencial pela área de corte (DIETER, 1981).

$$\sigma_c = Ft/Ac \quad (5)$$

Na equação 5, a tensão de cisalhamento pode ser observada por σ_c , sendo relacionada a divisão da força tangencial Ft pela área de corte Ac .

A área de corte por sua vez é representada por uma multiplicação entre a aresta de corte e a espessura da chapa (DIETER, 1981).

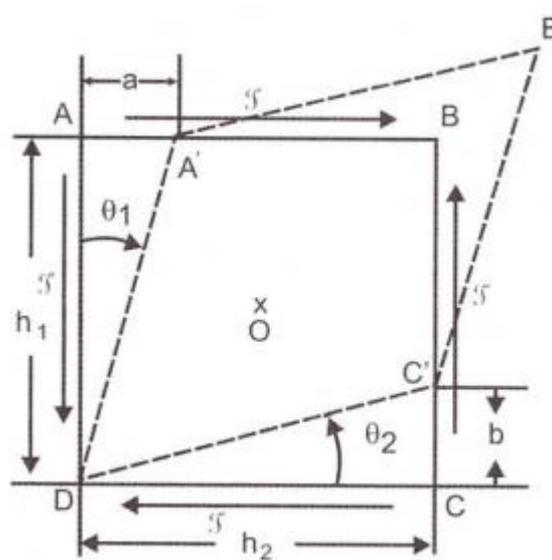
$$Ac = l.s \quad (6)$$

A equação 6 por sua vez, apresenta a área de corte Ac como a multiplicação entre a aresta de corte l , pela espessura de chapa s .

Durante a aplicação de tensões cisalhantes, ocorre a deformação por cisalhamento, observado para duas dimensões, sendo possível notar que não ocorre a extensão e ou contração de arestas, mas sim uma mudança no ângulo em relação a um ponto arbitrado como a origem, sendo assim, a deformação angular φ_c é tida como a variação angular (HELMAN; CELTIN, 2010).

A figura 6 ilustra o desenvolvimento da deformação angular pelas tensões cisalhantes em um plano bidimensional.

Figura 6 - Representação 2D de deformação por cisalhamento.



Fonte: (HELMAN; CELTIN, 2010)

$$\varphi_c = \theta_1 + \theta_2 \quad (7)$$

A equação 7 apresenta a deformação angular φ_c como resultado da soma entre θ_1 e θ_2 , que são respectivamente o ângulo 1 e o ângulo 2.

As deformações lineares por sua vez correspondem aos extremos, sendo representados por ε_1 , o ponto de máximo, ε_3 o ponto de mínimo, e ε_2 um ponto intermediário, estas deformações são colineares, tendo as tensões principais σ_1 , σ_2 e σ_3 em materiais isotrópicos, adicionalmente, em relação ao volume inicial do corpo V_0 , a deformação volumétrica será decorrida da variação na medida dos lados de um paralelepípedo em relação as deformações

lineares após a aplicação das tensões principais, resultando em um volume final V_f (HELMAN; CELTIN, 2010).

$$L'1 = L1 + \varepsilon1 \quad (8)$$

$$L'2 = L2 + \varepsilon2$$

$$L'3 = L3 + \varepsilon3$$

A equação 8 apresenta as relações para os comprimentos finais após a deformação, onde $L'1$, $L'2$, e $L'3$ são os comprimentos finais um, dois e três respectivamente, sendo possível notar que seus valores correspondem ao comprimento inicial $L1, L2$, e $L3$ acrescidos de suas respectivas deformações, $\varepsilon1$, $\varepsilon2$, e $\varepsilon3$.

$$V0 = L1L2L3 \quad (9)$$

A equação 9 apresenta o volume inicial $V0$ como a multiplicação entre os comprimentos iniciais $L1, L2$, e $L3$.

$$V_f = L1L2L3(1 + \varepsilon1)(1 + \varepsilon2)(1 + \varepsilon3) \quad (10)$$

A equação 10 apresenta de forma simplificada o volume final V_f , como a multiplicação de seus respectivos comprimentos iniciais acrescidos de suas deformações, o que resulta na multiplicação entre os três comprimentos finais.

2.6.3 Criação e Refinamento de Malha.

Uma malha pode ser compreendida como a partição de um domínio arbitrário em objetos geométricos mais simples, essas formas correspondem aos elementos. Os elementos são compostos de nós, arestas, faces e relações entre si, em uma coleção de elementos não sobrepostos que preenchem um domínio (CNRS; CEDEX; ENCALADA, 2010).

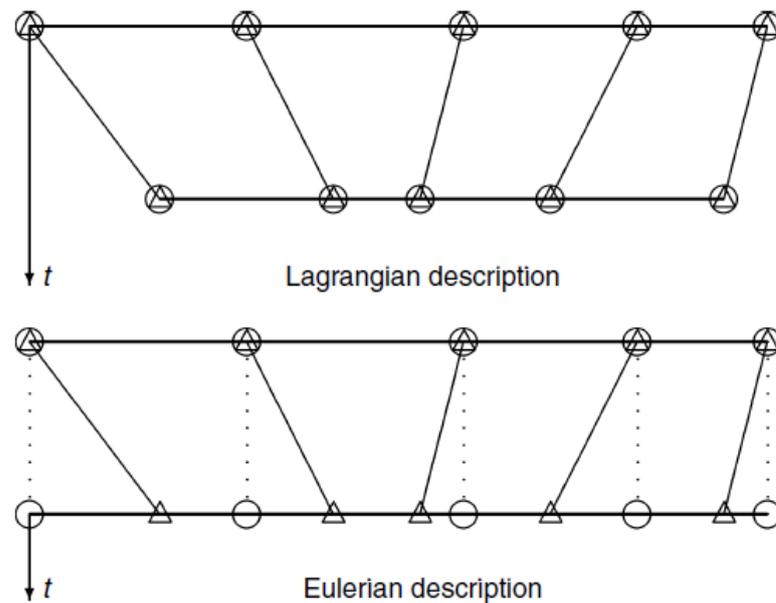
Para a etapa de criação de malha em um elemento finito, uma etapa de fundamental importância é a informação ao software é, quanto a qual método de integração utilizar durante

a resolução dos cálculos diferenciais, sendo critério do projetista identificar e determinar o método de melhor validade para o problema em questão (BATHE, 2014)

Os algoritmos da mecânica do contínuo, normalmente utilizam de duas descrições clássicas do movimento, dentre estas no método de integração de Lagrange, cada nó individual em um elemento de malha segue a partícula associada durante o movimento, permitindo uma fácil rastreabilidade de superfícies e interfaces livres de diferentes, no entanto, necessita que haja a recriação da malha para as etapas de cálculo. Quanto ao método de Euler, este se difere pôr o elemento de malha estar fixo, tendo os deslocamentos e deformações se movendo por entre a grade (STEIN; BORST; HUGHES, 2004).

A figura 7 demonstra de forma visual a diferença entre a aplicação dos métodos de Lagrange e de Euler durante a etapa de redefinição de malha, parâmetro este utilizado durante os cálculos computacionais.

Figura 7 - Comparação entre método de Lagrange e de Euler.



Fonte:(STEIN; BORST; HUGHES, 2004)

Em aplicações envolvendo grandes deformações, e distorções em estruturas mecânicas, o método de descrição cinemática mais aplicado é o de Lagrange, por conta de seu grau de precisão, utilizando de um sistema de reconstrução de malha para os diferentes estágios da simulação, as informações da malha antiga são então passadas para a nova malha. No entanto, isso torna e aumentar o número de graus de liberdade levando a um custo

computacional, o que está relacionado ao tempo de simulação utilizado (ZHUANG *et al.*, 2008).

Constituindo uma fase de grande importância durante a simulação de elementos finitos, a criação da malha, sobretudo para grandes deformações, a sensibilidade da malha deve ser bem estabelecida devido as grandes forças aplicadas aos corpos, sendo que em áreas específicas podem vir a necessitar de um tamanho pequeno de elementos (JOSHI; BIRANALE; BHATT, 2014).

Para o tratamento adequado das superfícies, e obtenção de dados assertivos é necessário que ocorra o refino de malha adequado, a malha representa o método pelo qual o software irá subdividir a peça em demais corpos menores, que poderão ser de diferentes formas a depender o método de refino utilizado. Dados de entrada como força, material, velocidades relativas e posicionamentos, serão então interpolados para obtenção de dados de análise em todo o estampo, sendo assim, uma malha mal executada, contendo polígonos grandes demais irá acarretar em cálculos falhos, no entanto, uma malha refinada excessivamente leva a uma maior demanda computacional (BATHE, 2014).

O refinamento de malha pode ser aplicado a uma zona específica apenas, como a demanda computacional está associada ao número de elementos, uma solução eficaz é o refinamento apenas em pontos de análise tidos como críticos, no entanto, é necessário que haja o devido tratamento e estudo das áreas para que não ocorram problemas devido a altos níveis de distorção durante a etapa de simulação (SOFIA; CURRALO, 2021).

O refinamento de malha adaptativo em elementos finitos pode ser dividido em duas categorias, sendo estas o refinamento-h, que utiliza sempre do mesmo elemento, alterando apenas o tamanho nas zonas de interesse, e o refinamento-p, que utiliza sempre do mesmo tamanho de elemento, mas aumenta o grau do polinômio utilizado na geração da malha no ponto de objetivo (SOFIA; CURRALO, 2021).

Quanto a otimização de topologia, este processo pode ser compreendido como a metamorfose do espaço geométrico em uma estrutura inovadora, complexa e de alto desempenho, podendo ocorrer por meio de software, seguindo como parâmetro as restrições impostas ao corpo (HALID *et al.*, 2020).

2.6.4 Modelos Matemáticos de Solução.

Em análises de dinâmica explícita, as equações de equilíbrio são substituídas por equações de movimento, para um material elástico linear as equações podem ser reescritas em termos de deslocamento, e constantes elásticas, em paralelo as relações tensão deslocamento e tensão deformação (ANDERSON, 2005).

A resolução de equações de equilíbrio em análises dinâmicas, necessita da inclusão do efeito de forças de inércia dependentes da aceleração, e as forças do amortecimento vinculadas a velocidade, no entanto geram equações diferenciais de maior custo computacional, sendo assim necessário a compreensão do problema para simplificação e resolução de forma mais eficiente (BATHE, 2014).

Em problemas de engenharia, a necessidade de imposição de restrições, e limitações ao problema a ser resolvido, estão sempre presentes em uma etapa inicial, de forma a serem utilizadas sob a forma de parâmetros de solução contínua, e ou em variáveis discretas (BATHE, 2014).

Restrições e limitações como problemas que apresentam a não linearidade de dados, são normalmente relacionados a propriedades dos materiais como condutividade térmica, elasticidade, e ou mesmo com relação aos carregamentos não periódicos. Em casos onde as deformações são elevadas, pode ocorrer a não linearidade no tratamento dos dados, com as equações necessitando serem reescritas, nesses casos, sua rigidez e carregamentos tornam-se função dos deslocamentos, e ou deformações, isso por sua vez torna a gerar um problema de resolução iterativa, onde a rigidez e o carregamento são função do deslocamento, ao mesmo passo que o deslocamento é função da rigidez e do carregamento (PALMA, 2009)

A partir da aplicação do FEM, e seguindo trabalhos desenvolvidos na área de simulação de corte por cisalhamento, é possível a aplicação de um modelo na análise do comportamento, e obtenção de dados necessários ao desenvolvimento de projetos eficazes (JOSHI; BIRANALE; BHATT, 2014)

Portanto, é possível compreender as principais características, e tratamentos necessários ao desenvolvimento de um modelo utilizando o FEM, aplicável a simulação de estampas, bem como analisar a influência de parâmetros referentes as características dos materiais envolvidos, e seu comportamento durante a aplicação de solicitações mecânicas, dentro de um problema transiente envolvendo grandes deformações, assim como no método

computacional, pautada nas considerações necessárias ao modelo para resultados de maior confiabilidade e menor demanda numérica .

