

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

EDUARDO FLAIN DOS SANTOS

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL APLICADA AO PROCESSO DE FORJAMENTO DE UM
PISTÃO AUTOMOTIVO**

Alegrete

2025

EDUARDO FLAIN DOS SANTOS

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL APLICADA AO PROCESSO DE FORJAMENTO DE UM
PISTÃO AUTOMOTIVO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Mecânica**.

Orientador: Prof. Dr. Cristian Pohl Meinhardt

Alegrete

2025

EDUARDO FLAIN DOS SANTOS

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL APLICADA AO PROCESSO DE FORJAMENTO DE UM
PISTÃO AUTOMOTIVO**

Monografia apresentada ao Curso de
Engenharia Mecânica da Universidade
Federal do Pampa, como

requisito parcial para obtenção do grau
de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Monografia defendida e aprovada em 09 de julho de 2025.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Cristian Pohl Meinhardt
Orientador
(UNIPAMPA)

Prof. Dr. Leandro Ferreira Friedrich
(UNIPAMPA)

Prof. Dr. Vicente Bergamini Puglia
(UNIPAMPA)



Assinado eletronicamente por **LEANDRO FERREIRA FRIEDRICH, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 09/07/2025, às 18:06, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **CRISTIAN POHL MEINHARDT, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 09/07/2025, às 18:34, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **VICENTE BERGAMINI PUGLIA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 09/07/2025, às 18:40, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1778050** e o código CRC **B02D9796**.

AGRADECIMENTOS

À Deus, toda honra e toda glória. Foi com sua graça que encontrei forças nos momentos difíceis, sabedoria nas incertezas e fé para não desistir. Sem Ele, nada disso seria possível.

À minha família, agradeço profundamente. Ao meu pai, Jeocemar Patrício Alves dos Santos, à minha mãe, Karla Suzana Flain dos Santos, ao meu irmão, Cleo Flain dos Santos, à minha avó, Carlota Suzana Garay Flain, e ao meu avô, Benvindo Monteiro dos Santos, sou imensamente grato pelo apoio incondicional, incentivo e, principalmente, pelos valores e princípios que me foram ensinados. Cada passo dado nesta trajetória carrega um pouco de cada um de vocês.

Minha gratidão também à Maria da Graça Monçon, à Regina Vieira e à minha namorada, Lorhana Salbego Trindade, por toda a presença, apoio e importância ao longo do meu caminho acadêmico. Suas palavras, gestos e incentivos foram fundamentais em minha jornada.

Aos amigos que caminharam comigo nesta fase, deixo meu sincero agradecimento pelo companheirismo, pelas conversas, por contribuírem para que a cidade e o ambiente de estudo se tornassem um pouco mais suportável e por estarem sempre por perto nos momentos mais desafiadores.

Ao meu orientador, Cristian Pohl Meinhardt, registro meu profundo reconhecimento pela dedicação, disponibilidade e valiosas contribuições na construção deste trabalho. Seu apoio foi essencial.

Por fim, deixo um especial agradecimento *in memoriam* as pessoas que são de grande importância em minha vida: Meu avô Pedro Silva da Silva, Antonio Confortin, João Alfeu Barcellos Echeverria e Gustavo dos Santos Massia. Cada um, à sua maneira, me ensinaram lições na qual levo comigo até hoje – a herança de seus ensinamentos e exemplos permanece viva em mim, ainda que, mesmo após suas mortes, deixaram lições valiosas. Estarão sempre presentes em minha memória e em meu coração. Esta conquista pertence a vocês.

RESUMO

O presente trabalho visa utilizar a simulação computacional para reproduzir o processo de fabricação por forjamento de pistões automotivos, um componente do motor que é fundamental na conversão da energia de combustão em trabalho mecânico. O forjamento, técnica de conformação mecânica amplamente aplicada para a fabricação de componentes com geometrias complexas, permite a deformação plástica de metais por meio de forças compressivas, aprimorando suas propriedades mecânicas. Esse processo pode ser realizado em diferentes temperaturas, conforme os requisitos do material e do produto final. A simulação computacional, tem-se tornado uma ferramenta indispensável na engenharia moderna, proporcionando a modelagem e análise de processos de conformação em geral. Este estudo visa não apenas simular o forjamento de um pistão doado pela Universidade Federal do Pampa, mas também, através do *software* QForm UK, identificar a formação de defeitos e sugerir melhorias nos parâmetros de processo, além de avaliar como as condições de temperatura, tamanho da matriz e taxa de deformação influenciam as tensões desenvolvidas. Os principais objetivos deste trabalho consistem na análise das tensões e deformações do componente forjado, bem como estimar a vida útil das ferramentas utilizadas. O estudo mostrou que o preenchimento da peça foi adequado e que o forjamento a 300 °C é inviável devido às altas tensões desenvolvidas. A matriz com o tamanho recomendado pela literatura apresentou maior vida útil, 43,44% maior, ao comparar com a matriz de tamanho reduzido, e o desgaste se localizou em regiões de mudança de seção e raios pequenos. A simulação computacional se mostrou como uma ferramenta eficaz para identificar falhas e otimizar o processo de forjamento, mesmo antes da etapa experimental. A importância deste trabalho reside na sua contribuição para otimizar a eficiência e a qualidade da produção de pistões, impactando diretamente na indústria automotiva e na performance dos processos de forjamento.

Palavras-chave: Pistão, forjamento, simulação computacional.

ABSTRACT

This work aims to use computer simulation to reproduce the manufacturing process by forging automotive pistons, an engine component that is essential in converting combustion energy into mechanical work. Forging, a mechanical forming technique widely applied to the manufacturing of components with complex geometries, allows the plastic deformation of metals through compressive forces, improving their mechanical properties. This process can be performed at different temperatures, according to the requirements of the material and the final product. Computer simulation has become an indispensable tool in modern engineering, providing modeling and analysis of forming processes in general. This study aims not only to simulate the forging of a piston donated by the Federal University of Pampa, but also, through the QForm UK software, to identify the formation of defects and suggest improvements in the process parameters, in addition to evaluating how the temperature conditions, die size and deformation rate influence the stresses developed. The main objectives of this work are to analyze the stresses and deformations of the forged component, as well as to estimate the useful life of the tools used. The study showed that the part filling was adequate and that forging at 300 °C is not feasible due to the high stresses developed. The die with the size recommended by the literature presented a longer service life, 43,44% longer, when compared to the die with a reduced size, and the wear was located in regions of cross-section change and small radii. Computer simulation proved to be an effective tool for identifying failures and optimizing the forging process, even before the experimental stage. The importance of this work lies in its contribution to optimizing the efficiency and quality of piston production, directly impacting the automotive industry and the performance of forging processes.

Keywords: Piston, forging, computer simulation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Partes do pistão.....	16
Figura 2 - Forças atuantes em um pistão.....	17
Figura 3 - Forjamento por punção.....	21
Figura 4 - Fluxograma das etapas realizadas no trabalho.....	24
Figura 5 - Figuras superiores apresentam medidas do pistão após usinagem em [mm]; figuras inferiores apresentam o pistão real.....	25
Figura 6 - À esquerda, medidas do punção; ao centro, medidas da matriz referenciada; à direita, medidas da matriz com estimativa inicial.....	25
Figura 7 – Modelagem da matriz e do punção através do pistão.....	26
Figura 8 – Propriedades do pistão baseado através do <i>software</i> SolidWorks.....	27
Figura 9 – Movimento realizado pelo punção para o forjamento do pistão.....	27
Figura 10 – Ao lado esquerdo a montagem da pré-simulação em $\frac{1}{4}$ do modelo completo e ao lado direito com o recurso de espelhamento ativado.....	28
Figura 11 – Malha Remeshing adaptativo no ferramental e na peça.....	
Figura 12 – Tabela referente à altura da cavidade da peça para cálculo da altura da matriz referenciada.....	31
Figura 13 – Fluxograma da condução do estudo e dos objetivos.....	34
Figura 14 – Preenchimento da cavidade em $\frac{1}{4}$ do tamanho do modelo e pistão em tamanho completo nas vistas superior e frontal.....	35
Figura 15 – À esquerda, tensão na peça à 460 °C; à direita, tensão na peça à 300 °C.....	37
Figura 16 - Simulação com a matriz reduzida. À esquerda, tensão no punção à 460 °C; à direita, tensão no punção à 300 °C.....	38
Figura 17 - Simulação com o tamanho da matriz com base na literatura. À esquerda, tensão no punção à 460 °C; à direita, tensão no punção à 300 °C.....	38

Figura 18 – Deformação plástica na MRT300.....	39
Figura 19 – Deformação plástica na MLT300.....	39
Figura 20 – Simulação da vida em fadiga com matriz reduzida. a) Vista frontal; b) vista lateral; c) vista isométrica.....	41
Figura 21 - Simulação da vida em fadiga com o tamanho da matriz recomendada pela literatura. a) Vista frontal; b) vista lateral; c) vista isométrica.....	41
Figura 22 - Simulação apresentando o desgaste nas ferramentas. a) Vista frontal; b) vista lateral; c) matriz em vista isométrica.....	43
Figura 23 – À esquerda, simulação realizada em 100 mm/s; à direita, simulação realizada à 600 mm/s.....	44
Figura 24 – À esquerda, simulação realizada em 100 mm/s; à direita, simulação realizada à 600 mm/s.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela comparativa: Evolução dos pistões.....	19
Tabela 2 – Propriedades das malhas.	
Tabela 3 - Parâmetros de simulação.....	29
Tabela 4 – Composição química da liga de alumínio AA4032.....	29
Tabela 5 – Propriedades mecânicas do material.....	30
Tabela 6 – Composição química do aço H13.....	30
Tabela 7 – Condições de simulação adotadas.....	33
Tabela 8 - Resultados gerais das análises e simulações.....	45

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Designações de ligas de alumínio.....	18
Quadro 2 - Nomenclatura de aço ferramentas definida pelo AISI.....	20
Quadro 3 – Principais softwares de simulação computacional aplicado a processos de conformação mecânica.....	22

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas;

AISI - *American Iron and Steel Institute*;

CAD - *Computer-Aided Design*;

FEM – Finite Element Method;

HRC – Rockwell C;

MLT460 – Matriz com tamanho literatura à 460 °C;

MLT300 – Matriz com tamanho literatura à 300 °C;

MRT460 – Matriz com tamanho reduzida à 460 °C;

MRT300 – Matriz com tamanho reduzida à 300 °C.

LISTA DE ABREVIATURAS

Al – Alumínio;

h – Altura da cavidade;

H – Tamanho da matriz;

mm – Milímetros;

Si- Silício;

TR – Tempo de resfriamento.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICOS.....	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1 PISTÃO.....	18
2.2 FORJAMENTO DE LIGAS DE ALUMÍNIO.....	19
2.3 FORJAMENTO EM FERRAMENTAS DE AÇO FERRAMENTA.....	21
2.4 FORJAMENTO EM PISTÕES.....	22
2.4.1 FORJAMENTO A QUENTE	23
2.5 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.....	24
2.5.1 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS.....	25
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	26
3.1 PROJETO DO PISTÃO.....	26
3.2 PROJETO DA MATRIZ E DO PUNÇÃO.....	28
3.3 PROJETO <i>BILLET</i>	28
3.4 PROJETO DA DINÂMICA DE FORJAMENTO.....	29
3.5 PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO.....	30
3.5.1 MATERIAL UTILIZADO NA PEÇA	32
3.5.2 MATERIAL UTILIZADO NO FERRAMENTAL.....	33
3.5.3 TAMANHO DA MATRIZ.....	33
3.5.4 ALTURA DO <i>BILLET</i> NECESSÁRIO PARA PREENCHER A MATRIZ.....	34
3.5.5 FORÇA NECESSÁRIA DO PUNÇÃO PARA O FORJAMENTO.....	35
3.5.6 OUTROS PARÂMETROS.....	36
3.6 RESUMO DOS PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO.....	36

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	38
4.1 ANÁLISE DO PROCESSO DE PREENCHIMENTO DA CAVIDADE E FORMAÇÃO DO PISTÃO.....	38
4.2 ANÁLISE DE TENSÕES NA PEÇA E NOS FERRAMENTAIS.....	39
4.3 ANÁLISE DE CICLOS DE FADIGA DESENVOLVIDAS NO FERRAMENTAL.....	43
4.4 ANÁLISE DO DESGASTE NOS FERRAMENTAIS.....	45
4.5 ANÁLISE DE VELOCIDADE DE DEFORMAÇÃO DA PEÇA.....	46
5 CONCLUSÃO.....	49
6 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	50
REFERÊNCIAS.....	51

1 INTRODUÇÃO

O pistão, também chamado de êmbolo, é responsável por converter a energia liberada durante o processo de combustão em trabalho mecânico e transferi-la para o virabrequim, através do pino do pistão e da biela. Sua principal aplicação é em motores a combustão interna, no entanto, também é muito utilizado em bombas, compressores de ar e máquinas hidráulicas. Desta maneira, o pistão é um componente mecânico que precisa ter uma elevada resistência mecânica, propriedades termofísicas específicas e com alta tenacidade (SHIGLEY *et al.*, 2015).

O forjamento é um processo de conformação mecânica amplamente utilizado na indústria metalúrgica, que consiste na deformação plástica de metais e suas ligas por meio da aplicação de força compressiva. Este método é valorizado por sua capacidade de melhorar as propriedades mecânicas dos materiais, como resistência e dureza, através do escoamento plástico do material, causando assim, um fluxo e/ou fibramento na peça. Em relação à temperatura de trabalho, o forjamento pode ser realizado a quente, forno ou a frio, dependendo das características desejadas da peça final e do material utilizado. As características fundamentais associadas à deformação da peça incluem: fluxo de metal, velocidade de deformação e transferência de calor. Ademais, além dos tipos de prensa e equipamentos empregados no processo, ressalta-se que a velocidade e a força de forjamento constituem os fatores mais significativos (RODRIGUES; MARTINS, 2010).

