



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO PIAUÍ
CAMPUS TERESINA CENTRAL
DEPARTAMENTO DE INDÚSTRIA, SEGURANÇA E PRODUÇÃO CULTURAL
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

FRANCISCO JAIME DA SILVA

**PROJETO DE MATRIZ DE EXTRUSÃO PARA PROCESSO DE DEFORMAÇÃO
SEVERA – EQUAL CHANNEL ANGULAR PRESSING (ECAP)**

Teresina

2020

FRANCISCO JAIME DA SILVA

PROJETO DE MATRIZ DE EXTRUSÃO PARA PROCESSO DE DEFORMAÇÃO
SEVERA – EQUAL CHANNEL ANGULAR PRESSING (ECAP)

Trabalho de Conclusão de Curso (monografia)
apresentado como exigência parcial para
obtenção do diploma do Curso de Bacharelado
em Engenharia Mecânica do Instituto Federal
de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí.
Campus Teresina Central.

Orientador: Prof. Dr. José Francisco dos Reis
Sobrinho

Teresina

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD

Silva, Francisco Jaime da

S586p Projeto de matriz de extrusão para processo de deformação severa Equal Channel Angular Pressing (ECAP) / Francisco Jaime da Silva. - 2020.
85 f.: il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica)
- Instituto Federal do Piauí, Campus Teresina Central, 2020.
Orientador : Prof. Dr. José Francisco dos Reis Sobrinho.

1. Equal Channel Angular Pressing (ECAP). 2. Projeto. 3. Matriz. I. Título.

CDD - 620

Elaborado por Sindya Santos Melo CRB 3/1085

FOLHA DE APROVAÇÃO

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ALUNO: FRANCISCO JAIME DA SILVA

MATRÍCULA Nº: 20131EME0094

DATA: 02 de julho de 2020

Este trabalho foi julgado adequado e aprovado para a obtenção do título de graduação em Engenharia Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí:

Prof. Me. Francisco José Patrício Franco
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. José Francisco dos Reis Sobrinho
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí
Orientador

Prof. Dr. Ayrton de Sá Brandim
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí
Avaliador

Prof. Dr. Gemierson Valois da Mota Cândido
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí
Avaliador

Teresina, 02 de julho de 2020.

AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho aos meus pais Luzineide Silva dos Santos Silva e José de Arimatéia da Silva e irmãos, Carlos Laércio da Silva e Edson Ramon da Silva por todo o amor, apoio e compreensão em todos os momentos difíceis dessa jornada.

Agradeço também a todos os amigos que fiz no decorrer do curso, em especial aos amigos Larissa, Pedro Lopes, Delany, Flaviane e Flávio Trankeira por toda a ajuda e companhia.

Agradeço ao meu professor orientador José Francisco dos Reis Sobrinho pela confiança depositada e pelos ensinamentos.

A todos que tenham, direta ou indiretamente, colaborado na conclusão dessa importante etapa da minha vida, meu muito obrigado.

“Quem tiver talento, obterá o êxito na medida que lhe corresponda. Porém, apenas se persistir naquilo que faz”

Isaac Asimov

RESUMO

Das abordagens utilizadas para melhorar as propriedades mecânicas de metais leves, o *Equal Channel Angular Pressing* (ECAP) mostra-se uma das mais promissoras. Ao se forçar um corpo de prova através de um canal com uma grande mudança de direção provoca-se o refinamento dos grãos em escalas micrométricas. Uma das vantagens de utilização desse método é sua facilidade de implementação, requerendo poucos equipamentos. Dos diferentes designs para a construção de matrizes para deformação severa por ECAP, o design de pastilhas intercambiáveis é o mais versátil, permitindo a realização de diferentes ensaios ao se trocar o ângulo de extrusão mantendo a maior parte da estrutura da matriz. O projeto iniciou-se com a avaliação da influência dos múltiplos fatores que influenciam o processo de ECAP, utilizando a teoria de falhas mecânicas para dimensionar os componentes da matriz. Optou-se pelo dimensionamento de um canal com ângulo de extrusão de 90° , que deve promover uma deformação equivalente média de 0,94 por passe. As pastilhas intercambiáveis, o punção e as laterais devem ser construídas em AÇO 4340, os parafusos, porcas e arruelas devem ser da classe 10.9 com 10 mm de diâmetro. A base pode ser construída em aço 1020 pois não sofre tantos esforços. A carga máxima a não exceder foi calculada com base no menor coeficiente de segurança do conjunto, que ocorre no punção, e é de 136476 N. A pré-carga mínima aplicável aos parafusos deve ser de 22858,2 N e deve ser aplicada com a utilização de um torquímetro. É possível utilizar outros ângulos de extrusão desde que maiores que 90° e resultará em uma menor deformação equivalente por passe.

Palavras-chave: Projeto, Matriz, ECAP

ABSTRACT

Of the approaches used to improve the mechanical properties of light metals, Equal Channel Angular Pressing (ECAP) is one of the most promising. When a specimen is forced through a channel with a large change of direction, the grains are refined in micrometric scales. One of the advantages of using this method is its ease of implementation, requiring little equipment. Of the different designs for the construction of dies for severe deformation by ECAP, the design of interchangeable inserts is the most versatile, allowing different tests to be carried out when changing the extrusion angle while maintaining most of the structure of the die. The project started with the evaluation of the influence of the multiple factors that influence the ECAP process, using the theory of mechanical failures to dimension the matrix components. It was decided to design a channel with an extrusion angle of 90° , which should promote an average deformation equivalent to 0.94 per pass. The interchangeable inserts, the punch and the sides must be built in STEEL 4340, the screws, nuts and washers must be of class 10.9 with 10 mm in diameter. The base can be constructed of 1020 steel as it does not suffer as much effort. The maximum load not to be exceeded was calculated based on the lowest safety coefficient of the set, which occurs at the punch, and is 136476 N. The minimum preload applicable to the screws must be 22858.2 N and must be applied with the use of a torque wrench. It is possible to use other extrusion angles as long as they are greater than 90° and will result in less equivalent deformation per pass.

Keywords: Project, Matrix, ECAP

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Processamento por ECAP	17
Figura 2 - Exemplo de matriz de ECAP	17
Figura 3 - Exemplo de matriz de corpo inteiro	20
Figura 4 - Exemplo de matriz bipartida	21
Figura 5 - Exemplo de matriz de ECAP de pastilhas	22
Figura 6 - Esquema do canal de extrusão para ECAP	23
Figura 7 - Deformação equivalente em função do ângulo do canal Φ	24
Figura 8 - Rotas fundamentais de ECAP	26
Figura 9 - Exemplo de formação de folga de canto	28
Figura 10 - Tipos de parafusos	32
Figura 11 - Exemplo de porcas e arruelas	32
Figura 12 - Exemplo de simulação com MEF	35
Figura 13 - Elementos finitos comumente usados	36
Figura 14 - (a) Modelo (b) Malha automática de 294 elementos (c) Modelo deformado (d) Malha automática com 1008 elementos (e) Modelo deformado	37
Figura 15 - (1) Matriz de deformação (2) Corpo de Prova (3) Punção	41
Figura 16 - Vista da tela principal do software QForm 9.0	44
Figura 17 - Aspecto da malha gerada automaticamente	45
Figura 18 - Efeito dos raios internos na força de extrusão	48
Figura 19 - Distribuição da deformação plástica para $R = 0$ mm e $r = 0$ mm	49
Figura 20 - Distribuição da deformação plástica para $R = 3$ mm e $r = 3$ mm	50
Figura 21 - Distribuição da deformação plástica para $R = 6$ mm e $r = 6$ mm	50
Figura 22 - Distribuição da deformação plástica para $R = 6$ mm e $r = 3$ mm	51
Figura 23 - Efeito do comprimento do corpo de prova na força de extrusão	51
Figura 24 - Carga crítica de flambagem	52
Figura 25 - Tensão máxima no punção sem refinamentos	53
Figura 26 - Tensão máxima no punção com design refinado	54
Figura 27 - Tensão máxima no canal de extrusão	55
Figura 28 - Tensão máxima na lateral da matriz	56
Figura 29 - Disposição dos parafusos	58
Figura 30 - Tensão máxima na junta parafusada com 100% de pré-carga	59
Figura 31 - Tensão máxima na junta parafusada com 75% de pré-carga	59
Figura 32 - Tensão máxima na junta parafusada com 50% de pré-carga	60
Figura 33 - Deslocamento máximo com escala de visualização de 200 vezes	63
Figura 34 - Distribuição de tensão sobre a base	64
Figura 35 - Distribuição de tensão sobre a base refinada	64
Figura 36 - Vista explodida da matriz de deformação severa proposta	67
Figura 37 - Dimensões (1) Matriz (2) Corpo de Prova (3) Punção	75
Figura 38 - Catálogo para seleção de parafusos	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação entre raios e deformação por passe.....	25
Tabela 2 - Força de extrusão máxima.....	49
Tabela 3 - Forças de pré-carga para parafusos de diferentes classes.....	57
Tabela 4 - Diferentes percentuais de pré-carga aplicada.....	57
Tabela 5 - Tensão máxima na junta parafusada	61
Tabela 6 - Coeficientes de segurança e modos de falha	65
Tabela 7 - Parâmetros operacionais	66
Tabela 8 - Parâmetros do parafuso selecionado.....	66
Tabela 9 – Lista de materiais de construção	67
Tabela 10 - Aspectos geométricos para roscas de parafusos.....	82
Tabela 11 - Especificações de classe métrica para parafusos de aço	83
Tabela 12 - Dados usados para simulação de extrusão do Alumínio AA 1050	84

LISTA DE SÍMBOLOS

L_o	Largura da entrada do canal de extrusão
Φ	Ângulo de extrusão
Ψ	Ângulo associado ao arco de curvatura onde as duas partes do canal se cruzam
R	Raio do filete de adoçamento no canal relativo ao ângulo do cotovelo
r	Raio do filete de adoçamento no canal relativo ao ângulo de extrusão
ε_N	Deformação equivalente
N	Número de passes.
μ	Coeficiente de atrito
σ_{vm}	Tensão equivalente de von Mises
σ_1	Tensão principal 1
σ_2	Tensão principal 2
σ_3	Tensão principal 3
σ_E	Tensão de escoamento
P_{cr}	Carga crítica de flambagem
E	Módulo de elasticidade ou modulo de Young
I	Momento de inércia da área da seção transversal
L_e	Comprimento equivalente
a	Medida da aresta
σ_{cri}	Tensão crítica de flambagem
A	Área da seção transversal.
σ_t	Tensão axial de tração
F	Força axial aplicada no parafuso
A_t	Área sob tração do parafuso
A_i	Área do i-ésimo parafuso e
n_b	Número de parafusos
F_{pre}	Força de pré-carga
F_{pro}	Força de prova do parafuso
σ_{pro}	Tensão de prova
γ	Coeficiente de Poisson
d	Densidade

$\sigma_{cri_flambagem}$	Tensão crítica de flambagem
$N_{fla_punção}$	Coeficiente de segurança para flambagem do punção
$N_{esc_punção}$	Coeficiente de segurança para escoamento do punção
$N_{esc_pastilhas}$	Coeficiente de segurança para escoamento das pastilhas
$N_{esc_lateral}$	Coeficiente de segurança para escoamento da lateral
$N_{esc_parafuso}$	Coeficiente de escoamento para escoamento do parafuso
N_{esc_base}	Coeficiente de segurança para escoamento da base

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS	18
1.2	JUSTIFICATIVA	18
2	REFERENCIAL TEÓRICO	20
2.1	DESIGNS COMUNS EM MATRIZES DE ECAP	20
2.1.1	Matrizes de corpo inteiro	20
2.1.2	Matrizes bipartidas	21
2.1.3	Matrizes de pastilhas.....	22
2.2	PARÂMETROS FUNDAMENTAIS EM ECAP	22
2.2.1	Deformação plástica equivalente	23
2.2.2	Rotas de processamento	25
2.2.3	Ângulo de cotovelo	26
2.2.4	Efeito da velocidade de extrusão	27
2.2.5	Efeito do lubrificante	27
2.2.6	Efeito da temperatura.....	27
2.2.7	Efeito do <i>corner gap</i> na distribuição de deformação	27
2.3	TEORIA DE FALHAS ESTÁTICAS	28
2.3.1	Modos de falha mecânica	29
2.3.2	Falha por escoamento e Teoria de von Mises.....	29
2.3.3	Flambagem.....	30
2.3.4	Projeto de juntas parafusadas.....	31
2.4	COEFICIENTES DE SEGURANÇA	34
2.5	SIMULAÇÃO COM MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (FEM)	34
2.5.1	Tipos de elementos	35
2.5.2	Malha e convergência	36
2.5.3	Condições de contorno.....	37
2.5.4	Análise de tensões e deformações	37
2.5.5	Referências adicionais sobre Método dos Elementos Finitos (FEM)	38
2.6	SELEÇÃO DE MATERIAIS	38
2.7	AJUSTES E TOLERÂNCIAS DIMENSIONAIS	39
2.7.1	Classes de ajustes e sistemas de ajustes	39

3.0	METODOLOGIA.....	40
3.1	PROJETO PRELIMINAR	41
3.2	PROJETO INTERMÉDIARIO	42
3.2.1	Seleção de materiais	42
3.2.2	Design inicial para simulações.....	43
3.2.3	Dimensionamento do canal de extrusão Φ	43
3.2.4	Dimensionamento do punção.....	46
3.3.5	Análise das tensões nas pastilhas.....	46
3.3.6	Dimensionamento das laterais da matriz	47
3.3.7	Dimensionamento da junta parafusada.....	47
3.3.8	Dimensionamento da base	47
4.0	RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
4.1	EFEITO DOS RAIOS INTERNOS NA FORÇA DE EXTRUSÃO E NA DISTRIBUIÇÃO PLÁSTICA EQUIVALENTE.....	48
4.2	EFEITO DO COMPRIMENTO DO CORPO DE PROVA NA FORÇA DE EXTRUSÃO.....	51
4.3	DIMENSIONAMENTO DO PUNÇÃO	52
4.4	ANÁLISE DAS TENSÕES NAS PASTILHAS.....	54
4.5	DIMENSIONAMENTO DAS LATERAIS DA MATRIZ.....	55
4.6	DIMENSIONAMENTO DA JUNTA PARAFUSADA	56
4.6.1	Análise de tensões na junta parafusada	58
4.6.2	Força axial nos parafusos	60
4.6.3	Avaliação de cenários críticos no projeto da junta parafusada	61
4.7	DIMENSIONAMENTO DA BASE	63
4.8	FATORES DE SEGURANÇA.....	65
4.9	PARÂMETROS OPERACIONAIS	65
4.10	SELEÇÃO DE PARAFUSOS	66
4.11	LISTA DE MATERIAIS POR COMPONENTES	66
4.11	VISTA EXPLODIDA DO CONJUNTO DE MONTAGEM	67
4.12	DESENHOS CAD PARA CONSTRUÇÃO E MONTAGEM DA MATRIZ DE DEFORMAÇÃO SEVERA.	68
5.0	CONCLUSÕES	69
	REFERÊNCIAS.....	70
	APÊNDICE A - Algoritmo para obtenção da carga crítica de flambagem	74

APÊNDICE B – Dimensões utilizados para simulação no software QForm	75
APÊNDICE C – Desenho CAD do punção	76
APÊNDICE D – Desenho CAD da pastilha inferior	77
APÊNDICE E – Desenho CAD da pastilha superior.....	78
APÊNDICE F – Desenho CAD para laterais.....	79
APÊNDICE G – Desenho CAD da base	80
APÊNDICE H – Desenho CAD do corpo de prova	81
ANEXO A - Parâmetros geométricos para parafusos com padrão métrico	82
ANEXO B - Resistências para parafusos de padrão métrico	83
ANEXO C - Propriedades alumínio AA 1050	84
ANEXO D - Catálogo comercial para seleção de parafusos	85

1. INTRODUÇÃO

Metais leves como o Alumínio, Titânio e Magnésio são frequentemente usados para reduzir o peso de componentes e estruturas em diferentes setores industriais como engenharia aeroespacial, automobilística, elétrica e estrutural. Esses metais apresentam boas propriedades funcionais, como alta resistência à corrosão, boa soldabilidade e biocompatibilidade, embora sua baixa resistência mecânica tenha sido problema no passado, o investimento em pesquisa e desenvolvimento realizado ao longo dos anos, propiciou a utilização de processos visando contornar essa particularidade dessa classe de metais.

De início os processos mais utilizados para melhorar as propriedades mecânicas desses metais se baseavam em endurecimento por precipitações e por trabalho mecânico. Callister et al. (2008) mostra que o refinamento de grãos em escala micro e nanométrica pode melhorar essas propriedades, sendo essa a base dos esforços atuais.

Diferentes abordagens podem ser utilizadas para alcançar grandes reduções nos tamanhos dos grãos desses metais, onde duas se destacam: metalurgia do pó, que utiliza processos de sinterização e as técnicas de deformação plástica severa, do inglês *Severe Plastic Deformation* (SPD).

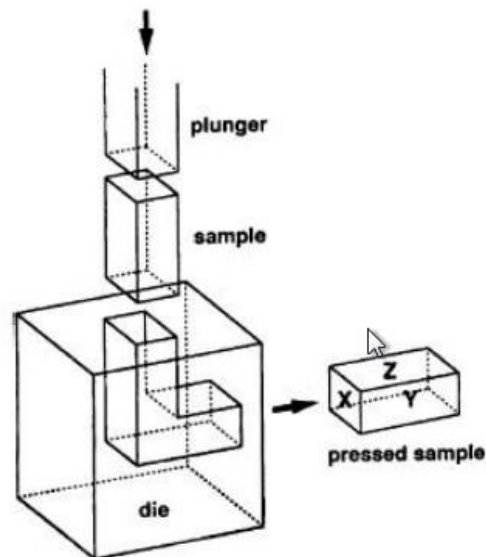
Dentre as técnicas de deformação severa, Araújo (2009) descreve a Pressão Angular de Canais Iguais, do inglês *Equal Channel Angular Pressing* (ECAP) como uma operação na qual um tarugo é forçado pela ação de um pino de punção a seguir através de um canal de entrada de uma determinada seção transversal, formado no interior de uma matriz, e escoar por cisalhamento ao ter mudada sua direção de fluxo, no canal de saída.

As grandes deformações promovem um encruamento máximo e um acúmulo de energia de deformação que acaba por promover o re-arranjo da estrutura de discordâncias. Em geral, as discordâncias interagem formando células que evoluem para contornos de baixo-ângulo e posteriormente para contornos de alto-ângulo, formando sub-grãos no interior dos grãos originais severamente deformados (COSTA, 2010, p. 1).

Uma das vantagens da deformação severa e o motivo para a sua escolha neste trabalho é a possibilidade de execução na maioria das plantas industriais, devido à necessidade de poucos equipamentos, o que do ponto de vista prático, se mostra

como a técnica mais promissora para o processamento de metais micro e nano estruturados. A Figura 1 apresenta um esquema do ECAP.

Figura 1 - Processamento por ECAP



Fonte: (ARAÚJO, 2009)

As matrizes de ECAP podem ser construídas de variadas formas. Podem ser construídas em um único corpo com o canal usinado no seu interior ou em placas e fechadas com parafusos. A Figura 2 mostra um exemplo de matriz de ECAP.

Figura 2 - Exemplo de matriz de ECAP



Fonte: (REDA, 2019)

Trabalhos sobre deformação severa como Costa (2010) e Filho et al. (2011), mostram estar focados na parte de caracterização metalográfica, muitas vezes

apontando as dificuldades operacionais e problemas com os corpos de prova obtidos por conta das altas tensões durante o processamento e afastamento das placas.

Para a obtenção de bons resultados, o processo de deformação severa por ECAP exige um grande cuidado com o projeto da matriz devido às grandes tensões exercidas durante a passagem do corpo de prova. O projeto dessas matrizes deve ser cuidadoso, utilizando uma boa metodologia para o projeto dos componentes pois as tensões envolvidas podem ocasionar o rompimento de parafusos de fixação e até mesmo do corpo da própria matriz, além de causarem desgaste superficial no canal de extrusão diminuindo a vida útil da matriz.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é projetar, com auxílio de simulação computacional, uma matriz de deformação severa para aplicação do método ECAP em corpos de prova de alumínio.

Para alcançar o objetivo principal os seguintes objetivos específicos foram determinados:

- Determinar a força de extrusão para o processo de ECAP por simulação;
- Analisar as tensões envolvidas durante o processo através de simulação;
- Determinar os materiais mais adequados para o projeto da matriz;
- Dimensionar os componentes da matriz;
- Analisar o afastamento das placas através de simulação numérica; e
- Determinar a pré-carga necessária para os parafusos de fixação.

1.2 JUSTIFICATIVA

Segundo Costa (2010), O aumento da resistência mecânica dos materiais tradicionais é talvez a maneira mais efetiva de economizar combustível para um mercado cada vez mais exigente em termos econômicos e também no controle da poluição ambiental. Considerando a aproximação grosseira que a duplicação da resistência mecânica das ligas metálicas tradicionais poderia reduzir de 20 a 30% o peso de peças e equipamentos, esta redução traria uma enorme economia de energia

na obtenção do próprio material (embora cause um aumento de energia para a fabricação das peças via SPD), mas principalmente diminuiria o peso total das estruturas de máquinas (automóveis e aviões, por exemplo), ocasionando uma economia de combustível para o consumidor final.