Desta forma, os conceitos abordados viabilizam a simulação numérica e análise do problema com base nas considerações realizadas em trabalhos semelhantes, bem como a tratativa presente durante o desenvolvimento da análise de dados obtidos, relacionando os mesmos a problemas anteriores cuja validação apresente resultados satisfatórios com base no conhecimento científico.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

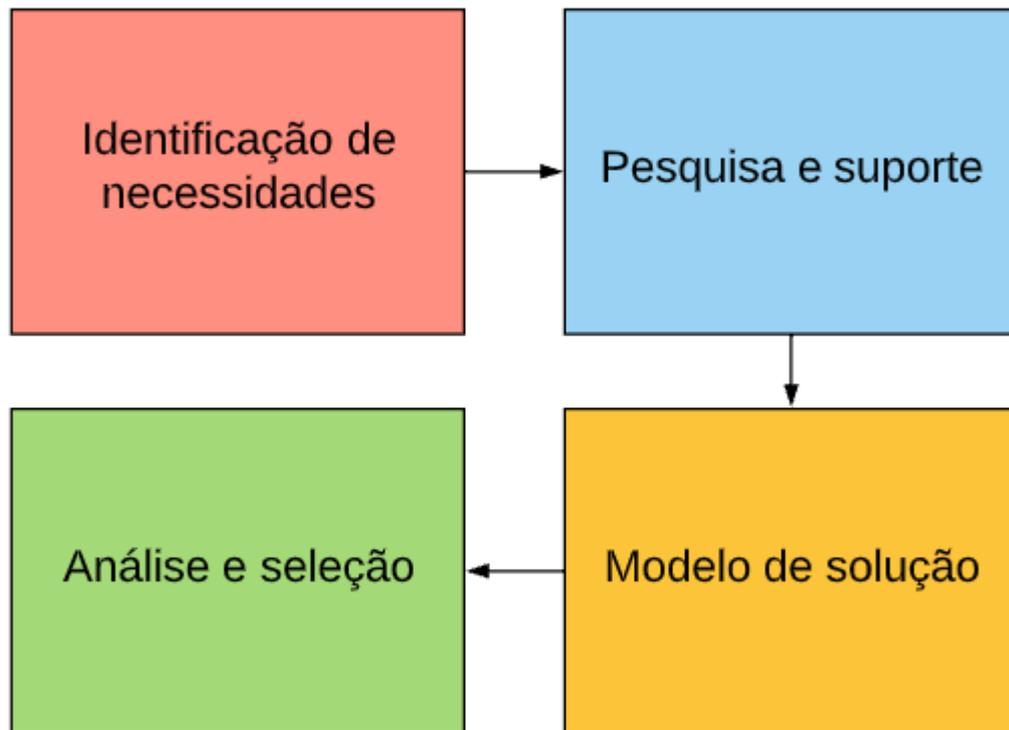
O presente capítulo é dividido em seis partes, sendo estas correspondentes as etapas de aplicação da metodologia de projetos. Na primeira há o método analítico, onde é dada introdução ao problema objeto de estudo; na segunda parte a descrição da falha; a terceira se refere aos dados e restrições iniciais, sendo abordadas as considerações e início no desenvolvimento do modelo de simulação. A quarta parte aborda a criação de malha, os métodos utilizados e tratativas; seguida pela quinta etapa, onde é abordado o ensaio do anel, utilizado para obtenção de dados referentes ao coeficiente de atrito entre o punção e o perfil; e por último, a sexta parte, abordando o modo de dinâmica explícita, suas características e desenvolvimento do modelo FEM.

3.1 MÉTODO ANALÍTICO

O objetivo do presente trabalho reflete a necessidade de aplicação, e desenvolvimento de modelo de validação, para estampos de corte de alumínio por meio do método FEM, aplicando conceitos de engenharia na prevenção de falhas, e validação de projetos embasado nas teorias de fratura. Para isso o presente estudo utiliza de um conjunto já existente, mas que apresenta falhas em seu punção, vindo a sofrer de fratura por vezes.

A figura 8 apresenta a metodologia de estudo empregada, pautada na investigação da falha por meio do FEM, este por sua vez, sendo embasado na identificação de necessidades e trabalhos desenvolvidos anteriormente, para somente então ocorrer a validação final sob a forma de teste prático.

Figura 8 - Metodologia de estudo.



Fonte: Autor

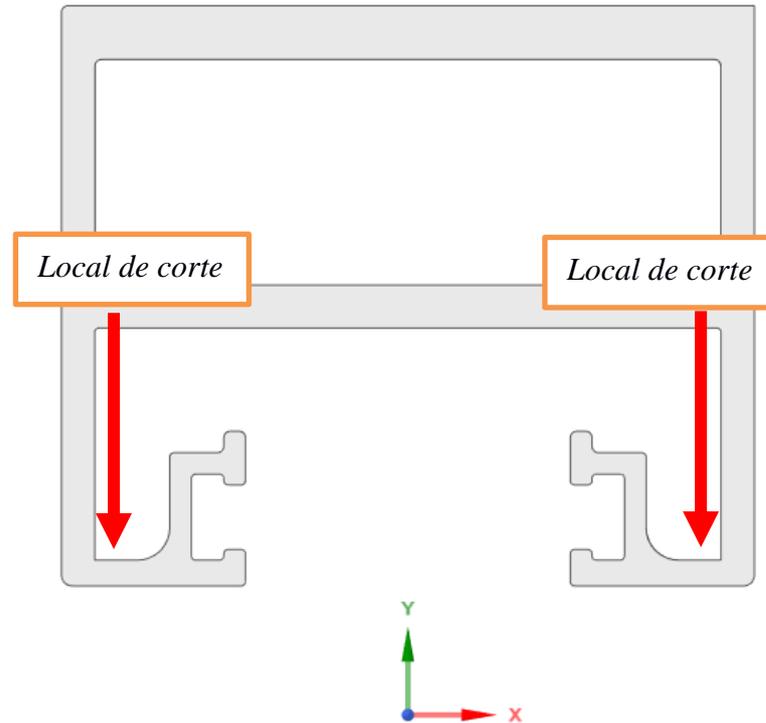
Correspondendo a primeira etapa na metodologia de solução o projeto tem como problema a necessidade de otimização de um punção utilizado no processo de corte de perfis de alumínio, que em alguns casos sofre de falha crítica, dito isto, as principais restrições levantadas em relação ao punção são, a sua necessidade de corte de uma área grande de alumínio em uma única etapa, e sua fabricação de elevada complexidade, englobando processos como fresamento por CNC, corte por eletro erosão, fresamento convencional em fresadora e processos de têmpera aplicados ao aço D6.

O conjunto de matriz e punção em questão apresenta problemas e limitações quanto a sua utilização, o corte apresenta uma grande área de remoção de material por etapa correspondente a $317,8 \text{ mm}^2$, além disso, a espessura do perfil é grande se comparada a de outras linhas, estando na faixa de 2,5 mm.

Outro fator que torna a acrescentar dificuldade ao corte é a geometria, que apresenta sulcos e entradas que para as janelas são utilizadas no encaixe de escovas deslizantes, mas que para a etapa de corte acrescentam elevada rigidez ao corpo, impondo restrições quanto a geometria tanto do punção quanto das matrizes, tornando necessário à utilização de um punção e duas matrizes, uma matriz interna para assegurar a rigidez do perfil, e evitar elevadas deformações nas abas internas, possibilitando desenvolver um corte perpendicular ao perfil, e

uma matriz inferior, referente ao perímetro de corte. Na figura 9 é possível observar o perfil descrito, com as setas vermelhas indicando o local de corte desenvolvido pelo punção.

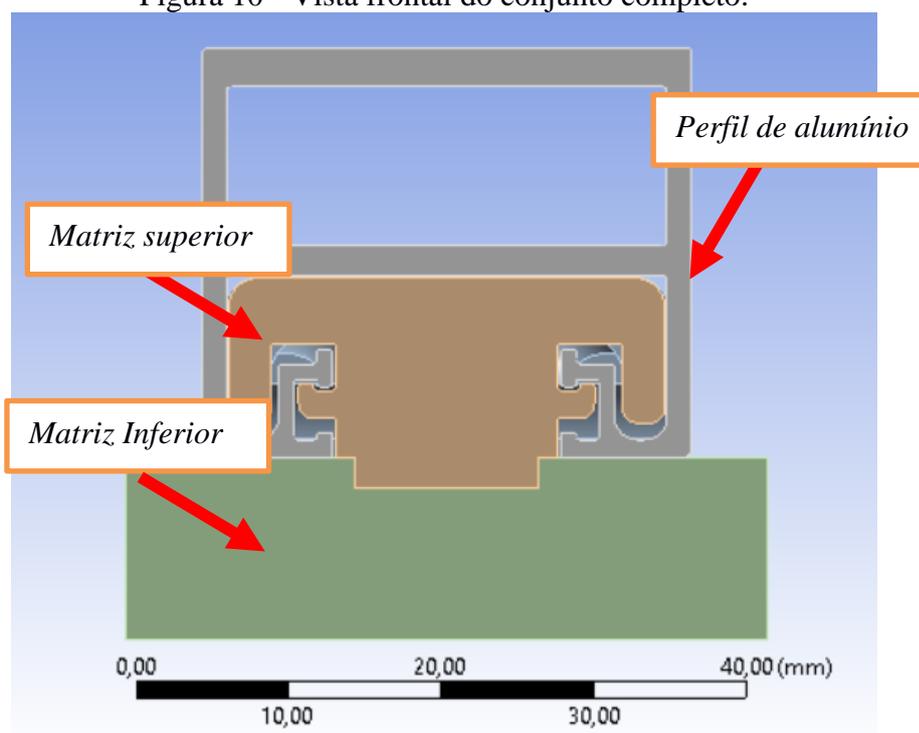
Figura 9 - Perfil de alumínio a ser cortado.



Fonte: Autor

Enquanto a figura 9 mostra apenas o perfil e seu local de corte, a figura 10 apresenta a vista frontal do conjunto, sendo possível a visualização de ambas as matrizes, e o local de encaixe do perfil durante a etapa de corte.

Figura 10 - Vista frontal do conjunto completo.



Fonte: Autor

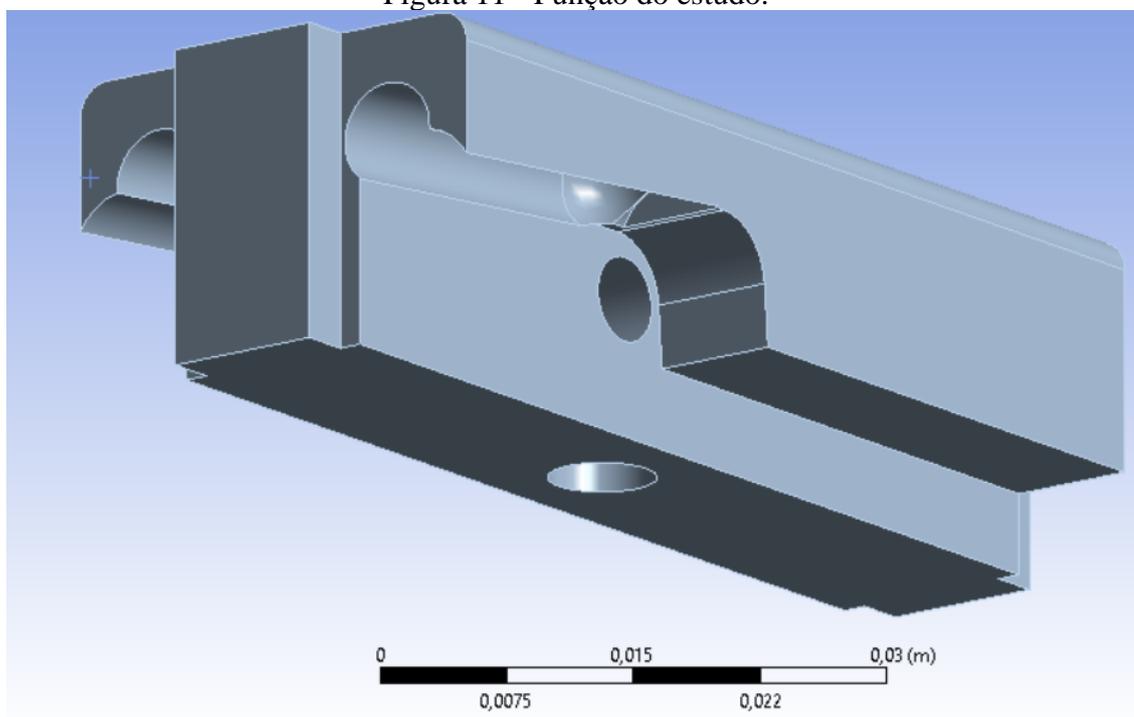
As principais dificuldades estimadas no corte atual são, os grandes concentradores de tensão existentes no punção, combinados a elevadas forças de corte necessárias para o corte do perfil. Em uma avaliação prévia a simulação, a principal hipótese desenvolvida é a de que, o punção apresenta coeficiente de segurança tendendo a uma unidade, ou seja, a tensão gerada no ponto de ruptura do punção é muito próxima a tensão máxima permitida pelo material.