A simulação computacional de processos de conformação representa, atualmente, uma ferramenta essencial na engenharia. Este recurso permite a modelagem e análise de operações como forjamento, estampagem, extrusão, entre outros, proporcionando diversos benefícios, sendo eles: previsão do comportamento do material; otimização de processos; redução de custos e tempo de desenvolvimento; aprimoramento da qualidade do produto. Um dos *softwares* de destaque nessa área é o QForm UK, amplamente reconhecido por sua relativa eficácia e facilidade na simulação de processos de forjamento e estampagem (SIXPRO, 2023).

Prever o processo de forjamento de pistões através da simulação computacional é uma prática essencial na indústria automotiva, onde a precisão e a qualidade dos componentes são fatores críticos. Através da simulação, por exemplo, é possível determinar a força e quantidade de material adequado para a fabricação do componente, além de prever a formação de defeitos durante o forjamento. Isso permite otimizar a etapa de desenvolvimento do componente forjado, oferecendo vantagens que impactam diretamente a eficiência da produção e a qualidade do

produto final. O simulador permite realizar uma variedade de análises, como: fluxo de material; distribuição de tensões e deformações; distribuição de temperatura, entre outros.

1.1 OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICOS

O objetivo geral deste trabalho consiste em realizar a simulação computacional, através do *software* QForm UK, do processo de forjamento a quente de um pistão de alumínio. Como peça de referência foi utilizado um pistão automotivo de veículo leve com diâmetro de 67 mm. Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a. determinar o volume de material para o *billet*;
- b. estimar a força de forjamento necessária;
- c. analisar e adequar o preenchimento da cavidade da matriz;
- d. análise das tensões e deformações desenvolvidas no componente forjado;
- e. analisar o impacto das variáveis: (a) Temperatura de forjamento; (b) velocidade do punção e (c) tamanho da matriz, nas tensões e deformações desenvolvidas
- f. avaliar o efeito do tamanho da matriz no processo de forjamento.
- g. estimar e avaliar o desgaste e vida útil em fadiga das ferramentas;

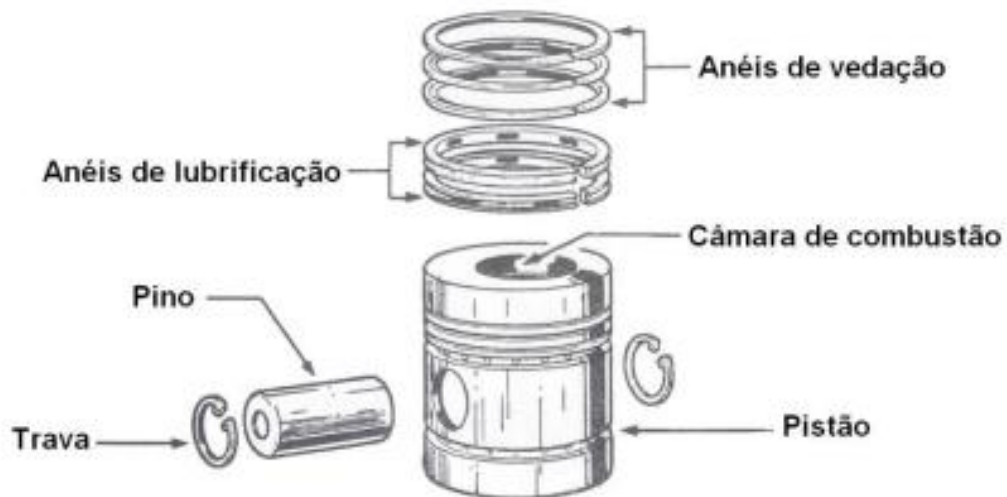
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção, serão expostos os referenciais teóricos que sustentam os assuntos discutidos no decorrer deste estudo.

2.1 PISTÃO

O pistão é uma peça de forma cilíndrica, geralmente de liga de alumínio ou ferro fundido, fechada na parte superior e aberta na parte inferior, adaptando-se perfeitamente ao diâmetro do cilindro ou da camisa do motor. É a parte móvel da câmara de combustão. Recebe a força de expansão dos gases queimados, transmitindo-a à biela, por intermédio de um pino de aço (MAHLE, 2019). A Figura 1 mostra as principais partes do pistão.

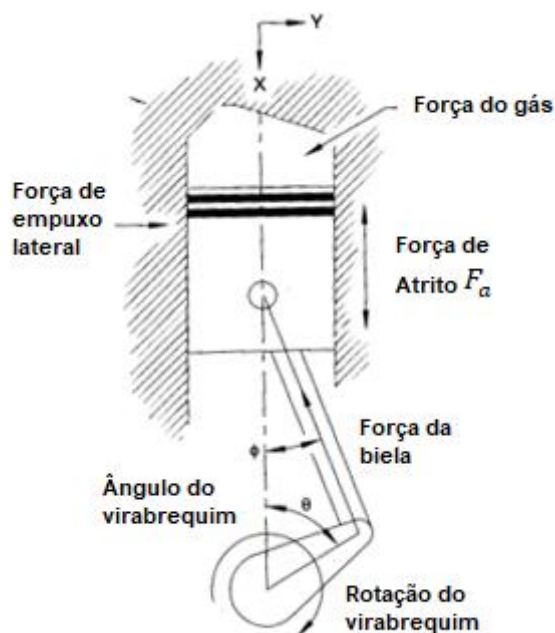
Figura 1- Partes do pistão.



Fonte: Universidade Federal de Pelotas, 2013.

O pistão, ou êmbolo, termo recomendado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT, é extensamente utilizado na indústria automotiva, sendo assim, um dos principais componentes do motor à combustão interna. Durante o funcionamento, o pistão é constantemente submetido à esforços, originados das forças mecânicas resultantes da pressão dos gases em combustão. As forças resultantes combinadas com a inclinação da biela dá origem a uma força perpendicular à parede do cilindro, gerando uma força de atrito F_a . E assim, é transmitido o movimento cíclico para rotacionar o virabrequim. A figura 2 exemplifica as forças atuantes em um pistão.

Figura 2 - Forças atuantes em um pistão.



Fonte: Adaptado de MÉDUE TTA, 2004.

Desta maneira, o pistão é um componente mecânico que precisa apresentar elevada resistência mecânica, resistência ao desgaste, propriedades termofísicas específicas, como baixo coeficiente de expansão térmica e alta tenacidade. Devido aos avanços tecnológicos e à crescente demanda por uma maior eficiência nos motores de combustão interna, ocorreu uma transição dos pistões de ferro fundido para ligas de alumínio. Essa mudança resulta em componentes mais leves e com propriedades mecânicas superiores.

2.2 FORJAMENTO DE LIGAS DE ALUMÍNIO

Recentemente, as ligas de alumínio têm sido amplamente utilizadas devido a sua versatilidade e gama de propriedades. Existem vários tipos de ligas de alumínio disponíveis, dependendo de sua composição. No entanto, as ligas da série 4000, Al-Si, são comumente usadas devido a suas propriedades atraentes, como aumento da resistência por trabalho mecânico, alta relação resistência-peso, boa usinabilidade, excelente fundibilidade, boa condutividade térmica e resistência à corrosão. Há muitas aplicações de ligas Al-Si em automóveis, pois são utilizados na fabricação de pistões forjados e fundidos automotivos (KERNI; RAINA; HAQ, 2018). A liga de alumínio 4032 apresenta baixo coeficiente de expansão térmica e resistência ao desgaste, essas propriedades a tornam adequadas para a aplicação em pistões automotivos forjados (ASM METALS, 1992). No quadro 1 é possível ver

os tipos de ligas de alumínio, padronizada pela Associação Americana de Alumínio, *The Aluminum Association*.

Quadro 1 - Designações de ligas de alumínio.

Grupo de Liga	Principal Elemento de Liga	Onde é usado
1XXX	Alumínio puro não ligado com no mínimo de 99% de Alumínio	Tubos desenhados, folhas, aeroespacial e condutores elétricos.
2XXX	Cobre	Chapas, placas, aeroespacial, forjamentos.
3XXX	Manganês	Latas de bebidas, chapas, materiais que requerem endurecimento por trabalho.
4XXX	Silício	Hastes, forjamentos, extrusões, materiais que requerem endurecimento por trabalho.
5XXX	Magnésio	Chapas, placas, hastes, extrusões, aeroespacial, marinha, fios de solda, automotiva.
6XXX	Magnésio e Silício	Chapas, placas, aeroespacial, forjamentos, extrusões, materiais que requerem tratamento térmico.
7XXX	Zinco	Aeroespacial, placas, chapas, folhas.
8XXX	Outros elementos	Aeroespacial, distribuição elétrica.
9XXX	Série não utilizada (reservado para outras ligas)	N/A.

Fonte 1: MAHLE, 2019.

Portanto, como apresentado no quadro 1, é possível identificar que a série 4000 é amplamente usada em processos de forjamento, dessas ligas é composto por ligas eutéticas e é conhecido como "ligas de pistão". Ao adicionar silício, magnésio e cobre às ligas Al-Si, a dureza, resistência e resistência ao desgaste podem ser melhoradas (KERNI; RAINA; HAQ, 2018).

A Tabela 1 ilustra a comparação entre pistões confeccionados em ferro fundido e aqueles fabricados com ligas de alumínio. Observa-se que, apesar do pistão em liga de alumínio apresentar um diâmetro inferior, é notável uma significativa melhoria de desempenho em todos os parâmetros analisados (MAHLE, 2019). O comparativo também demonstra a evolução relacionado ao pistão em liga de alumínio em comparação ao de ferro fundido.

Tabela 1 - Tabela comparativa: Evolução dos pistões.

	Motor Benz (1886) ø 90 mm (4 tempos)	Motor Ciclo Otto Atual ø 85 mm	Evolução
Material do pistão	ferro fundido	liga de alumínio	—
Peso do pistão, sem acessórios	2.200 g	320 g	85,5% ↓
Máxima rotação do motor	300 rpm	6.000 rpm	1.900% ↑
Peso do motor/potência	58 kg/cv	1,44 kg/cv	97,5% ↓
Relação de compressão	3,5 : 1	8,5 : 1	143% ↑
Potência de cada pistão	1,7 cv	20,5 cv	1.100% ↑
Peso do pistão/potência do cilindro	1.294 g/cv	15,6 g/cv	98,8% ↓
Folga na saia do pistão	0,2 mm	0,02 mm	90% ↓

	Motor Benz (1886) ø 90 mm (4 tempos)	Motor Ciclo Diesel Atual	Evolução
Material do pistão	ferro fundido	liga de alumínio	—
Peso do pistão, sem acessórios	2.200 g	1.040 g	52,8% ↓
Máxima rotação do motor	300 rpm	2.890 rpm	863% ↑
Peso do motor/potência	58 kg/cv	3,0 kg/cv	94,8% ↓
Relação de compressão	3,5 : 1	17,25 : 1	393% ↑
Potência de cada pistão	1,7 cv	30 cv	1.664% ↑
Peso do pistão/potência do cilindro	1.294 g/cv	34,7 g/cv	97,4% ↓
Folga na saia do pistão	0,2 mm	0,11 mm	45% ↓

Fonte: MAHLE, 2019.

2.3 FORJAMENTO EM FERRAMENTAIS DE AÇO FERRAMENTA

O termo aço ferramenta refere-se a ligas de aço que contêm em sua composição elementos como cromo, molibdênio e vanádio, com a finalidade de melhorar suas propriedades mecânicas, adequando-as às exigências impostas pelo processo de forjamento. Segundo o *American Iron and Steel Institute* - AISI, recomenda-se a simbologia, fornecida no quadro 2 para identificação dos referidos aços ferramenta (AVNER, 1974).

Quadro 2 – Nomenclatura de aços ferramenta definida pelo AISI.

Símbolo	Descrição
W	Aços ferramenta temperados em água
S	Aços ferramenta resistentes ao choque
O	Aços ferramenta, para trabalho a frio, temperados em óleo
A	Aços ferramenta, para trabalho a frio (média liga de carbono), temperados ao ar
D	Aços ferramenta, para trabalho a frio (alta liga de carbono), com alta porcentagem de cromo
	Aços ferramenta, para trabalho a quente, com as seguintes subdivisões:
H	- H1 a H19: a base de cromo; - H20 a H39: a base de tungstênio; - H40 a H59: a base de molibdênio.
T	Aços ferramenta, rápido, a base de tungstênio
M	Aços ferramenta, rápido, a base de molibdênio
	Aços ferramenta, moldes, com as seguintes subdivisões:
P	- P1 a P19: baixo carbono; - P20 a P39: demais tipos.

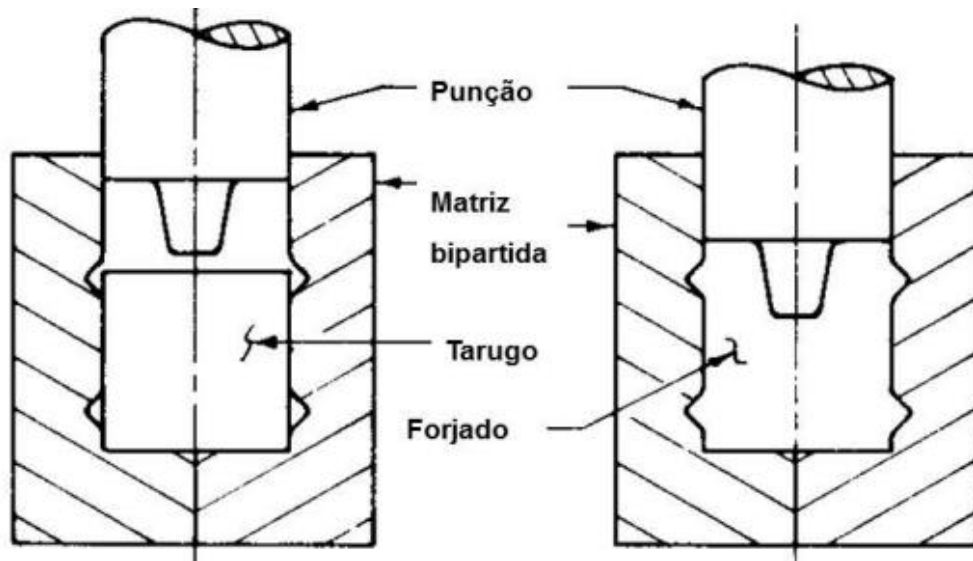
Fonte: AVNER, 1974.