Ainda segundo Costa (2010), o início de uma produção em larga escala de materiais ultra refinados depende apenas da solução de alguns problemas técnicos, da viabilidade econômica e das leis de mercado. Contudo, ainda que a tecnologia seja simples e a maior parte dos resultados e detalhes estejam disponíveis na literatura científica aberta, há de se considerar que sairão na frente as indústrias e países que estão procurando essas soluções nos seus institutos de pesquisa e universidades.

O laboratório de materiais do Instituto Federal do Piauí – LabMat possui credibilidade na pesquisa de materiais, principalmente cerâmicas e ligas metálicas. O processo de deformação severa por ECAP pode abrir mais uma linha de pesquisa, dessa vez, no campo de materiais de grãos ultra refinados incluído também pesquisas de materiais com memória de forma como em Pereira (2013). Para isso, se faz necessário o investimento em pesquisas no sentido de desenvolver as tecnologias mínimas necessárias.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são apresentados os parâmetros fundamentais a serem considerados no processo de deformação severa por ECAP. Também são descritos aspectos de tensões e deformação em metais, teoria de falhas estáticas, a importância do coeficiente de segurança, simulação com Método dos Elementos Finitos (MEF), seleção de materiais e aspectos de ajustes e tolerâncias em projetos mecânicos.

2.1 DESIGNS COMUNS EM MATRIZES DE ECAP

O design das matrizes de deformação severa por ECAP variam em dimensões e materiais de construção, podendo ser organizadas em três grupos de design: matrizes de corpo inteiro, matrizes bipartidas e matrizes de pastilhas.

2.1.1 Matrizes de corpo inteiro

São construídas em um único bloco de aço. Podem ser cilíndricas ou retangulares (assim como os canais de extrusão), sendo o canal criado por eletroerosão. A Figura 3 abaixo mostra uma matriz de ECAP de corpo inteiro.

Figura 3 - Exemplo de matriz de corpo inteiro



Fonte: (WHITTAKER, 2012)

Esse tipo de design possui alta resistência mecânica às tensões de extrusão e simplicidade de projeto. Como desvantagens possui a necessidade de equipamentos especiais para a criação do canal via eletroerosão e permite ensaios apenas com o ângulo definido em projeto.

2.1.2 Matrizes bipartidas

Neste caso as partes da matriz são separadas permitindo que se tenha acesso ao canal de extrusão. O canal pode ser de seção quadrada, retangular ou circular, usinado por CNC ou eletroerosão. As partes são fechadas com o uso de parafusos. É o design utilizado no trabalho de Junior (2017). A Figura 4 mostra um exemplo de uma matriz bipartida.

Figura 4 - Exemplo de matriz bipartida



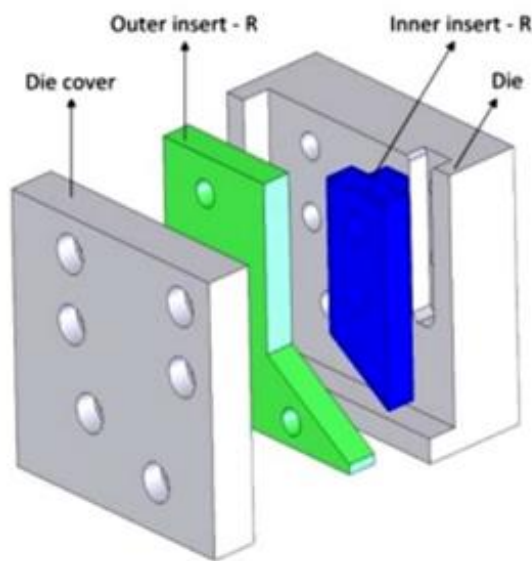
Fonte:(SPRINGER, 2012)

Nesse caso existe uma maior facilidade de construção do canal por métodos de usinagem, mas existe a possibilidade de extrusão do material para fora do canal devido à erros no projeto da junta parafusada de fechamento da matriz, além disso, a mudança do ângulo de extrusão só é possível com a troca da maior parte da matriz.

2.1.3 Matrizes de pastilhas

São uma variação das matrizes bipartidas. Possuem pastilhas de aço intercambiáveis que permitem usar diferentes ângulos de deformação com a mesma matriz. Um exemplo desse tipo de matriz é mostrado em Santos et al. (2014) e na Figura 5.

Figura 5 - Exemplo de matriz de ECAP de pastilhas



Fonte: (SORDI et al., 2014)

Esse tipo de design permite mudar o ângulo de extrusão com a troca das pastilhas, aumentando o leque de configurações de ensaio, em contrapartida, existe a possibilidade de extrusão do material para fora do canal assim como nas matrizes bipartidas.

2.2 PARÂMETROS FUNDAMENTAIS EM ECAP

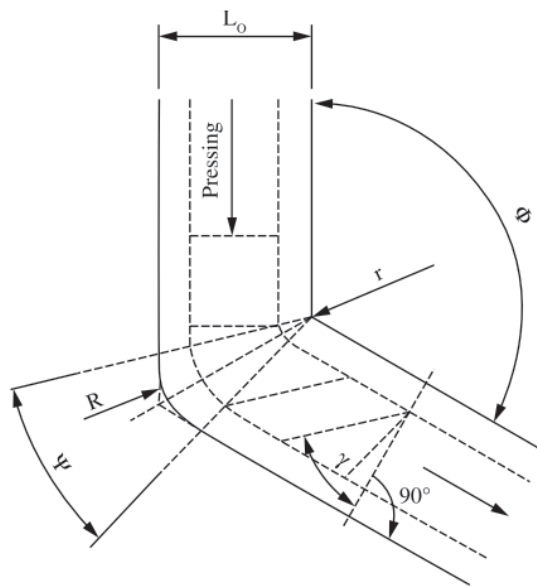
Segundo Araújo (2009) os fatores fundamentais em ECAP estão divididos em três categorias distintas. Primeiro, há fatores associados diretamente com a facilidade de realizar o ECAP, como os valores dos ângulos entre as duas partes do canal e o arco exterior de curvatura onde os canais se cruzam. Segundo, há fatores experimentais relacionados ao processo, por exemplo, a velocidade de extrusão e a

temperatura da operação. A terceira categoria está relacionada com os processos determinados pelo operador, por exemplo, a definição da rota (se A, BA, BC ou C) e o número total de passes aplicados na amostra.

2.2.1 Deformação plástica equivalente

Faria e Rego (2020) explica que a deformação equivalente ou efetiva pode ser definida sob o conceito de trabalho plástico incremental por volume e para o processo de ECAP depende da geometria do canal de extrusão. A Figura 6 mostra o esquema de um canal de extrusão.

Figura 6 - Esquema do canal de extrusão para ECAP



Fonte: (TEIXEIRA, 2015)

Onde L_o é a Largura da entrada do canal de extrusão, Φ é o ângulo de extrusão, Ψ é o ângulo associado ao arco de curvatura onde as duas partes do canal se cruzam, R é o raio do filete de adoçamento no canal relativo ao ângulo de cotovelo e r é o raio do filete de adoçamento no canal relativo ao ângulo de extrusão.

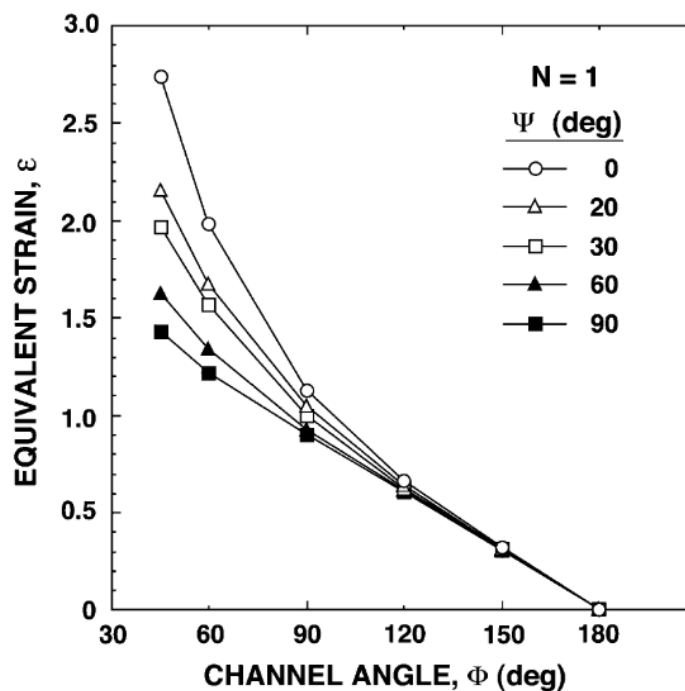
Valiev e Langdon (2006) mostra a deformação plástica equivalente associada à tensão de cisalhamento pode ser obtida pela Equação 1:

$$\varepsilon_N = \frac{N}{\sqrt{3}} 2 \cot\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) + \Psi \csc\left(\frac{\Phi}{2} + \frac{\Psi}{2}\right) \quad (1)$$

Onde N é o número de passes.

Valiev e Langdon (2006) estudaram a influência dos ângulos na deformação efetiva e várias conclusões podem ser alcançadas a partir da análise da Figura 7. Primeiro, o ângulo do arco de curvatura, Ψ , tem um efeito relativamente menor na tensão equivalente, exceto apenas para ângulos de canal inferiores a 90° . Segundo, deformações excepcionalmente altas podem ser alcançadas em uma única passagem, construindo uma matriz com valores muito baixos de Φ e Ψ . Terceira, para matrizes convencionais em que o ângulo do canal é geralmente igual a 90° , a deformação equivalente é próxima de 1 para uma única passagem e essa deformação é essencialmente independente do ângulo que representa o arco de curvatura, Ψ .

Figura 7 - Deformação equivalente em função do ângulo do canal Φ



Fonte: (VALIEV; LANGDON, 2006)

Santos et al. (2012) vai mais afundo e avalia a influência dos raios de adoçamento na interseção do canal de extrusão, onde a deformação máxima é alcançada quando os valores dos raios interno "r" e externo "R" na intersecção dos canais equiangulares são iguais, e o ângulo Φ entre os canais é de 90° e baseado nesse estudo, Junior (2017) avaliou o efeito do valor do raio de adoçamento R e do

ângulo do canal Φ na deformação equivalente compilando os dados na Tabela 1 abaixo: ¹

Tabela 1 - Relação entre raios e deformação por passe

Ângulo do Canal (Φ)	Raio do cotovelo (R)	Ângulo do Cotovelo (ψ)	Deformação por passe (ϵ)
90°	0	0	1,115
	0,25	16	1,072
	0,50	37	0,992
	0,75	62	0,932
	1,00	90	0,907
	0	0	0,667
120°	0,25	13	0,645
	0,50	28	0,625
	0,75	44	0,610
	1,00	60	0,605
	0	0	0,478
135°	0,25	5	0,474
	0,50	22	0,461
	0,75	33	0,436
	1,00	45	0,453

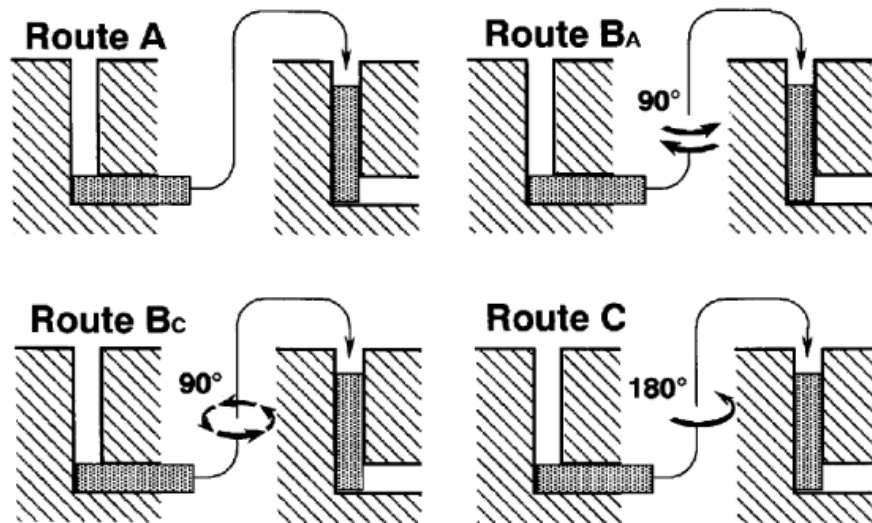
Fonte: (JUNIOR, 2017)

2.2.2 Rotas de processamento

Outra importante variável de processo é o caminho de deformação. É possível adotar uma de quatro rotas de processamento, que se distinguem pelo modo no qual o tarugo é introduzido no canal de extrusão, com ou sem rotação em torno de seu eixo longitudinal. As principais rotas de processamento por ECAP podem ser vistas na Figura 8.

¹ Raio de cotovelo (R) em polegadas

Figura 8 - Rotas fundamentais de ECAP



Fonte: (VALIEV; LANGDON, 2006)

Assim, tem-se:

- Rota A – sem rotação em torno do eixo longitudinal do tarugo;
- Rota BA - rotação de $\pm 90^\circ$ em torno do eixo longitudinal;
- Rota C – rotação de $+180^\circ$ em torno do eixo longitudinal;
- Rota BC - rotação de $+90^\circ$ em torno do eixo longitudinal.

“Como os canais apresentam seção transversal idêntica, as dimensões finais da amostra são muito semelhantes às iniciais, permitindo a passagem N vezes da amostra pelo processo”. (QUARTIERMEISTER, 2017, p. 11)

2.2.3 Ângulo de cotovelo

O ângulo de curvatura, Ψ , denota o arco externo onde as duas partes do canal cruzam dentro da matriz. Estimativas de deformação equivalente obtidas por Valiev e Langdon (2006) mostram que esse ângulo desempenha apenas um papel menor na determinação da deformação imposta à amostra.

2.2.4 Efeito da velocidade de extrusão

Para avaliar o efeito da velocidade no processo de ECAP, Berbon et al. (1999) realizou um ensaio onde amostras de alumínio puro e de uma liga de alumínio-magnésio foram processadas em uma faixa de velocidades de 10^{-2} até 10 mm/s. Os resultados obtidos mostraram que a velocidade de prensagem não influencia significativamente no tamanho dos grãos nessa faixa de velocidade, mas afetando a natureza da microestrutura: a recuperação ocorre mais facilmente em velocidades de prensagem mais lentas, de modo que a microestrutura fica mais equilibrada e contém menos deslocamentos extrínsecos.

2.2.5 Efeito do lubrificante

Filho et al. (2011) exemplifica que graxas sintéticas à base de Bissulfeto de Molibdênio (MoS_2) são comumente utilizadas em ensaios por ECAP e que para essas graxas, adota-se um coeficiente de atrito de $\mu = 0,125$ para efeito de cálculo.

2.2.6 Efeito da temperatura

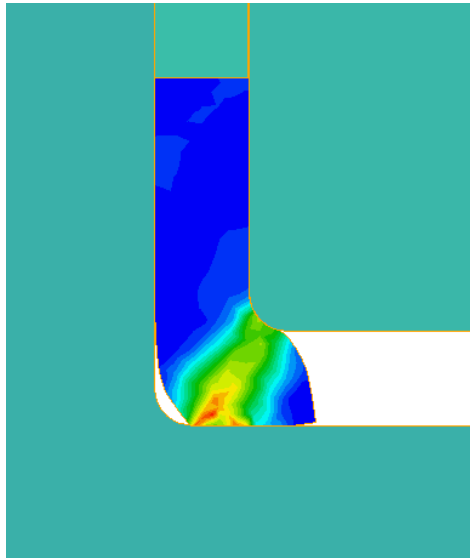
Filho et al. (2011) fala que a temperatura durante o processo de ECAP deve ser a mais baixa possível para evitar a recuperação dinâmica. Para materiais dúcteis, como as ligas Al e Cu, não há razão para operar acima da temperatura ambiente, exceto no processamento de ligas Al de alta resistência, como a série 7000. No entanto, aços, Ti e ligas de Ti são normalmente pressionados a temperatura moderada, embora tenha sido demonstrado que o Ti puro comercialmente pode ser deformado por ECAP à temperatura ambiente.

2.2.7 Efeito do *corner gap* na distribuição de deformação

Segundo Dayal et al. (2018) a formação da folga de canto, do inglês *corner gap*, afeta a distribuição da tensão no tarugo processado, onde o espaço formado entre os cantos e o raio superior do filete é responsável pela distribuição da deformação ao longo da seção. Para o ângulo do arco externo $\Psi = 0$, na parte inferior, é formado um espaço devido ao qual a amostra nessa região não está mais em contato com a matriz. Isso reduz a deformação na parte inferior da amostra e leva a uma distribuição não

uniforme da deformação equivalente. A Figura 9 mostra o corner gap de uma simulação de extrusão.

Figura 9 - Exemplo de formação de folga de canto



Fonte: Próprio autor

2.3 TEORIA DE FALHAS ESTÁTICAS

Segundo Norton (2004), peças falham porque as tensões impostas excedem sua resistência. “Em geral, materiais dúcteis e isotrópicos submetidos a carregamentos estáticos são limitados pelas suas tensões de cisalhamento, enquanto materiais frágeis são limitados pela tensão normal”. (NORTON, 2004, p. 246)

Budynas e Nisbett (2011) mostram as teorias de falhas geralmente aceitas:

Materiais dúcteis (critério de escoamento)

- Tensão de cisalhamento máxima;
- Energia de distorção (teoria de von Mises); e
- Coulomb-Mohr dúctil.

Materiais frágeis (critérios de fratura)

- Tensão normal máxima (Tresca); e
- Coulomb-Mohr frágil.

2.3.1 Modos de falha mecânica

Segundo Collins (2006), qualquer modificação de tamanho, forma ou propriedades de um material de uma máquina ou componente que não permita a realização da sua função como projetado deve ser considerada uma falha mecânica.

Uma lista disponível incluindo os modos de falha mais comumente observados está disponível em Collins (2006) para uma avaliação mais detalhada. Para exemplificar citaremos alguns desses modos de falhas.

- Falha mecânica por escoamento: Ocorre em materiais dúcteis devido à deformação plástica causada por cargas ou temperaturas;
- Falha mecânica por desgaste: Ocorre devido a uma mudança cumulativa, não desejada, nas dimensões de um componente causada pela remoção gradual de partículas de superfícies deslizantes em contato;
- Falha mecânica por flambagem: Ocorre quando uma combinação crítica de magnitude ou ponto de aplicação de uma carga, juntamente com a geometria do componente provoca uma deflexão do componente.

2.3.2 Falha por escoamento e Teoria de von Mises

Collins (2006) define o escoamento como a falha que ocorre quando a deformação plástica em um componente, causada pelas cargas de operação, se torna elevada o suficiente para interferir na capacidade de execução da função do componente.

“A teoria de von Mises prediz que o escoamento ocorre quando a energia de deformação por distorção em uma unidade de volume alcança ou excede a energia de deformação por distorção por unidade de volume no escoamento sob tração ou compressão simples do mesmo material. ” (BUDYNAS; NISBETT, 2011, p. 239)

O desenvolvimento das equações para o critério de falhas de von Mises mostradas abaixo, pode ser visto em Norton (2004), de forma que quando colocada em função de uma tensão equivalente que representa situações de tensões combinadas (tensão equivalente de von Mises) pode ser escrita para o estado triplo de tensões como:

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_1\sigma_3} \quad (2)$$

Onde σ_{vm} é a tensão equivalente de von Mises e $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ as tensões principais.

Para o estado plano de tensões ($\sigma_2 = 0$):

$$\sigma_{vm} = \sqrt{\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_3 + \sigma_3^2} \quad (3)$$

Para fins de projeto, é conveniente incluir um coeficiente de segurança N_{esc} , dado pela relação entre a tensão de escoamento (σ_E) e a tensão equivalente de von Mises (σ_{vm}):

$$N_{esc} = \frac{\sigma_E}{\sigma_{vm}} \quad (4)$$

2.3.3 Flambagem

Collins (2006) mostra que quando forças compressivas em regime permanente são aplicadas a peças curtas elas tendem a falhar por escoamento à compressão. E quando forças compressivas em regime permanente são aplicadas a peças longas, provocam-se alterações na geometria, com arqueamento, enrugamento, torção, flexão ou flambagem.

“A predição do limiar da falha por flambagem é uma tarefa importante. É essencial observar, de início, que a falha por flambagem não depende da resistência do material, mas apenas das dimensões da estrutura e do módulo de elasticidade do material. ” (COLLINS, 2006, p. 71)

A carga critica pode ser calculada de acordo com Beer (2015) pela Equação 5:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_e^2} \quad (5)$$

Onde P_{cr} é a carga crítica em N, E é o módulo de elasticidade do material em Pa, I é o momento de inércia da área da seção transversal em m^2 e L_e é o comprimento equivalente em m.

Para uma seção transversal quadrada:

$$I = \frac{a^4}{12} \quad (6)$$

Onde a é a medida do lado em m.

Para a condição de contorno considerada o comprimento equivalente é dado conforme a Equação 7, como pode ser visto em Beer (2015):

$$L_e = 2.L \quad (7)$$

Substituindo 7 e 6 em 5 temos então:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot \left(\frac{a^4}{12}\right)}{(2.L)^2} \quad (9)$$

Uma carga aplicada maior que a carga crítica irá causar flambagem no punção.

A tensão crítica pode ser calculada por:

$$\sigma_{cri_flambagem} = \frac{P_{cr}}{A} \quad (10)$$

Onde A é a área da seção transversal.