O projeto original não utilizou de forma alguma para determinação de forças e tensões envolvidas, estando baseado apenas no método empírico, sendo assim a primeira etapa necessária é a determinação dos valores atrelados ao corte, e análise quanto a teorização dos concentradores de tensão localizados no punção, visando determinar o modo de falha.

Para isso, as formas de análise desenvolvidas no estudo são a tensão através do critério de Von Mises, e estudo dado o enfoque aos locais de pontos críticos através do recuso Probe presente no Ansys, através desse recuso é possível acompanhar um ponto, face ou corpo específico, para a obtenção do valor de máxima tensão desenvolvida ao longo de toda a simulação, após a obtenção desses dados é possível o desenvolvimento de uma geometria que remova ou reduza os concentradores de tensão.

Na figura 11 é possível visualizar o punção alvo do estudo no ambiente *workbench* do Ansys, este em seu estado original e sem a presença dos demais componentes.

Figura 11 - Punção do estudo.



Fonte: Autor

3.2 DESCRIÇÃO DA FALHA

Quanto ao tipo e ocorrência de falhas no punção estudado, é observado que durante as etapas de teste e validação do estampo, seguindo os padrões estabelecidos pela empresa, quando há a ocorrência de falha, esta se dá de forma catastrófica logo nas primeiras 4 operações de corte, sendo que na grande maioria das vezes, o punção não chega a falhar ou apresentar quaisquer irregularidades.

A figura 12 apresenta uma das falhas ocorridas durante a etapa de teste, com a parte fraturada presa ao corpo do punção por meio de cola, para que seja de maior facilidade a compreensão.

Figura 12 - Falha de punção durante etapa de teste.



Fonte: Autor

3.3 DADOS E RESTRIÇÕES INICIAIS

Durante as análises e simulações no Ansys, o tratamento adequado é o de um PVI (Problema de Valor Inicial), fornecendo dados para as equações diferenciais utilizadas internamente no software para a solução do problema, adicionando limitações e variáveis que sejam importantes para o resultado final, como os dados dos materiais utilizados na simulação, sendo responsabilidade do projetista em muitos casos a criação do material, com os dados que lhe serão pertinentes.

Para a determinação de esforços no punção, seguindo o método FEM por meio do Ansys, é necessário que alguns parâmetros sejam estipulados, iniciando pelo tipo de simulação desejada, o software dispõe de diversos tipos de análise, através do *Workbench* a primeira determinação necessária feita é a escolha do modo *Explicit Dynamics*, correspondendo ao módulo indicado a simulações de grandes deformações, distorções e choque entre corpos para curtos períodos de tempo, como para casos em que a variável de tempo, bem como os efeitos da inércia não podem ser ignorados.

Além disso este módulo pode trabalhar com a não linearidade dos processos, assim como a simulação para pontos além da deformação plástica desenvolvida no material, decorrente pelo corte por cisalhamento, viabilizando análise durante o momento de ruptura do material e corte do perfil, mesmo que o perfil não seja o foco do estudo, caso contrário, a

simulação poderia vir a falhar, ocorrendo a interrupção quando iniciassem as deformações além do regime elástico.

Para as simulações em questão os principais dados a serem fornecidos e que fazem parte do PVI são os dados referentes aos materiais presentes na simulação, como os coeficientes de Poisson ν , e módulo de elasticidade E atribuídos a todos os componentes presentes na simulação como materiais linearmente elásticos, além da escolha do modo de falha presente no material.

O modo de falha utilizado para o punção corresponde ao de máxima tensão de compressão, uma vez que as tensões desenvolvidas no corpo estão associadas ao fenômeno compressivo, enquanto que ao modo para o perfil foi atribuído as tensões principais, com o fornecimento da máxima tensão de cisalhamento permitida pelo material.

Os materiais utilizados na simulação são o alumínio A6061 T6 para o perfil, e o aço D6 tanto para a matriz quanto que para o punção, sendo os dados dos materiais retirados de catálogos fornecidos pelos fabricantes, e inseridos no Ansys através da criação de um material de coeficientes isotrópicos, por meio do recurso *Engineering data*.

Na figura 13 é possível observar o material Aço D6 e suas propriedades em suas respectivas unidades, sendo o material criado no ambiente de dados para a simulação e atribuído aos corpos no ambiente de trabalho.

Figura 13 - Dados para o Aço D6.

Properties of Outline Row 4: D6			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	 Material Field Variables	 Table	
3	 Density	7670	kg m ⁻³
4	<input type="checkbox"/>  Isotropic Elasticity		
5	Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio	
6	Young's Modulus	200	GPa
7	Poisson's Ratio	0,3	
8	Bulk Modulus	1,6667E+11	Pa
9	Shear Modulus	7,6923E+10	Pa
10	<input type="checkbox"/>  Tensile Pressure Failure		
11	Maximum Tensile Pressure	-1860	MPa

Fonte: Autor

Na figura 14 é possível observar o material 6061T6 e suas respectivas propriedades e unidades, sendo este presente no modelo desenvolvido por meio do ambiente de dados dos componentes.

Figura 14 - Dados para o Alumínio 6061T6.

Properties of Outline Row 3: 6061T6			
	A	B	C
1	Property	Value	Unit
2	 Material Field Variables	 Table	
3	 Density	2713	kg m ⁻³ ▾
4	 Isotropic Elasticity		
5	Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio ▾	
6	Young's Modulus	68,9	GPa ▾
7	Poisson's Ratio	0,33	
8	Bulk Modulus	6,7549E+10	Pa
9	Shear Modulus	2,5902E+10	Pa
10	 Principal Stress Failure		
11	Maximum Tensile Stress	117	MPa ▾
12	Maximum Shear Stress	75,8	MPa ▾

Fonte: Autor

Após o fornecimento dos dados do material, é necessário que ocorra a determinação da geometria utilizada no estudo, para este caso o conjunto é fornecido através da importação do Solidworks2015, software utilizado no projeto inicial, a geometria importada se dá de forma simplificada, com a remoção de marcas e chanfros, que para a análise somente acarretam em uma maior dificuldade de geração de uma malha uniforme, e distorções, assim como maior custo computacional.

Com a conclusão da importação da geometria, é possível então que ocorra a criação de malha, etapa de suma importância, e a seguir realizar o refinamento do tipo h em pontos específicos, bem como fornece ao software o modelo de integração desejado.

Desta forma, ambas as matrizes presentes no estudo são assumidas como rígidas, ou seja, é presumido que não ocorre a falha em tais corpos, assim como deformações significativas, desta forma, dados de tensão e deformação não serão calculados para estes corpos, tal definição traz consigo a vantagem de diminuir drasticamente a demanda computacional, uma vez que a malha criada será apenas no exterior do corpo, diminuindo significativamente o número de elementos e nós presente no estudo, por sua vez o perfil e o punção do conjunto são definidos

como corpos flexíveis, o que permite a obtenção de dados numéricos e acompanhamento dos corpos diferentemente dos objetos definidos como rígidos.

3.4 CRIAÇÃO DE MALHA E REFINAMENTOS

A etapa de criação de malha, como apresentado representa uma elaboração de fundamental importância e pilar para o FEM, sendo que a criação da malha pode proceder a partir de diversos métodos a depender da geometria, e tipo de análise em objetivo, assim um método pode apresentar superioridade frente a outros, tornando responsabilidade do projetista identificar e implementar o modelo adequado por meio de previsões.

Para a simulação em questão, optou-se por a utilização do método cartesiano, por conta do modelo de dinâmica explícita, quando associado a esse método de malha apresentar baixa distorção, evitando assim problemas como a interrupção da simulação em decorrência de elevadas deformações, e conseqüente diminuição de incremento de tempo.

A utilização do método cartesiano foi aplicada a todos os corpos, visando minimizar as diferenças entre os objetos e geração de uma malha uniforme, além de evitar a criação de elementos de tamanho altamente desproporcionais, o que pode acarretar na dificuldade de cálculo, que representa um problema comum durante a utilização de diferentes métodos de malha em análises dinâmicas, gerando insolubilidade dos cálculos e ou diminuição de precisão dos resultados.

No entanto, embora o método de malha seja o mesmo para todos os corpos, o tamanho utilizado nos elementos difere entre si, para a matriz inferior o tamanho de elemento utilizado foi de 2 mm com uma propagação no eixo Z igual a 1,5 mm, enquanto que para a matriz superior foi de 1,5 mm, e propagação igualmente a anterior, devido a maior complexidade da peça e necessidade de uma malha refinada, para evitar problemas relativos a deformação do corpo, por sua vez tanto para o punção quanto para o perfil, que são determinados como corpos flexíveis durante a análise do projeto, o tamanho de elemento utilizado foi de 1mm com propagação no eixo Z igual a 2mm, levando a uma malha mais refinada em comparação aos demais corpos presentes no estudo.

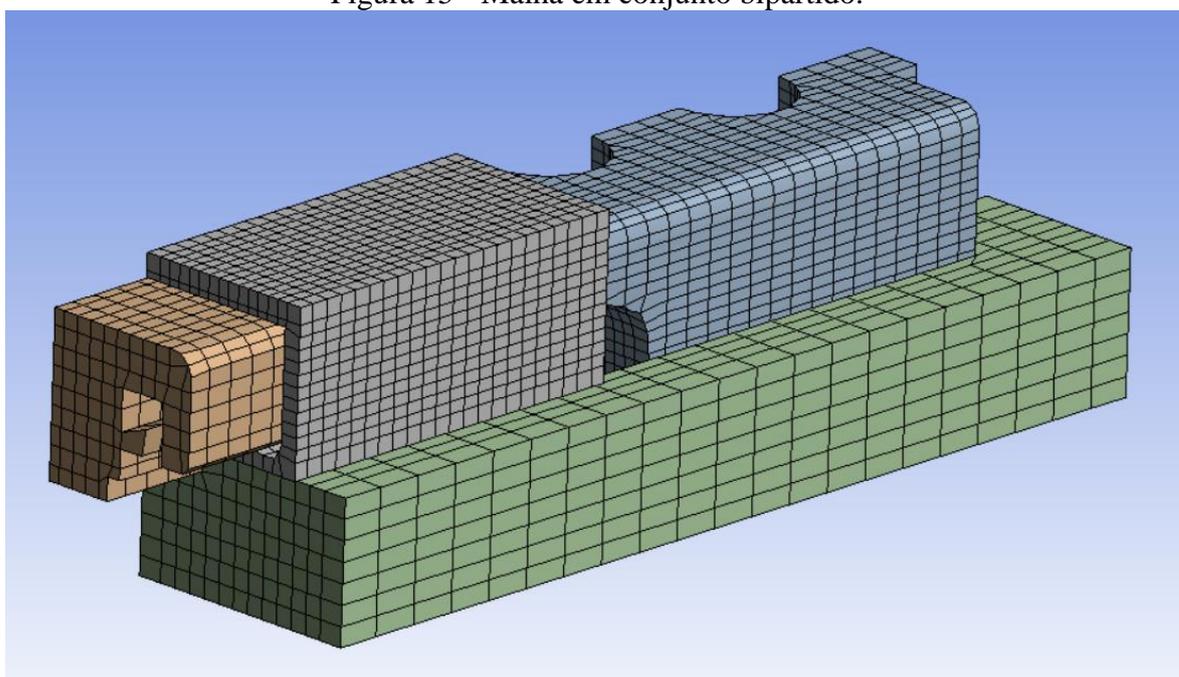
Como resultado, a malha criada apresenta uma grande conformidade entre os corpos, e proporcionalidade referente ao tamanho dos elementos, o que torna a facilitar os cálculos realizados pelo software bem como minimizar defeitos de distorção.