De acordo com (ASM INTERNACIONAL, 2005), o AISI H13 possuiu uma maior resistência ao desgaste quando comparado a outros aços da sua classe como, por exemplo, o AISI H11. Além disso, tendo outras características superiores aos demais, tal como uma boa resposta aos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento, com isso, o aço AISI H13 é amplamente usado para matrizes na indústria de conformação mecânica.

2.4 FORJAMENTO DE PISTÕES

O processo de forjamento vem sendo empregado por diversas indústrias do mundo inteiro para produção de peças em diversas áreas. Esta técnica oferece algumas vantagens sobre outros processos, pois não gera grandes desperdícios do material e confere boas propriedades mecânicas às peças forjadas. O objetivo desta técnica de conformação é alterar o formato de um determinado material bruto aplicando-se forças sobre ele (MICHELS *et al.*, [s.d.]). A figura 3 exemplifica um processo de forjamento com punção.

Figura 3 - Forjamento por punção.



Fonte: T. ALTAN, S.OH, H. GEGEL, 2012.

Pode-se definir como conformabilidade a capacidade de um material ser deformado sem apresentar falhas. A conformabilidade depende de dois tipos de variáveis: a) variáveis relativas às condições impostas durante o processo de deformação, tais como: temperatura, velocidade de deformação, tensões, histórico de deformações; e b) variáveis relativas ao próprio material, como: composição, vazios, inclusões, microestrutura inicial, etc. (VIECELLI, 1995).

2.4.1 FORJAMENTO A QUENTE

O processo de forjamento a quente consiste no aquecimento de um tarugo até determinada temperatura acima da temperatura de recristalização do material e posteriormente seguido de uma conformação mecânica, geralmente por prensa. O processo inicia pelo corte das barras para obtenção do tarugo ou *billet*. Os tarugos passam por um aquecimento em um forno, posteriormente são submetidas ao forjamento. O forjamento pode ocorrer em duas ou mais etapas (pré-forma, forma e forja) para que se consiga um preenchimento total da cavidade das matrizes. Ao final, os forjados são tratados termicamente para obter-se uma microestrutura adequada para o uso final ou para outra etapa do processo de fabricação, como a usinagem. As matrizes de forjamento devem ser pré-aquecidas para que não trinquem ou quebrem por choque térmico com a peça conformada. Após forjar a primeira peça do lote, deve-se verificar as dimensões do forjado. Caso seja necessário, algum ajuste no ferramental é realizado, para atender as especificações do produto. (HOLMAN, J. *et al.*[s.d.]) (MICHELS, L. *et al.*, [s.d.]).

2.5 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

O desenvolvimento dos recursos de computação nas últimas décadas resultou em um avanço significativo nas mais diversas áreas do conhecimento (LAGERGREN, 2002). Com a evolução tecnológica, muito tem se utilizado das simulações computacionais para modelar processos de manufatura, visando obter resultados mais rápidos, confiáveis e econômicos. Muitos métodos têm sido implementados para a realização de simulações e em destaque tem-se a modelagem por elementos finitos. O método dos elementos finitos considera a região de solução do problema formada por pequenos elementos conectados entre si, onde a região em estudo é analiticamente modelada ou aproximada por um conjunto de elementos discretos pré-definidos (DO PRADO, 2015).

Existem diversos programas dedicados ao estudo de processos de conformação plástica, sendo a grande maioria baseada no método dos elementos finitos. Entre os principais programas computacionais devem-se destacar (WALTERS, 2006):

Quadro 3: Principais *softwares* de simulação computacional aplicado a processos de conformação mecânica.

Nome	Fabricante
Easy-Form	COM Gesellschaft f'ur Computeranwendung
Deform	ScientificForming Technologies Corporation
Forge	Transvalor AS
Marc Autoforge	MARC AnalysisResearch Corporation
Simufact	Simufact
QForm UK	Micas Simulations Limited headquarters
MSC Superforge	Technical Project Coordinator

Fonte: Adaptado de SCHAFFER *et al*, 2012.

Estes *softwares* demonstram uma elevada capacidade de previsão e simulação do processo de forjamento, resultando em um apoio significativo ao desenvolvimento do processo. As geometrias da matriz e da peça podem ser criadas internamente ou recorrendo a um *software* de CAD 3D, sendo em seguida importadas para a simulação. O uso destes *softwares* permite obter resultados como: forças necessárias para o adequado escoamento do material com um grau de precisão muito mais elevado do que os métodos analíticos. De igual modo, permitem estudar os fenômenos de transferência de calor, desgaste das ferramentas e em alguns simuladores, é possível prever até a evolução da microestrutura (PINTO, 2017).

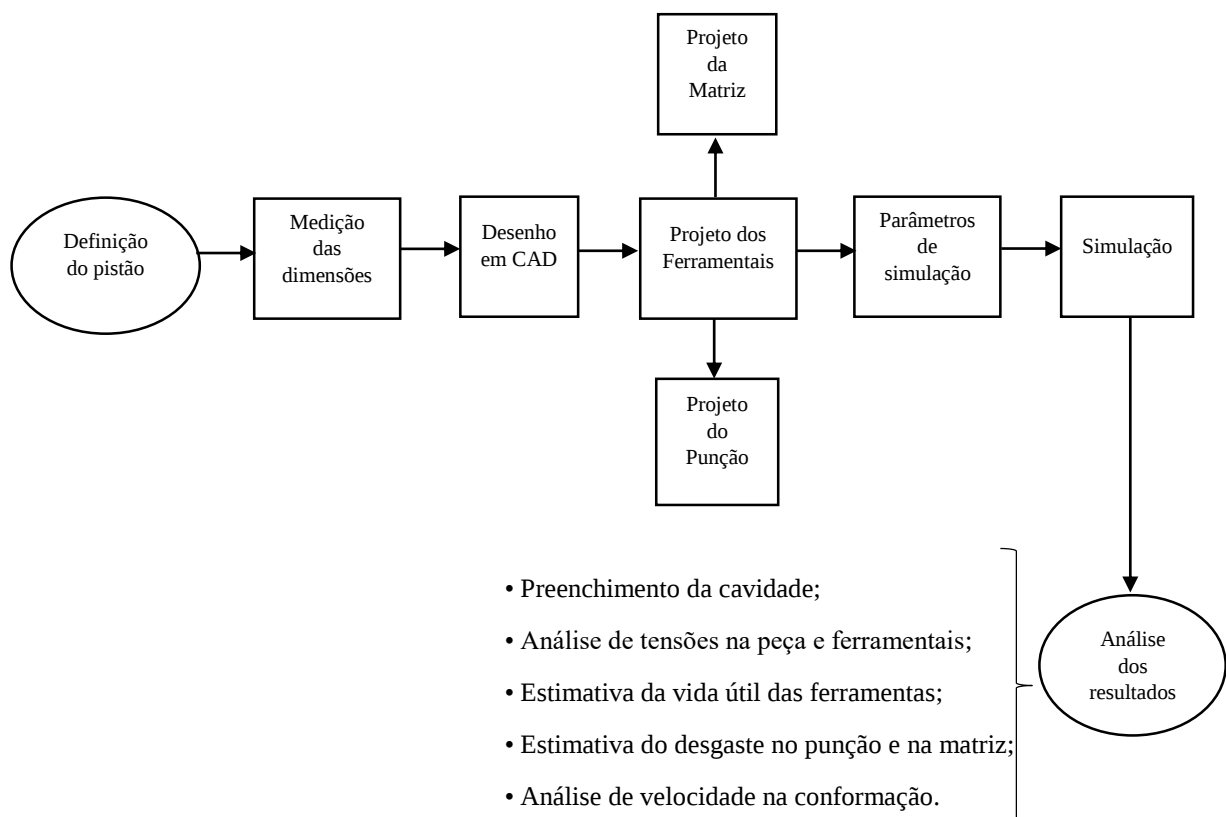
2.5.1 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS

Esta etapa é uma das mais importantes na simulação computacional, uma vez que é nela que definimos os parâmetros que asseguram que a simulação reproduza de forma mais fiel possível as condições práticas. Sendo assim, os parâmetros principais são: material a ser utilizado na peça; material do ferramental; volume necessário para preencher a matriz; temperatura dos ferramentais; temperatura de forjamento, força aplicada pelo punção; velocidade do punção; lubrificação; tempo de forjamento; tempo de resfriamento (SCHAEFFER, 2004) (STEMMER, 1979) ([S.I.: s.n.]. 21--).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado com base em um pistão automotivo, modelo Volkswagen Gol 1.0, classe veículo leve, 67 mm de diâmetro x 51 mm de altura, sendo cedido pela Universidade Federal do Pampa, campus Alegrete – RS. Para a realização do trabalho foi utilizado a licença acadêmica do *software* QForm UK, específico para simulação computacional de processos de conformação mecânica, da empresa *Micas Simulations Limited*. A figura 4 mostra o fluxograma das etapas que foram implementadas no trabalho.

Figura 4: Fluxograma das etapas realizadas no trabalho.



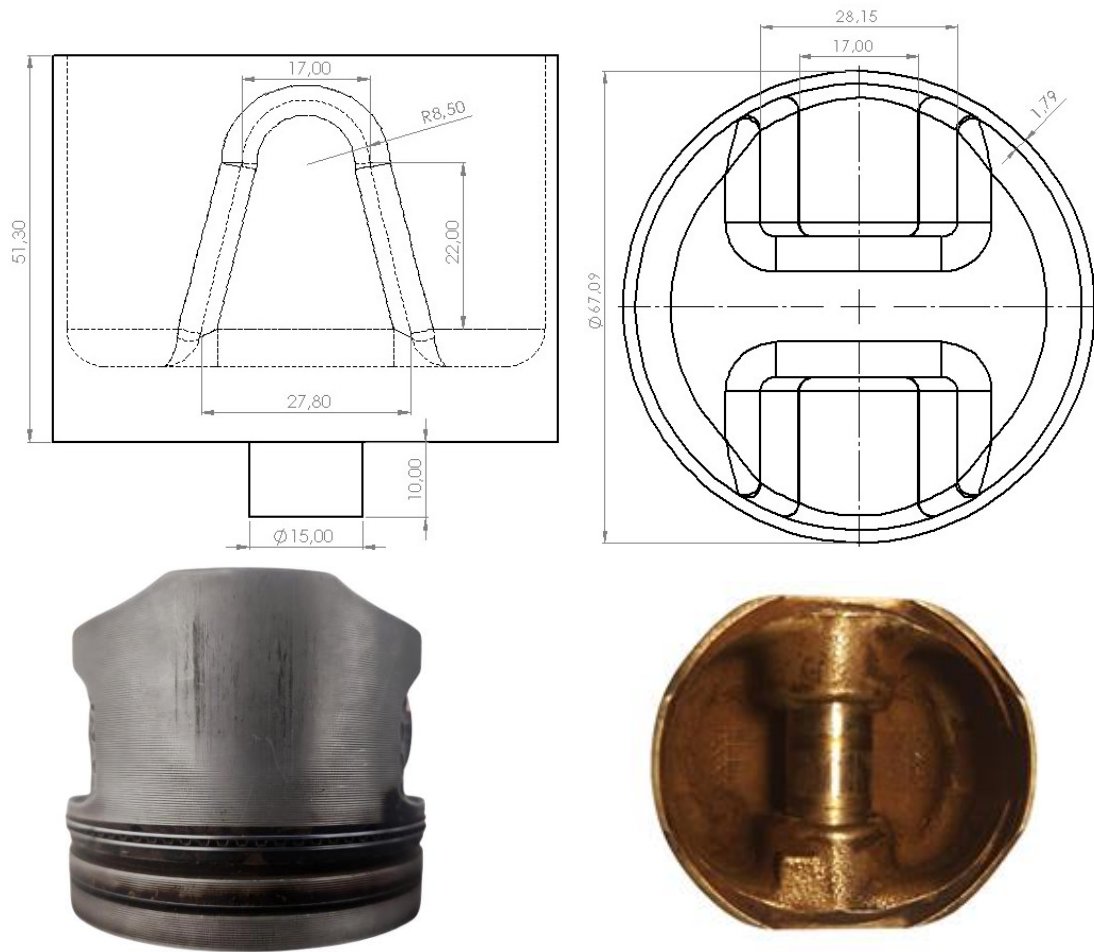
Fonte: Próprio autor, 2024.

3.1 PROJETO DO PISTÃO

Como mostrado no fluxograma acima, na segunda e terceira etapa foi necessário extrair as dimensões do pistão de referência e transferi-las para o *software*, a fim de realizar a modelagem do pistão em CAD, *Computer-Aided Design*. Na figura 5, são apresentadas as medidas do pistão em mm, e na figura 6, pode-se observar a geometria do punção e dos ferramentais, na qual serão abordadas no tópico seguinte.