2.3.4 Projeto de juntas parafusadas

Uma das aplicações primárias de parafusos e porcas é a junção de componentes em situações de tração. Norton (2004) afirma que é prática comum pré-carregar a junta com torque suficiente para criar cargas que se aproximem da resistência de prova. Para montagens carregadas estaticamente indica-se uma pré-carga no parafuso de até 90% da resistência de prova e para juntas carregadas dinamicamente até 75% da resistência de prova. A Figura 10 mostra as aplicações para diferentes tipos de parafusos.

Figura 10 - Tipos de parafusos

Pré-Tensionados	Obturadores	De Ajustagem	De Potência
• Antes do uso é aplicada uma tensão que aumenta a segurança da fixação;	• São parafusos utilizados para fins de vedação;	• São utilizados para fazer um ajuste inicial e eliminar folgas;	• Transformam movimento rotativo em movimento de translação.

Fonte: (SILVEIRA, 2013)

Os parafusos são utilizados em conjunto com porcas e arruelas. Segundo Silveira (2013), as porcas são elementos utilizados em conjunto com os parafusos com função de garantir a junção entre elementos. Podem ser fabricadas em vários materiais metálicos e poliméricos e ter várias geometrias, sendo dois dos tipos mais utilizados, a porca-borboleta, como duas abas e de fácil aperto manual e remoção ou de travamento.

Vanipar (2020), explica que as arruelas, são elementos planos com formato de anel que tem como objetivo aumentar o contato entre a cabeça do parafuso e a porca ou parte apertada. São em geral fabricadas de material dúctil revestido de aço endurecido para que, durante o aperto entre as partes a força seja distribuída sobre uma área maior que da cabeça do parafuso ou da porca. A Figura 11 mostra alguns exemplos de porcas e arruelas.

Figura 11 - Exemplo de porcas e arruelas

Fonte: (VANIPAR, 2020)

Valores tabelados para a área sob tração, assim como outras características geométricas e de materiais está disponível nos Anexos A e B.

2.3.4.1 Tensões em parafusos

A tensão axial pode ser calculada por:

$$\sigma_t = \frac{F}{A_t} \quad (11)$$

Onde F é a força axial aplicada no parafuso em N e A_t é a área sob tração do parafuso em mm².

Segundo Shigley (2005), o comprimento ideal de parafusos com porca é aquele no qual apenas uma ou duas roscas projetam-se da porca após o aperto.

Collins (2006) demonstra que em uniões com múltiplos parafusos, deve-se conhecer a distribuição das forças aplicadas entre os parafusos e as tensões em cada parafuso. Em carregamentos simétricos é possível assumir que o cisalhamento total está uniformemente distribuído entre os parafusos e assumindo que o atrito de fixação não fornece resistência ao cisalhamento então a Equação 9, pode ser reescrita como:

$$\sigma_t = \frac{F}{\sum_{i=0}^{n_b} A_i} \quad (12)$$

Onde A_i é a área do i -ésimo parafuso e n_b é o número de parafusos.

2.3.4.2 Pré-carga em parafusos

Collins (2006) explica que quando os parafusos estão pré-carregados, as teorias de falha por tensão combinada ou teorias de projeto podem ser aplicadas e suposições simplificadoras apropriadas podem ser feitas para cálculos preliminares de projeto.

Norton (2004) destaca que deve-se pré-carregar a junta apertando os parafusos com torque suficiente para criar cargas de tração próximas às resistências de prova e que essa força de pré-carga deve ser de até 90% da resistência de prova para membros estáticos e de 75% da resistência de prova para membros carregados dinamicamente, de forma que:

$$F_{pre} = 0,90 \times F_{prova} \quad (13)$$

Onde F_{pre} é a força de pré-carga no parafuso, F_{prova} é a carga de prova do parafuso.

A F_{prova} pode ser obtida em função da área de tração do parafuso:

$$F_{prova} = \sigma_{prova} \times A_t \quad (14)$$

Logo podemos calcular a força de pré-carga em parafusos carregados estaticamente substituindo a Equação 14 na Equação 13, obtendo a Equação 15:

$$F_{pre} = 0,90 \times (\sigma_{prova} \times A_t) \quad (15)$$

2.4 COEFICIENTES DE SEGURANÇA

Segundo Norton (2004), a qualidade de um projeto pode ser medida por meio de muitos critérios. É sempre necessário calcular um ou mais coeficientes de segurança para estimar a probabilidade de falha. Podem haver normas de projetos, de legislatura ou aceitos de forma geral, que também devem ser adotados.

“ Um coeficiente de segurança (também chamado de fator de segurança) pode ser expresso de muitas formas. Ele é tipicamente a razão entre duas quantidades que possuem as mesmas unidades, como (resistência) / (tensão atuante), (esforço crítico) / (esforço aplicado) e por isso é sempre adimensional. ” (NORTON, 2004, p. 16)

Norton (2004) aponta que uma vez havendo mais de uma forma de falha em potencial para qualquer elemento da máquina, pode haver mais de um valor para o coeficiente de segurança N . O menor valor de N para qualquer peça é o mais importante, já que ele prevê a forma mais provável de falha. Quando N é reduzido a 1, a tensão sobre a peça é igual à resistência do material.

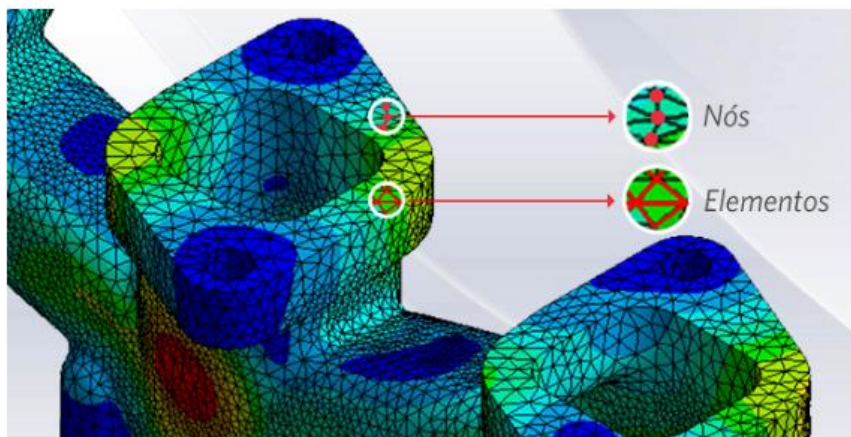
2.5 SIMULAÇÃO COM MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS (FEM)

Segundo Ribeiro (2004) devido à complexidade do comportamento do material, da geometria, das cargas ou das condições de fronteira, há muitos problemas de

engenharia para os quais não são conhecidas soluções analíticas. Em tais situações recorre-se a métodos numéricos que permitem a obtenção de soluções aproximadas.

Balancin (2015) explica que o conceito fundamental do método dos elementos finitos (MEF) está na discretização do domínio e aplicação de resoluções aproximadas das equações de derivadas parciais que descrevem o comportamento macroscópico dos materiais metálicos por meio de subdomínios de tamanho finito (elementos). Cada elemento é constituído por pontos nodais, onde são definidas as variáveis físicas, sendo o valor destas interpolado entre os pontos nodais.

Figura 12 - Exemplo de simulação com MEF

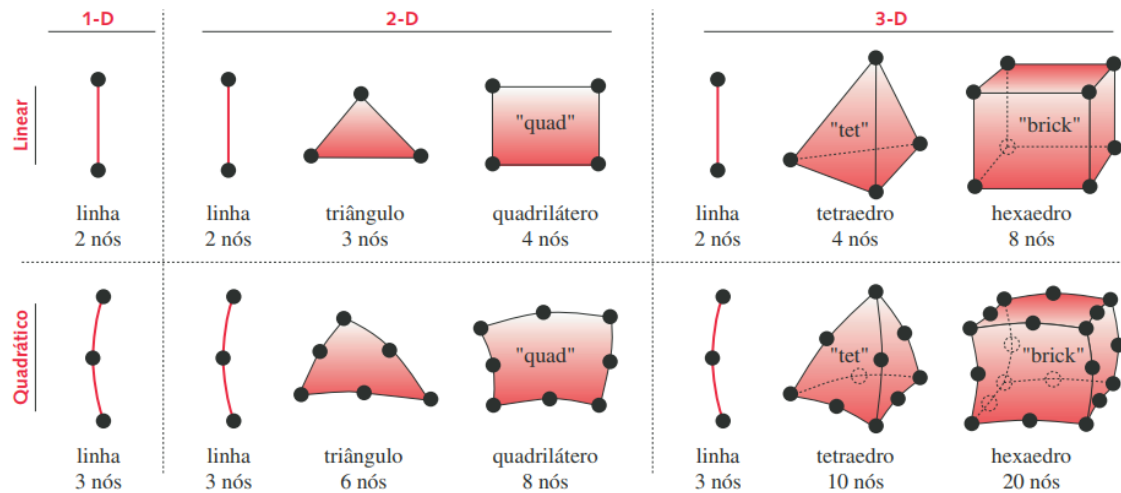


Fonte: (MIRLISENNA, 2016)

2.5.1 Tipos de elementos

Norton (2004) classifica os elementos em uni, bi ou tridimensionais ou como elementos de linha, área e volume, respectivamente. Cada elemento pode ainda possuir diferentes ordens no que se refere ao polinômio interpolador do deslocamento no interior do elemento. O uso de elementos de ordens superiores não implica necessariamente em melhores resultados, o que permite o uso de elementos mais simples.

Figura 13 - Elementos finitos comumente usados



Fonte: (NORTON, 2004)

2.5.2 Malha e convergência

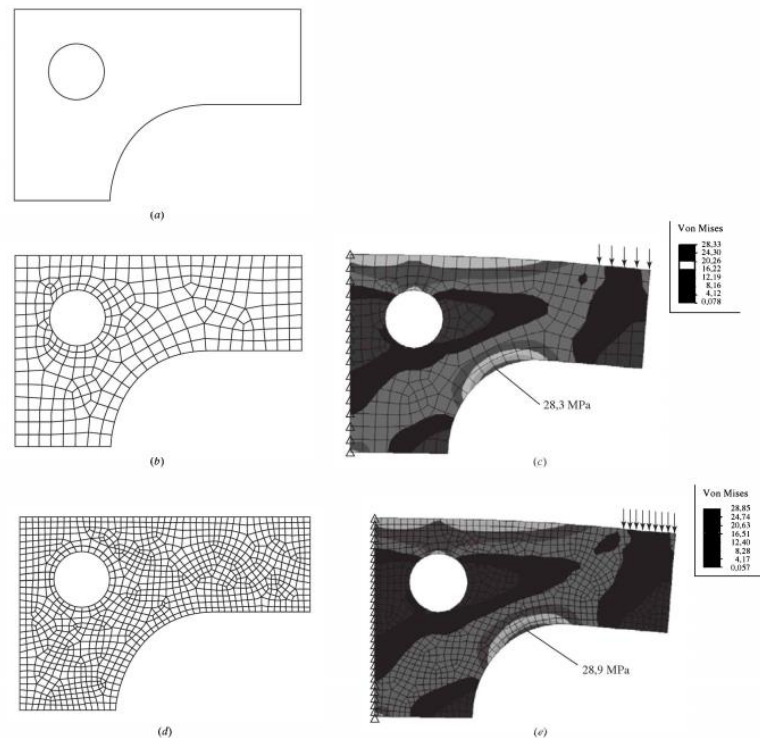
A tarefa de geração da malha pode se tornar bastante complexa com o incremento da complexidade do componente a ser analisado. Hoje em dia os softwares comerciais já possuem a função de geração da malha automatizada, o que torna essa tarefa bastante simplificada.

Budynas e Nisbett (2011) explicam que os resultados tendem a melhorar quando a densidade da malha aumenta em áreas com gradientes de tensão elevados ou em zonas de transição geométrica.

Segundo Norton (2004) a convergência dos resultados nas zonas onde as tensões são maiores com o refinamento da malha mostra que a malha foi suficientemente refinada. Os valores de tensão nas regiões mais críticas devem ser comparados para as diferentes densidades de malhas. Uma diferença significativa entre uma solução e outra indica que a malha ainda pode ser mais refinada.

A Figura 14 mostra a aplicação de malhas de diferentes densidades e o efeito nos resultados da simulação.

Figura 14 - (a) Modelo (b) Malha automática de 294 elementos (c) Modelo deformado (d) Malha automática com 1008 elementos (e) Modelo deformado



Fonte: (BUDYNAS; NISBETT, 2011)

2.5.3 Condições de contorno

Segundo Norton (2004) as condições de contorno (CC) e outras formas de restrição servem para evitar que o modelo se comporte de forma não realística. Restrições em número suficiente devem ser aplicadas para manter o equilíbrio estático, não devem restringir nem permitir deformações que na verdade não ocorreriam. Se poucas CC são impostas o sistema é dito sub-restrito e a simulação falhará. Se muitas CC são impostas, o sistema é dito super-restrito sendo excessivamente rígido.

2.5.4 Análise de tensões e deformações

Norton (2004) explica que o cálculo de tensões e deformações em um componente pode ser realizado dividindo esse componente em um número finito de elementos discretos conectados por nós (malha), uma aproximação dos valores reais das tensões e deformações pode ser obtida em qualquer parte do componente em

função das condições de contorno e das cargas aplicadas. Ainda segundo Norton (2004), parte do problema deste tipo de análise se encontra na escolha do tipo, número e distribuição dos elementos que compõem a malha com o objetivo de usar o menor poder de processamento no menor tempo possível para se obter a melhor solução possível.

Para a análise de tensões e deformações em elementos com contornos curvos, Norton (2004) recomenda a utilização de elementos de alta ordem, enquanto que para elementos lineares são aplicáveis aos contornos retos.

Segundo Norton (2004), o uso de elementos triangulares de três nós ou tetraedros de quatro nós deve ser evitado por causa das estimativas imprecisas para a tensão e a rigidez. O uso de quadriláteros de quatro nós ou de hexaedros de oito nós leva a melhores estimativas de tensão.

2.5.5 Referências adicionais sobre Método dos Elementos Finitos (FEM)

Um estudo mais aprofundado sobre o método de elementos finitos pode ser feito através da ampla bibliografia disponível onde podemos citar: Azevedo (2003), Costa (2014), Teixeira-Dias et al. (2018) e Filho (2018), além de Norton (2004) e Shigley (2011) com aplicações de FEM em projetos de máquinas.

2.6 SELEÇÃO DE MATERIAIS

Niemann (1971) aponta que na escolha de materiais devem-se considerar, inicialmente, as exigências a serem satisfeitas relativamente à função, solicitação e durabilidade e, a seguir, as exigências relativas à conformação e à fabricação, bem como os custos de fabricação. Geralmente, podem-se tomar como base resultados conhecidos de experiências já realizadas.

“A seleção efetiva de um material pode ser bastante simplificada, tomando-se como base aplicações prévias ou bastante complexa para projetos muito complexos.” (BUDYNAS; NISBETT, 2011)

2.7 AJUSTES E TOLERÂNCIAS DIMENSIONAIS

Agostinho (1977) explica que o processo de fabricação de componentes mecânicos são sujeitos à desvios nas dimensões previamente projetadas devido aos mais diversos fatores, incluindo erros operacionais e problemas com os equipamentos. Esses desvios são muito difíceis de serem controlados e por isso se faz necessário definir dentro de qual desvio da medida nominal a peça deve ser fabricada para exercer sua função.

Ainda segundo Agostinho (1977), a tolerância é definida como a diferença entre as duas medidas limites admissíveis, ou seja, entre os valores máximo e mínimos.

2.7.1 Classes de ajustes e sistemas de ajustes

Dependendo da variação dimensional entre duas peças a serem acopladas, o ajuste pode ser:

1. Ajuste móvel – Permite o jogo entre as peças após o acoplamento;
2. Ajuste prensado – Após o acoplamento existe pressão ou interferência;
3. Ajuste indeterminado – Segundo a posição das medidas reais e das medidas de acoplamento dentro das zonas toleradas, pode haver jogo ou movimentação.

“ No sistema furo-eixo, para todas as classes de ajuste, as medidas mínimas dos furos são iguais à medida nominal e os eixos são maiores ou menores que os furos onde, para o ajuste desejado, haja a necessidade de interferência ou folga. ”
(AGOSTINHO; RODRIGUES; LIRANI, 1977, p. 13)

3.0 METODOLOGIA

Em função dos objetivos traçados, segundo Cervo et al. (2007) esse trabalho segue a linha de uma pesquisa do tipo explicativa experimental, com uma abordagem quantitativa, onde para atender aos objetivos geral e específicos definidos, será realizada uma pesquisa bibliográfica referente a teoria de esforços estáticos e dinâmicos, resistência dos materiais, previsão de vida útil (fadiga), método dos elementos finitos aplicados em simulações e uma avaliação de projetos anteriores semelhantes.

O projeto da matriz de deformação severa será realizado seguindo principalmente as metodologias e equações para o projeto de componentes de máquinas de Collins (2006), Norton (2004) e Budynas e Nisbett (2011). A metodologia empregada nesses livros deverá direcionar o dimensionamento da matriz assim como de seus acessórios (base, punção, parafusos, porcas e arruelas).

Os softwares utilizados para o projeto da matriz de deformação severa foram o QForm, empregado para a obtenção das forças de extrusão, o Freecad, utilizado para o desenho da geometria bidimensional utilizado no QForm e o software SolidWorks, versão 2018, para simulação e obtenção das tensões nos componentes. Além desses, também foi elaborado um algoritmo que pode ser utilizado no software GNU/Octave, compatível com a linguagem MatLab para a realização de cálculos mais complexos ou repetitivos devido à natureza iterativa do problema.

Relativamente ao projeto de máquinas, Collins (2006), organiza essa atividade em três estágios principais. O estágio de *projeto preliminar*, observando-se características de desempenho esperado baseados em experiências anteriores, assim como uma investigação geral do sistema, com pouca atenção a detalhes construtivos. O estágio de *projeto intermediário* contempla a seleção de material, determinação de geometria e montagem dos componentes, assim como fatores de fabricação, montagem, inspeção e custo. O estágio de *projeto de detalhamento* contempla aspectos de compatibilidade dimensional, ajustes e tolerâncias e padronização. Como produto do projeto de detalhamento tem-se os desenhos e especificações completos, incluindo os desenhos em detalhe de todas as peças.

3.1 PROJETO PRELIMINAR

A matriz projetada deve ser capaz de processar corpos de prova de alumínio. Deve ser capaz de suportar as tensões envolvidas durante a passagem do corpo de prova pelo canal e o material de construção da matriz deve ser compatível com materiais comumente utilizados em projetos semelhantes e comercialmente acessíveis.

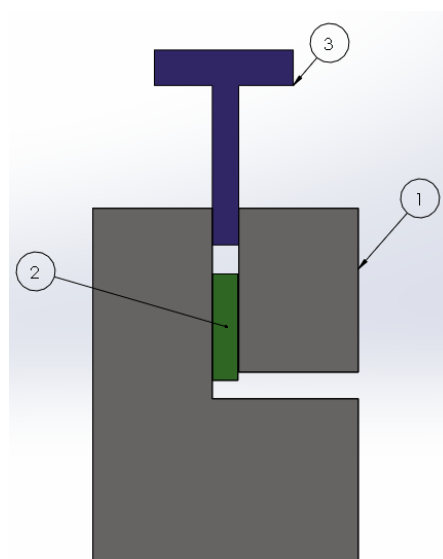
A montagem da matriz deve ser facilitada tanto em máquinas de ensaio universais como em prensas hidráulicas comumente disponíveis em laboratórios de ensaios mecânicos.

A escolha pelo design de projeto de uma matriz do tipo matriz de pastilhas se dá em função das vantagens apontadas no item 2.1.3.

O projeto da junta parafusada necessária em função do design de pastilhas deve ser capaz de demonstrar a pré-carga mínima necessária para evitar o afastamento e consequentemente o escoamento do material do corpo de prova para o interior das frestas existentes entre as diferentes partes da matriz. Os parafusos, porcas e arruelas devem ser dimensionados tendo em conta opções comerciais.

A Figura 15 mostra um desenho da configuração inicial do projeto.

Figura 15 - (1) Matriz de deformação (2) Corpo de Prova (3) Punção



Fonte: Próprio autor

3.2 PROJETO INTERMÉDIÁRIO

Definindo os parâmetros iniciais para o projeto da matriz de deformação severa que serão utilizados para a realização das simulações computacionais do processo de ECAP. A seção transversal do canal quadrada permite que o corpo de prova possa ser rotacionado de forma a atender todas as 4 principais rotas de ECAP conforme descrito no item 2.2.2 deste trabalho.

O ângulo do canal de extrusão Φ de 90° permite um maior valor de deformação equivalente por passe, como pode ser visto no item 2.2.3 deste trabalho.

Os ângulos de adoçamento internos do canal, R e r, respectivamente: o raio do filete de adoçamento no canal relativo ao ângulo do cotovelo e o raio do filete de adoçamento no canal relativo ao ângulo de extrusão, serão definidos por simulação com o objetivo de reduzir a formação de *corner gap*, testando os valores de R variando de 0 até 1 in, conforme a Tabela 1.

A velocidade de extrusão deve estar na faixa de 10^{-2} até 10 mm/s conforme o estudo realizado por Berbon et al. (1999).

O lubrificante utilizado será o Bissulfeto de Molibdênio (MoS_2) com coeficiente de atrito estimado em $\mu = 0,125$ conforme Santos et al. (2012).

A simulação será feita considerando temperatura ambiente de 24°C .

As dimensões iniciais do corpo de prova são definidas como 15 mm^2 de seção transversal com comprimento de 60 mm.