Quanto ao modelo de cálculo diferencial, foi definido a utilização do modelo de Lagrange, criando uma malha com pontos que seguem a deformação do corpo através de um processo de recriação dinâmica de malha, e interpolação dos dados entre as etapas de cálculo, este método é amplamente utilizado para problemas semelhantes, envolvendo grandes deformações como a gerada durante o corte da chapa, e apresenta resultados de boa confiabilidade.

Como é possível observar tanto na figura 10, quanto na figura 11, o conjunto estudado apresenta simetria em relação ao centro, podendo inferir que as tensões desenvolvidas em ambos os lados são iguais, este fato traz a possibilidade de simplificação mediante a bipartição dos modelos, acarretando em menor demanda computacional, por conta de uma malha gerada de forma mais eficiente, com um menor número de elementos e nós.

A figura 15 apresenta a criação da malha para o estampo na forma bipartida, seguindo os parâmetros apresentados.

Figura 15 - Malha em conjunto bipartido.



Fonte: Autor

3.5 ENSAIO DO ANEL

Em análises de punção e matriz comumente são ignorados os efeitos do atrito entre o conjunto, no entanto, como apresentado, estudos recentes mostram que o atrito desempenha

fator fundamental nos esforços desenvolvidos nos corpos, e a sua avaliação sempre que possível deve ser considerada, desta forma, utilizando-se do método prático intitulado teste do anel, foram fabricados corpos de prova cilíndricos, para que em conjunto com uma prensa hidráulica, e um deslocamento conhecido o coeficiente de atrito possa ser estipulado.

Quanto ao corpo de prova, o anel deve possuir proporções de 2 para 3 para 6, correspondendo a altura, diâmetro interno, e diâmetro externo respectivamente, como o perfil de alumínio utilizado nos testes apresenta espessura máxima de 2,5 mm, as dimensões resultantes para o corpo de prova são de 2,5 mm, 3,75 mm e 6,5 mm, já referente ao material do punção e da matriz, utilizou-se de dois discos de 15 mm de diâmetro por 8 mm de altura.

Para a execução do teste foram fabricados 3 corpos de prova com o material do perfil, por meio de corte por eletro erosão a fio, processo no qual é realizada a usinagem sem contato por meio de uma corrente elétrica, para este um furo inicial é realizado no material, com diâmetro inferior ao diâmetro interno desejado para o anel, após isso é passado o fio da eletro, realizando a atribuição de ponto zero através da medição entre centro da furação inicial, com isso é dado início ao processo de corte, sendo necessário a etapa de pausa da máquina para o corte do perímetro externo após a fabricação do diâmetro interno.

Na figura 16 é possível visualizar o processo de fabricação do corpo de prova de alumínio, e o funcionamento do corte por eletro erosão, com o fio passando por dentro do local destinado ao furo central do anel.

Figura 16 - Fabricação de anéis por eletro erosão a fio.



Fonte: Autor

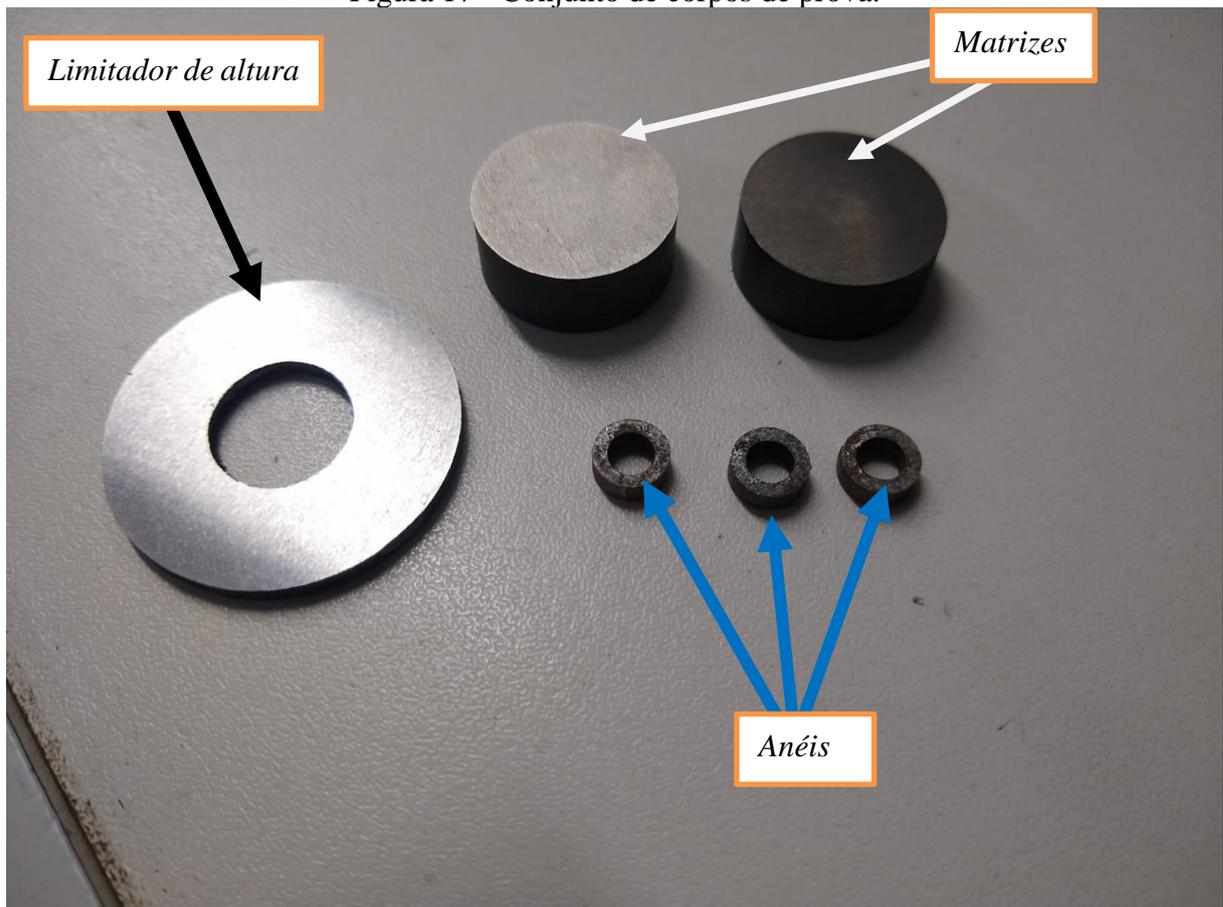
Para o material correspondente a matriz e o punção foram fabricados 4 corpos ao total, todos por processo de usinagem convencional, em torno mecânico até as medidas especificadas, posteriormente a isso foi dada a etapa de têmpera em óleo até a dureza de 55HRC, seguida da retifica em uma das faces.

Os processos de fabricação utilizados para os corpos de prova, são os mesmos aos quais tanto o punção, quanto a matriz são submetidos em seus processos fabris. Por fim, foi dada a fabricação de dois corpos de prova cuja função é de limitador de altura, estes por sua vez possuem diâmetro interno de 12mm, diâmetro externo de 30mm, e espessura inicial de

3mm, sendo obtidos através de corte a laser em chapas de aço SAE 1020, seguidos da etapa de retificação até as alturas de 2mm e 1,5mm.

Na figura 17 o corpo de prova indicado pela seta preta representa o limitador de altura, os corpos indicados pelas setas brancas são os corpos correspondentes ao material da matriz e do punção, que serão comprimidas contra os corpos indicados por azul.

Figura 17 - Conjunto de corpos de prova.

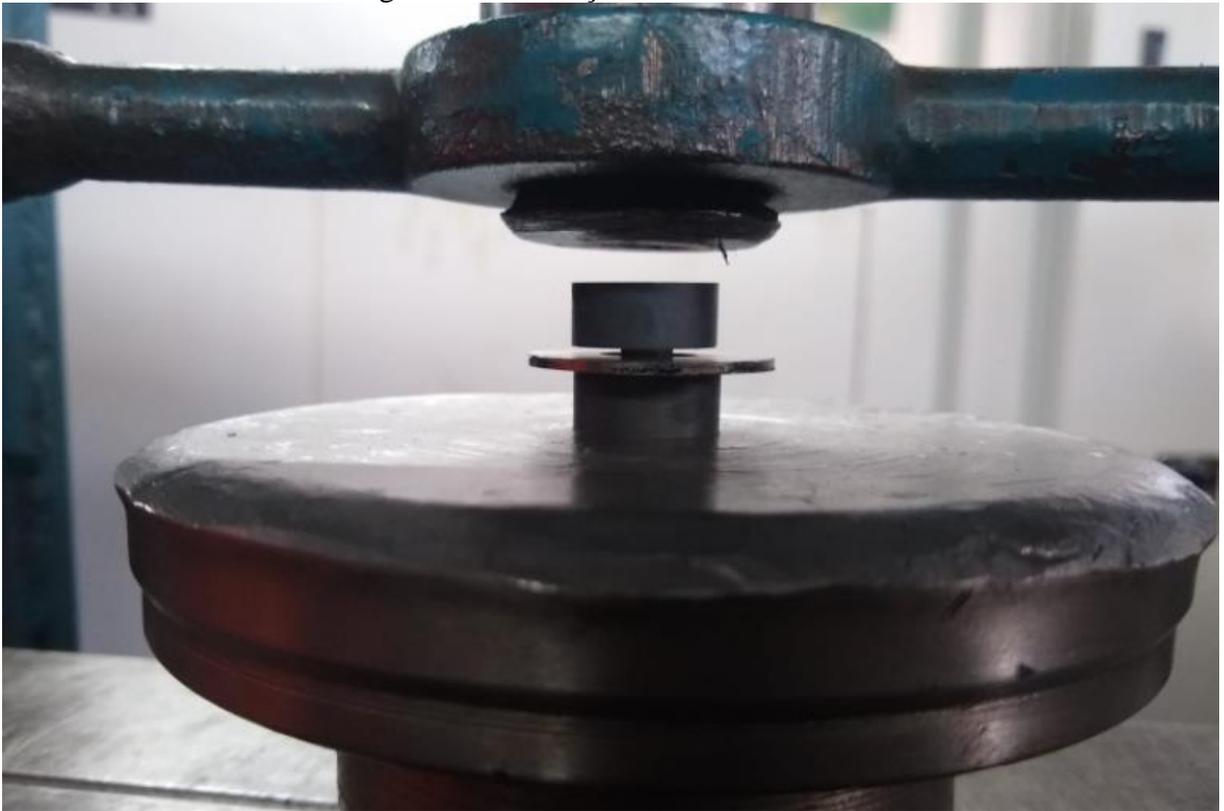


Fonte: Autor

Durante a execução dos testes, os corpos de prova são posicionados na prensa hidráulica, com o anel de alumínio 6061 T6 entre os corpos de prova do punção e da matriz, como ambos são feitos do mesmo material, o aço D6, os dois corpos de prova são iguais, o limitador utilizado é posicionado entre os corpos de aço D6, com o anel de alumínio em seu centro, com isso o teste é interrompido quando o corpo de prova superior alcança o anel, sendo possível estabelecer as deformações de altura, pois serão iguais a diferença entre a altura do limitador e do corpo deformado.

Na figura 18 o corpo de prova é posicionado em seu local de teste, aguardando que a prensa seja abaixada até a posição de aplicação de força, sendo o teste interrompido apenas quando ocorrer o toque entre a peça cilíndrica superior, com o corpo de prova limitador de altura.

Figura 18 - Execução do ensaio do anel.