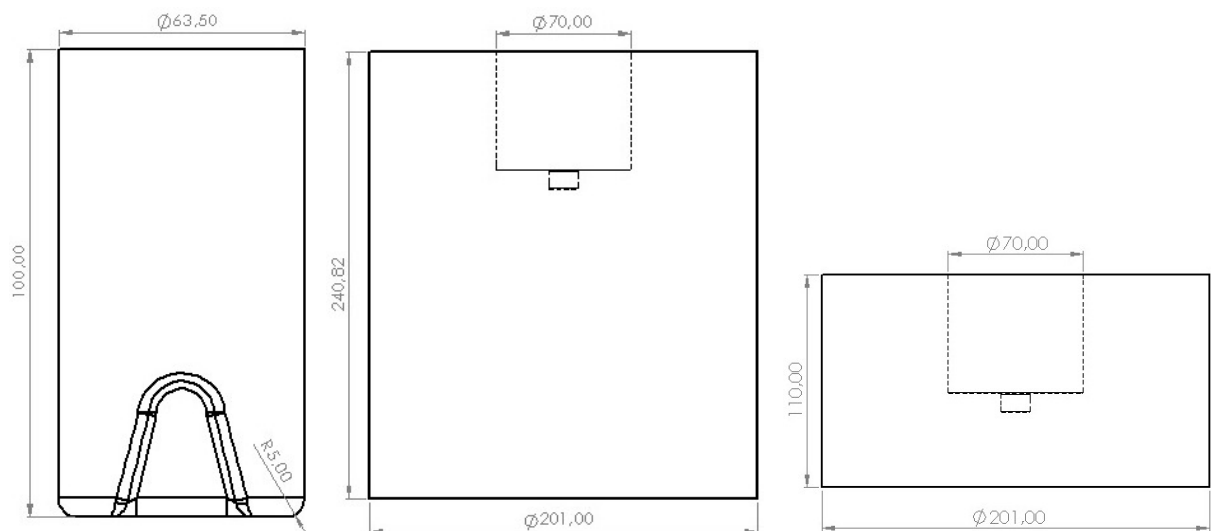
Nota-se que foi adicionado na face do pistão um sobremetal de dimensões 15x10 mm, tendo como função ser usado como contraponto de apoio para a usinagem do mesmo.

Figura 5 – Figuras superiores apresentam medidas do pistão após usinagem em mm; figuras inferiores apresentam o pistão real.



Fonte: Próprio autor, 2024.

Figura 6: À esquerda, medidas do punção; ao centro, medidas da matriz referenciada; à direita, medidas da matriz com estimativa inicial.

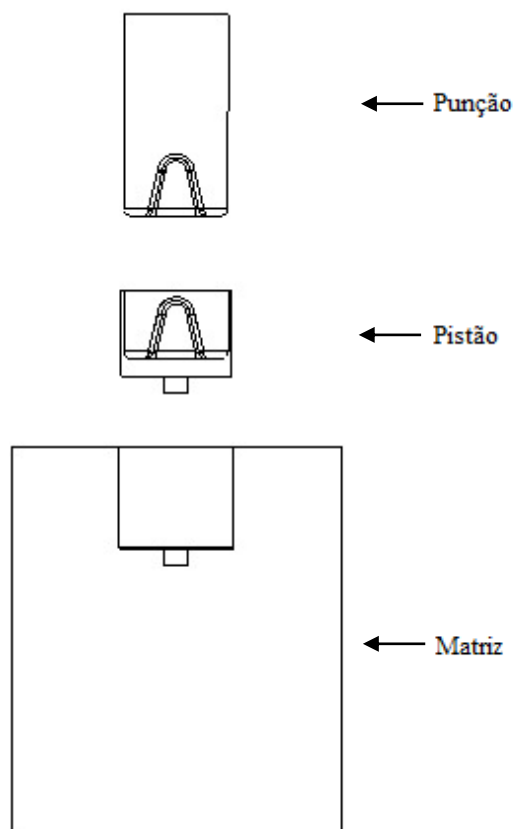


Fonte: Próprio autor, 2024

3.2 PROJETO DA MATRIZ E DO PUNÇÃO

Para o desenvolvimento do projeto da matriz e do punção, foi necessário primeiro realizar o desenho do pistão no *software* de modelamento. Após a conclusão da modelagem, conforme foi mostrado acima, foi possível gerar a matriz e o punção por meio de uma ferramenta disponibilizada pelo próprio SolidWorks®. Vale destacar que, com o pistão modelado em CAD, foi possível determinar tanto suas dimensões precisas quanto o seu volume. A figura 7, demonstra o pistão em conjunto com sua matriz e punção.

Figura 7 – Modelagem da matriz e punção através do pistão.



Fonte: Próprio autor, 2024.

3.3 PROJETO *BILLET*

Uma das etapas iniciais da conformação consiste em definir o volume e as dimensões do *billet*, matéria-prima que após conformada da origem a peça forjada. Também é importante posicionar o *billet* na matriz, de forma que preencha adequadamente a cavidade, ao receber o impacto do punção. Nesse contexto, é fundamental que o *billet* apresente o volume adequado, a fim de evitar a sobra ou a falta de material na peça a ser forjada, prevenindo, assim, possíveis defeitos no produto final.

É importante destacar que a identificação do *billet* adequado só foi possível graças às simulações preliminares e aos cálculos realizados (relacionando diâmetro com a altura) com base nos diâmetros de barras de alumínio disponíveis no catálogo, conforme discutido no tópico 3.5.4. A figura 8 mostra a obtenção do volume do *billet* através do *software* SolidWorks.

Figura 8 – Propriedades do pistão através do *software* SolidWorks®.

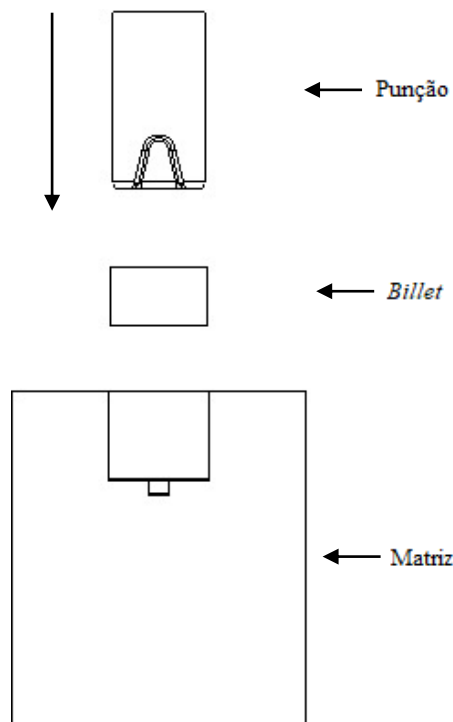
Densidade = 0.002680 gramas por milímetro cúbico
Massa = 227.574572 gramas
Volume = 84915.884982 milímetros cúbicos
Área de superfície = 27642.869161 milímetros quadrados

Fonte: SolidWorks, 2024.

3.4 PROJETO DA DINÂMICA DE FORJAMENTO

Tradicionalmente, a conformação do pistão ocorre por forjamento a quente, sem a utilização do canal de rebarba na matriz. Assim, na simulação, será empregado um punção com movimento na vertical para comprimir o *billet* contra a matriz, que é fixa. Após a compressão, o componente forjado é extraído da matriz, com a forma desejada. Na figura 9 é exemplificado a dinâmica de forjamento, evidenciando o movimento do punção.

Figura 9 – Movimento realizado pelo punção para o forjamento do pistão.

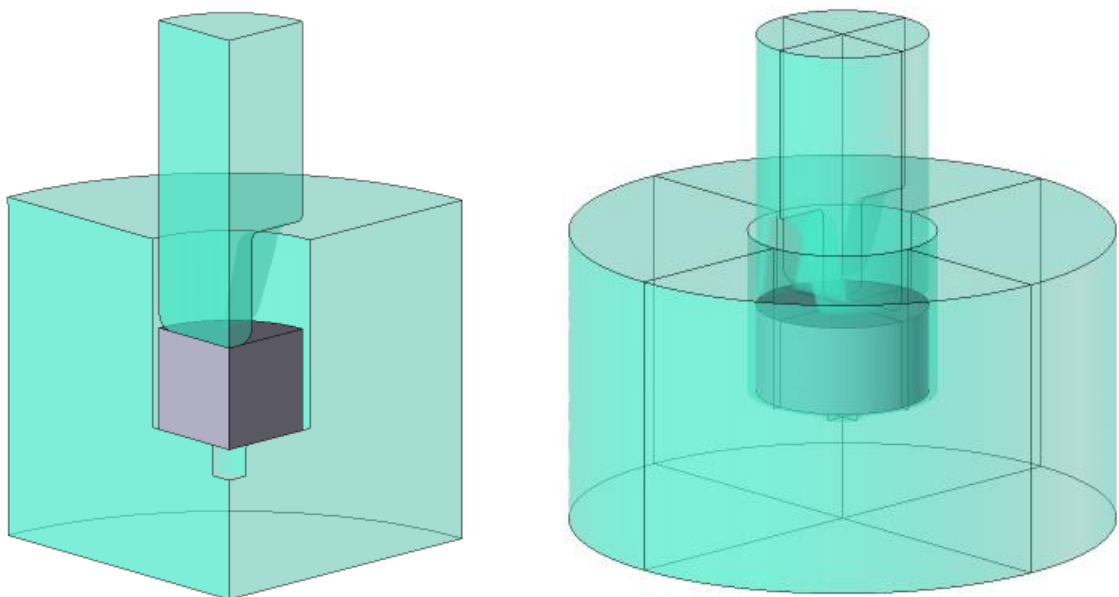


Fonte: Próprio autor, 2024.

3.5 PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

Considerando que a matriz e o punção, bem como o material a ser forjado, possuem geometrias de revolução em torno de um mesmo eixo, e levando-se em conta que a peça final apresenta simetria, optou-se por realizar a simulação utilizando apenas $\frac{1}{4}$ do modelo completo. Tal abordagem visa a redução do consumo de recursos computacionais, tornando a simulação mais leve e eficiente. Essa simplificação é viabilizada por um recurso do *software* de simulação utilizado, que permite o espelhamento geométrico, assegurando que os resultados obtidos sejam equivalentes para as demais partes da peça. Ademais, adotou-se no punção um raio de 5 mm nos cantos, com o objetivo de eliminar arestas vivas e regiões retangulares. Essa escolha busca evitar o refinamento excessivo da malha gerada pelo QForm UK nessas áreas, o que poderia comprometer o desempenho da simulação e aumentar a possibilidade de erros. Na figura 10 é possível observar ao lado esquerdo o *billet* e os ferramentais em $\frac{1}{4}$ do modelo completo e ao lado direito o recurso de espelhamento ativado.

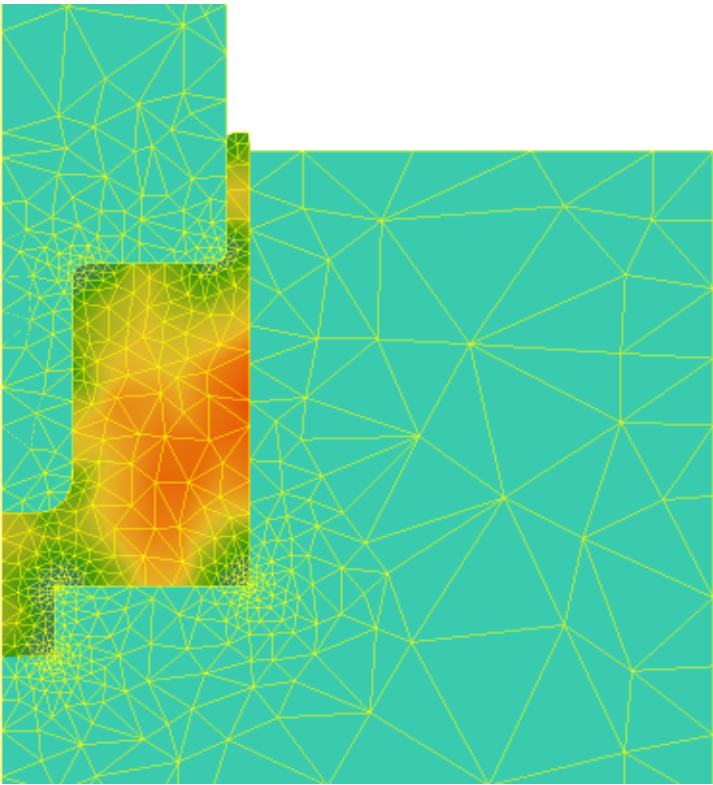
Figura 10 - Ao lado esquerdo a montagem de pré-simulação em $\frac{1}{4}$ do modelo completo e ao lado direito com o recurso de espelhamento ativado.



Fonte: Próprio autor, 2025.

Além disso, o software utiliza o FEM, *Finite Element Method*, nas simulações, empregando uma malha com elementos tetraédricos para deformações em 3D, com *remeshing* adaptativo, a qual é automaticamente reconfigurada ao longo do processamento, de acordo com as deformações sofridas pelo material. Conforme a Figura 11.

Figura 11 – Malha Remeshing adaptativo no ferramental e na peça.



Fonte: Próprio autor, 2025.

Segue a Tabela 2 abaixo para análise das propriedades das malhas no ferramental e na peça.

Tabela 2 – Propriedades das malhas.

Matriz Literatura					
Objeto	Nós na superfície	Nós Internos	Total de nós	Elementos de superfície	Elementos volumétricos
Peça	4024	2710	6734	8044	28841
Punção	1503	791	2294	3002	9253
Matriz	2726	1676	4402	5448	18416
Total	8253	5177	13430	16494	56510
Matriz Reduzida					
Objeto	Nós na superfície	Nós Internos	Total de nós	Elementos de superfície	Elementos volumétricos
Peça	4000	2751	6751	7996	29013
Punção	2555	2249	4804	5106	21694
Matriz	1503	791	2294	3002	9253
Total	8058	5791	13849	16104	59960

Fonte: Próprio autor, 2025.

Uma das etapas mais cruciais do processo refere-se à definição dos parâmetros da simulação, uma vez que é nesta fase que serão especificadas as propriedades dos materiais e dos ferramentais utilizados, além dos parâmetros de processo. Com base na literatura e do banco de dados do *software* QForm UK, a tabela 3 mostra os parâmetros que foram definidos:

Tabela 3 – Parâmetros de simulação.