O material do corpo de prova será o Alumínio AA1050 com as características mecânicas obtidas do banco de dados do software QForm Cloud 9.0, como visto no Anexo C.

3.2.1 Seleção de materiais

Como citado em Shigley (2011) optou-se por uma abordagem mais conservadora para a seleção dos materiais a serem utilizados para a construção da matriz de deformação. Trabalhos como Oliveira (2004) e Santos et al. (2014) fazem uso do aço SAE 4340 para os componentes críticos da matriz como as pastilhas

internas e as laterais, assim como o punção. O aço SAE 4340 é conhecido pela sua alta resistência mecânica, elevada temperabilidade, alta tenacidade, sendo comumente utilizado na fabricação de máquinas e equipamentos sendo uma boa escolha inicial. Componentes como parafusos, porcas e arruelas são normatizados e serão tratados especificamente em itens posteriores.

Outros materiais, como o Aço 1020 ou ligas metálicas específicas para parafusos, porcas e arruelas também podem ser utilizados, considerando-se a natureza dos esforços aos quais serão submetidos, assim como a obtenção de coeficientes de segurança adequados conforme o item 2.4.

3.2.2 Design inicial para simulações

Para efeito das simulações computacionais, será utilizada uma simplificação 2D de uma matriz de deformação severa de ECAP com as medidas disponíveis no Apêndice B, o que de acordo com Melconian (2014), diminui a necessidade de poder computacional e acelera o processo de projeto. O design de pastilhas com ângulo de extrusão de 90 graus será usado como ponto de partida.

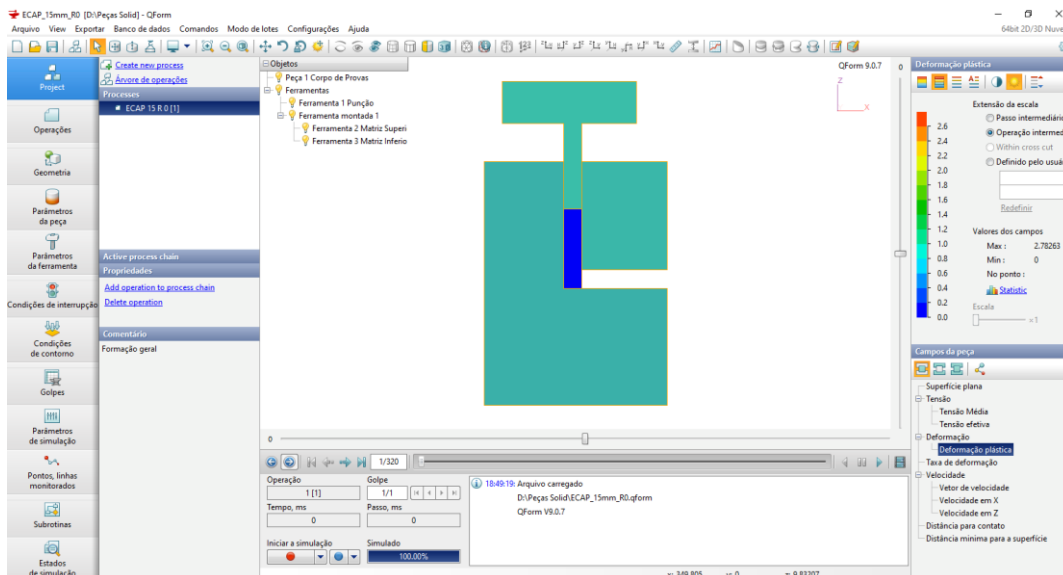
3.2.3 Dimensionamento do canal de extrusão Φ

As simulações computacionais desta etapa foram realizadas no software QForm versão 9.0 com o objetivo de avaliar a influência dos parâmetros de ECAP na força necessária para a extrusão e também na distribuição da deformação plástica equivalente no corpo de prova. “ O QForm é um software de engenharia profissional usado para simulação, análise e otimização de processos de moldagem de metal. ” (QFORM, 2020)

Devido à limitação de recursos para o desenho de esboços em 2D da ferramenta de desenho embutida no software QForm, a montagem disposta na Figura 15, com as dimensões descritas no Apêndice B, foi desenhada no software FreeCad versão 0.18. Após o desenho da geometria, criou-se um arquivo com o formato .dxf que foi importado para o QForm.

A Figura 16 mostra a tela inicial do software QForm 9.0 com a geometria em 2D importada.

Figura 16 - Vista da tela principal do software QForm 9.0



Fonte: Próprio autor

Definiu-se um projeto geral com geometria 2D sem os parâmetros adicionais de processo térmico já que o ensaio será realizado a temperatura ambiente.

O arquivo .dxf com a geometria deve ser carregado e os componentes da montagem (Punção, Matriz e Corpo de prova) definidos. Especificamente para a matriz, deve-se criar uma ferramenta montada selecionando as duas partes separadas pelo canal. Isso é importante para a definição das condições de contorno em etapa posterior.

Nos parâmetros do corpo de prova definiu-se o material como Alumínio AA 1050 cold ². A temperatura do ensaio foi definida como 24 °C e o comprimento da peça em 60 mm.

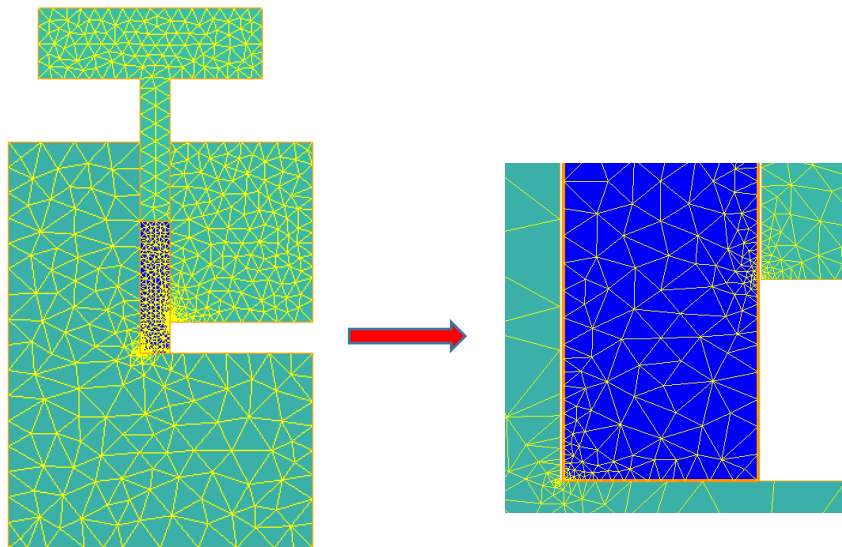
O punção teve seu acionamento definido como uma prensa hidráulica de 100 toneladas com a velocidade de avanço de 0,5 mm/s com acionamento direto. Foi utilizado um coeficiente de atrito de Coulomb constante de $\mu = 0,125$ entre o corpo de

² Uma tabela com as propriedades mecânicas e químicas do Alumínio AA 1050 está disponível no anexo C

prova e a matriz. Como condição de parada foi definido um deslocamento vertical do punção de 50 mm.

Observa-se na Figura 17 o aspecto da malha criada com refinamentos aplicados nos pontos críticos.

Figura 17 - Aspecto da malha gerada automaticamente



Fonte: Próprio autor

3.2.3.1 Efeito dos raios internos

Com base nas combinações de raios de adoçamento internos do canal de extrusão estudadas por Junior (2017) vistas na Tabela 1, realizou-se simulações considerando-se as combinações de $R = 0 \text{ mm}$ e $r = 0 \text{ mm}$, $R = 3 \text{ mm}$ e $r = 3 \text{ mm}$, $R = 6 \text{ mm}$ e $r = 6 \text{ mm}$ e $R = 6 \text{ mm}$ e $r = 3 \text{ mm}$, para se determinar qual o efeito dessas diferentes combinações na força de extrusão e na distribuição da deformação plástica no corpo de prova. O objetivo é determinar a influência da variação dessas configurações de raios na força de extrusão e na distribuição da deformação.

3.2.3.2 Efeito do comprimento do corpo de prova

A configuração de raios internos $R = 6 \text{ mm}$ e $r = 3 \text{ mm}$ é fixada e será realizada apenas a alteração do comprimento do corpo de prova para se avaliar o efeito de diferentes comprimentos na força máxima de extrusão.

3.2.4 Dimensionamento do punção

A determinação da carga crítica de flambagem para o dimensionamento do punção depende de suas dimensões e do material do qual será construído. Para essa etapa e etapas posteriores será utilizado o software SolidWorks versão 2018 para simulação dos componentes. A escolha desse software se deu devido às limitações impostas pelo software Ansys, em sua versão estudante, onde a utilização de malhas refinadas é restringida, o que não acontece no SolidWorks.

Será realizada a análise da variação da carga crítica de flambagem em função do comprimento do punção. Como condições de contorno considera-se o punção como uma viga engastada em uma das extremidades com a outra livre, uma seção quadrada de aresta 15 mm com diferentes comprimentos variando de 50 mm até 100 mm e o material de construção o aço SAE 4340.

Os modos de falha mais prováveis para o punção são falha por escoamento e falha por flambagem de modo que os coeficientes de segurança obtidos devem ser adequados conforme o item 2.4.

3.3.5 Análise das tensões nas pastilhas

As pastilhas serão avaliadas como um conjunto montado. A força máxima de extrusão obtida através do dimensionamento do canal de extrusão será aplicada nas faces internas do caminho do canal.

As pastilhas podem sofrer falha por escoamento, devendo o coeficiente de segurança para escoamento atender aos critérios definidos no item 2.4.

3.3.6 Dimensionamento das laterais da matriz

O dimensionamento das laterais será realizado considerando-se a aplicação da força máxima de extrusão na lateral do canal.

Assim com as pastilhas, as laterais podem sofrer falha por escoamento, devendo o coeficiente de segurança para escoamento atender aos critérios definidos no item 2.4.

3.3.7 Dimensionamento da junta parafusada

A junta parafusada deve prover o total fechamento do canal, evitando o escoamento do material a ser extrudado para o interior das frestas do canal. Para isso, deve-se dimensionar os parafusos capazes de suportar o esforço de tração durante a extrusão do corpo de prova.

As tensões aplicadas e a pré-carga adequada, devem ser calculadas através dos itens 2.3.4.1 e 2.3.4.2..

Os modos de falha possíveis são a falha dos parafusos por escoamento e falha devido à abertura da junta, devendo ser analisados os cenários mais críticos de uso de forma que os coeficientes de segurança atendam aos critérios definidos no item 2.4.

3.3.8 Dimensionamento da base

Uma base para o conjunto é necessária para evitar deslocamentos imprevistos da matriz durante o processo de extrusão assim como danos na matriz ou na prensa.

Para a modelagem do problema, considerou-se o pior cenário onde a força de extrusão e o peso próprio da matriz estejam concentradas no centro da base.

O material utilizado na base pode ser diferente do material utilizado em outros componentes como o punção e as pastilhas pois espera-se que o carregamento aplicado à base seja distribuído por uma área que permita a obtenção de um coeficiente de segurança robusto de acordo com os critérios do item 2.4.

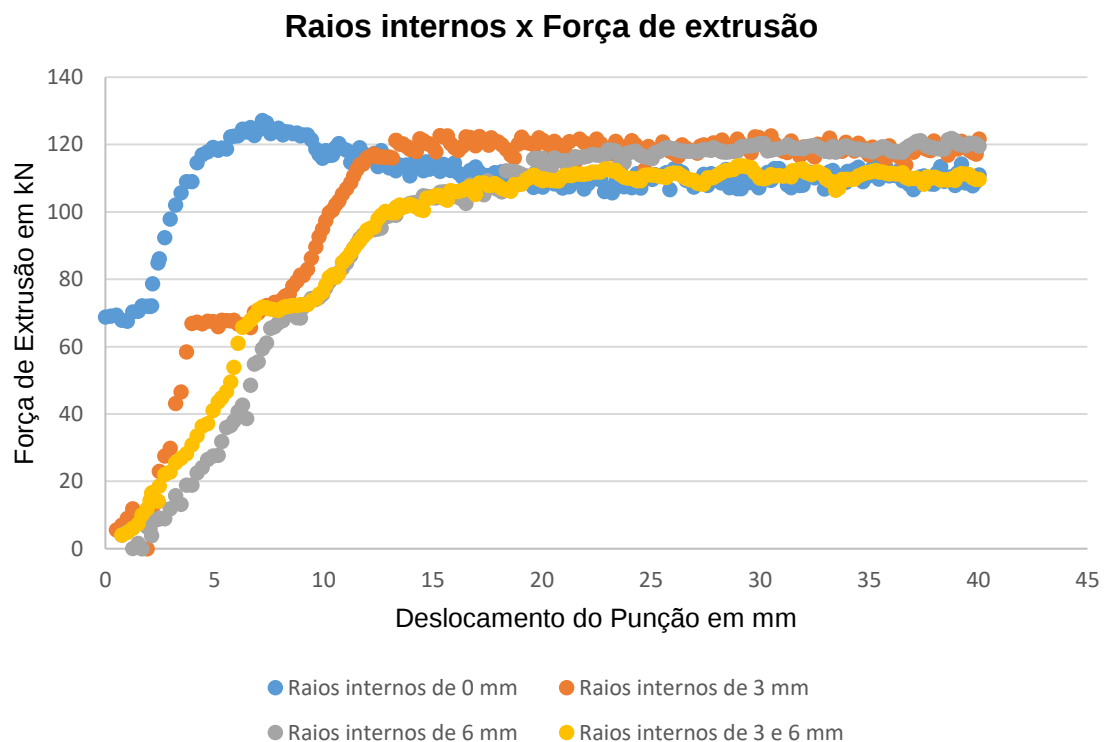
4.0 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram obtidos seguindo os parâmetros definidos na metodologia. Realizou-se a análise da influência dos raios de adoçamento e comprimento do corpo de prova na força máxima de extrusão para o dimensionamento do canal de extrusão. O design do punção foi testado para falha por escoamento e flambagem. O design das pastilhas internas foi testado para falha por escoamento assim como as laterais e a base. A junta parafusada foi testada para falha por escoamento nos parafusos e para abertura.

4.1 EFEITO DOS RAIOS INTERNOS NA FORÇA DE EXTRUSÃO E NA DISTRIBUIÇÃO PLÁSTICA EQUIVALENTE

As diferentes configurações de raios internos de adoçamento de “R” e “r” foram simuladas com as condições descritas no item 3.2.3.1. A Figura 18 mostra um gráfico que aponta a força de extrusão máxima obtida em função do deslocamento do punção.

Figura 18 - Efeito dos raios internos na força de extrusão



A Tabela 2 mostra os valores máximos da força de extrusão em função dos ângulos internos.

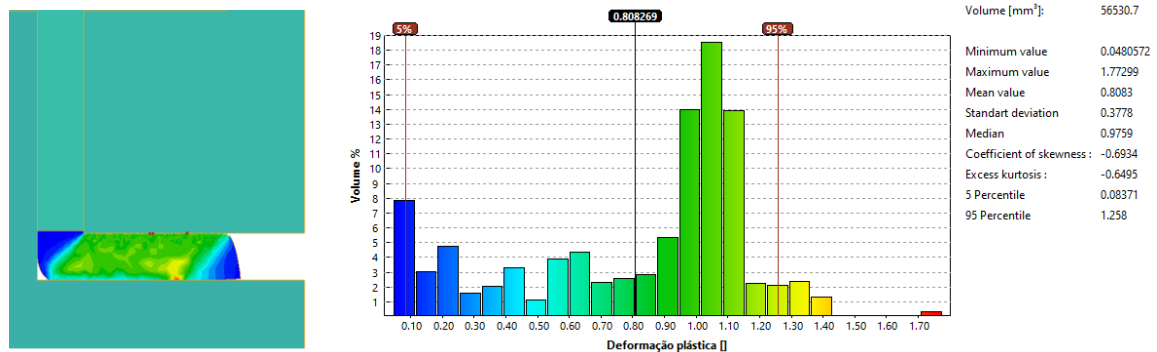
Tabela 2 - Força de extrusão máxima

Força Máxima (kN)	R = r = 0 mm	R = r = 3 mm	R = r = 6 mm	R = 6 mm e r = 3 mm
	127,13	122,71	121,86	113,73

Fonte: Próprio autor

As diferentes combinações de raios internos produzem distribuições de deformação diferentes na amostra e para o caso da combinação de R = 0 mm e r = 0 mm pode-se observar a distribuição dessa deformação plástica equivalente na Figura 19.

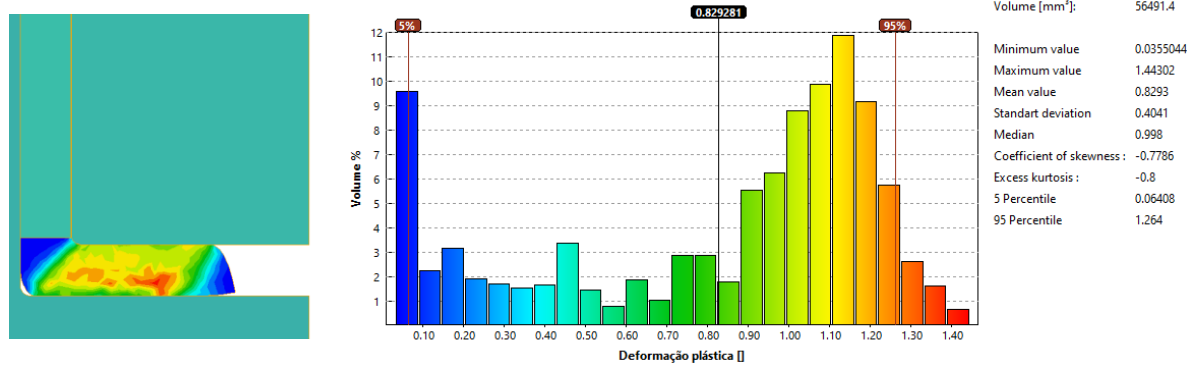
Figura 19 - Distribuição da deformação plástica para R = 0 mm e r = 0 mm



Fonte: Próprio autor

Para o caso da combinação de R = 3 mm e r = 3 mm a deformação plástica equivalente é mostrada na Figura 20.

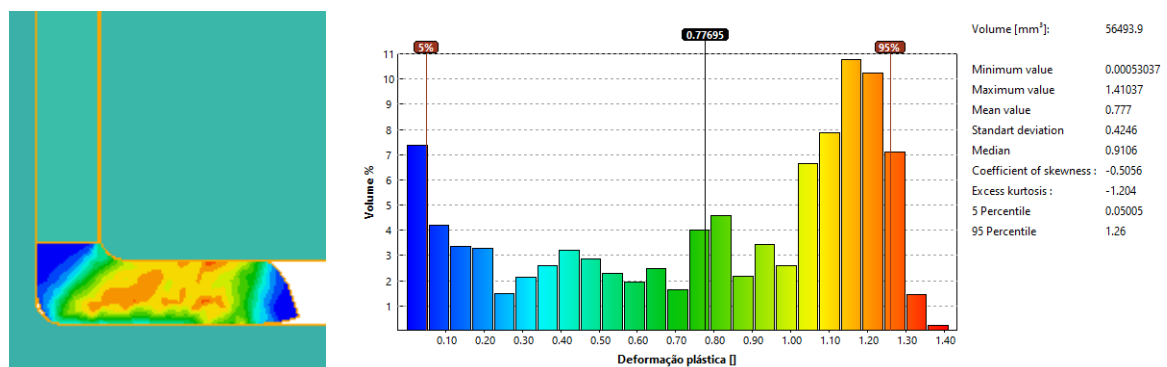
Figura 20 - Distribuição da deformação plástica para R = 3 mm e r = 3 mm



Fonte: Próprio autor

Considerando a combinação de R = 6 mm e r = 6 mm a deformação plástica equivalente é mostrada na Figura 21.

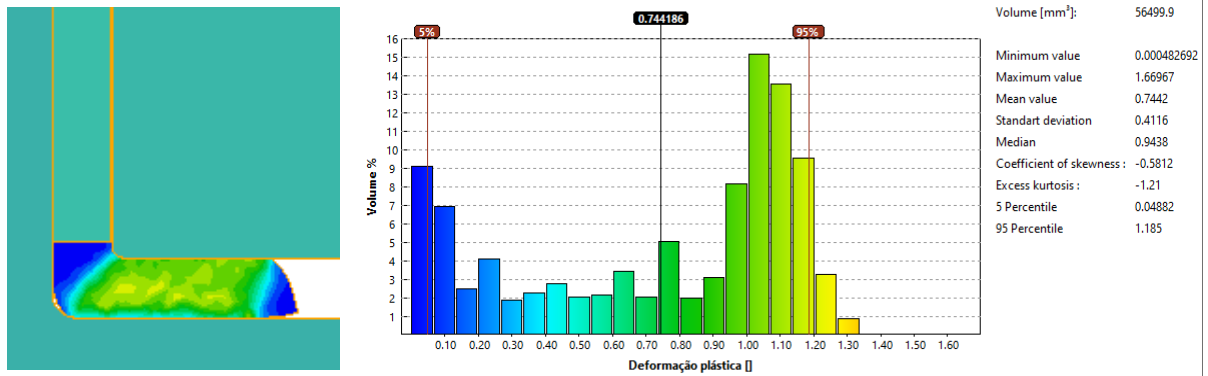
Figura 21 - Distribuição da deformação plástica para R = 6 mm e r = 6 mm



Fonte: Próprio autor

Para o caso de combinação onde R = 6 mm e r = 3 mm temos a deformação plástica equivalente mostrada na Figura 22.