Fonte: Autor

Realiza-se a medição inicial do corpo de prova em alumínio, tabelando as medidas em uma planilha do Excel, após a aplicação da carga, o teste é interrompido quando o corpo de prova limitador é alcançado, sendo utilizado dois modelos diferentes, um com espessura de 2mm e o outro com 1,5mm, correspondendo a 20%, e 40% de deformação respectivamente, ambos sob as mesmas condições de aplicação, e ausência de lubrificação, com isso, a diferença entre a altura do anel e o corpo limitador será correspondente ao deslocamento linear da prensa, removendo a carga, é realizada a medição dos anéis deformados, tornando possível utilizar de uma curva de calibração, ao qual relaciona as curvas de deformação tanto para o diâmetro interno quanto para a altura deformada, em comparação as medidas iniciais, resultando em um valor aproximado para o coeficiente de atrito.

3.6 DINÂMICA EXPLÍCITA

Através dos recursos presentes no módulo de dinâmica explícita do Ansys, e realizando paralelo com a utilização do estampo, determinou-se as condições de contorno para a simulação, tendo como base trabalhos realizados anteriormente como apresentado, e recomendações realizadas por a própria Ansys, como o tempo de simulação estimado de 0,2 s, tendo como parâmetro associado um deslocamento de -9mm correspondente ao necessário para realizar o corte do perfil, e não o curso total do estampo.

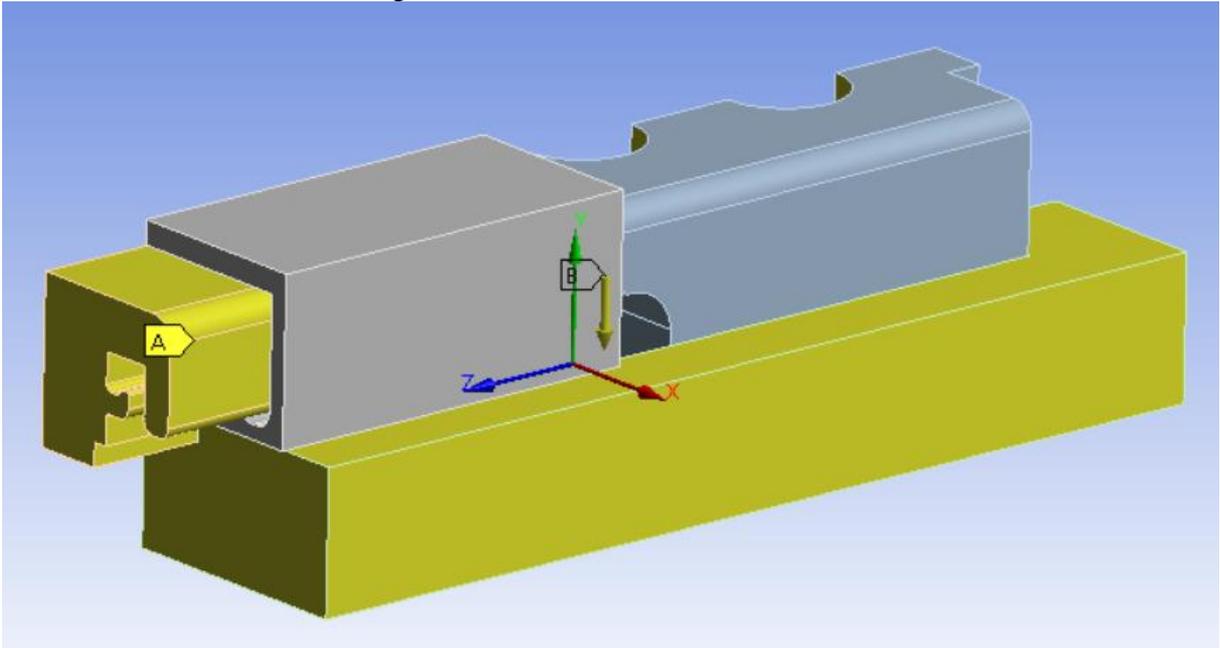
O tempo foi estimado através da medição, durante o processo de corte com um estampo pneumático, sendo igual a 0,45 s aproximadamente, a partir disso, por meio de uma regra de três simples, realizando paralelo com o curso total da máquina de 20mm, estipulou-se o tempo necessário para 9mm de descolamento, que representa a movimentação necessária para corte do perfil, tendo como resultado 0,2 s.

Para aplicação do deslocamento ao punção foi utilizado do recurso de componentes cartesianos, atribuindo valores para as componentes X, Y e Z, por conta de o movimento do punção ocorrer de forma linear, e apenas na orientação de Y, as componentes X e Z foram atribuídas valor igual a zero, uma vez que durante toda a etapa de simulação o corpo não deve apresentar deslocamento nestas direções, para a componente Y por sua vez, atribuiu-se o valor de - 9mm, o sinal negativo justifica-se por conta do referencial de orientação adotado no ambiente do Ansys, estando o eixo positivo atribuído para a direção superior enquanto que o movimento ocorre de cima para baixo.

Uma vez que o software possui as informações referentes ao deslocamento do punção, é preciso realizar a determinação de pontos estáticos, que são correspondentes a ambas as matrizes, para isso utilizou-se do recurso deslocamento, atribuindo valores igual a zero para todas as três coordenadas cartesianas dos corpos, além de atribuir ao software a detecção de contato de corpos, para que um corpo em contato com outro não possa transpassar os demais, a não ser que sejam superados os valores para tensão limite, decorrido da falha do material.

A imagem 19 apresenta o conjunto simplificado por meio da bipartição, e a aplicação de dois deslocamentos, onde A representa os corpos cujo deslocamento é nulo, e B o deslocamento linear de -9 mm.

Figura 19 - Deslocamentos atribuídos.



Fonte: Autor

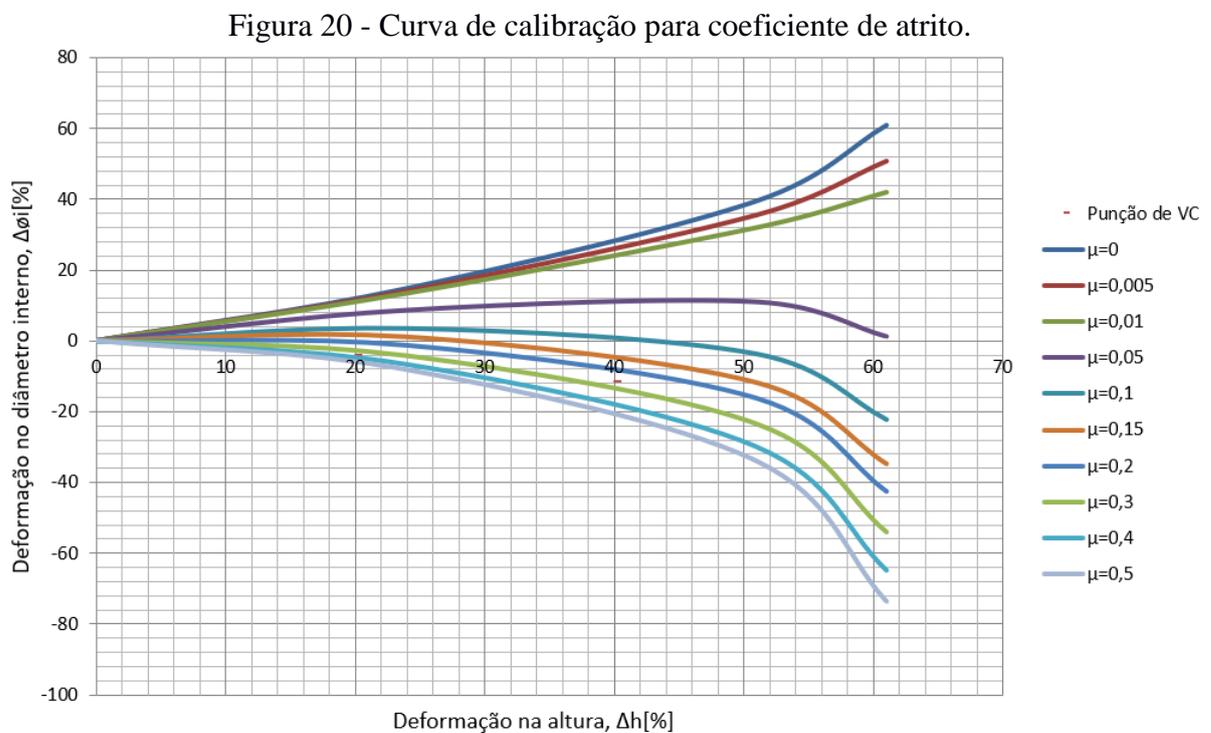
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão abordados os resultados referentes aos procedimentos descritos previamente, bem como sua análise e interpretação com base em conceitos físicos, para então realizar a idealização de uma proposta de solução à falha do punção, bem como validação do modelo FEM desenvolvido, e a otimização do projeto perante teste prático.

4.1 COEFICIENTE DE ATRITO

A partir dos dados obtidos durante o ensaio do anel, e as suas medições por meio do software Excel, desenvolveu-se as curvas de calibração, contendo os respectivos valores aos coeficientes de atrito possíveis.

Com base na figura 20 é possível observar as curvas de calibração geradas com base no experimento, e medição dos corpos antes e depois da aplicação de carga, bem como os valores respectivos aos coeficientes de atrito em cada linha, sendo estas diferenciadas por meio da cor, para o teste desenvolvido a curva utilizada foi a de cor verde.



Fonte: Autor

Ao término do teste, e após os cálculos para ambas deformações o valor do coeficiente de atrito entre o D6 e o Alumínio 6061T6 obtido foi de 0,3. A implementação deste dado ao software por sua vez é dada através da função *frictional*, atribuindo-se a constante aos corpos quanto detectado contato, e em movimento relativo.

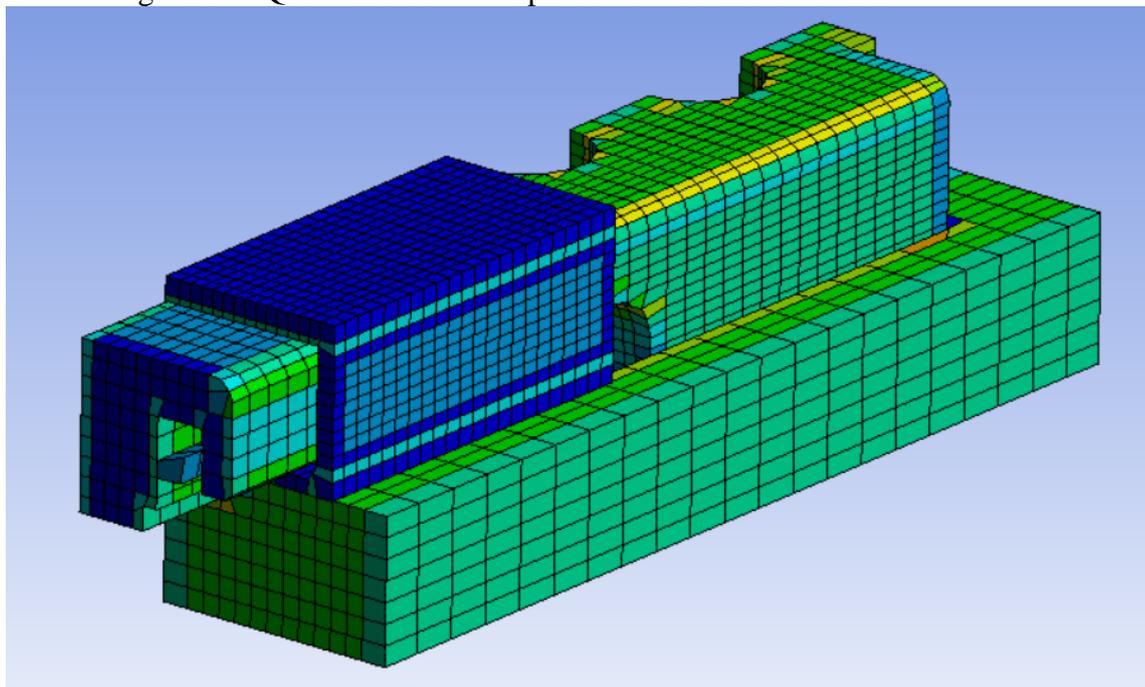
4.2 RESULTADOS DE MALHA

Com as informações postas no software para que ocorra a etapa de solução foi possível identificar que o punção bem como as solicitações as quais o mesmo está submetido são simétricas, com isso é possível que o modelo seja simplificado de forma a dividir ao meio os corpos, trazendo consigo a vantagem de diminuir significativamente o número de nós e elementos e com isso reduzir a demanda numérica na etapa de solução, após a realização de tal simplificação, os dados de malha são iguais a 11667 nós e 8200 elementos.