Parâmetros de simulação	
Material a ser utilizado na peça:	Liga de Alumínio AA4032
Material do ferramental:	Aço AISI H13
Tamanho da matriz referenciada:	240,82 mm
Tamanho da matriz reduzida:	110 mm
Volume necessário para preencher a matriz:	84915,88 mm ³
Temperatura do ferramental e <i>billet</i> :	300 e 460°C
Força necessária de forjamento:	2,5 MN
Lubrificação:	Óleo mineral + grafite

Fonte: Próprio autor, 2024.

Os parâmetros adotados foram os mais próximos possíveis daqueles empregados no processo de forjamento da peça de referência. Para isso, as definições foram fundamentadas na literatura técnica e em estudos previamente realizados sobre o assunto.

3.5.1 MATERIAL UTILIZADO NA PEÇA

A liga de alumínio utilizada foi a liga Al-Si AA4032, liga tradicionalmente usada para o forjamento de pistões automotivos (ASM HANDBOOK, 1990). Na tabela 3 pode ser visualizado a composição química.

Tabela 4 – Composição química da liga de alumínio AA4032.

Fe	Si	Mg	Cu	Cr	Ni	Zn
1	13,5	1,3	1,3	0,1	1,3	0,25

Fonte: QForm UK, 2025.

A seguir, na tabela 5, é apresentado as propriedades mecânicas do material utilizado nas simulações.

Tabela 5 – Propriedades mecânicas do material

Propriedades mecânicas do material	
Coeficiente médio de expansão térmica	19,4 $\mu\text{m/m} \cdot ^\circ\text{C}$
Condutividade térmica à 25 $^\circ\text{C}$	138 $\text{W/m} \cdot ^\circ\text{C}$
Densidade	2,68 g/cm^3
Dureza	120 HB
Temperatura de fusão	532 - 570 $^\circ\text{C}$
Limite de resistência à fadiga	110 MPa
Máxima resistência ao cisalhamento	260 MPa
Máxima resistência à tração	380 MPa
Módulo de elasticidade	79 GPa
Resistência à tração e ao escoamento	315 MPa
Tensão de escoamento à 300 $^\circ\text{C}$	210 MPa
Tensão de escoamento à 460 $^\circ\text{C}$	100 MPa

Fonte: Adaptado ASM HANDBOOK, 1990.

3.5.2 MATERIAL UTILIZADO NO FERRAMENTAL

Neste presente trabalho, o material utilizado para as ferramentas aplicadas para o forjamento a quente, foi o aço AISI H13.

De acordo com o software QFormUK, o aço AISI H13 possui uma dureza média de 53HRC e um limite de escoamento de 1607MPa. A tabela 6 demonstra a composição química do mesmo.

Tabela 6 - Composição química do aço AISI H13.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V
0,45	1,2	0,55	0,03	0,03	5,5	1,7	1,15

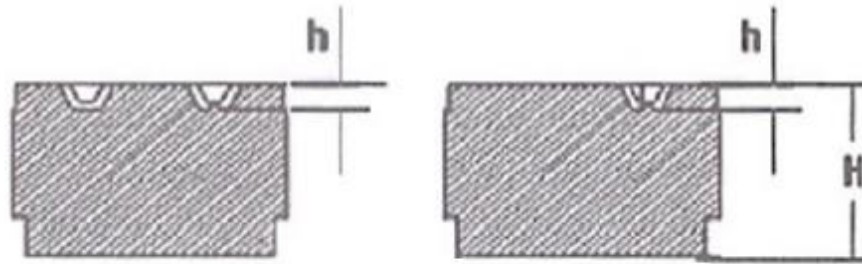
Fonte: QForm UK, 2025.

3.5.3 TAMANHO DA MATRIZ

No processo de forjamento, um dos parâmetros mais relevantes é o dimensionamento da matriz na qual a peça será conformada. Neste estudo, foram utilizadas duas matrizes: uma baseada em premissas de referência previamente estabelecidas (SCHAEFFER, 2004) e outra desenvolvida a partir da redução do tamanho da referência inicial, denominada nesse trabalho de matriz reduzida, na qual teve como objetivo principal comparar o efeito do tamanho das matrizes nos resultados da simulação analisados.

Conforme visto na figura 12, é mostrado a recomendação da literatura para as dimensões gerais de matrizes de forjamento em função da altura da cavidade da peça forjada.

Figura 12 – Tabela referente à altura da cavidade da peça forjada para estimar a altura da matriz referenciada.



h, mm	H, mm
6	100
10	125
40	200
100	315

Fonte: Adaptado de Schaeffer, 2004.

Com base na figura 12, foi preciso aplicar o método de interpolação utilizando a medida da altura cavidade (h) para determinar o tamanho correspondente da matriz (H). Considerando que a profundidade da cavidade é de 61,30 mm, adotaram-se quatro valores de referência para o cálculo: duas associadas à cavidade e duas à matriz, sendo um valor inferior e outra superior em relação ao valor analisado. Em seguida, foram efetuados os cálculos necessários para a realização da interpolação, seguindo:

$$\frac{100-40}{61,30-40} = \frac{315-200}{x-200}; x = 240,82 \text{ mm}$$

Já para a matriz com dimensões reduzidas, estabeleceu-se como estimativa uma altura de 110 milímetros.

3.5.4 ALTURA DO *BILLET* NECESSÁRIO PARA PREENCHER A MATRIZ

A determinação da altura do *billet* se deu a partir da definição de duas variáveis, sendo elas: o volume da peça, na qual foi fornecido pelo modelamento no *software* SolidWorks® e também o diâmetro inicial do *billet*, diâmetro comercial escolhido através de consulta em catálogo comercial de barras redondas - catálogo Gilena Aços e Metais. O diâmetro comercial selecionado, foi o mais próximo do diâmetro da matriz, portanto, o diâmetro adotado foi de 63,50 mm. Após isso, foi possível calcular a altura do mesmo pela equação 1:

$$V = \frac{\pi \times D^2}{4} \times h \quad (1)$$

Onde:

- V – Volume de material mínimo necessário para preencher a cavidade da matriz;
- D – Diâmetro do *billet* (barra redonda de alumínio extrudado);
- h – Altura do *billet*.

Diante do exposto, a altura necessária do *billet* para o processo de forjamento do pistão proposto é de $h = 26,81$ mm com base na equação 1, sendo assim:

$$V = 84915,88 \text{ mm}^3 \qquad D = 63,50 \text{ mm}$$

$$h = \frac{84915,88 \times 4}{\pi \times (63,5)^2} = 26,81 \text{ mm}$$

Entretanto, o dimensionamento do *billet* foi inicialmente baseado no volume do pistão final já usinado, a qual serviu como referência para o desenvolvimento deste trabalho. No entanto, é necessário levar em conta o volume da peça bruta de forjamento, ou seja, a peça acrescida de sobremetal de usinagem, que para este caso foi considerado 3 mm no diâmetro. Uma vez que, após essa etapa de forjamento a peça ainda passará por processos de usinagem para aquisição do formato final.

Além disso, deve-se considerar que, durante a exportação do modelo entre os *softwares* SolidWorks e QForm UK, ocorre uma perda de volume atribuída às diferenças nos formatos de arquivos e interpretações geométricas. Assim, o tamanho final do *billet*, ajustado com base nesses fatores e nos cálculos realizados, foi definido como 33 milímetros de altura.

3.5.5 FORÇA NECESSÁRIA DO PUNÇÃO PARA O FORJAMENTO

Segundo BATALHA *et al.* (2011), a força de forjamento é dada pela equação abaixo.

$$F = \sigma_m \times A_o \times C \tag{2}$$

Onde:

- σ_m – Tensão média de escoamento do material;
- A_o – Área da seção transversal da peça;
- C – Constante empírica relacionada com a complexidade da matriz.

A constante empírica C , que depende da complexidade da matriz, é dada da seguinte forma:

- $C = 1,2$ a $2,5$ para achatamento de cilindro entre duas superfícies planas de ferramenta;
- $C = 3$ a 8 para matriz fechada de forma simples e com rebarba;
- $C = 8$ a 12 para matriz fechada de forma complexa.

Dessa forma, com todos os dados devidamente obtidos, é possível calcular a força requerida para o forjamento do pistão. Para esse cálculo, foi utilizado $C = 8$. Portanto:

$$\sigma_m = 100 \text{ MPa}; A_o = \frac{\pi \times D^2}{4}; C = 8$$

Substituindo:

$$F = 100 \text{ MPa} \times \frac{\pi \times 63,5^2}{4} \text{ mm} \times 8 = 2,53 \times 10^6 \text{ N} = 2,53 \text{ MN}$$

3.5.6 OUTROS PARÂMETROS

Outros parâmetros, como as propriedades mecânicas dos materiais, velocidade de deformação, coeficiente de atrito e coeficiente de transmissão de calor, foram definidos com base nos valores padrões previamente estabelecidos pelo próprio *software* de simulação. No que se refere transferência de calor para o meio, adotou-se a condição de resfriamento por ar, com temperatura fixada em 20°C .

3.6 RESUMO DOS PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

Neste estudo, foram estabelecidas quatro condições de forjamentos distintas, cada uma associada a um tipo específico de parâmetro de simulação. As condições estão relacionadas ao tamanho da matriz e a temperatura de forjamento. A tabela 7 apresenta essas condições correspondentes a cada parâmetro analisado.

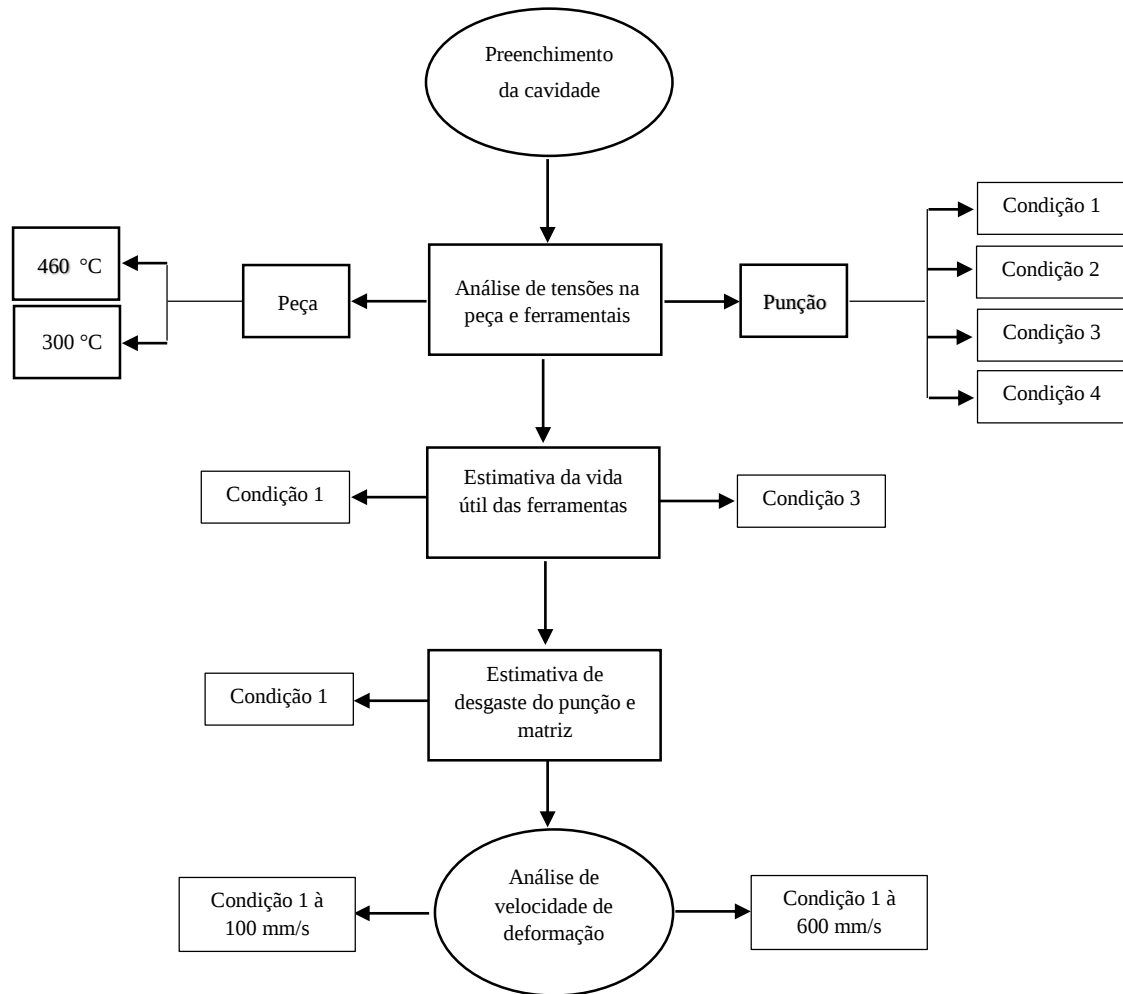
Tabela 7 - Condições de simulação adotadas.

Matriz com tamanho literatura			Matriz com tamanho reduzido		
Condição 1	MLT460	460 °C	Condição 3	MRT460	460 °C
Condição 2	MLT300	300 °C	Condição 4	MRT300	300 °C

Fonte: Próprio autor, 2025.

Além disso, na figura 13 é apresentado um fluxograma que representa a sequência adotada na condução do estudo dos objetivos propostos neste trabalho.

Figura 13 – Fluxograma da condução do estudo e dos objetivos.