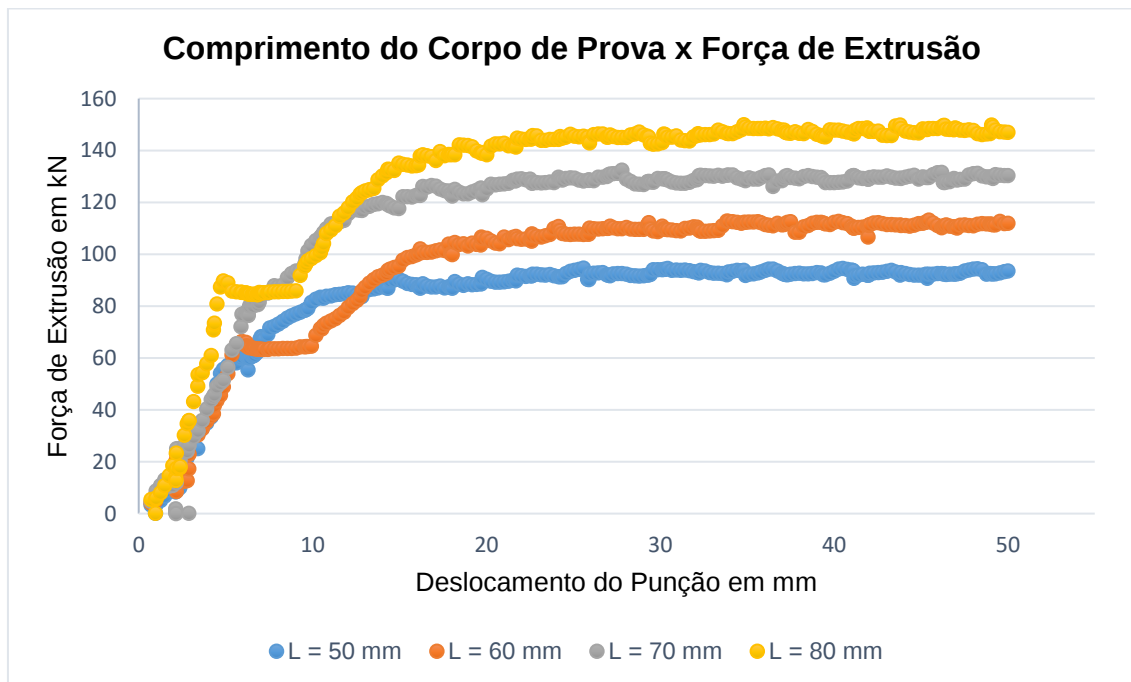
Figura 22 - Distribuição da deformação plástica para R = 6 mm e r = 3 mm



Fonte: Próprio autor

4.2 EFEITO DO COMPRIMENTO DO CORPO DE PROVA NA FORÇA DE EXTRUSÃO

Figura 23 - Efeito do comprimento do corpo de prova na força de extrusão



Fonte: Próprio autor

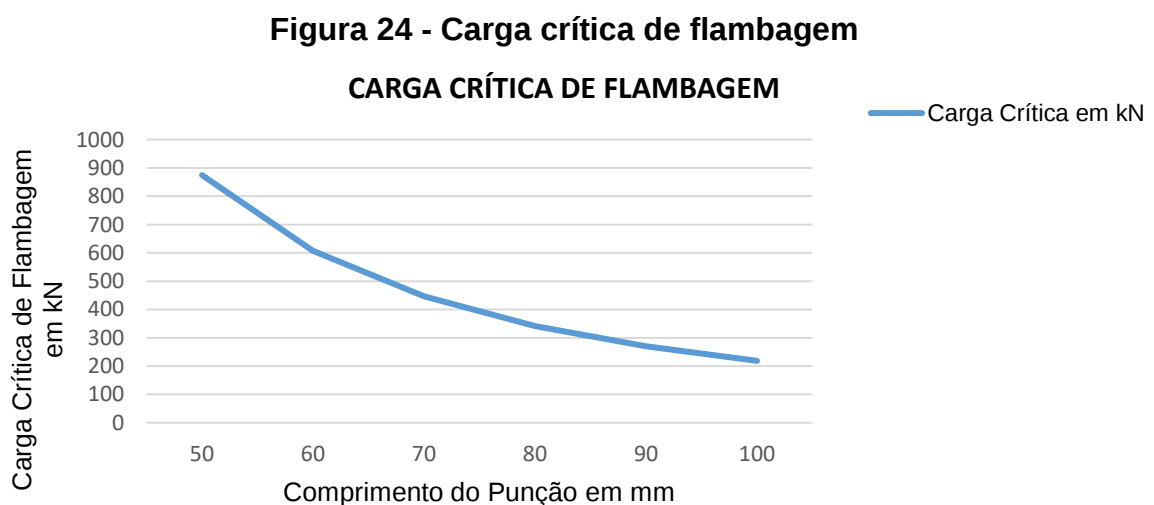
Observa-se que a força de extrusão decresce proporcionalmente à diminuição do comprimento do corpo de prova. Neste caso seria sensato em se pensar na utilização do menor corpo de prova possível para minimizar a força de extrusão, mas considerando que o corpo de prova deve possuir dimensões mínimas que permitam a

realização de ensaios mecânicos e de caracterização metalográfica esta abordagem pode se tornar inviável. Dessa forma, para considerações de projeto, considera-se um corpo de prova de comprimento máximo de 60 mm, cabendo ao realizador da análise avaliar a utilização de corpos de prova de dimensões inferiores.

Observa-se pela Tabela 2 que o menor valor de força extrusão $F_{ext} = 113,73$ kN, ocorre para a combinação de $R = 6$ mm e $r = 3$ mm. Para essa combinação a curva da força de extrusão possui uma inclinação mais suave em comparação com as outras combinações e a distribuição da deformação plástica equivalente é mais uniforme, com baixo desvio padrão e com a mediana da deformação plástica equivalente de 0,94. Por essas razões, essa combinação de raios internos mostra-se adequada para ser considerada como ponto de partida para o design da matriz de deformação severa. A força $F_{ext} = 113,73$ kN será utilizada para o dimensionamento dos demais componentes da matriz.

4.3 DIMENSIONAMENTO DO PUNÇÃO

A Figura 24 mostra um gráfico com a variação da carga crítica de flambagem em função do comprimento do punção considerando como condições de contorno o punção como uma viga engastada em uma das extremidades com a outra livre, uma seção quadrada de aresta 15 mm com diferentes comprimentos variando de 50 mm até 100 mm e o material de construção o aço SAE 4340.



Fonte: Próprio autor

Para um punção com 14,5 mm² de seção transversal e comprimento de 100 mm, construído com aço 4340, a carga crítica de flambagem calculada pela Equação 9 através do algoritmo do Apêndice A é de $P_{cr} = 190,88 \text{ kN}$ e a tensão crítica $\sigma_{cri_flambagem} = 907,85 \text{ MPa}$ obtidas através do algoritmo disponível no Apêndice A.

O fator de segurança para flambagem por ser calculado:

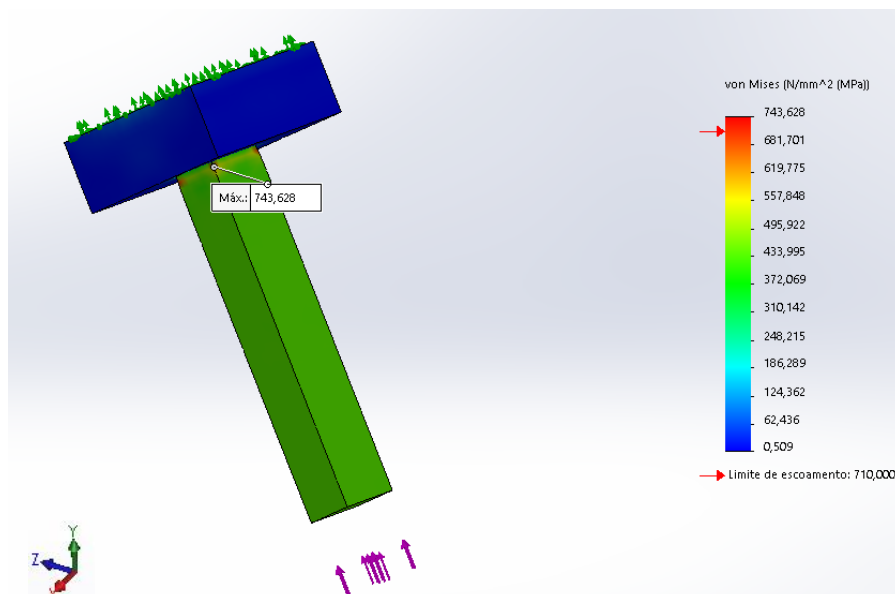
$$N_{fla_punção} = \frac{P_{cr}}{F_{ext}} = \frac{190,88 \text{ kN}}{117,73 \text{ kN}} = 1,62 \quad (16)$$

Para escoamento o fator de segurança é baseado na tensão equivalente de von Mises conforme mostrado na Equação 4 e o coeficiente de segurança para escoamento:

$$N_{esc_punção} = \frac{710 \text{ MPa}}{743,63 \text{ MPa}} = 0,95 \quad (17)$$

Esse fator de segurança não é aceitável pelo critério de falha por escoamento mostrado no item 2.4. É possível observar pela Figura 25 que o valor máximo da tensão equivalente de von Mises ocorre em um ponto de concentração de tensão. Esse design deve ser refinado para que se possa obter um coeficiente de segurança adequado.

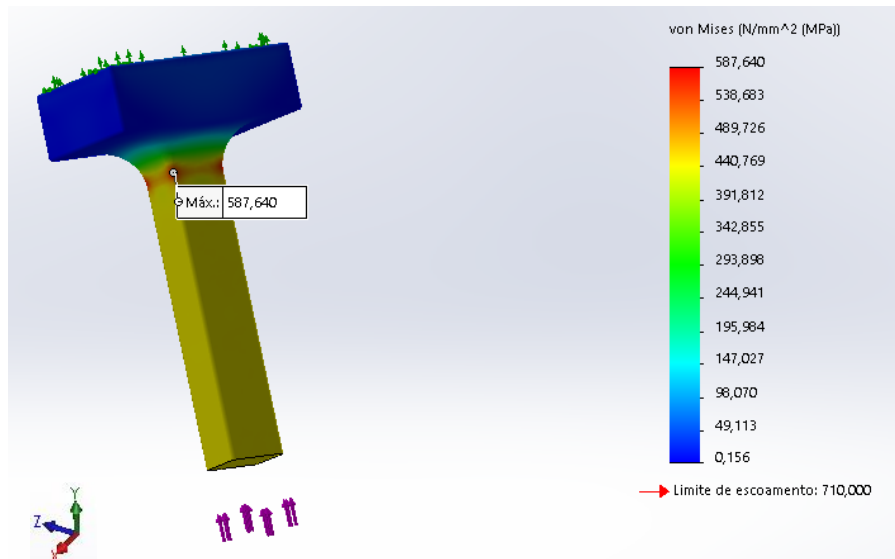
Figura 25 - Tensão máxima no punção sem refinamentos



Fonte: Próprio autor

A aplicação de uma malha mais refinada e de um filete de 1 mm nas arestas e de 15 mm para evitar a descontinuidade brusca entre as diferentes seções, resultou na diminuição da tensão máxima equivalente conforme visto na Figura 26.

Figura 26 - Tensão máxima no punção com design refinado



Fonte: Próprio autor

O novo fator de segurança para escoamento pode ser calculado:

$$N_{esc_punção} = \frac{710 \text{ MPa}}{587,64 \text{ MPa}} = 1,21 \quad (16)$$

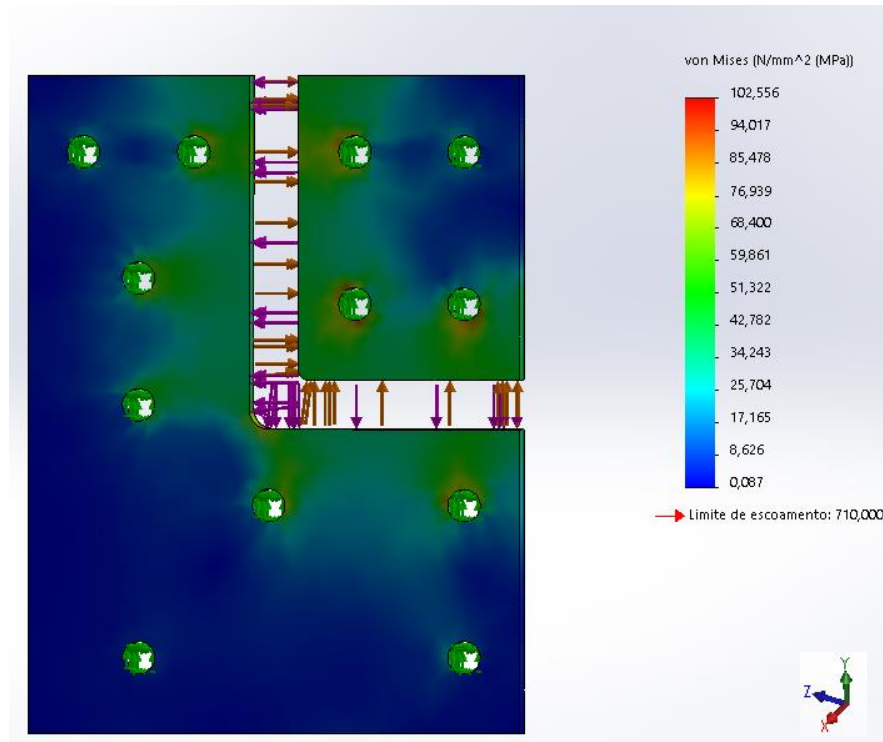
O punção deve ser capaz de suportar a carga exercida pela força máxima de extrusão sem flambagem e sem escoamento. O desenho CAD com as dimensões finais do punção pode ser visto na Apêndice C.

4.4 ANÁLISE DAS TENSÕES NAS PASTILHAS

Considerou-se para a simulação dos esforços nas pastilhas internas da matriz o pior cenário como sendo a aplicação da força de extrusão de $F_{ext} = 113,73 \text{ kN}$ em toda a face interna do canal. As faces internas dos furos dos parafusos foram definidas como geometrias fixas e a malha gerada foi refinada nos pontos críticos para evitar

erros devido à concentração de tensão. O material escolhido foi o aço SAE 4340. A Figura 27 mostra a distribuição de tensão nas pastilhas.

Figura 27 - Tensão máxima no canal de extrusão



Fonte: Próprio autor

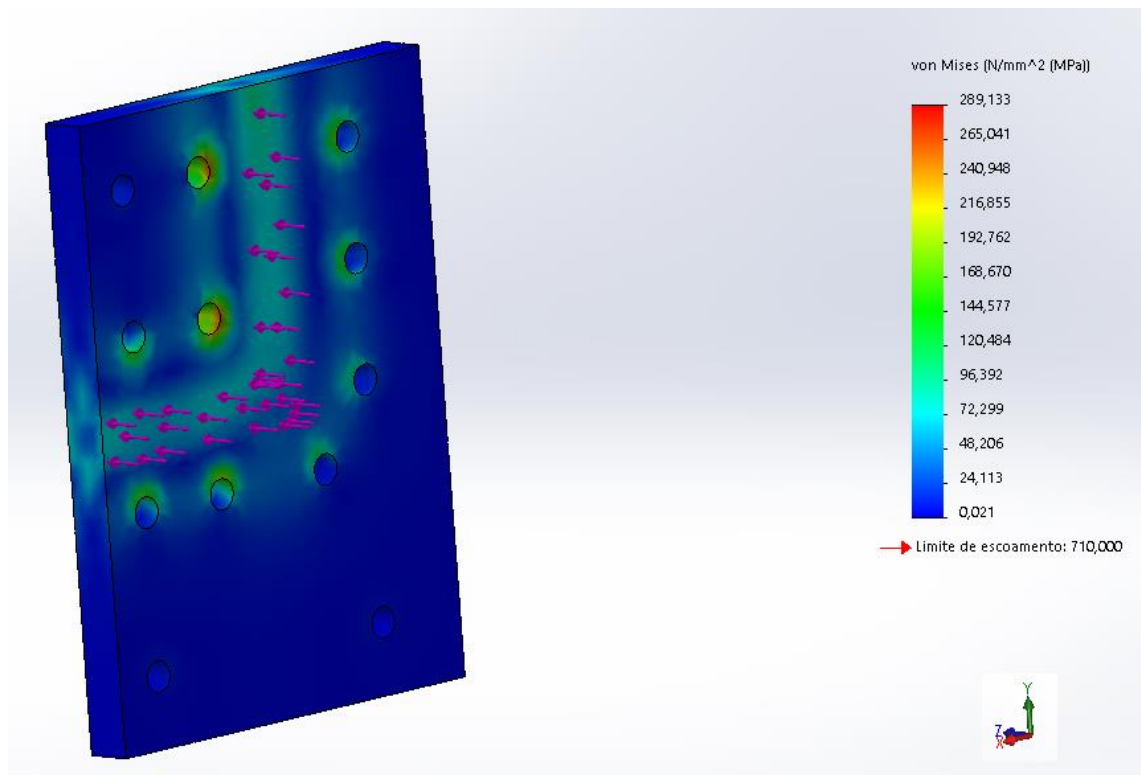
O coeficiente de segurança para escoamento das pastilhas internas para pode ser calculado:

$$N_{esc_pastilhas} = \frac{710 \text{ MPa}}{102,57 \text{ MPa}} = 6,92 \quad (18)$$

4.5 DIMENSIONAMENTO DAS LATERAIS DA MATRIZ

A lateral da matriz possui as dimensões de 200 mm de altura por 150 mm de comprimento e 15 mm de largura, o material escolhido para sua construção foi o aço 4340. A carga de projeto $F_{ext} = 113,73 \text{ kN}$ foi aplicada apenas no caminho do canal de extrusão. A distribuição da tensão provocada por esse carregamento pode ser vista na Figura 28.

Figura 28 - Tensão máxima na lateral da matriz



Fonte: Próprio autor

O fator de segurança para falha por escoamento:

$$N_{esc_lateral} = \frac{710 \text{ MPa}}{289,13 \text{ MPa}} = 2,45 \quad (19)$$

4.6 DIMENSIONAMENTO DA JUNTA PARAFUSADA

A Tabela 3 mostra os valores de pré-carga para parafusos de diferentes classes e diâmetros, calculados através da Equação 15. As tensões de prova em função da classe do parafuso podem ser vistas no Anexo B.

Tabela 3 - Forças de pré-carga para parafusos de diferentes classes

Classe do Parafuso	Tensão de prova (MPa)	Diâmetro (mm)	Área de tração passo grosso (mm ²)	Área de tração passo fino (mm ²)	Pré-Carga 1 (kN)	Pré-Carga 2 (kN)
9,8	650	10	58	61,2	33930,00	35802,00
		12	84,3	92,1	49315,50	53878,50
		14	115	125	67275,00	73125,00
10,9	830	10	58	61,2	43326	45716,4
		12	84,3	92,1	62972,1	68798,7
		14	115	125	85905	93375
12,9	970	10	58	61,2	50634	53427,6
		12	84,3	92,1	73593,9	80403,3
		14	115	125	100395	109125

Fonte: Próprio autor

Observa-se que quanto maior a classe e o diâmetro, maior a pré-carga suportada pelo parafuso. Note que o valor de pré-carga calculado acima faz referência ao valor ideal para ser aplicado no parafuso.

Considerando os parafusos classe 10,9 M10, utilizados em Santos et al. (2014), a força de pré-carga utilizada deve ser de $F_{pre_carga} = 45,72$ kN para rosca de passo fino. Essa força de pré-carga foi usada na simulação para a obtenção das tensões nos parafusos e na matriz ao ser aplicada a $F_{ext} = 113,7$ kN, que atua no sentido de tração da junta.

Considerando alguma dificuldade na aplicação da pré-carga ideal, diferentes valores de pré-carga para os parafusos classe 10,9 M10 foram simulados variando de 100%, 50% e 25 % da pré-carga ideal. Os diferentes valores podem ser vistos na Tabela 4.

Tabela 4 - Diferentes percentuais de pré-carga aplicada

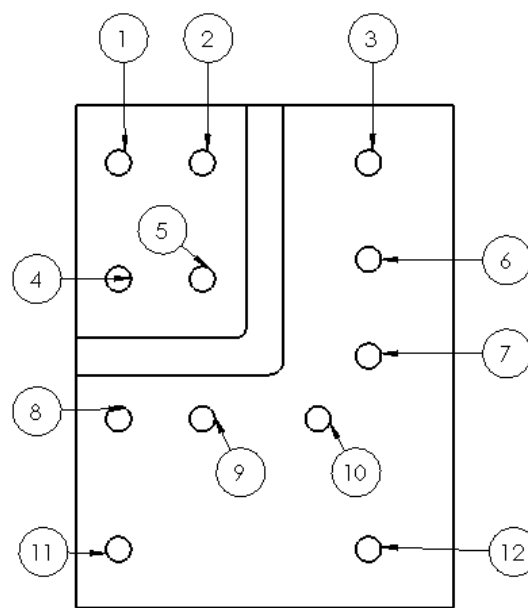
Pré-Carga	100 %	75 %	50 %
Valor	45716,4 N	34287,3 N	22858,2 N

Fonte: Próprio autor

Os contatos entre os componentes da montagem foram definidos como tipo *frictional* com coeficiente de atrito de $\mu = 0,2$ de acordo com a faixa definida para contato entre interface aço-aço em condição de superfície seca e deslizamento estático mostrado em Collins (2006).