Para a análise de qualidade da malha, é utilizado do recurso de *Element Quality*, presente nas opções de *display*, esse recurso mostra de forma visual as diferenças entre o tamanho dos elementos resultantes de forma a colorir cada um, e apresentar por meio de uma barra os pontos de máximo e de mínimo, desta forma uma malha sem transições de formas abruptas de cor representam uma maior conformidade da dimensão de elementos, e conseqüentemente uma menor pré-disposição a erros.

Como resultado, a figura 21 apresenta por escala de cores a malha criada, que apresenta uma grande conformidade entre os corpos, e proporcionalidade referente ao tamanho dos elementos, o que torna a facilitar os cálculos realizados pelo software, bem como minimizar defeitos de distorção.

Figura 21 - Qualidade de malha por tamanho dos elementos.



Fonte: Autor

4.3 SOLUÇÃO E ANÁLISE INICIAL DE DADOS

Correspondendo a etapa de análise e solução, e penúltima etapa correspondente a aplicação do método utilizado, é dada a solução dos modelos matemáticos, para isso é necessário fornecer quais dados são objetivo da análise, como desenvolvido anteriormente é utilizado o modelo de Von Misses para as tensões, enquanto que para as deformações o modelo adota-se o modelo de estres equivalente, desta forma é realizada uma iteração inicial a fim de determinar os pontos críticos da peça durante uma análise inicial, para então posteriormente a isso ser adicionado o componente intitulado Probe.

A função Probe no Ansys tem a aplicação para obtenção de dados em um ponto, nó e ou face específica. Estes dados por sua vez são referentes as tensões em pontos críticos, para determinação do coeficiente de segurança a qual o projeto está submetido, realizando uma análise com relação a possibilidades construtivas, e de projeto com a finalidade de melhoria do mesmo.

Para maior acurácia de dados, uma possibilidade é o refino de malha local, destinando este aos locais críticos, no entanto, como apresentado, o refino de malha gera como resultado um maior número de elementos e nós, acarretando em uma demanda computacional acrescida em efeito exponencial, portanto, cabe ao projetista a análise subjetiva quanto a viabilidade de

refino, para a simulação e questão não foi adicionado nenhum refinamento e ou simplificação além das já estabelecidas e comentadas previamente, gerando um tempo de simulação de 23 horas.

Com isso, o estudo de caso parte das condições de contorno já atribuídas na etapa de dinâmica explícita, que são as solicitações a qual o punção está submetido durante a operação de corte, integrando os dados a um modelo criado para a solução em específico, com suas particularidades aplicadas ao modelo, como deslocamentos, tempo de corte, e restrições físicas as quais limitem os corpos a um determinado caminho.

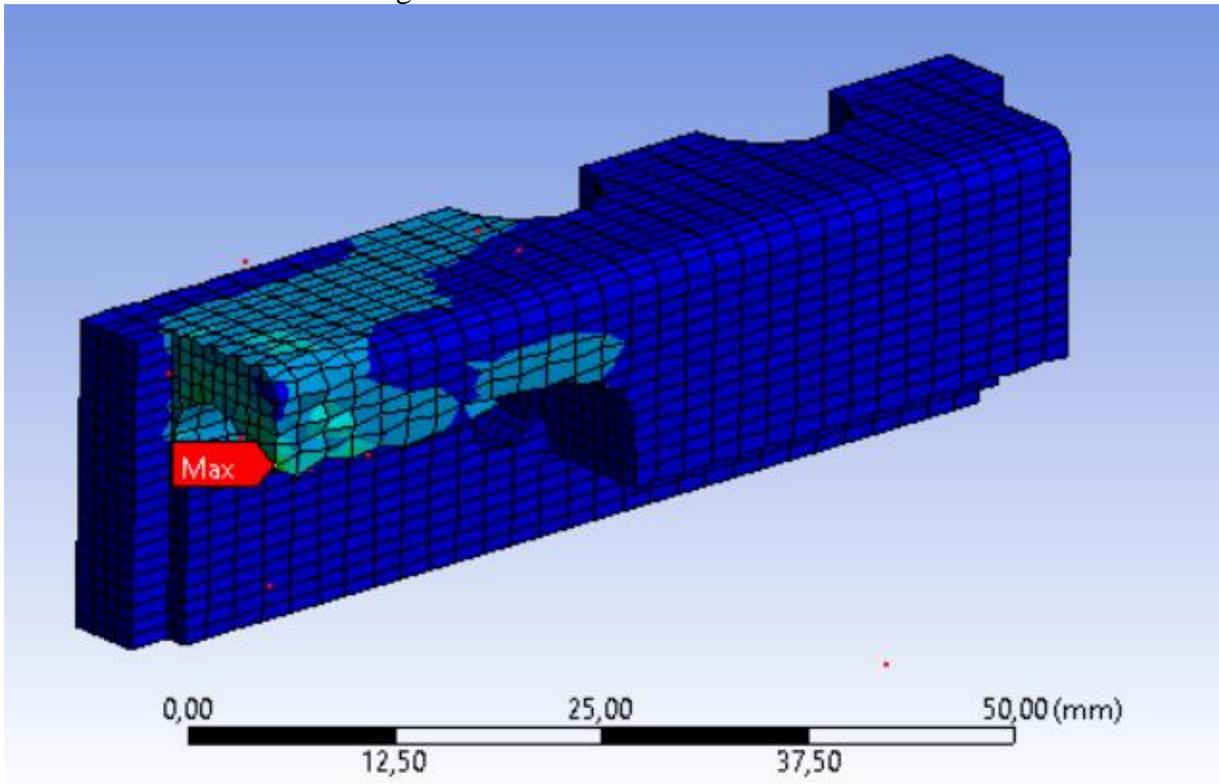
A solução do modelo desenvolvido por sua vez, leva a primeira conclusão a de que o componente punção não sofre fratura em momento algum, além de não desenvolver deformações grandes, no entanto, este dado inicial diverge do observado pela prática. Realizando testes e verificações não é constatado nenhum erro no modelo, o que leva a investigação de forma mais profunda a fim de buscar as possíveis justificativas para a falha.

4.4 PONTOS CRÍTICOS.

A avaliação de pontos críticos inicialmente ocorreu por meio da tensão equivalente de Von Misses, através de ferramentas gráficas, com a utilização de escala de cores, permitindo não somente analisar os pontos de máximo, mas também o desenvolvimento das tensões ao longo do tempo.

Na figura 22 é possível visualizar o punção após a etapa de simulação, com a presença dos pontos máximos e a indicação de distribuição de tensões por meio de gradiente de cores, as demais peças presentes no estudo estão sob a forma oculta, para que seja possível a visualização apenas do componente alvo de estudo.

Figura 22 - Análise inicial de tensões.



Fonte: Autor

Por se tratar de um problema transiente, ou seja, cujo os resultados dependem do tempo, os valores são tabelados em uma linha cronológica, o que ajuda a compreender o comportamento do punção, com isso é possível observar que os valores da tensão são crescentes durante o corte, até o momento de ruptura total do perfil, alcançando valores de 466,27 MPa em seu ponto máximo, correspondente ao momento de ruptura do perfil de alumínio.

A tensão desenvolvida, embora seja um valor elevado, está abaixo da tensão de ruptura a compressão para o aço D6, que é de 1800MPa a uma dureza de HRC 55, o que leva a um fator de segurança resultante da divisão entre a carga máxima do material, pela carga máxima desenvolvida durante o corte, sendo igual a 3,86 (adimensional), o que é acima do esperado inicialmente, com isso podemos inferir inicialmente que o problema em relação ao punção não está ligado a sobre carga, mas a outros fatores que serão investigados.

Na figura 23, é possível observar os dados para as tensões em função do tempo de simulação, tabelados por meio do Ansys, sendo o principal modo de análise por meio da tensão máxima.

Figura 23 - Valores de tensões ao longo do tempo.

	Time [s]	<input checked="" type="checkbox"/> Minimum [MPa]	<input checked="" type="checkbox"/> Maximum [MPa]	<input checked="" type="checkbox"/> Average [MPa]
1	1,1755e-038	0,	0,	0,
2	1,5e-002	2,201e-004	17,922	0,15941
3	3,e-002	1,2627e-003	121,25	0,7353
4	4,5e-002	4,9738e-003	95,801	0,64916
5	6,e-002	5,1473e-003	91,375	1,0933
6	7,5e-002	5,4507e-003	91,764	1,3945
7	9,e-002	0,	131,85	2,6366
8	0,105	1,3734e-002	79,668	2,0928
9	0,12	0,	115,01	2,7502
10	0,135	0,	163,49	6,838
11	0,15	0,	348,25	4,4694
12	0,165	0,	250,94	4,6127
13	0,18	0,	186,65	3,7643
14	0,195	0,	342,36	5,0411
15	0,20116	0,	466,27	12,12

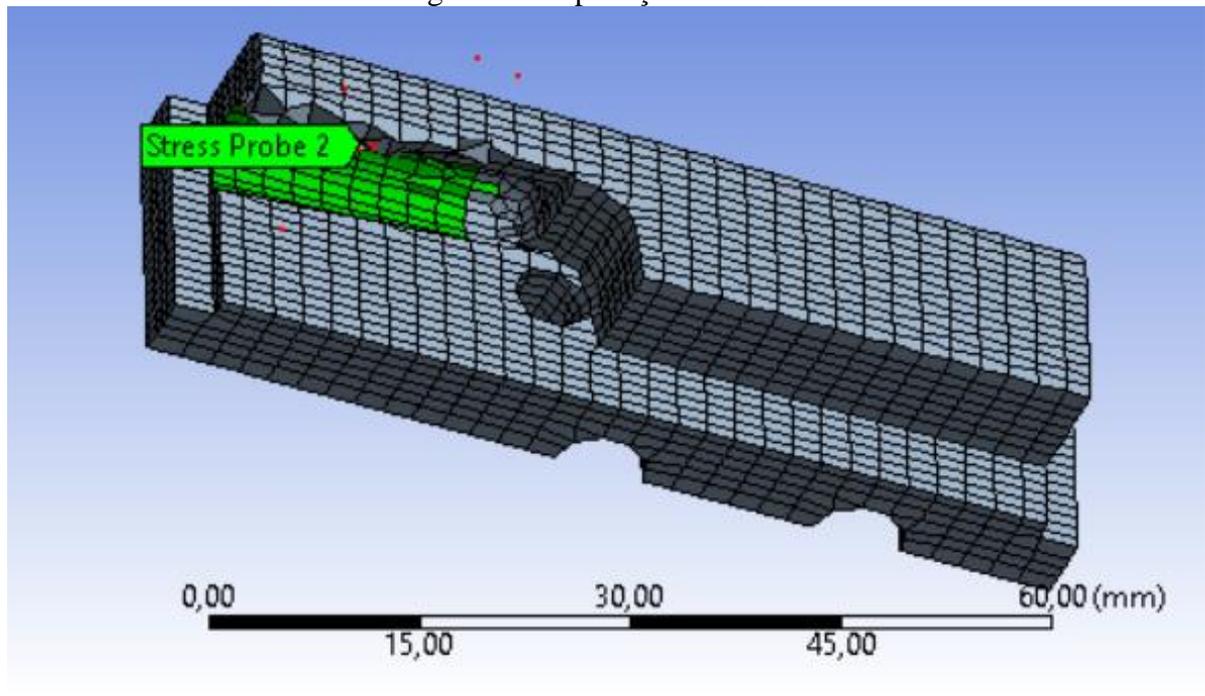
Fonte: Autor

Sabendo o local de máxima tensão, é possível então utilizar da ferramenta probe, para analisar e tabelar os dados de uma área em específica do objeto de estudo, com isso podemos observar de forma mais eficaz o comportamento e evolução das tensões desenvolvidas neste ponto, que é em grande probabilidade o local de falha caso esta ocorra. Para o punção estudado, a área crítica corresponde a parte interior inferior do punção.