Fonte: Próprio autor, 2025

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

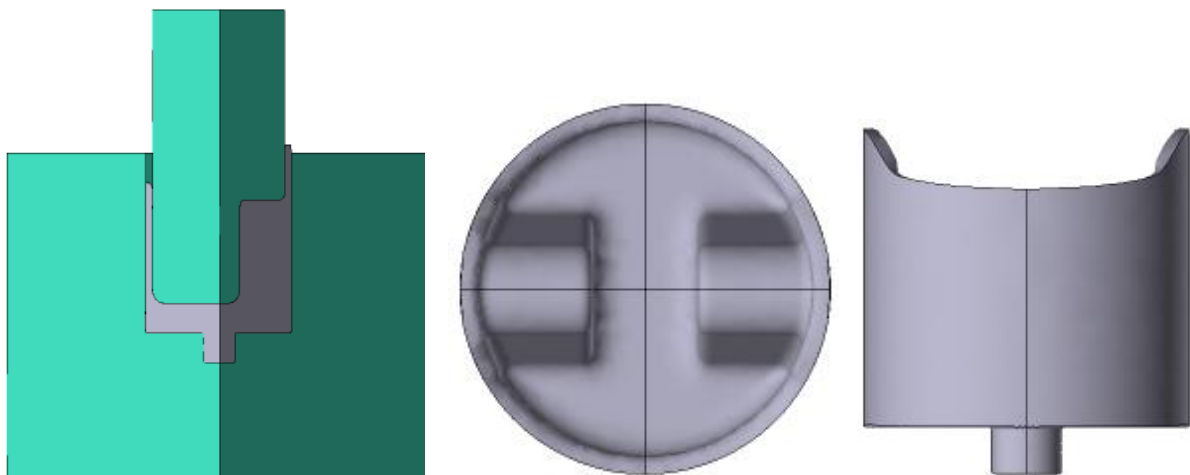
Nesta seção, são detalhados os principais resultados da pesquisa, seguidos da interpretação e discussão com base nos dados obtidos e no embasamento teórico.

4.1 ANÁLISE DO PROCESSO DE PREENCHIMENTO DA CAVIDADE E FORMAÇÃO DO PISTÃO

O preenchimento adequado do *billet* na cavidade da matriz é de fundamental importância para a obtenção de uma peça com alta precisão dimensional, minimização de esforços e otimização da qualidade final.

Na figura 14 observa-se que, ao utilizar na simulação o *billet* com as dimensões previamente calculadas, o preenchimento da matriz ocorreu de forma adequada, resultando na formação do pistão conforme o esperado, inclusive no que se refere às suas dimensões finais. Cabe ressaltar que eventuais excessos ou deficiências de material em pontos específicos da matriz são inerentes ao processo de forjamento, uma vez que, conforme mencionado no tópico 3.5.4, a peça será submetida a processos de usinagem após o forjamento.

Figura 14 – Preenchimento da cavidade em $\frac{1}{4}$ do tamanho do modelo e pistão em tamanho completo nas vistas superior e frontal.



Fonte: Próprio autor, 2025.

Portanto, após as análises é possível afirmar que a altura e diâmetro calculado do *billet* está de acordo com o volume necessário para o preenchimento do mesmo, logo ainda, possuindo uma espessura a mais de parede de 3 milímetros no diâmetro, denominada de sobremetal para futura usinagem com o objetivo de alcançar sua geometria final com precisão.

4.2 ANÁLISE DE TENSÕES NA PEÇA E NOS FERRAMENTAIS

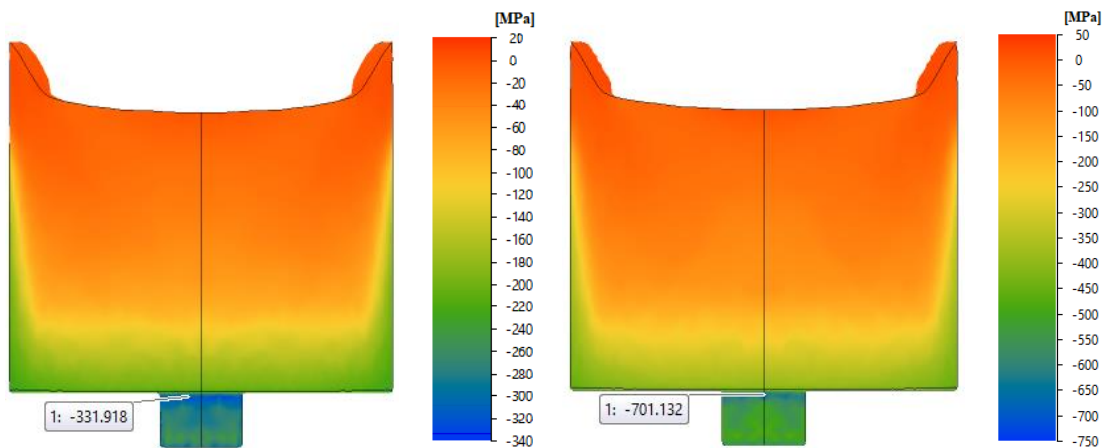
Através da simulação, foi possível visualizar as tensões desenvolvidas na peça e nos ferramentais. A partir disso, pode-se identificar regiões com altas tensões, onde é importante verificar, principalmente para as tensões tratativas, se irá atingir valores próximos da tensão de ruptura do material conformado. Esses pontos são de suma importância para serem analisados, logo que, uma vez alcançado valores maiores que a tensão de ruptura do material, poderá criar trincas e/ou defeitos no componente forjado.

Nas análises realizadas, foram avaliadas as tensões médias na peça e as tensões efetivas nos ferramentais, considerando as temperaturas de forjamento de 460 °C e 300 °C. Na figura 15, são apresentadas as maiores tensões identificadas na peça, conforme fornecido pelo *software*. Ressalta-se que os valores negativos observados se devem ao fato de que a peça está sendo comprimida pela ação do punção e reação da matriz.

Pode-se observar a influência da temperatura de forjamento na tensão desenvolvida no componente forjado. Nota-se que o perfil da distribuição de tensão é muito semelhante para ambas condições. Na condição 1 – MLT460, a tensão desenvolvida foi menor, como esperado, atingindo um máximo de 331,9 MPa de tensão compressiva. Enquanto, na condição 2 – MLT300, a tensão máxima observada foi de 701,1 MPa compressiva, ou seja, a tensão máxima atingida no componente forjado mais que dobrou, por conta da mudança na temperatura de forjamento.

Considerando que as tensões de escoamento para a liga AA4032, nas temperaturas de forjamento avaliadas, são aproximadamente 100 MPa e 210 MPa, respectivamente, a tensão máxima desenvolvida em ambas condições apresentam bem acima da tensão de escoamento do material, porém são tensões compressivas, que geralmente não causam defeitos de trincamento. Vale ressaltar que, a temperatura de forjamento de 300 °C não se mostra a melhor escolha, pois aumenta significativamente a tensão máxima desenvolvida.

Figura 15 – À esquerda, tensão na peça à 460 °C; à direita, tensão na peça à 300 °C.

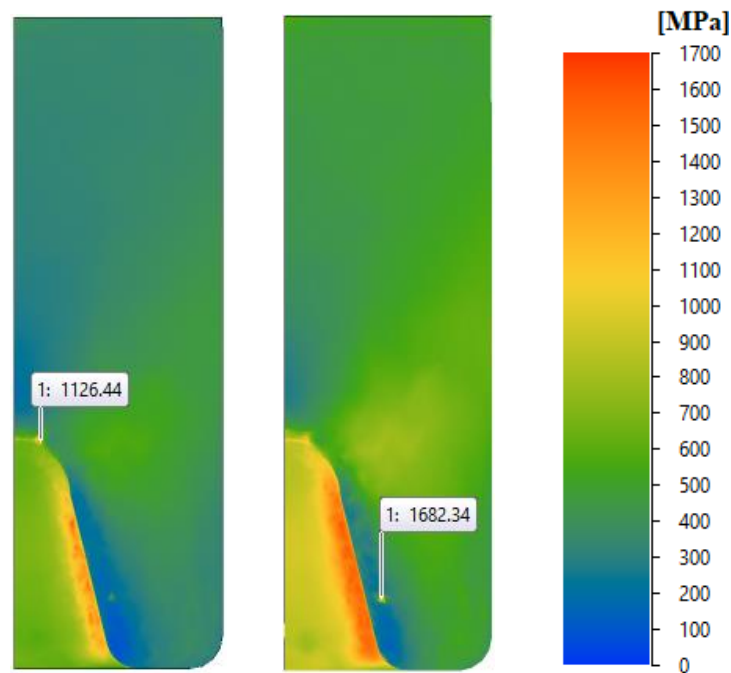


Fonte: Próprio autor, 2025.

No caso dos ferramentais, a análise das tensões concentrou-se no punção. Além disso, foi utilizado o mesmo tamanho de punção para as diferentes matrizes já especificadas. Na figura 16 é mostrado a distribuição das tensões no punção, quando forjada com a matriz de tamanho reduzido. Já na figura 17, é mostrada as tensões no punção para a matriz com o comprimento baseado na literatura. Pode-se observar que ao reduzir o tamanho da matriz, a tensão máxima desenvolvida no punção diminuiu em 21,6%, quando forjado na temperatura de 460°C, enquanto que para a temperatura de forjamento de 300 °C, a tensão máxima desenvolvida no punção aumentou em 4,1%.

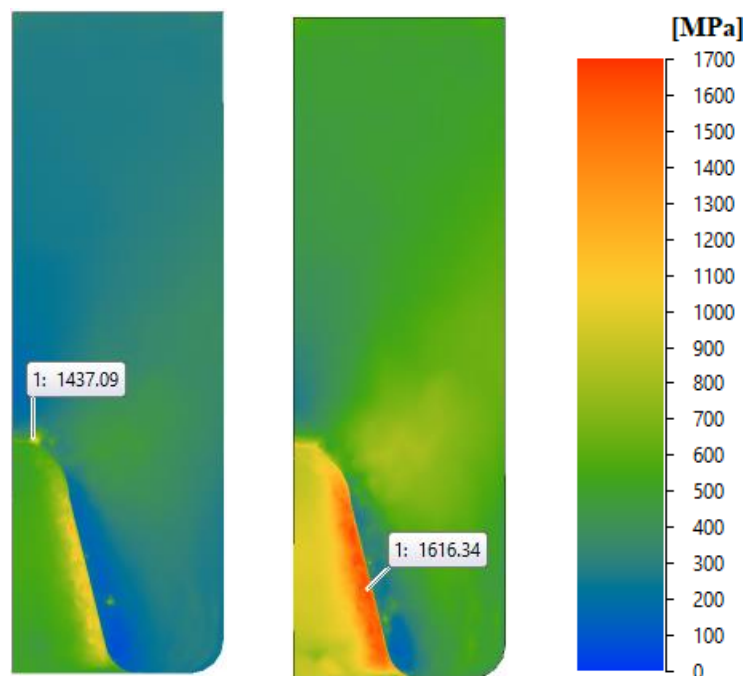
Pode-se analisar através da simulação, o efeito da temperatura de forjamento na tensão desenvolvida no punção. Observa-se que a tensão se concentra na região inclinada da ferramenta, chegando a valores muito altos. Destaca-se que na condição 2 - MLT300, foi verificado valores muito próximos a 1700 MPa de tensão trativa. Essas altas tensões trativas, prejudicam a vida útil da ferramenta, pois aumenta o desgaste, propícia a iniciação e propagação de trincas, com isso, diminuindo a vida em fadiga.

Figura 16 – Simulação com a matriz reduzida. À esquerda, tensão no punção à 460 °C; à direita, tensão no punção à 300 °C.



Fonte: Próprio autor, 2025.

Figura 17 – Simulação com o tamanho da matriz com base na literatura. À esquerda, tensão no punção à 460 °C; à direita, tensão no punção à 300 °C.

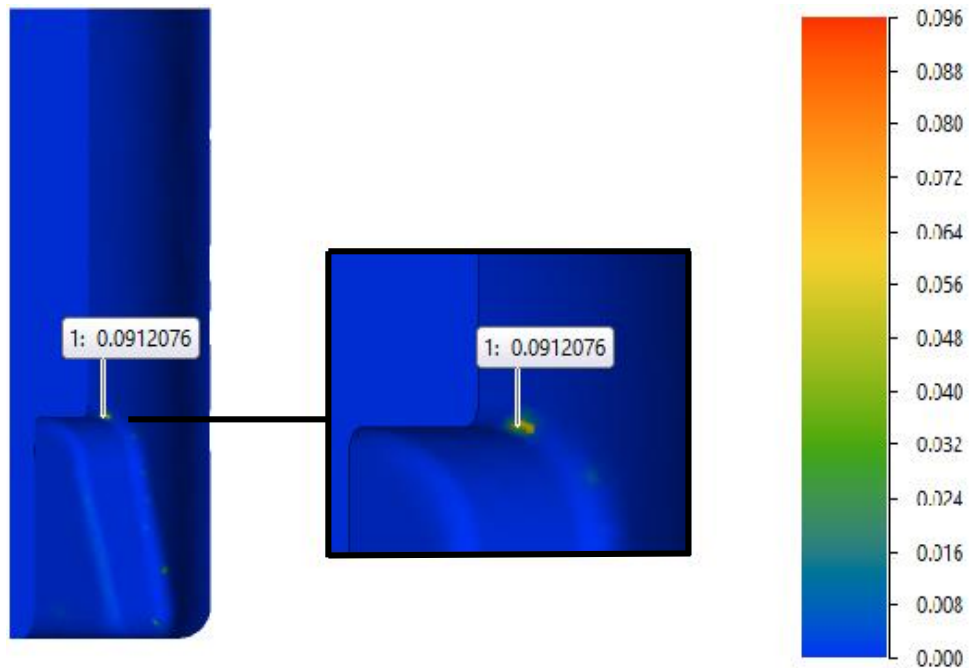


Fonte: Próprio autor, 2025.