A Figura 29 mostra a numeração dos parafusos distribuídos na matriz.

Figura 29 - Disposição dos parafusos

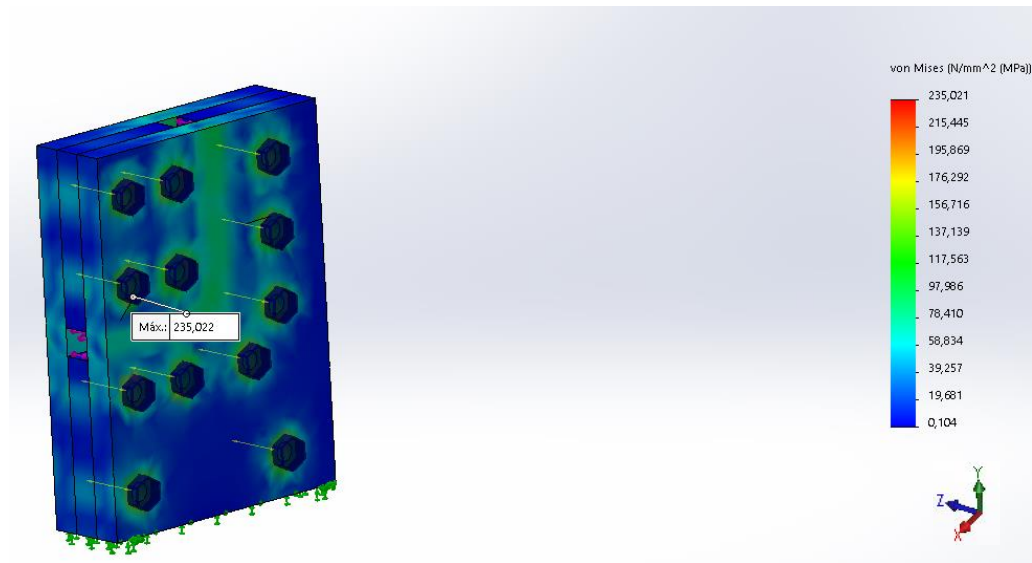


Fonte: Próprio autor

4.6.1 Análise de tensões na junta parafusada

A simulação foi realizada considerando a aplicação de 100% da força de pré-carga $F_{pre} = 45,72$ kN. Foi aplicada uma malha fina com refinamento nos pontos críticos para evitar o problema de concentração de tensão. A tensão máxima foi obtida no parafuso 4, sendo esse o parafuso mais solicitado. A distribuição da tensão pode ser vista na Figura 30.

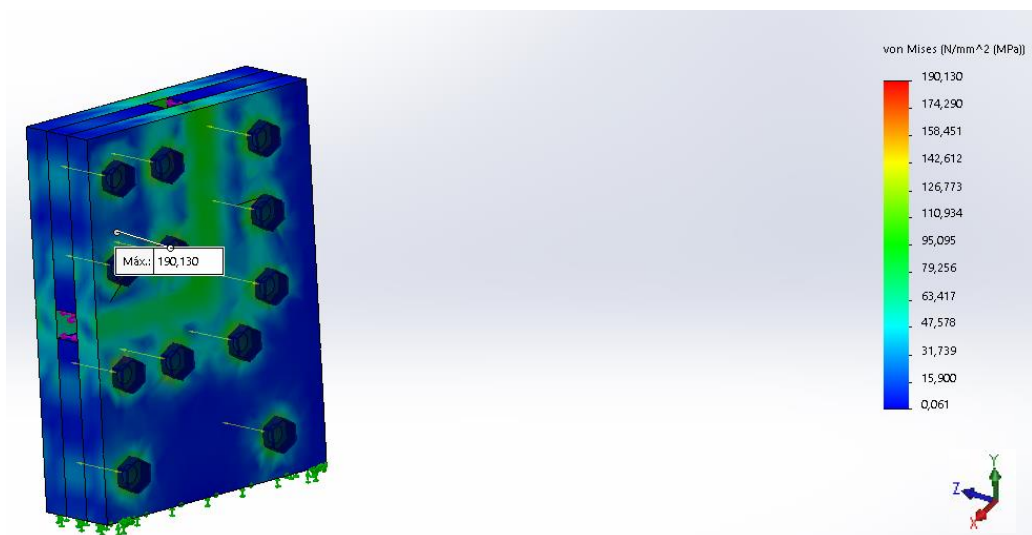
Figura 30 - Tensão máxima na junta parafusada com 100% de pré-carga



Fonte: Próprio autor

Considerando a aplicação de 75% da força de pré-carga $F_{pre} = 34,29$ kN, temos a distribuição de tensão mostrada na Figura 31.

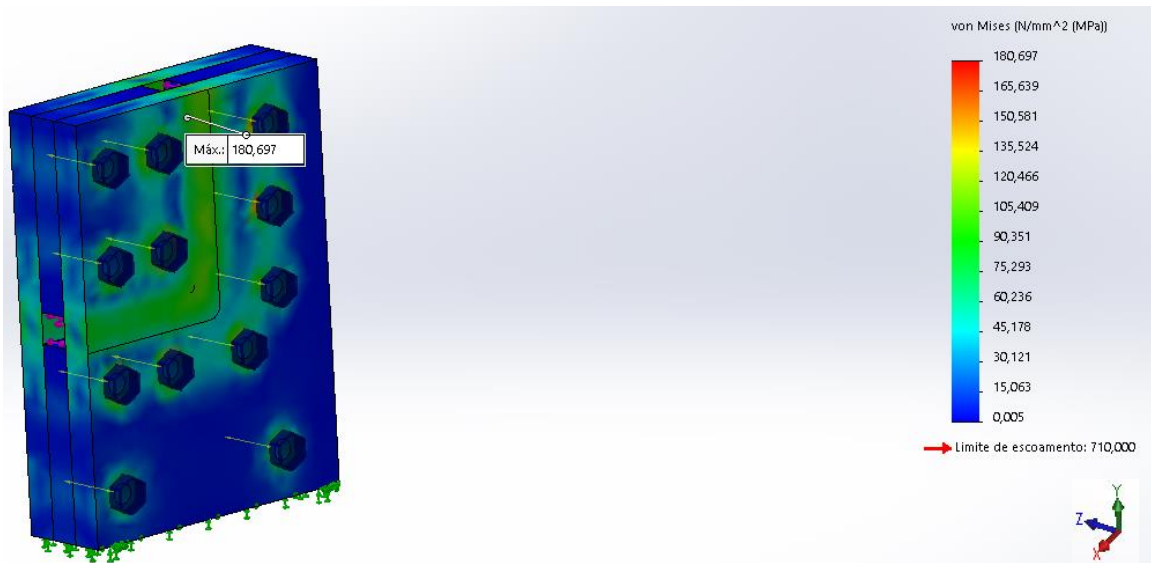
Figura 31 - Tensão máxima na junta parafusada com 75% de pré-carga



Fonte: Próprio autor

Para a aplicação de 50% da força de pré-carga $F_{pre} = 22,86$ kN a distribuição de tensão pode ser vista na Figura 32.

Figura 32 - Tensão máxima na junta parafusada com 50% de pré-carga



Fonte: Próprio autor

Observa-se que a máxima tensão equivalente de von Mises ocorre quando a junta está carregada com a máxima pré-carga. Considerando que a força de abertura da junta encontra-se dividida entre todos os parafusos, espera-se que mesmo em condições de pré-carga inferiores a 100% devem permitir que a junta se mantenha íntegra.

4.6.2 Força axial nos parafusos

A Tabela 5 expressa as forças atuantes em cada parafuso obtidas após as simulações, considerando 100%, 75% e 50% de pré-carga, permitindo avaliar em quais parafusos ocorrem os maiores carregamentos e se as considerações feitas relativas ao material e a geometria desses parafusos foram adequadas.

Tabela 5 - Tensão máxima na junta parafusada

	100% de Pré-Carga	75% de Pré-Carga	50 % de Pré-Carga
	Força axial (N)	Força axial (N)	Força axial (N)
Parafuso 1	46923	36470	22580
Parafuso 2	45883	34768	27542
Parafuso 3	45797	34488	24456
Parafuso 4	47563	37651	23626
Parafuso 5	45804	34601	29634
Parafuso 6	45668	34301	23956
Parafuso 7	46304	35327	23111
Parafuso 8	46075	34885	25305
Parafuso 9	45721	34293	24361
Parafuso 10	45720	34291	22819
Parafuso 11	45721	34383	22817
Parafuso 12	45630	34162	23299

Fonte: Próprio autor

4.6.3 Avaliação de cenários críticos no projeto da junta parafusada

Observa-se pela Tabela 5, que os parafusos onde ocorrem os maiores esforços são os parafusos 4, para pré-carga de 100% e 75% e o parafuso 5, para pré-carga de 50%.

Maiores valores de pré-carga implicam em maiores tensões nos elementos, podem ocasionar falha por escoamento, nesse caso o cenário mais crítico seria a falha por escoamento no parafuso mais carregado e a falha por abertura da junta pela aplicação de um baixo valor de pré-carga.

4.6.3.1 Falha por escoamento no parafuso mais fortemente carregado

Para o parafuso 4 a força axial obtida por simulação foi de 47563 N e a tensão axial de tração pode ser obtida pela Equação 11, de forma que:

$$\sigma_t = \frac{F_{pre}}{A_t} = \frac{47563 \text{ N}}{61,2 \text{ mm}^2} = 777,17 \text{ MPa} \quad 20$$

Para a tensão $\sigma_t = 777,17 \text{ MPa}$, o coeficiente de segurança contra escoamento pode ser calculado:

$$N_{esc_parafuso} = \frac{\sigma_{prova}}{\sigma_t} = \frac{830 \text{ MPa}}{777,17 \text{ MPa}} = 1,07 \quad 21$$

Observa-se que para esse cenário, o coeficiente de segurança é muito próximo do limite de 1, de forma que uma alternativa para aumentar esse fator de segurança pode ser adequada. Como pode-se observar pela Figura 34, a abertura esperada com a aplicação de apenas 50% de pré-carga é mais do que suficiente para garantir a integridade da junta, de forma que não se faz necessária a aplicação da pré-carga máxima, dessa forma, considerando-se a pré-carga de 50% o fator de segurança para o parafuso mais solicitado:

$$\sigma_t = \frac{F_{pre}}{A_t} = \frac{29634 \text{ N}}{61,2 \text{ mm}^2} = 484,22 \text{ MPa} \quad 22$$

Lembrando que para 50% de pré-carga o parafuso mais carregado é o parafuso 5, de forma que o coeficiente de segurança seria:

$$N_{esc_parafuso} = \frac{\sigma_{prova}}{\sigma_t} = \frac{830 \text{ MPa}}{484,22 \text{ MPa}} = 1,67 \quad 23$$

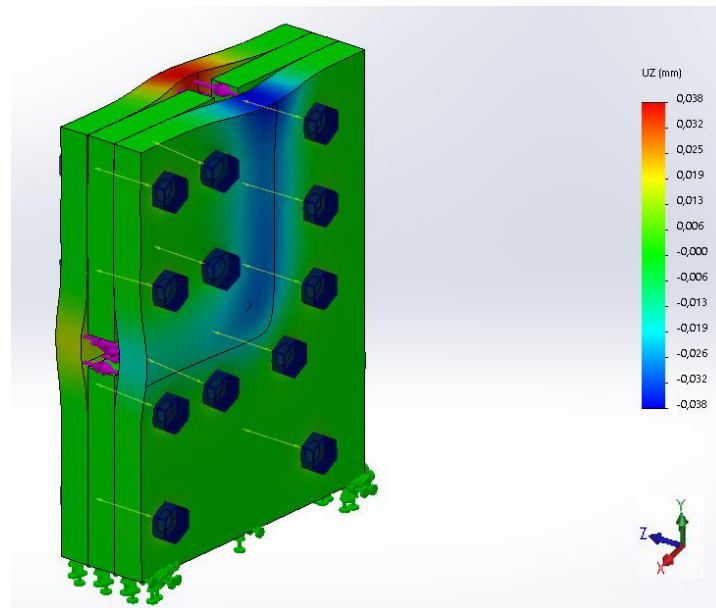
Um coeficiente de segurança mais adequado e que não compromete a integridade do fechamento da junta parafusada o que permite operar com segurança com valores de 50 % da pré-carga máxima.

4.6.3.2 Falha por abertura da junta parafusada

Para esse caso, podemos obter o valor do deslocamento ao longo do eixo axial dos parafusos através da simulação. Esse valor deve ser zero ou muito próximo de zero para garantir que não haverá nenhuma abertura da junta.

O valor do deslocamento para o cenário de 50% de força de pré-carga pode ser visto na Figura 33.

Figura 33 - Deslocamento máximo com escala de visualização de 200 vezes



Fonte: Próprio autor

O valor máximo para deslocamento esperado é de 0,038 mm esse valor de abertura é baixo mesmo para uma pré-carga de 50% o que reforça a segurança do projeto da junta parafusada.

4.7 DIMENSIONAMENTO DA BASE

A matriz pesa 9,95 kg e considerando a gravidade como 9,81 m/s² e seu peso de 97,61 N a força que atuará na base será:

$$F_{base} = F_{ext} + F_{p_matriz} \quad 24$$

Onde F_{base} é a força atuante na base, F_{ext} é a força de extrusão e F_{p_matriz} é a força devido ao peso da matriz.

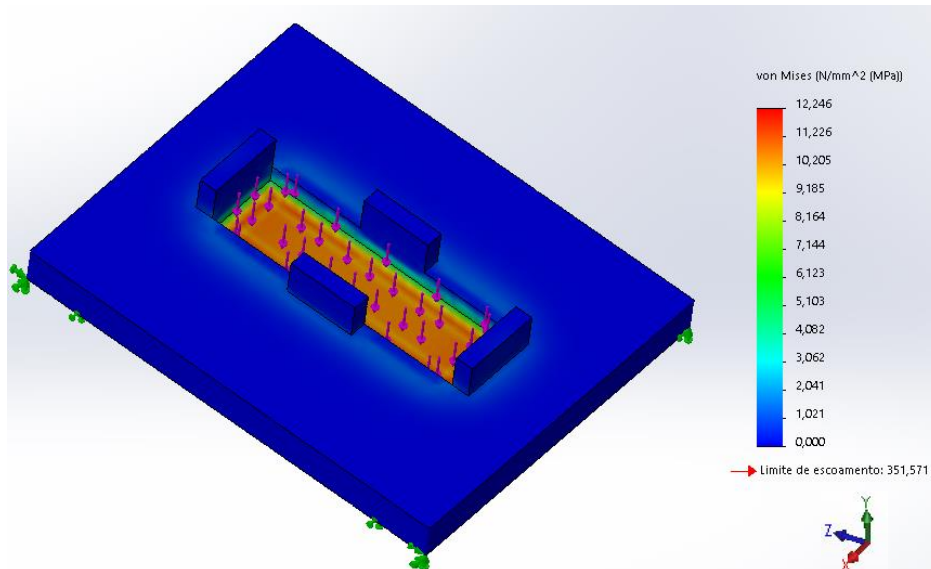
De forma que:

$$F_{base} = 113730 \text{ N} + 97,61 \text{ N} = 113827,61 \text{ N} \quad 25$$

A F_{base} foi aplicada por toda a área em contato da matriz com a base, de forma que a simulação foi realizada com essa modelagem. Considerando que a base não

sofrerá um carregamento crítico, foi escolhido o aço SAE 1020 para sua confecção. A distribuição da tensão para a primeira iteração pode ser vista na Figura 34.

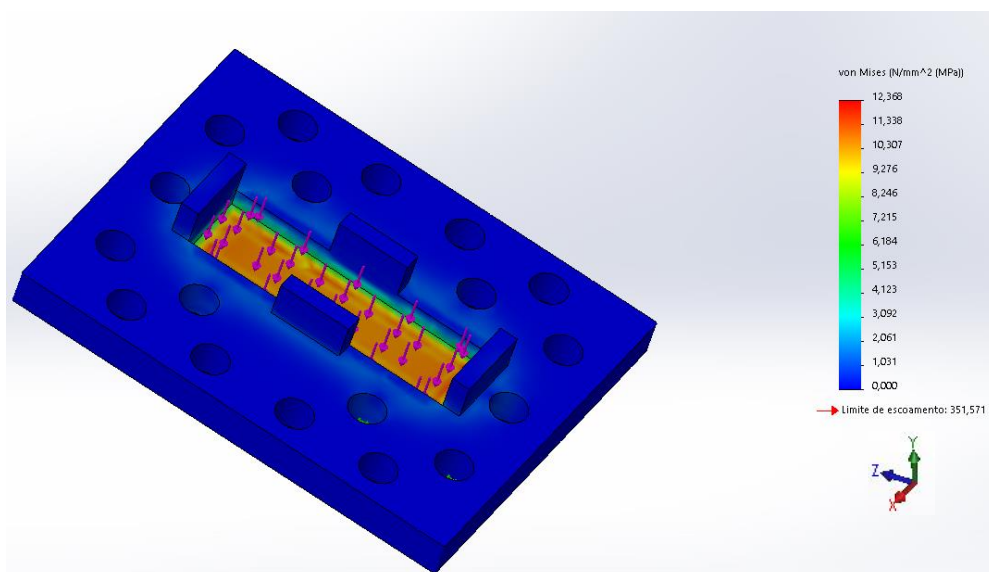
Figura 34 - Distribuição de tensão sobre a base



Fonte: Próprio autor

O fator de segurança mínima para essa primeira iteração é de 28, o que mostra que a base é superdimensionada. Para reduzir o peso, elaborou-se um segundo design. A distribuição de tensão para a segunda iteração pode ser vista na Figura 35.

Figura 35 - Distribuição de tensão sobre a base refinada



Fonte: Próprio autor

Com a segunda iteração conseguiu-se reduzir a massa da base de 9,95 kg para 6,80 kg, uma redução de 32% no peso da base.

O coeficiente de segurança para escoamento da base:

$$N_{esc_base} = \frac{351,57 \text{ MPa}}{12,368 \text{ MPa}} = 28,43 \quad 26$$

4.8 FATORES DE SEGURANÇA

Os fatores de segurança obtidos para os componentes podem ser vistos na Tabela 6.

Tabela 6 - Coeficientes de segurança e modos de falha

FATORES DE SEGURANÇA		
Componente	Modo de falha	Coeficiente de Segurança
Punção	Escoamento	1,21
	Flambagem	2,05
Pastilhas internas	Escoamento	6,92
Laterais	Escoamento	2,45
Parafusos	Escoamento	1,67
Base	Escoamento	26,77

Fonte: Próprio autor

Observa-se que o menor valor de coeficiente de segurança é a falha por escoamento no punção, sendo esse o componente crítico de operação para todo o conjunto.

4.9 PARÂMETROS OPERACIONAIS

Para a correta operação da matriz e a realização segura do ensaio de deformação severa por ECAP deve-se manter os seguintes parâmetros como definidos na Tabela 7.

Tabela 7 - Parâmetros operacionais

PROCESSO DE EXTRUSÃO	
Velocidade de ensaio	De 0,01 até 10 mm/s
Lubrificante indicado	Graxa de Bissulfeto de Molibdênio (MoS ₂)
Temperatura de ensaio	Temperatura ambiente (24°)
Material do Corpo de Prova	Apenas Alumínio
CARGAS APLICADAS	
Carga máxima	136476 N
Carga operacional	113730 N
Pré-Carga máxima Parafusos	45716,4 N
Pré-Carga indicada	22858,2 N

Fonte: Próprio autor

4.10 SELEÇÃO DE PARAFUSOS

O parafuso selecionado deve seguir os seguintes parâmetros:

Tabela 8 - Parâmetros do parafuso selecionado

Tipo de cabeça	Sextavada
Classe	10,9
Diâmetro	10 mm
Comprimento	60 mm
Comprimento da rosca	26 mm
Altura da cabeça	6,56 mm

Fonte: Próprio autor

4.11 LISTA DE MATERIAIS POR COMPONENTES

A Tabela 9 abaixo mostra os materiais a serem utilizados em cada componente.