Neste local, onde está localizado o ponto de máximo, está associado a um momento em decorrência da movimentação do punção frente ao perfil, a embora e tensão desenvolvida não justifique a falha, a região corresponde a qual a fratura ocorre.

A figura 24 ilustra a aplicação do probe ao local descrito como o ponto de máxima tensão desenvolvida, nesta imagem os demais componentes estão sob a forma oculta, para que seja de maior facilidade a análise do comportamento do punção durante a etapa de corte.

Figura 24 - Aplicação do Probe.

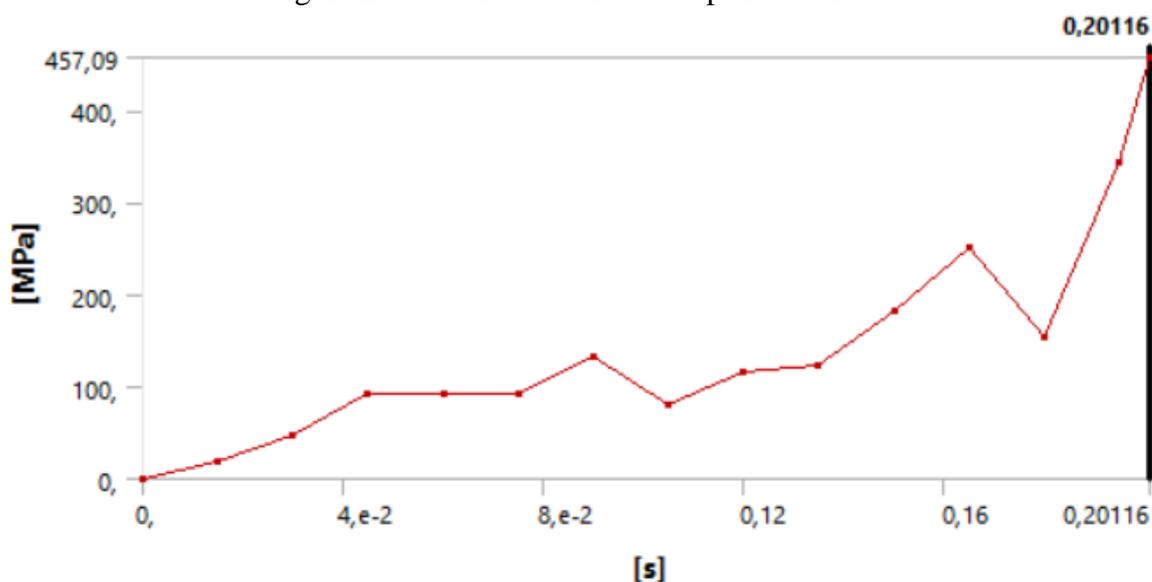


Fonte: Autor

O comportamento das tensões desenvolvida no ponto de máximo assemelha-se ao aspecto geral da peça, com valores levemente diferentes, o que corrobora com a validade do modelo de simulação desenvolvida, não apresentando nenhum aspecto de irregularidade aparente e ou comportamento não condizente com a física do problema.

A figura 25 está relacionada a figura 24, com a obtenção dos dados por meio gráfico ao longo do tempo de corte.

Figura 25 - Gráfico de tensões no ponto crítico.



Fonte: Autor

4.5 HIPÓTESE DE FALHA

Seguindo o método de projetos estipulado, como princípio no modelo de solução há uma pré análise, antes mesmo da realização das simulações, a hipótese levantada quanto a falha dos punções foi a de sobrecarga, e que as solicitações mecânicas fossem muito próximas da tensão máxima permitida pelo aço D6, esta por sua vez pode ser descartada, uma vez que os dados da simulação levam a um valor máximo de 466,27 MPa, e quando utilizada a tensão máxima de compressão para falha do material, resulta em um coeficiente de segurança de 3,84.

A segunda possibilidade levantada é quanto a falha ser decorrida por conta da fadiga, uma vez que estatisticamente a grande maioria dos elementos em máquinas falha por tal. No entanto, uma vez que a caracterização de falhas ocorre em geral durante os primeiros 4 cortes, a mesma pode ser refutada, não há presença de ciclos suficientes que justifiquem a falha por fadiga, além disso, aos punções que resistem a pequena etapa de teste, dificilmente ocorrem a sua falha posteriormente, mesmo com a aplicação de prolongados ciclos de trabalho.

Como terceira hipótese, há a ocorrência de problemas de fabricação, os quais podem ser subdivididos em três formas. A primeira diz respeito a presença de defeitos internos ao material, como trincas e vazios, que em caso de falha podem ser observados de forma visual, o que não ocorreu em nenhum dos punções testados.

Como segundo subgrupo, há os defeitos por fabricação, como ferramentas não adequadas, acabamento mal executado, com a presença de trincas, e micro trincas na superfície

da punção, ou riscos superficiais que possam gerar fissuras no material, que também podem ser identificadas por meio de testes visuais, e ou líquidos penetrantes, esta hipótese, assim como a de defeitos nos materiais, não mostram-se realistas, uma vez que as peças são inspecionadas pelos montadores, e a geração de fissuras que levassem a falha, também necessitariam de um ciclo de cortes maior do que o utilizado até o momento de ruptura.

A terceira hipótese diz respeito a inadequação da têmpera, com a geração de tensões internas presentes em zonas específicas do punção, além de fragilidade elevada por conta de um tratamento térmico realizado de forma não adequada, como no caso de um resfriamento gerado de forma não indicada, ou da utilização de meio de troca de calor não adequado e tempos curtos demais, sendo severos aos materiais.

4.6 PROPOSTA DE SOLUÇÃO

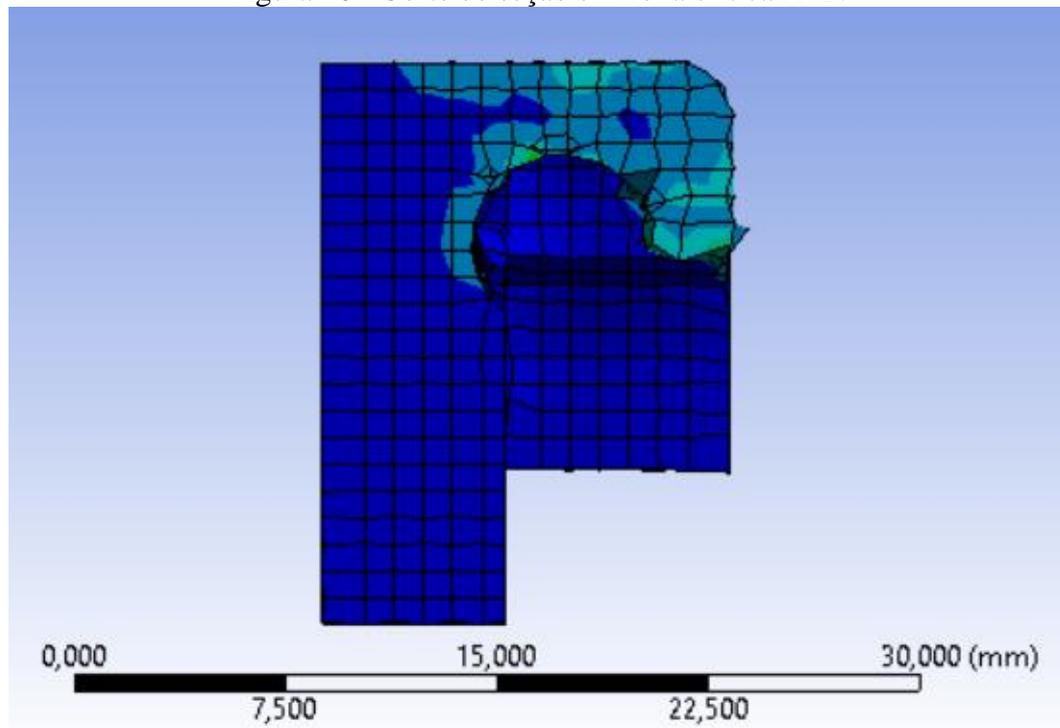
Como análise e seleção da solução, parte-se da causa provável de falha, tendo os defeitos durante o processo de tratamento térmico como causa das eventuais falhas, os dados que corroboram a tal conclusão podem ser descritos, partindo do modo da falha, tendo como suas ocorrência nas primeiras utilizações, ainda durante a etapa de testes, isto por si anula a possibilidade de fadiga na peça, quanto a presença de tensões elevadas, e ou mesmo concentradores de tensão, há um fator de segurança acima do recomendado, e a presença da maior tensão em uma face bem distribuída, sem que ocorra mudanças abruptas das tensões no local.

A partir dos dados obtidos há como causa de falha o tratamento térmico de forma inadequada, uma vez que falhas superficiais como a presença de trincas são de fácil observação por parte dos montadores, além de os punções sofrerem o processo de retifica, o que eleva o fator de vida através da remoção das trincas e possíveis propagadores de tensão.

Os fatores que corroboram para isso são, a presença de paredes de espessura fina em regiões específicas, o que pode levar a irregularidades de dureza durante a execução do tratamento térmico, com a geração de tensões internas elevadas, tanto por conta de geometria do punção quanto pela concentração de carbono presente no aço D6, que possui cerca de 2%, com isso ao testar o punção, o mesmo mostra-se frágil, levando a consequente falha. Por sua vez, durante o processo de simulação, a dureza do punção é idealizada, não ocorrendo a presença de fragilidade elevada em nenhum ponto.

A figura 26 mostra um corte de seção no plano X-Y, para que seja possível a observação tanto da espessura presente no local de fratura quanto à análise das tensões desenvolvidas, estas por sua vez não representando elevados valores.

Figura 26 - Corte de seção em zona crítica X-Y.

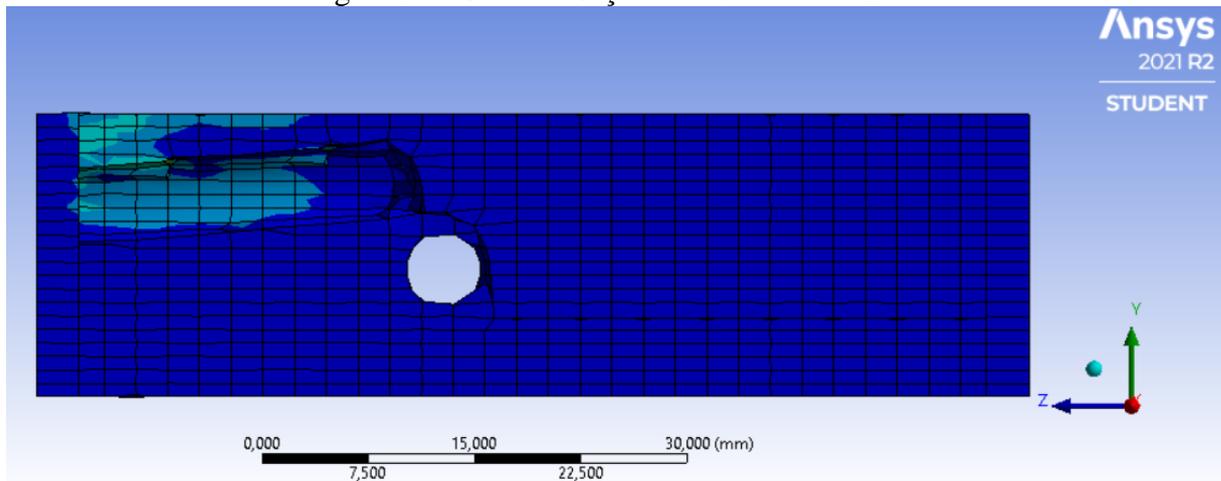


Fonte: Autor

A ocorrência de uma área de tensão máxima bem definida e espalhada corrobora com a vida útil do punção, é possível observar tanto no plano X-Y, quanto no Z-Y, que não há a ocorrência de locais de falha abrupta, pelo contrário, a peça mostra-se bem otimizada, dividindo as tensões ao longo da face de corte de forma eficaz.