No punção, foram identificadas regiões submetidas a tensões elevadas, cujos valores máximos atingiram 1616,34 MPa na matriz baseada na literatura e 1682,34 MPa na matriz reduzida, ambas simuladas com temperatura de forjamento de 300 °C. Nota-se que, nesta

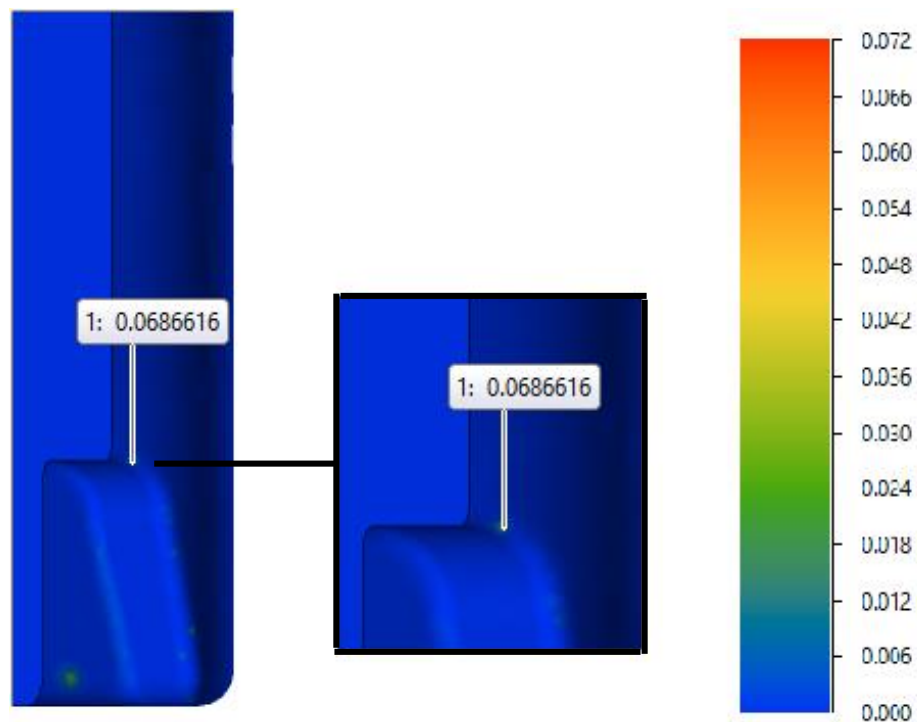
temperatura observou-se a ocorrência de deformações plásticas, uma vez que as tensões ultrapassaram o limite de escoamento do material, estabelecido em 1607 MPa. Nas figuras 18 e 19, é possível ver as deformações plásticas ocorridas no punção citadas acima:

Figura 18 – Deformação plástica no punção na condição MRT300.



Fonte: Próprio autor, 2025.

Figura 19 – Deformação plástica no punção na condição MLT300.



Fonte: Próprio autor, 2025.

As maiores tensões concentraram-se nas regiões de mudanças de seção e com raios reduzidos, resultando em zonas com acúmulo significativo de tensões, o que torna essas regiões mais propensas à ocorrência de falhas. Vale ressaltar que, a simulação, foi realizada para um golpe, assim, apresentando pequenas deformações pontuais nos punções, portanto, para uma larga escala de produção, ou seja, muitos golpes, deve-se levar em consideração a magnitude repetitiva dessa deformação.

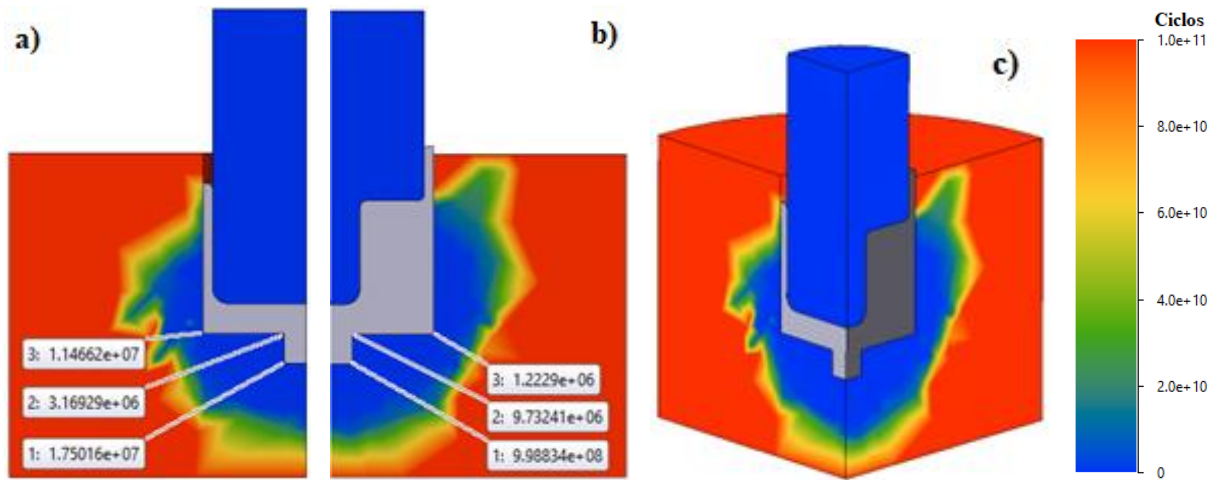
4.3 ANÁLISE DE CICLOS DE FADIGA DESENVOLVIDAS NO FERRAMENTAL

O principal objetivo dessa etapa é prever a vida útil dos ferramentais sob diferentes condições de forjamento. Portanto, no QForm UK, para analisar a durabilidade das matrizes, propõe-se o uso do critério deformacional-cinético de Gusenkov, este critério permite considerar tanto as componentes elásticas quanto plásticas da deformação, juntamente com o amolecimento termocíclico. No software comercial QForm UK, foi integrada uma sub-rotina que permite prever o número de ciclos até a falha da ferramenta de conformação.

Para a análise dos dados gerados pelas simulações, foram selecionados três pontos específicos do ferramental, identificados como aqueles que apresentam as maiores tensões. A partir desses três pontos, foi escolhido o ponto que apresentou o menor número de ciclos ou golpes para que ocorra a falha por fadiga, sendo essa utilizada na estimativa da vida útil do ferramental.

Na figura 20, pode-se observar a distribuição da vida em fadiga da matriz. Nota-se que, à medida que se aproxima da cavidade da peça, o número de ciclos até a falha diminui, região de coloração azul. Pode-se observar que o raio mais de fora da cavidade da matriz (ponto 3), é a região que apresenta a menor vida em fadiga da ferramenta. Na condição de maior temperatura de forjamento, 460 °C, a vida em fadiga na região mais crítica da ferramenta é na ordem de $1,2 \times 10^6$ ciclos.

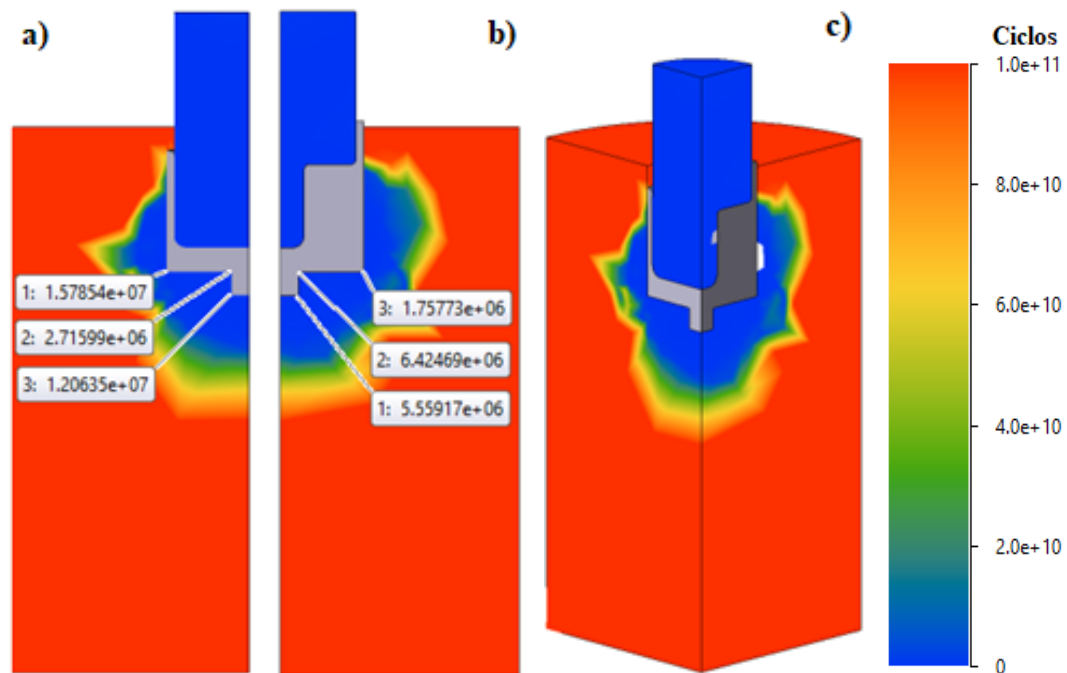
Figura 20 – Simulação da vida em fadiga com matriz reduzida. a) Vista frontal; b) vista lateral; c) vista isométrica.



Fonte: Próprio autor, 2025.

Na sequência, é apresentada a simulação da vida em fadiga do ferramental, quando considerado o tamanho da matriz recomendado pela literatura. Percebe-se que para esta condição de matriz, a simulação com maior temperatura de forjamento, 460°C , a vida em fadiga na região mais crítica da ferramenta é na ordem de $1,75 \times 10^6$ ciclos.

Figura 21 – Simulação da vida em fadiga com o tamanho da matriz recomendada pela literatura. a) Vista frontal; b) vista lateral; c) vista isométrica.



Fonte: Próprio autor, 2025.

Com base nos resultados obtidos, observa-se que, em todas as simulações, o ponto 3, apresentou os menores valores de ciclos até a falha por fadiga, indicando que esta é a região mais crítica da matriz no processo de forjamento, independentemente da geometria adotada ou da temperatura aplicada. Isso, pode ter correlação com o fato, que, nessa região, exige-se mais da matriz, devido a quantidade superior de material forjado em comparação com outras partes, além de que, essa região apresenta as maiores tensões desenvolvidas na matriz.

Adicionalmente, observa-se que, em ambas as simulações, a quantidade de ciclos até a fratura, resultou em uma vida em fadiga significativamente elevada, na ordem de 1 milhão de golpes de forjamento. No entanto, a matriz com o tamanho recomendado pela literatura, apresentou um aumento de 43,44% na vida útil em relação à matriz com tamanho reduzido, comprovando-se, assim, sua superioridade para aplicação no processo de forjamento.

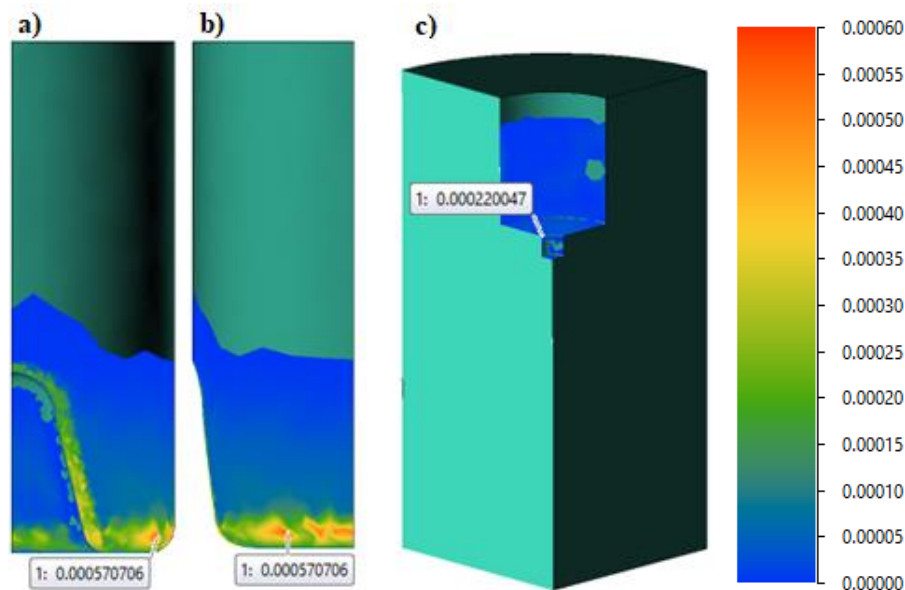
4.4 ANÁLISE DO DESGASTE NOS FERRAMENTAIS

O objetivo principal desta análise é prever o desgaste dos ferramentais e identificar as regiões mais suscetíveis a esse fenômeno.

Na figura 22, é apresentada a simulação do desgaste do ferramental na condição 1 – MLT460. Observa-se que os maiores níveis de desgaste estão localizados na parte inferior da cavidade da peça conformada, que coincide com a região que apresentou maiores valores de tensões no forjado (figura 15). O desgaste no punção está concentrado na região frontal (cabeça do punção) com magnitude máxima de 0,00057, enquanto na matriz, o maior desgaste ocorre na área do ressalto, tendo como magnitude máxima, o valor de 0,00022. Vale ressaltar que, esses valores correspondem a profundidade da matriz desgastada a cada golpe, com base no *software* QForm UK que utiliza a equação de Archard (OLIVEIRA, Felipe S; *et al*, ca. 2022) para prever o desgaste na matriz através das pressões normais e das tensões de cisalhamento na superfície, sendo a equação de Archard validada experimentalmente.

A simulação mostrou que os maiores valores de desgaste são localizados e concentrados nas zonas de maior contato com o material, possivelmente devido a pressão elevada e mudança de seção.

Figura 22 – Simulação apresentando o desgaste nas ferramentas. a) Punção vista frontal; b) punção vista lateral; c) matriz em vista isométrica.