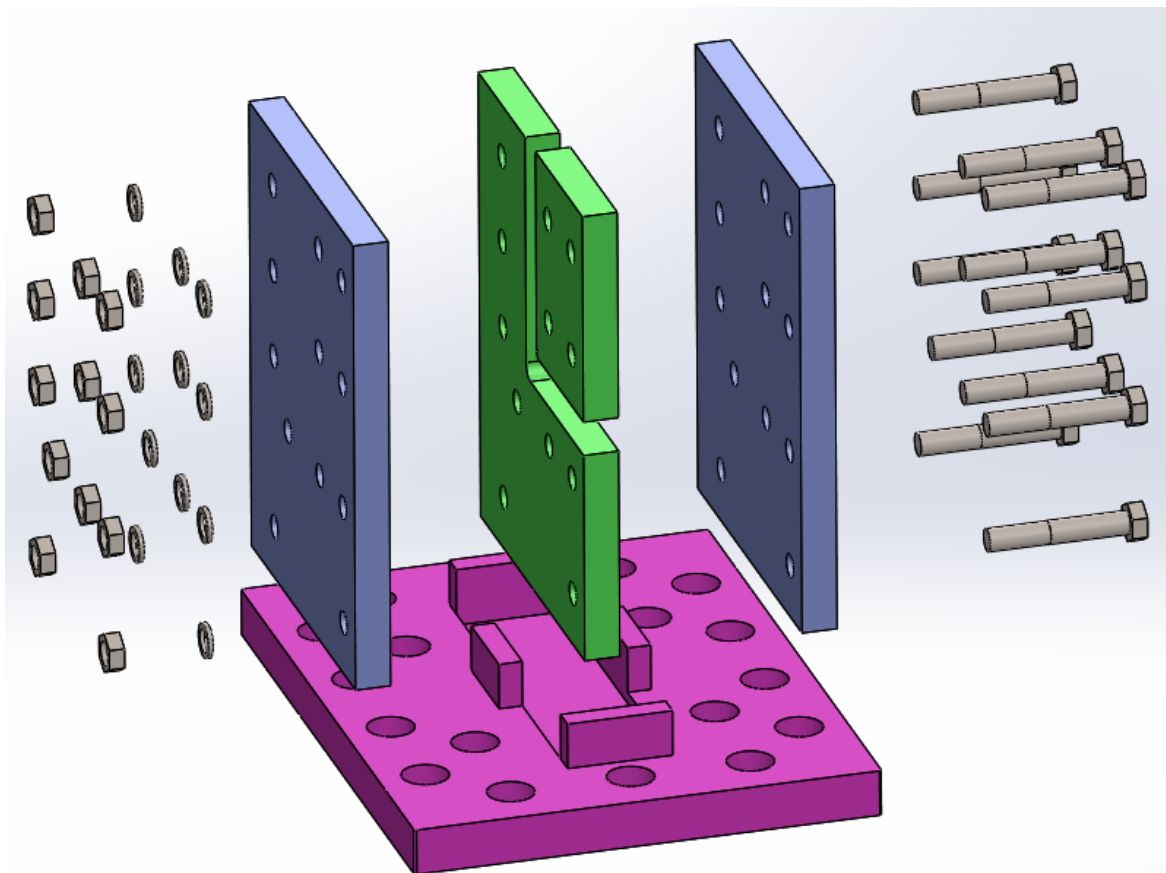
Tabela 9 – Lista de materiais de construção

Componente	Material de construção
Punção:	Aço SAE 4340
Pastilha inferior:	Aço SAE 4340
Pastilha superior:	Aço SAE 4340
Laterais:	Aço SAE 4340
Base:	Aço SAE 1020

Fonte: próprio autor

4.11 VISTA EXPLODIDA DO CONJUNTO DE MONTAGEM

A Figura 36 mostra uma vista explodida de todos os componentes da matriz de deformação severa.

Figura 36 - Vista explodida da matriz de deformação severa proposta

Fonte: Próprio autor

4.12 DESENHOS CAD PARA CONSTRUÇÃO E MONTAGEM DA MATRIZ DE DEFORMAÇÃO SEVERA.

Os desenhos foram elaborados levando-se em conta os dimensionamentos com os melhores coeficientes de segurança. Parafusos, porcas e arruelas são padronizados então os desenhos desses componentes foram ignorados. Os desenhos podem ser vistos na seção de Apêndices.

5.0 CONCLUSÕES

A carga máxima a não exceder foi calculada com base no menor coeficiente de segurança do conjunto. Uma carga maior que 136476 N deve produzir como consequência a falha por escoamento no punção. Do ponto de vista de projeto, a quebra do punção serve como um fusível mecânico, evitando que outras partes da matriz sejam danificadas, principalmente as laterais e as pastilhas internas.

As pastilhas podem ser substituídas por outras que formem diferentes ângulos, desde que mantenham as dimensões projetadas e que possuam ângulos de extrusão maiores que 90 graus, mas isso resultará numa menor deformação equivalente por passe.

Não é previsto qualquer afastamento da junta durante a operação se resguardada a recomendação de pré-carga mínima de 22858,2 N. É indicado que seja utilizado um torquímetro para atestar essa pré-carga durante o fechamento da matriz.

Considerando o aspecto de segurança para a operação durante o processo de extrusão, a quebra do punção pode gerar o lançamento de partes metálicas no operador, indicando-se o uso de óculos de proteção individual ao se utilizar a matriz.

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se verificar a utilização de um mecanismo de contrapressão na saída do canal de extrusão e a adição de extensômetros para medir a tensão de extrusão em situações onde não seja possível a utilização de uma máquina de ensaios universal.

REFERÊNCIAS

- AGOSTINHO, O. L.; RODRIGUES, A. C. DOS S.; LIRANI, J. **Tolerâncias, Ajustes, Desvios e Análise de Dimensões**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1977.
- ARAÚJO, J. S. DE. **Prensagem Angular De Ligas De Alumínio Solidificadas**. Marabá: Universidade Federal do Pará, 2009.
- AZEVEDO, Á. F. M. **Método Dos Elementos Finitos**. 1. ed. Porto: Universidade do Porto, 2003.
- BALANCIN, O. **Fundamentos de Simulação Numérica**. Disponível em: <<http://www.dema.ufscar.br/termomec/index.php/simulacao-numerica/fundamentos-de-simulacao-numerica>>. Acesso em: 20 out. 2019.
- BEER, F. P. **Mecânica dos Materiais**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2015.
- BERBON, P. B. et al. Influence of Stacking Fault Energy on Microstructural Development in Equal-channel Angular Pressing. **Journal of Materials Research**, v. 14, n. 10, p. 4044–4050, 1999.
- BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. **Elementos de Máquinas de Shigley. Projeto de Engenharia Mecânica**. 8. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.
- CERVO, A. L.; BERVIAN, P. A.; DA SILVA, R. **Metodologia Científica**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2007.
- COLLINS, J. A. **Projeto Mecânico de Elementos de Máquinas: Uma Perspectiva de Prevenção de Falhas**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2006.
- COSTA, A. L. DE M. **Processos de Conformação de Metais por Deformação Plástica Severa: Desafios e Oportunidades**. 1º Seminário Baiano de Tecnologias de Fabricação. Salvador, 2010.
- COSTA, M. S. M. **Método Dos Elementos Finitos Aplicado a Engenharia Civil**. Itapeva, 2014.
- DAYAL, A.; HANS RAJ, K.; SHARMA, R. S. ECAP Die Design for Minimising Corner Gap. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 1, p. 1686–1690, 2018.
- FARIA, A. R.; REGO, R. **Escoamento Plástico**. Instituto Tecnológico de

Aeronáutica.São José dos Campos, 2018.

FILHO, A. A. **Elementos Finitos: A base da Tecnologia CAE.** 6. ed. São Paulo: Érica, 2009.

FILHO, A. DE A. M. et al. Severe plastic deformation by equal channel angular pressing: Product quality and operational details. **Materials Research**, v. 14, n. 3, p. 335–339, 2011.

JUNIOR, G. S. **Estudo da Influência do Processo ECAP (Equal Channel Angular Pressing) nas Propriedades Mecânicas e Características Microestruturais do Aço SAE 1020.**Guaratinguetá, 2017.

MELCONIAN, M. V. **Modelagem Numérica e Computacional com Similitude e Elementos Finitos: Desenvolvimento de Equação Preditiva para o Cálculo da Força de Retenção em Freios de Estampagem.** 1. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2014.

MIRLISENNA, G. **Método dos Elementos Finitos: o que é?** Disponível em: <<https://www.esss.co/blog/metodo-dos-elementos-finitos-o-que-e/>>. Acesso em: 21 out. 2019.

NIEMANN, G. **Elementos de Máquinas.** 6. ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1971.

NORELEM. **Folha de Dados Parafusos Sextavados DIN 933.** Disponível em: <https://www.norelem.com/xs_db/DOKUMENT_DB/www/NORELEM/DataSheet/pt/07/07171_Datasheet_18386_Parafusos_sextavados_DIN_933--pt.pdf>. Acesso em: 8 abr. 2020.

NORTON, R. L. **Projeto de Máquinas: Uma Abordagem Integrada.** 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2004.

OLIVEIRA, L. F. DE. **Aplicação de Extrusão Angular em Canal em Materiais Metálicos.**Rio de Janeiro, 2004.

PEREIRA, A. M. **Deformação Plástica Severa Por ECAP de Ligas Com Memória de Forma.**Lisboa, 2013.

QFORM. **QForm Software.** Disponível em: <<https://www.qform3d.com/products/qform>>. Acesso em: 5 abr. 2020.

QUARTIERMEISTER, M. V. **Estudo Da Resistência À Corrosão De Ligas De Alumínio Com Grãos Ultrafinos Obtidos Por Deformação Plástica Severa Através Do Processo Ecap.**São Carlos, 2017.

REDA, R. Equal Channel Angular Pressing (ECAP): Die Design, Processing Handicaps and Mechanical Characterization. **Evolutions in Mechanical Engineering**, v. 1, n. May, 2019.

SANTOS, A. P. et al. **Desenvolvimento de Uma Matriz Para Deformação Plástica Severa Via Método ECAP.**Cuiabá.21º CBECIMAT, , 2014.

SANTOS, L. G. A. DOS et al. **Ecap: Otimização do Processo Via Simulação Numérica.**São Luís.CONEM, , 2012.

SILVEIRA, Z. DE C. **Seleção e Pré-Dimensionamento de Juntas Mecânicas.**São Carlos.Departamento de Engenharia Mecânica - SEM, , 2013.

SORDI, V. L. et al. Experimental and FEM studies of the relationships between equalchannel angular pressing die design, strain distribution and pressing forces. **Advanced Materials Research**, v. 922, n. May, p. 507–512, 2014.

SPRINGER, P. **Simulação Computacional, Projeto, Construção e Análise do Desempenho de Uma Matriz Para Extrusão em Canal Angular Dedicada ao Processamento de Chapas.**São Carlos, 2012.

TEIXEIRA-DIAS, F. et al. **Método dos Elementos Finitos. Técnicas de Simulação Numérica em Engenharia.** 2. ed. São Paulo: ETEP, 2018.

TEIXEIRA, A. **Avaliação do Processamento por Extrusão em Canal Angular na Consolidação de Pó de Alumínio Puro e Com Adição de Nanotubos de Carbono.**Criciúma, 2015.

VALIEV, R. Z.; LANGDON, T. G. Principles of equal-channel angular pressing as a processing tool for grain refinement. **Progress in Materials Science**, v. 51, n. 7, p. 881–981, 2006.

VANIPAR. **Conheça os Principais Tipos e Usos de Porcas, Parafusos e Arruelas.** Disponível em: <<http://www.vanipar.com.br/index.php/blog/item/27-conheca-os-principais-tipos-e-usos-de-porcas-parafusos-e-arruelas>>. Acesso em: 19 maio. 2020.

WHITTAKER, D. **Equal Channel Angular Pressing – A Cost-Effective Consolidation Route For Titanium Alloy Semi-Products**. Disponível em: <<https://www.pm-review.com/equal-channel-angular-pressing-a-cost-effective-consolidation-route-for-titanium-alloy-semi-products/>>. Acesso em: 23 mar. 2020.

WILLIAM D. CALLISTER, J.; DAVID G. RETHWISH. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**. 8. ed. São Paulo: LTV, 2008.

APÊNDICE A - Algoritmo para obtenção da carga crítica de flambagem

% Dimensionamento do Punção - ECAP

clc; clear all; close all;

% Dados de entrada

E=210*(10^9); % Coeficiente de elasticidade do material do punção em GPa
b=15*(10^-3); % Medida da base do retângulo em mm
h=15*(10^-3); % Medida da altura do retângulo em mm
L=95*(10^-3); % Comprimento útil do punção em mm

%-----

% Momentos de inércia

I=0; % Inicializador da variável
Ix=(b*(h^3))/12;
Iy=((b^3)*h)/12;

if Ix <= Iy

 I=Ix;

end

if Iy <= Ix

 I=Iy;

end

%fprintf('Momento de inércia da seção é: %.4e m^4\n', I);

%-----

% Carga crítica

Pcr=((pi^2)*E*I) / ((2*L)^2);

%-----

% Tensão crítica

A=(b*h);
sigma_cr=Pcr/A;

%-----

% Dados de saída

disp('Dados de dimensionamento do punção')

disp('-----')

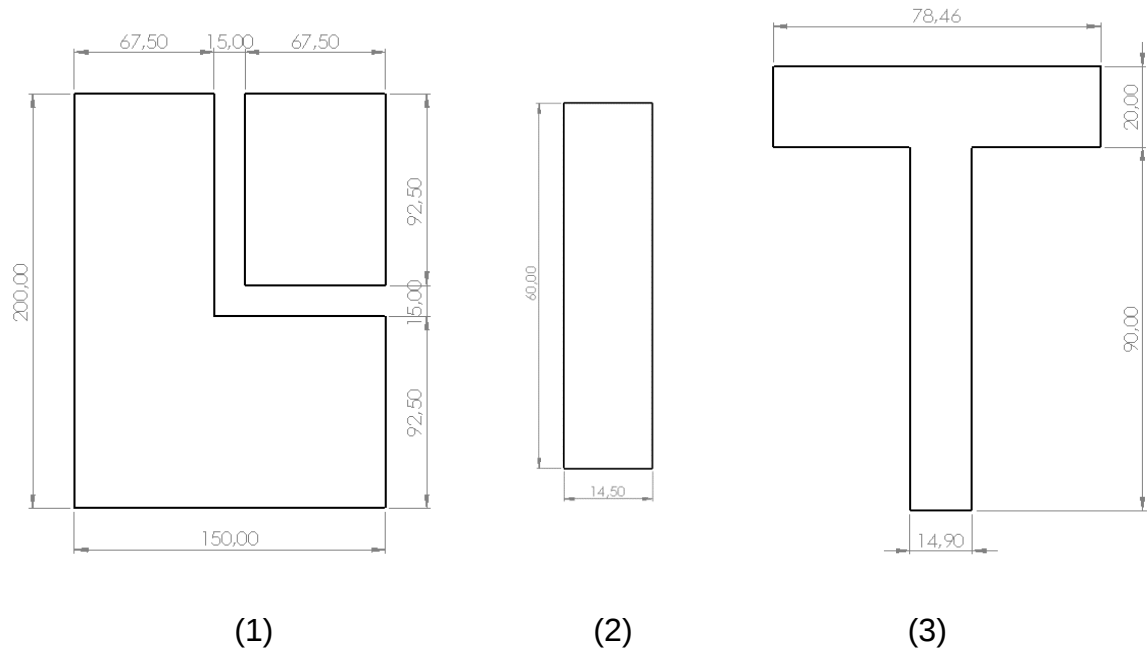
fprintf('A carga crítica de flambagem é: %.4f kN\n', Pcr/(10^3));

disp('-----')

fprintf('A tensão crítica de flambagem é: %.4f MPa\n', sigma_cr/(10^6));

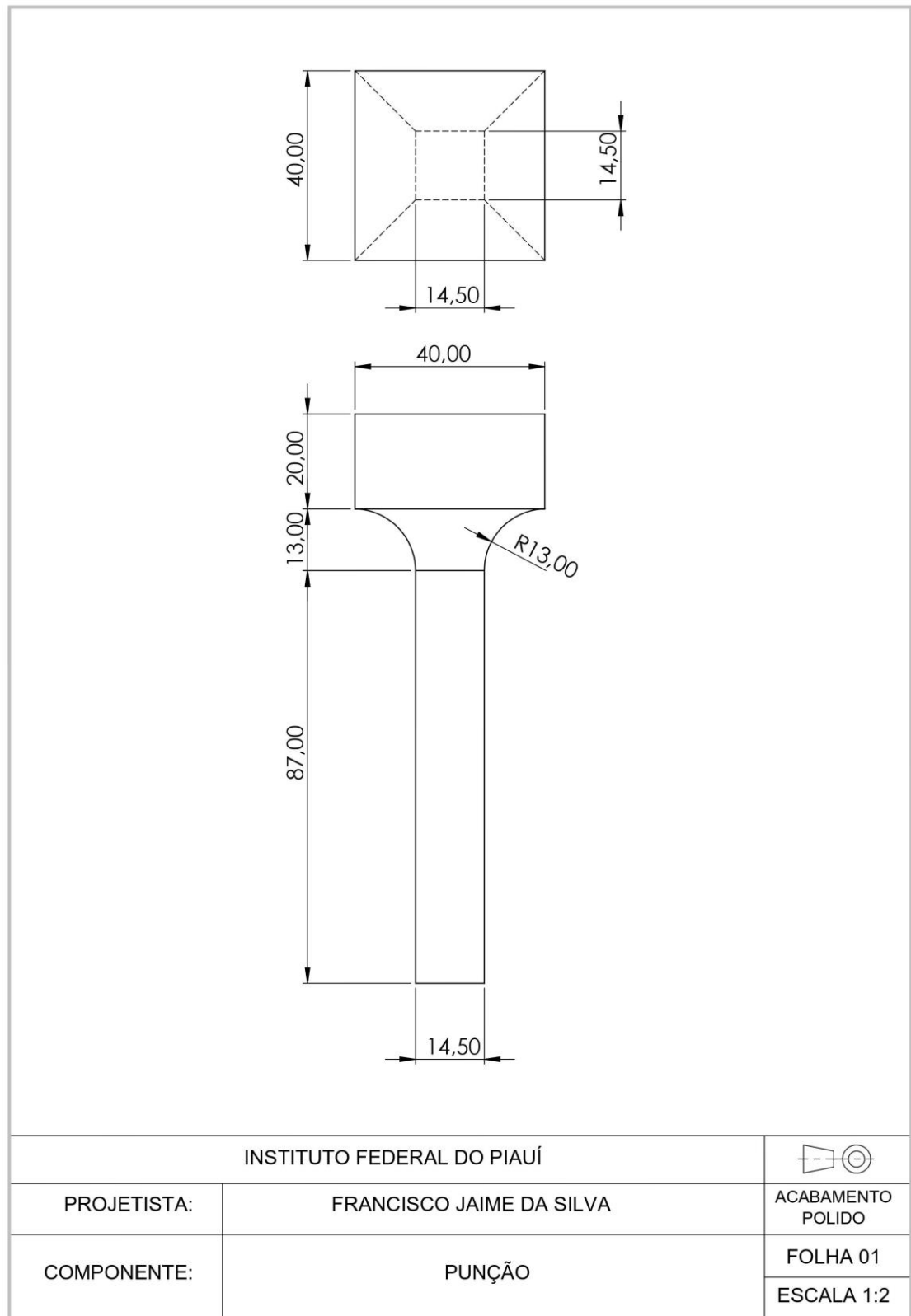
disp('-----')

% Fim do algoritmo-----

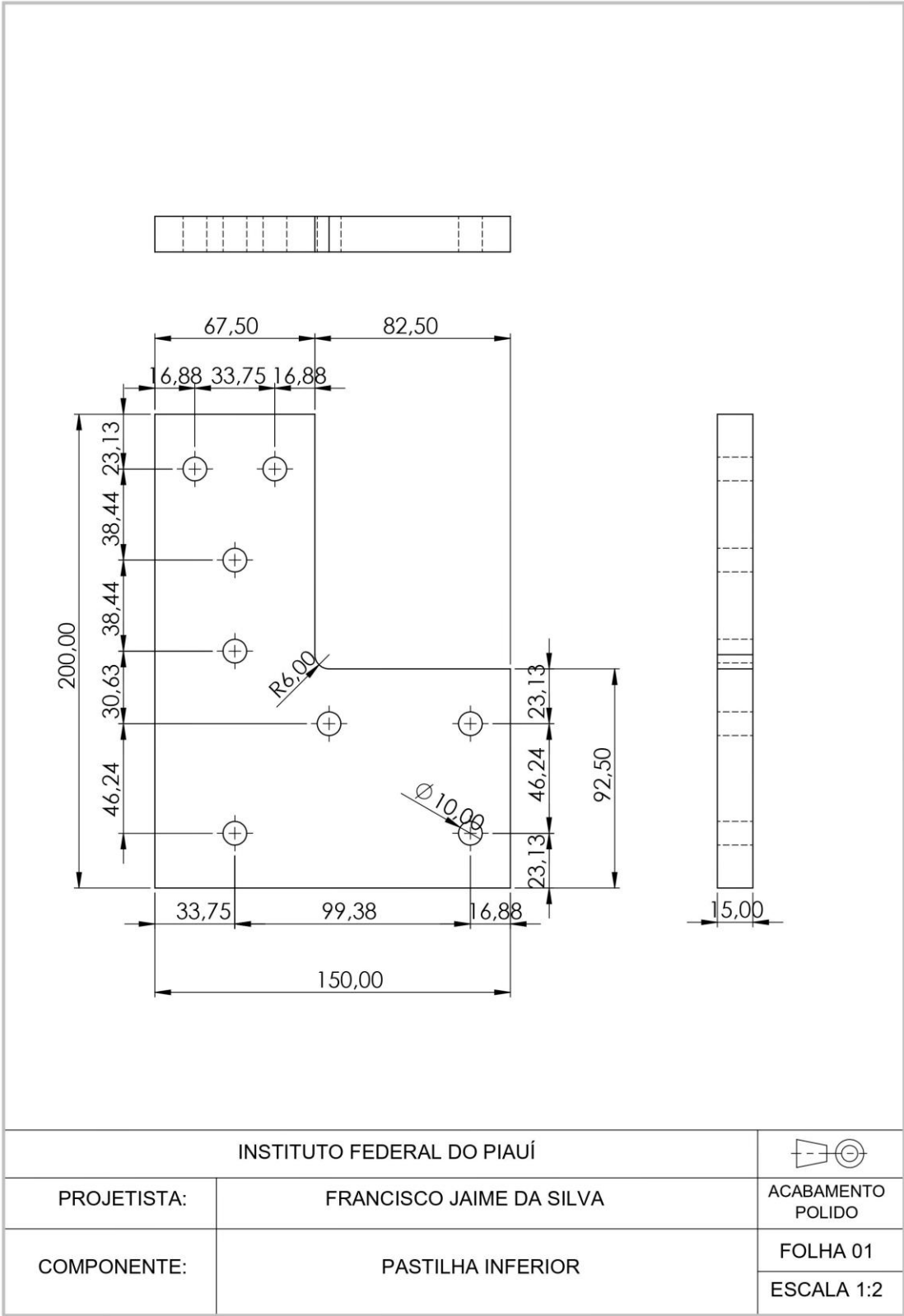
APÊNDICE B – Dimensões utilizados para simulação no software QForm**Figura 37 - Dimensões (1) Matriz (2) Corpo de Prova (3) Punção**