De forma análoga a figura 27 está relacionada a figura 26, representando outra seção de corte, a no plano Z-Y, onde é possível observar o desenvolvimento da espessura mínima de corte e sua respectiva tensão desenvolvida, sendo os pontos de máximo localizados nas superfícies, e principalmente na área mais próxima da ponta, através desta é possível observar que a geometria somada ao material utilizado tornam por dificultar a realização de tratamento térmico de forma homogênea, podendo haver a inclusão de pontos de tensão interna.

Figura 27 - Corte de seção em zona crítica Z-Y.



Fonte: Autor

Para a solução deste problema uma abordagem simples e eficaz é a substituição do material de fabricação e seu tratamento térmico de têmpera, incluindo um processo de revenimento mais bem controlado a fim de eliminar as tensões internas elevadas desenvolvidas durante a têmpera. A substituição do material de construção por sua vez justifica-se pela escolha de um que não apresente teores de carbono tão elevados, mas que ainda assim apresente alta temperabilidade, de forma a possibilitar a têmpera mais regular para diferentes espessuras ao longo da geometria, e a não inclusão de tensões internas.

A partir de ensaios realizados em materiais presentes na linha de produção, optou-se pela utilização de um aço de construção mecânica, o aço SAE 4340, contendo percentual de carbono entre 0,37 a 0,43, ligado ao cromo-níquel-molibdênio, sendo um aço de alta temperabilidade, e resistência mecânica de 1255MPa a 40HRC, o que caracteriza um coeficiente de segurança de 2,69.

Embora o novo coeficiente de segurança esteja abaixo do anterior, com o aço D6, a utilização do 4340 apresenta uma maior confiabilidade para o caso em questão, devido a maior facilidade de não criação de tensões internas elevadas, com um processo de têmpera de forma facilitada e de maior confiabilidade.

Embora a resistência mecânica final da punção não seja o mesmo após o processo de substituição de material, e têmpera idealizada anteriormente, em quesito de fator de segurança o projeto ainda se mostra superdimensionado, sendo assim, isto não constitui como um impeditivo para a mudança no processo, além disso, a solução do problema sem a necessidade

de alteração de projeto de forma física traz consigo a vantagem de não tornar necessário a fabricação de gabaritos e novos procedimentos fabris .

Desta forma, assim como desenvolvido por Hambli e Potiron (2000), Alexanderd (2017), e Vali e Raju (2019), com similaridades no desenvolvimento do método utilizado neste estudo, foi possível desenvolver um modelo de simulação para o processo de corte por cisalhamento, tendo o presente trabalho o foco na determinação de esforços presentes no punção.

Ao projeto final da punção destina-se as seguintes observações e alterações, iniciando com a substituição do aço D6 pelo aço SAE 4340, e a realização do revenimento logo após o processo de têmpera, este sendo realizado de forma controlada, visando a diminuição de tensões residuais.

Desta forma, após a idealização dos processos, e solução do problema, realizou-se testes práticos, onde foi possível constatar a eficácia da solução, com a não ocorrência de falhas prematuras como antes. A etapa de teste foi realizada da mesma forma em que nas versões anteriores, com o corte seguida de 10 perfis de alumínio, não sendo constatado nenhum problema ou defeito aparente, a proposta foi dada como satisfatória e implementada a linha de produção, agregando assim maior confiabilidade ao processo e ao produto final.

Contudo, o caso de estudo em questão mostrou-se de difícil análise, uma vez que a simulação por si só resultaria em um valor satisfatório para a validação do projeto, mas que quando confrontado com o experimento real veio a falha, devido a características do material que neste modelo a princípio não indicariam a quebra, sendo necessária a análise pautada nos processos de fabricação, adicionalmente a validação prática e análise da situação desenvolvida, além da veracidade dos dados obtidos, por meio de uma investigação aprofundada dos seus resultados.

Após a etapa de validação, com a fabricação de um punção sob as novas características construtivas, foi possível obter-se um projeto eficaz, e resistente a falha, tendo como modificações apenas na substituição do material.

Partindo disto, como futura continuação do estudo, há a necessidade de implementação de novos modos de falha que possam indicar a quebra para situações como a desenvolvida, buscando maior precisão no resultado de simulações para estampos. Além disso, cabe a importância de validação perante aplicação do modelo para outros projetos, a fim de delimitar possíveis impeditivos e limitações para cada caso.

Na imagem 28 é possível observar o punção idealizado após a realização das mudanças e testes de corte, não apresentando nenhuma irregularidade ou presença de fatores que possam acarretar a sua falha, que apresenta o punção após a sua etapa de teste prático.

Figura 28 - Punção otimizado



Fonte: Autor

Desta forma, assim como Joshi, Biranale e Bhatt (2014), cabe destacar que o método de elementos finitos mostra-se uma ferramenta completa na predição de falha em conjuntos de punção e matriz, além disso é possível observar a influência dada pela geometria, o material e o tratamento térmico, tendo direta influência como principais fatores sob a vida útil do punção, cabendo a relação entre o embasamento teórico e a aplicação a prática, para o estudo em questão, a geometria utilizada já mostra-se suficientemente dimensionada, cabendo apenas a mudança nos critérios de material e tratamento térmico utilizado

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi executado um estudo de caso visando a otimização do projeto de um punção existente, que apresentava falhas frequentes em sua etapa de teste. Por meio da implementação do FEM, foi possível a criação de um modelo computacional, este válido para simulação de corte por cisalhamento, e a obtenção de valores críticos presentes na etapa de corte.

Posteriormente a isso, houve a etapa de idealização de análise de dados com base em conhecimento científico, e proposta de solução a falha. A proposta de solução é caracterizada pela substituição do aço D6 pelo Aço SAE 4340, e tratamento térmico realizado de forma controlada. A mudança destes parâmetros tiveram sua validação por meio de testes práticos. Ao término das simulações e procedimentos estipulados se destaca como principais conclusões as seguintes.

- A aplicação do método de elementos finitos mostra-se viável para a etapa de validação e obtenção de pontos críticos;
- O modelo desenvolvido indica um fator de segurança do punção para o aço D6 igual a 3,86, enquanto que para o aço 4340 um fator de 2,69, sendo a associação entre a troca do material e o controle do tratamento térmico os fatores determinantes para a solução da falha;
- A substituição do material e tratamento térmico foram suficientes para solução do presente problema, sem que houvesse a necessidade de desenvolvimento de um novo componente.

REFERÊNCIAS

ALTAWHEEL, ALI. RAFA.; TOLOUEI-RAD, MAJID. Effect Of Quenching Media , Specimen Size And Shape On The Hardenability Of AISI 4140 Steel. **Emirates Journal For Engineering Research**, [s. l.], v. 19, n. 2, p. 33–39, 2014.

ANDERSON, T.L. **FRACTURE MECHANICS**. 3^oed. [S. l.]: Taylor & Francis Group, LLC, 2005. ISSN 02647303.v. 24

BATHE, K. J. **Finite Element Procedures**. 2^o eded. MA: Watertown, 2014. *E-book*.

CHIAVERINI, VICENTE. - **Tecnologia Mecânica - Processos de Fabricação e Tratamento - Volume II**. 2^oed. São Paulo: McGraw-Hill, 1986.

CNRS, U M R; CEDEX, LA TRONCHE; ENCALADA, BLANCO. Informatics in Oral Medicine. **Informatics in Oral Medicine**, [s. l.], v. 2aed, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.4018/978-1-60566-733-1>

DIETER, GEORGE E. **Metalurgia Mecânica**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981. v. 2^o ed.

GÜRÜN, Hakan; GÖKTAŞ, Mustafa; GÜLDAŞ, Abdulmecit. Experimental examination of effects of punch angle and clearance on shearing force and estimation of shearing force using fuzzy logic. **Transactions of Famena**, [s. l.], v. 40, n. 3, p. 19–28, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.21278/TOF.40302>

HALID, U K *et al.* Direct Optimization of an Automotive Sheet Metal Part Using ANSYS. [s. l.], v. 5, n. 3, p. 134–142, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.21791/IJEMS.2020.3.14.to>

HAMBLI, R. *et al.* Prediction of optimum clearance in sheet metal blanking processes. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s. l.], v. 22, n. 1–2, p. 20–

25, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00170-002-1437-5>

HAMBLI, Ridha;; POTIRON, Alain. Finite element modeling of sheet-metal blanking operations with experimental verification. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 102, n. 1, p. 257–265, 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00496-9](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00496-9)

HELMAN, HORACIO; CELTIN, PAULO ROBERTO. **Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais**. 2^oed. São Paulo: Artliber, 2010.

JO, HAEJU *et al.* Effects of cooling rate during quenching and tempering conditions on microstructures and mechanical properties of carbon steel flange. **Materials**, [s. l.], v. 13, n. 18, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/MA13184186>

JOSHI, ULLASH; BIRANALE, BALASAHEB D; BHATT, ANTRIKSH. Finite Element Simulation of Punching Process Using in Process Characterization of Mild Steel. [s. l.], v. 2, n. 10, p. 483–485, 2014.

MAGESH, V.; SUNDAR, S.; KARUPPUDAIYAN, S. Finite Element Analysis of Wrinkling and Shearing of Sheet Metal Forming. **Indian Journal of Science and Technology**, [s. l.], v. 9, n. 34, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i34/95252>

MAITI, S. K. Assessment of influence of some process parameters on sheet metal blanking. **Journal of Materials Processing Technology**, [s. l.], v. 102, n. 1, p. 249–256, 2000. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00486-0](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00486-0)

MARTINS, PAULO; RODRIGUES, JORGE. **RODRIGUES, MARTINS - 2010**. [S. l.: s. n.], 2011.

NORTON, ROBERT L. **Tradução da 2 a Edição: Parte I: Konstantinos Dimitriou Stavropoulos Tradução da 4 a Edição: Capítulos 8 e 16**. 4^oed. Porto Alegre: Bookman, 2013. *E-book*.

PALMA, Diogo Cristiano. Metodologia de simulação por elementos finitos de polias para transportadores de correia de grandes capacidades. [s. l.], p. 25, 2009.

PEDRO, JOÃO; CARDOSO, RODRIGUES. Comportamento Mecânico de Materiais em Processos de Fabrico por Separação Engenharia Mecânica Júri. [s. l.], 2012.

RAWABDEH, IBRAHIM. An Application of Finite Element Method and Design of Experiments in the Optimization of Sheet Metal Blanking Process. [s. l.], n. January 2008, 2014.

SCHAEFFER, Lírio. **Conformacao_Mecanica_Lirio_Schaeffer.pdf**. 2^oed. [S. l.: s. n.], 2004.

SHIGLEY. **Elementos de Maquinas -Livro.pdf**. 8^oed. São Paulo: Bookman, 2018.

SOFIA, BÁRBARA; CURRALO, AFONSO. E STUDIO DE MALHAS DE ELEMENTOS FINITOS. [s. l.], 2021.

STEIN, ERWIN.; BORST, RENÉ DE.; HUGHES, THOMAS J. R. **Encyclopedia of computational mechanics**. [S. l.]: John Wiley, 2004.

VALI, Sk MASTAN; RAJU, A SIVA NAGA. Design and Analysis of Punch and Die Process by Using Ansys with Non Linear Materials. [s. l.], n. 6, 2019.

WILLIAN D. CALLISTER, JR.; DAVID G. RETHWISCH. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 9^o eded. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2018.

ZHUANG, XIN CUN *et al.* Simulation of sheet metal extrusion processes with Arbitrary Lagrangian-Eulerian method. **Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)**, [s. l.], v. 18, n. 5, p. 1172–1176, 2008. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(08\)60200-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(08)60200-9)