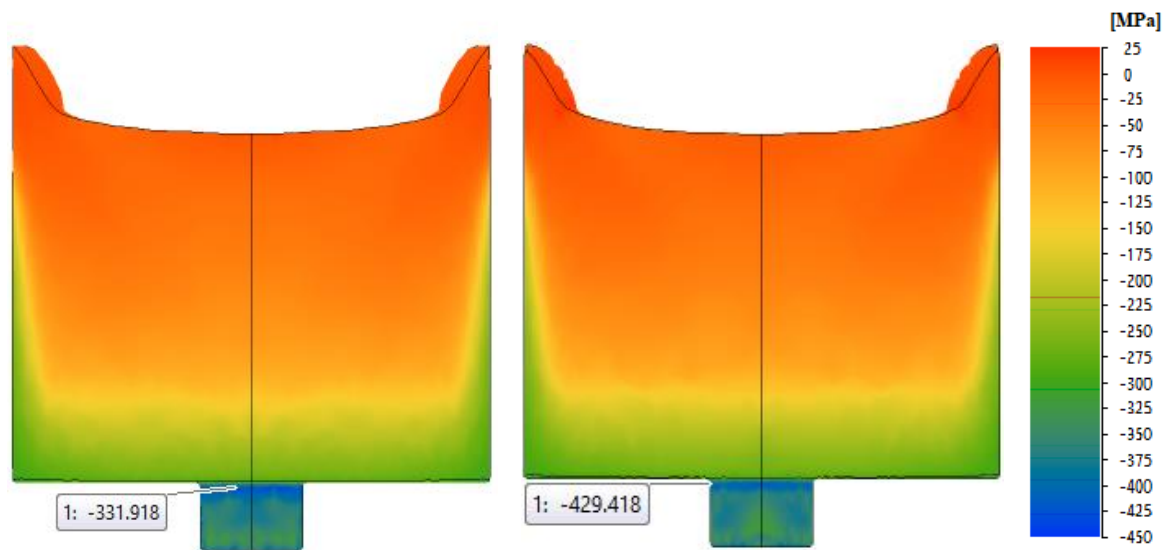
Fonte: Próprio autor, 2025.

4.5 ANÁLISE DE VELOCIDADE DE DEFORMAÇÃO DA PEÇA

A velocidade da ferramenta ou velocidade de deformação é um dos parâmetros mais importantes do processo, pois além de afetar a conformabilidade do material, impacta na produtividade do processo de forjamento. Neste trabalho, a influência da velocidade do punção foi avaliada em dois patamares: 100 e 600 mm/s

Na figura 23, observa-se a distribuição de tensão no forjado, através da simulação com diferentes velocidades de deformação. Com a velocidade do punção de 100 mm/s, o perfil de tensões apresenta uma distribuição mais suave, indicando uma transição gradual dos níveis de deformação e tensão ao longo da peça. Por outro lado, na simulação com velocidade de 600 mm/s, verifica-se um perfil de tensões, com uma variação mais abrupta, especialmente na região inferior da peça. Nota-se também que, constatou-se um aumento de aproximadamente 29,37% na tensão máxima desenvolvida, ao utilizar a maior velocidade de deformação, o que pode indicar também um aumento das tensões desenvolvidas nos ferramentais, aumentando o risco de formação de trincas e falhas localizadas.

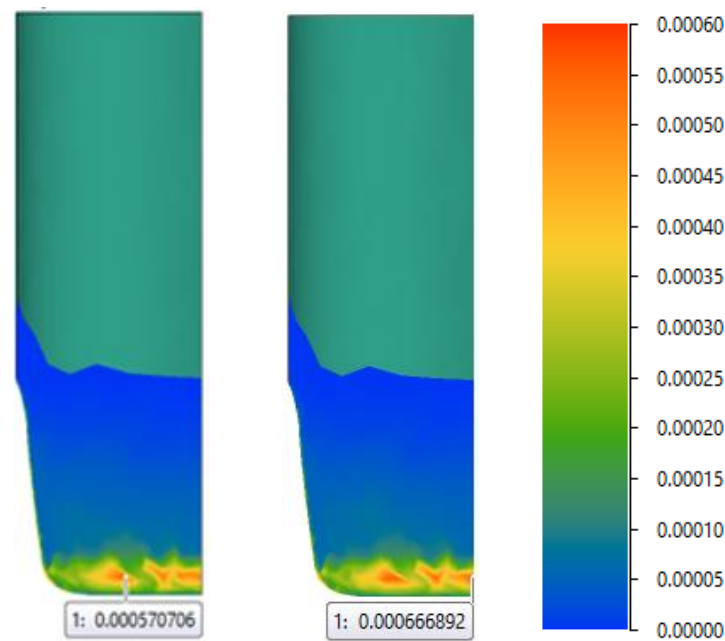
Figura 23 – À esquerda, simulação realizada em 100 mm/s; à direita, simulação realizada à 600 mm/s.



Fonte: Próprio autor, 2025.

Na figura 24, é demonstrado os mesmos parâmetros para o desgaste dos ferramentais, como no tópico 4.2, os maiores desgastes foram observados no punção, assim, se justifica a análise somente deste. Contudo, os resultados indicaram que, com o aumento da velocidade de deformação, houve um acréscimo de aproximadamente 17,54% no desgaste máximo. Além disso, observou-se uma leve ampliação da região crítica de desgaste na simulação com maior velocidade, especialmente na área inferior do punção, onde ocorre o principal contato com o material. Esse aumento no desgaste está associado à intensificação da taxa de deformação e aumento de tensões, o que pode comprometer a vida útil da ferramenta e a qualidade do processo de conformação. Portanto, o controle da taxa de deformação é um fator relevante para a durabilidade do punção e a estabilidade do processo.

Figura 24 - À esquerda, simulação realizada em 100 mm/s; à direita, simulação realizada à 600 mm/s.



Fonte: Próprio autor, 2025.

De maneira resumida e para melhor comparação, as análises realizadas neste trabalho estão resumidas na tabela 8.

Tabela 8 – Resultados gerais das análises e simulações.

	Matriz reduzida			Matriz literatura					
	Temperatura de forjamento			Temperatura de forjamento			Velocidade de punção [mm/s]		
	300 °C	460 °C	Δ%	300 °C	460 °C	Δ%	100	600	Δ%
σ _{máx.} forjado [MPa]	-	-	-	701,1	331,9	-52,66	331,9	429,4	29,37
σ _{máx.} punção [MPa]	1126,44	1682,34	49,35	1616,34	1437,09	-11,09	-	-	-
Vida em fadiga da matriz no ponto 3 [Ciclos até a falha]	-	1,22x10 ⁶	-	-	1,75x10 ⁶	-	-	-	-
Desgaste no punção	-	-	-	-	0,00057	-	0,00057	0,00067	17,54
Desgaste na matriz	-	-	-	-	0,00022	-	-	-	-

Fonte: Próprio autor, 2025.

5 CONCLUSÕES

Diante disso, conclui-se que os resultados do trabalho foram satisfatórios, permitindo a identificação de parâmetros inadequados, possíveis falhas na formação da geometria final da peça, pontos críticos responsáveis por tensões elevadas, previsões de vida útil dos ferramentais e ocorrência de desgaste prematuro, revelando-se, assim, uma ferramenta essencial no desenvolvimento e aprimoramento de processos de conformação mecânica. Destacam-se, como principais conclusões, os seguintes pontos:

- A simulação confirmou o preenchimento completo da cavidade, confirmando que o tamanho do *billet* é adequado;
- Forjamento a 300 °C mostrou-se inadequado devido a altas tensões e risco de defeitos;
- A matriz baseada na literatura apresentou maior vida útil em comparação à matriz reduzida, evidenciando maior eficiência e confiabilidade no processo;
- Desgaste foi mais intenso em áreas com maior contato e geometria complexa;
- Velocidades mais altas aumentaram tensões e desgaste, elevando o risco de falhas no processo;
- A simulação se mostrou uma ferramenta eficaz para identificação de falhas, otimização de parâmetros e previsão de vida útil dos ferramentais.

6 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Para futuros trabalhos, é sugerido a verificação da exatidão do modelo computacional por meio de testes práticos ou dados baseados em pistões forjados já disponíveis no mercado, como também o estudo da influência do tipo, densidade e refinamento da malha na precisão e eficiência da simulação do *software* QFormUK, e, a implementação da metodologia em uma empresa real para avaliação de desempenho e aplicabilidade.

REFERÊNCIAS

ASM INTERNACIONAL. **ASM Handbook – properties and selection: irons, steels, and high performance alloys**. Estados Unidos da América: ASM Internacional, 2005b. v.1. 2521p.

ASM. **Aluminum and Aluminum Alloys**. ASM International. p. 351-416. 2001.

ASM HANDBOOK: **Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials**., 1990. v. 2.

AVNER, S. H. **Introduction to physical metallurgy**. 2. Ed. McGraw-Hill Internacional Editions, 1974. 696p.

Barras de Alumínio Redondas. **Gilena Aços e Metais**. Disponível em: <<https://www.gilena.com.br/barras-de-aluminio-redondas.php>>. Acesso em: 17 maio. 2025.

BATALHA, P. E.; SPINELLI, D.; MORAES, E. P. **Conformação plástica dos metais**. São Paulo: Edgard Blücher, 2011.

DO PRADO, R. **SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL POR ELEMENTOS FINITOS DO PROCESSO DE FORJAMENTO A FRIO**, 2015.

Elastic-Plastic Thermomechanical Fatigue Analysis of Forging Dies // A. Vlasov, N. Biba e S. Stebunov, *Volume 716 da coleção Key Engineering Materials, 2016, Trans Tech Publications Ltd, Suíça, p.667*

Grunning K. **Técnica da Conformação**. São Paulo: Editora Polígono SA; 1996. p. 38-64

HELMAN, H.; CETLIN, P. **FUNDAMENTOS DA CONFORMAÇÃO MECÂNICA DOS METAIS**. Disponível em: <https://www.artliber.com.br/amostra/fundamentos_da_conformacao.pdf>.

HILDEBRAND, G. **Fundamentos de Motores de Combustão Interna**. 2. ed. São Paulo: Editora Blucher, 2017

HOLMAN, J. et al. McGraw-Hill **Series in Mechanical Engineering INTERNAL COMBUSTION ENGINE** Xnderung nur iiber. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://www.iust.ac.ir/files/mech/ayatgh_c5664/files/internal_combustion_engines_heywood.pdf>.

KERNI, L.; RAINA, A.; HAQ, M. I. U. (EDS.). **Performance evaluation of aluminium alloys for piston and cylinder applications** .

MAHLE. **Curso Metal Leve Motores de Combustão Interna**. 2019. Disponível em: <https://www.mahle-aftermarket.com/media/local-media-latin-america/catalogs/manuais-tecnicos/manual-curso-de-motores-2019.pdf>.

MICHELS, L. et al. **Uma visão geral sobre os equipamentos utilizados no processo de forjamento**.

MORAES, 2010 MORAES, S. A. de: **Estudo teórico-experimental da calibração de barras redondas laminadas a quente**. Dissertação de Mestrado. PPGE3M, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2010.

MOTOR SERVICE. **Assim funciona o pistão**. Rheinmetall. Disponível em: https://www.ms-motorservice.com/br/pt_br/tecnipedia/assim-funciona-o-pistao-1268;

NIU, Dexue; ZHANG, Jian; XIONG, Peiyong; HAO, Guannan; LIU, Shiyong; GUO, Wei. **High temperature fatigue and oxidation characteristics of forged steel piston materials.**

OLIVEIRA, Felipe S.; BEGGS, Nicholas; DUARTE, Alisson S. **Aumento da vida útil das matrizes de forjamento a quente de um cubo com o auxílio da simulação.** ., [s. l.], ed. SIXPRO 42 SENAFOR, [ca. 2022].

PINTO, J. P. R. P., **Forjamento em matriz fechada de peças em aço.** Dissertação, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 2017.

PULKRABEK, W. W. **Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine**, 2nd Ed. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, v. 126, n. 1, p. 198, 2004.

ROBERTS, G.; KRAUSS, G.; KENNEDY, R. **Tool steels.** 5. ed. Materials Park, Ohio: ASM International, 1998. p. 1-123, p. 219-50.

RODRIGUES, Jorge; MARTINS, Paulo. **Tecnologia Mecânica Vol.II: Tecnologia da Deformação Plástica.** 2005.

SAHIN, M.; MISIRLI, C. **Mechanical and Metallurgical Properties of Friction Welded Aluminium Joints.** Aluminium Alloys-New Trends in Fabrication and Applications. p. 277-300, 2012.

SCHAEFFER, L. **Conformação Mecânica – Cálculos Aplicados em Processos de Fabricação** Cap. IV – Forjamento em Matriz Fechada, pg. 71

SCHAEFFER, Lirio. **Conformação Mecânica.** 2. ed. rev. [S. l.]: Imprensa Livre Editora, 2004.

SERIACOPI, VANESSA. **Simulação numérica do campo de tensões na microestrutura do aço AISI H13 durante o forjamento a quente.** 2013. Dissertação (Engenharia mecânica) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, [S. l.], 2013.

SHIGLEY, Joseph Edward; MISCHKE, Charles R.; BUDYNAS, Richard Gordon; NISBETT, Keith J. **Elementos de máquinas.** 8. ed. 2015.

SHIGLEY, Joseph Edward; MISCHKE, Charles R. **Standard Handbook of Machine Design.** 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1996;

SINGH, U. et al. **Comparative analysis of different materials for piston and justification by simulation.** (SINGH et al., 2020)

SIXPRO VIRTUAL&PRACTICAL PROCESS. **CASOS SIMULADOS para Forjamento, Extrusão e Trefilação** 2. ed. 2023.

SOUZA, J. H. **Estudo do processo de Corte de Chapas por Cisalhamento.** Porto Alegre, pg65, 2001.

STEMMER, Caspar Erich. **Projeto e construção de máquinas.** Ed. Globo, 1979.

T. ALTAN, S.OH, H. GEGEL. **Processos de conformação dos materiais – Introdução aos processos de conformação.** 2012. Pag.132. Universidade de São Paulo. São Paulo.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS. **Apostila de motores a combustão interna.** Pelotas. 2013. Disponível em: <https://wp.ufpel.edu.br/mlaura/files/2013/01/Apostila-de-Motores-a-Combustão-Interna.pdf>.

VIECELLI, A. **PROJETO DE MATRIZES FECHADAS DE FORJAMENTO À QUENTE, PARA PEÇAS AXISSIMÉTRICAS COM REBARBA, AUXILIADO POR COMPUTADOR.** Disponível em:

<<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/159026/000190968.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>.

[S.I.: s.n.]. **Fabricando um pistão.** 21--