Fonte: Próprio autor

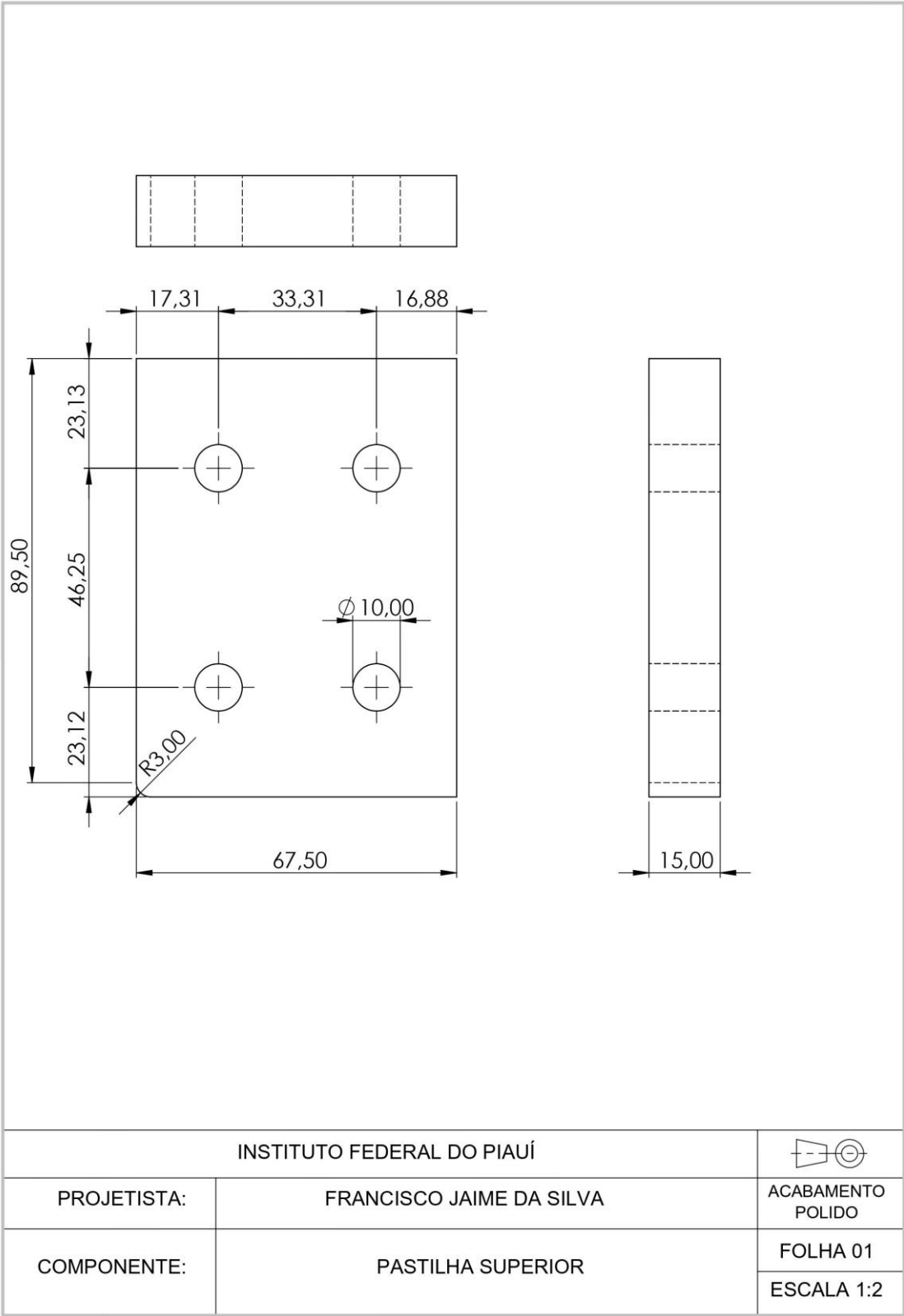
APÊNDICE C – Desenho CAD do punção



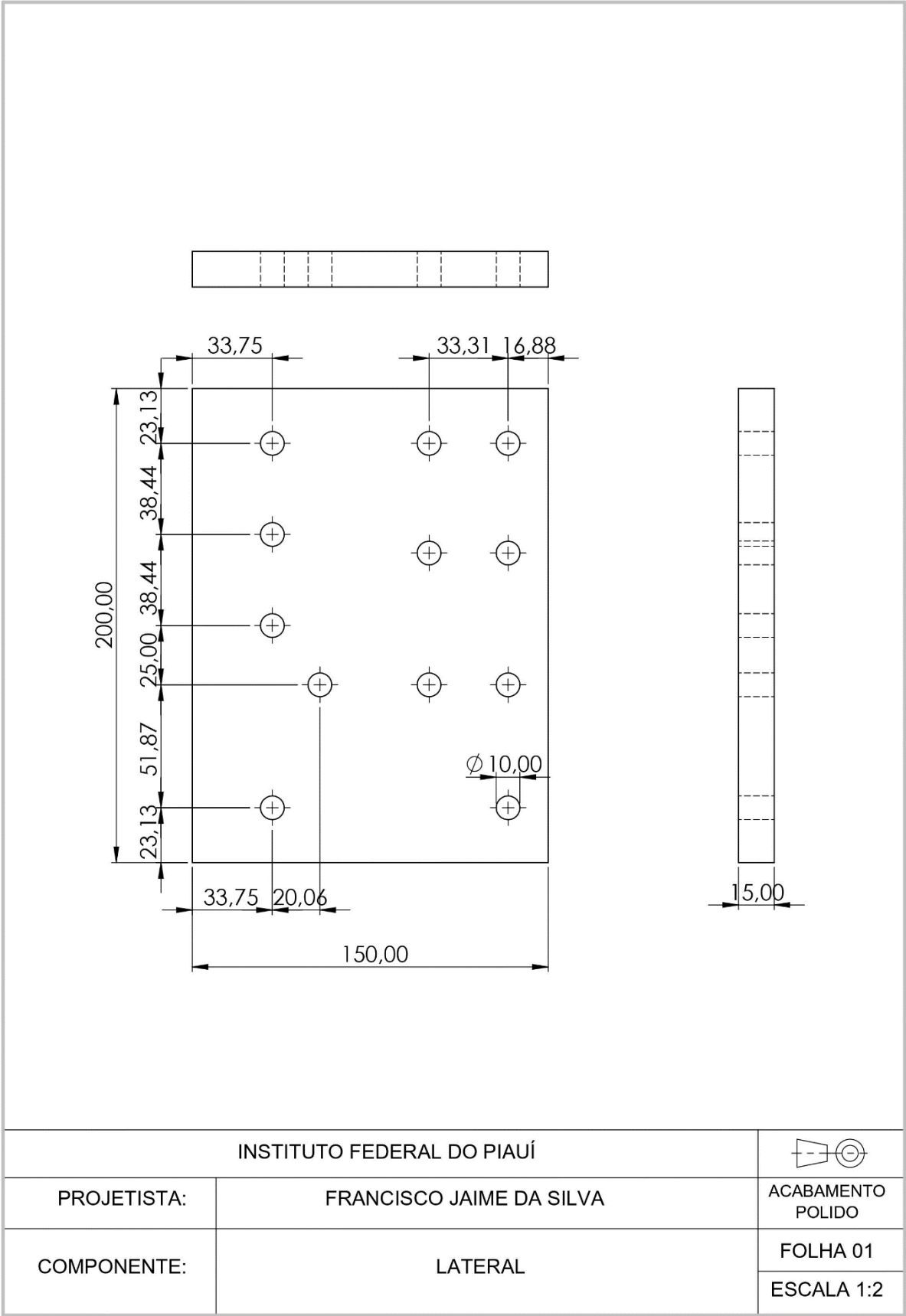
APÊNDICE D – Desenho CAD da pastilha inferior



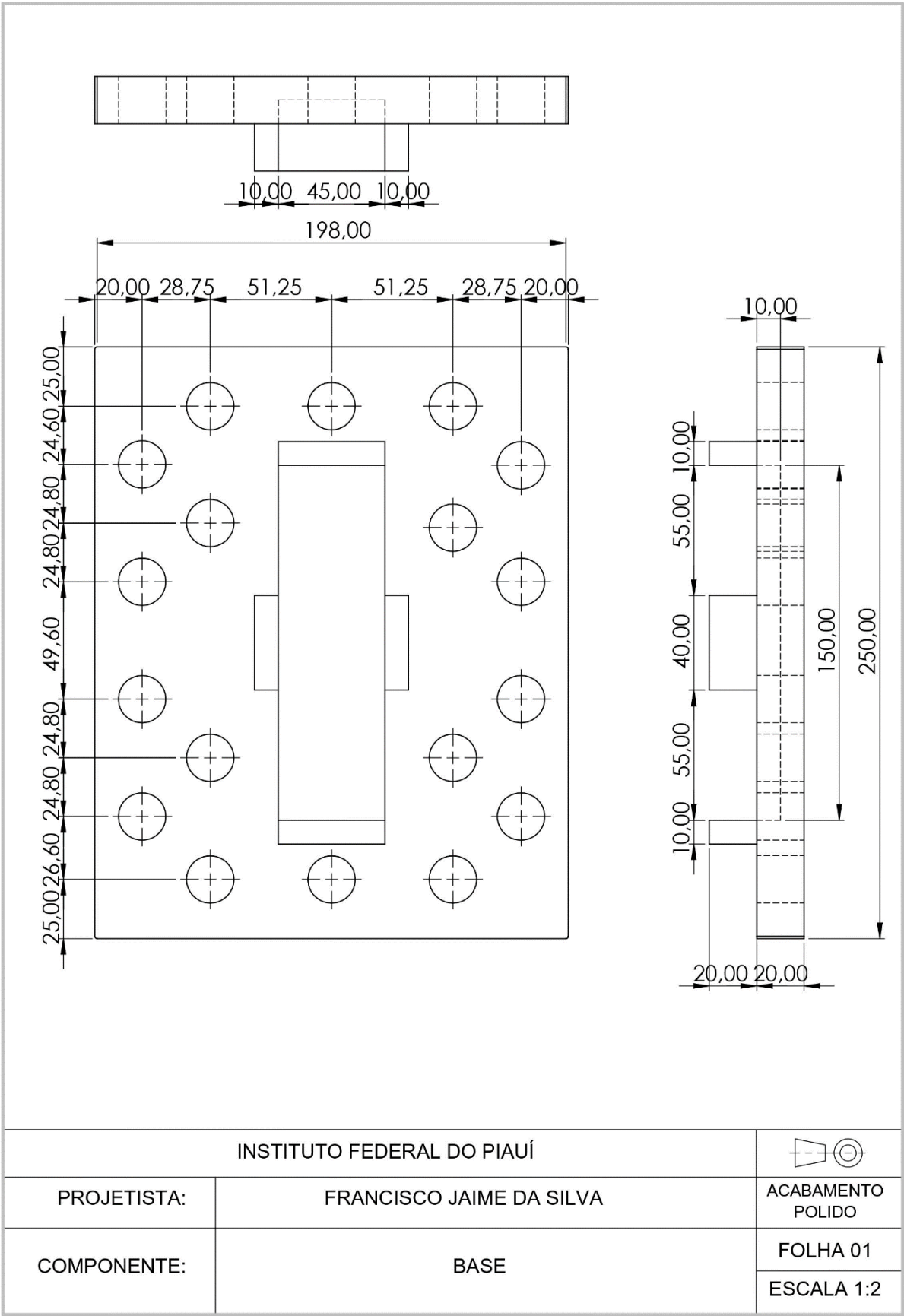
APÊNDICE E – Desenho CAD da pastilha superior



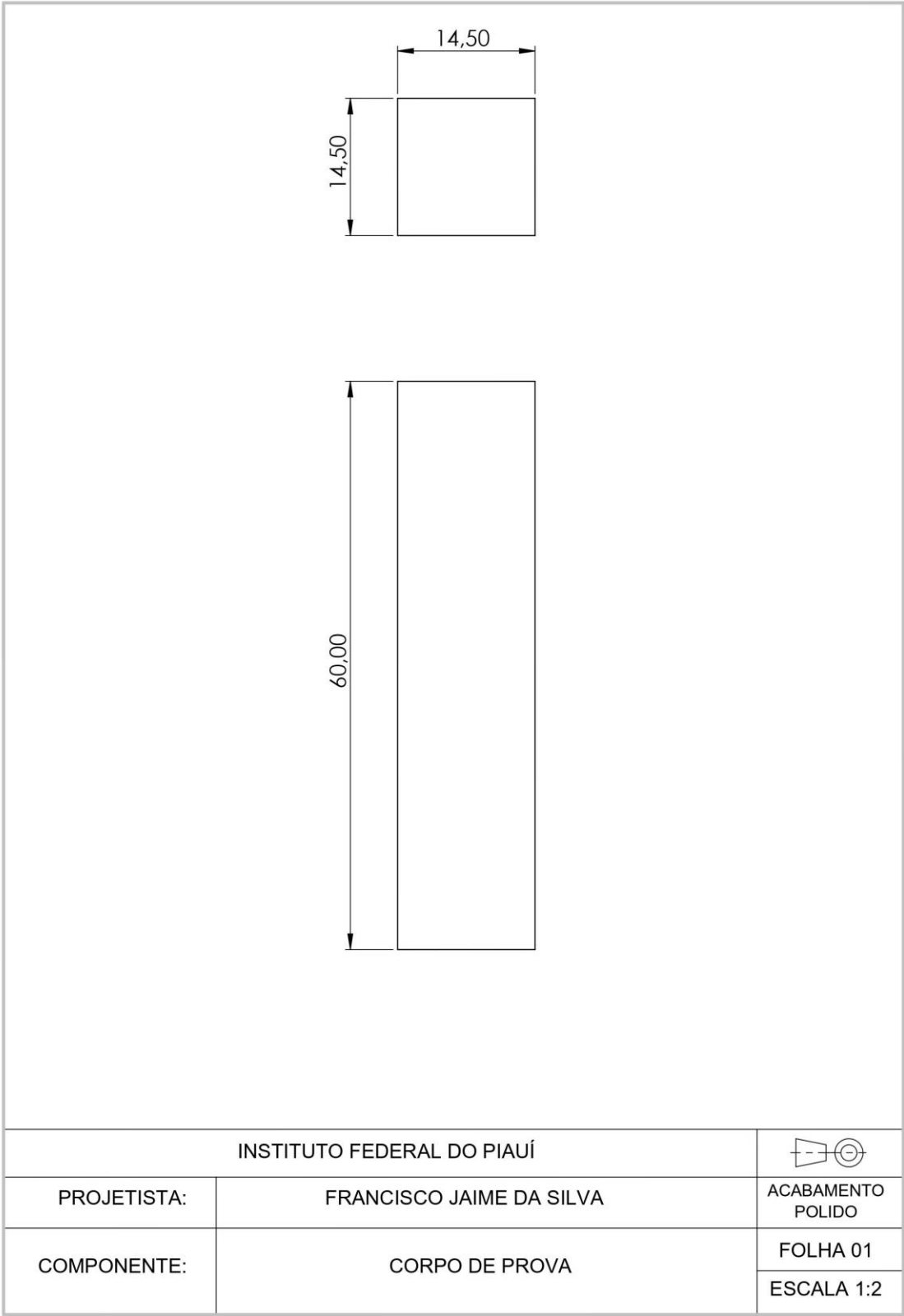
APÊNDICE F – Desenho CAD para laterais



APÊNDICE G – Desenho CAD da base



APÊNDICE H – Desenho CAD do corpo de prova



ANEXO A - Parâmetros geométricos para parafusos com padrão métrico

Tabela 10 - Aspectos geométricos para roscas de parafusos

Diâmetro maior nominal d mm	Passo p mm	Série de passo grosso		Série de passo fino		
		Área de tensão de tração A_t , mm ²	Área de diâmetro menor A_r , mm ²	Passo p mm	Área de tensão de tração A_t , mm ²	Área de diâmetro menor A_r , mm ²
1,6	0,35	1,27	1,7			
2	0,40	2,07	1,79			
2,5	0,45	3,39	2,98			
3	0,5	5,03	4,47			
3,5	0,6	6,78	6,00			
4	0,7	8,78	7,75			
5	0,8	14,2	12,7			
6	1	20,1	17,9			
8	1,25	36,6	32,8	1	39,2	36,0
10	1,5	58,0	52,3	1,25	61,2	56,3
12	1,75	84,3	76,3	1,25	92,1	86,0
14	2	115	104	1,5	125	116
16	2	157	144	1,5	167	157
20	2,5	245	225	1,5	272	259
24	3	353	324	2	384	365
30	3,5	561	519	2	621	596
36	4	817	759	2	915	884
42	4,5	1 120	1 050	2	1 260	1 230
48	5	1 470	1 380	2	1 670	1 630
56	5,5	2 030	1 910	2	2 300	2 250
64	6	2 680	2 520	2	3 030	2 980
72	6	3 460	3 280	2	3 860	3 800
80	6	4 340	4 140	1,5	4 850	4 800
90	6	5 590	5 360	2	6 100	6 020
100	6	6 990	6 740	2	7 560	7 470
110				2	9 180	9 080

Fonte: (NORTON, 2004)

ANEXO B - Resistências para parafusos de padrão métrico

Tabela 11 - Especificações de classe métrica para parafusos de aço

Número de classe	Intervalo de diâmetro externo (mm)	Resistência mínima de prova (MPa)	Resistência mínima de escoamento (MPa)	Resistência mínima à tração (MPa)	Material
4,6	M5–M36	225	240	400	aço-carbono, médio ou baixo
4,8	M1,6–M16	310	340	420	aço-carbono, médio ou baixo
5,8	M5–M24	380	420	520	aço-carbono, médio ou baixo
8,8	M3–M36	600	660	830	carbono médio, Q&T
9,8	M1,6–M16	650	720	900	carbono médio, Q&T
10,9	M5–M36	830	940	1040	baixo carbono, martensítico, Q&T
12,9	M1,6–M36	970	1100	1220	liga, Q&T

Fonte: (NORTON, 2004)

ANEXO C - Propriedades alumínio AA 1050

Tabela 12 - Dados usados para simulação de extrusão do Alumínio AA 1050

Densidade	2710	kg/m ³
Condutibilidade térmica	226	W/(m.K)
Calor específico	930	J/(kg.K)
Módulo de Young	75000	MPa
Coeficiente de Poisson	0,33	
Composição Química (%)	Máx.	
Fe	0,4	
Si	0,25	
Mn	0,05	
Mg	0,05	
Cu	0,05	
Ti	0,03	
V	0,03	
Zn	0,05	

Fonte: Banco de dados do software QForm 9.0

ANEXO D - Catálogo comercial para seleção de parafusos

Figura 38 - Catálogo para seleção de parafusos

07171 Parafusos sextavados DIN 933

norelem

Descrição do artigo/Imagens dos produtos

Descrição

Material:

Aço ou aço inoxidável (A 2).

Versão:

Aço com classe de resistência 8.8, preto ou galvanizado.

Aço com classe de resistência 10.9, preto ou galvanizado.

Aço com classe de resistência 12.9, preto.

Aço inoxidável A 2-70, superfície sem tratamento.

Desenhos

Visão geral dos artigos

Código do artigo	Material do corpo básico	Cor do corpo básico	Superfície Corpo básico	Classe de resistência	D	L	K	SW	E
07171-310X16	Aço	preto	-	10.9	M10	16	6,4	17	18,9
07171-310X18	Aço	preto	-	10.9	M10	18	6,4	17	18,9
07171-310X20	Aço	preto	-	10.9	M10	20	6,4	17	18,9
07171-310X25	Aço	preto	-	10.9	M10	25	6,4	17	18,9
07171-310X30	Aço	preto	-	10.9	M10	30	6,4	17	18,9
07171-310X35	Aço	preto	-	10.9	M10	35	6,4	17	18,9
07171-310X40	Aço	preto	-	10.9	M10	40	6,4	17	18,9
07171-310X45	Aço	preto	-	10.9	M10	45	6,4	17	18,9
07171-310X50	Aço	preto	-	10.9	M10	50	6,4	17	18,9
07171-310X60	Aço	preto	-	10.9	M10	60	6,4	17	18,9
07171-310X70	Aço	preto	-	10.9	M10	70	6,4	17	18,9
07171-310X80	Aço	preto	-	10.9	M10	80	6,4	17	18,9
07171-310X90	Aço	preto	-	10.9	M10	90	6,4	17	18,9
07171-310X100	Aço	preto	-	10.9	M10	100	6,4	17	18,9

Fonte: (NORELEM, 2020)