

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

FABRÍCIO BECOM RAMOS

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL APLICADA AO PROCESSO DE FORJAMENTO
DE UMA CRUZETA**

**Alegrete
2024**

FABRICIO BECOM RAMOS

**SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL APLICADA AO PROCESSO DE FORJAMENTO
DE UMA CRUZETA**

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 12 de dezembro de 2024.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Cristian Pohl Meinhardt

Orientador
(UNIPAMPA)

Prof. Dr. Aldoni Gabriel Wiedenhöft

(UNIPAMPA)

Prof. Dr. Leandro Ferreira Friedrich

(UNIPAMPA)



Assinado eletronicamente por **LEANDRO FERREIRA FRIEDRICH, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 12/12/2024, às 14:44, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **CRISTIAN POHL MEINHARDT, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 12/12/2024, às 14:44, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **ALDONI GABRIEL WIEDENHOFT, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 12/12/2024, às 14:45, 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 **1623930** e o código CRC **264DFEEB**.

RESUMO

A simulação computacional atualmente vem ganhando cada vez mais espaço na indústria, uma vez que, por meio da simulação computacional é possível verificar o comportamento de componentes mecânicos não só quando sob solicitações, como também durante o seu processo de fabricação. Dessa forma, há uma economia de matéria prima, além de tempo durante o processo de desenvolvimento do produto, pois, ao utilizar recursos computacionais, torna-se dispensável testes que utilizam tentativa e erro durante este processo. Um tipo de componente mecânico na qual a simulação computacional pode ser aplicada é a cruzeta, também conhecida como junta universal ou, cruzeta do cardan. A principal parte do processo de fabricação de uma cruzeta é o forjamento, um tipo de conformação mecânica responsável por dar a forma desejada para o componente mecânico por meio da deformação plástica do mesmo, e que é dividido em três tipos; a frio, a morno e a quente. Este processo pode ser simulado através de *softwares* de simulação computacional específicos para processos que envolvam deformação plástica. A partir de uma cruzeta doada por uma forjaria automotiva, o objeto principal do trabalho consistiu em simular o processo de forjamento a frio e a morno utilizando o *software* de simulação computacional QForm UK. Posteriormente, foi realizada uma comparação entre os resultados obtidos através da simulação, com os dados que foram obtidos de forma prática, como a correlação entre a deformação a frio com a dureza, fibramento, além de análise de preenchimento de cavidade, tensões desenvolvidas na peça e no ferramental e comparação entre o processo a frio e a morno. Com isso, foram obtidos resultados satisfatórios, onde o preenchimento da cavidade se mostrou adequado, no entanto, tensões elevadas foram observadas na peça e no ferramental. Observou-se também pontos que ocorreram deformação plástica no ferramental. O fibramento se mostrou semelhante à da peça real, já a correlação entre deformação a frio e dureza divergiu entre alguns pontos.

Palavras-Chave: Simulação computacional, cruzeta, forjamento.

ABSTRACT

Computer simulation is currently gaining more and more space in the industry, since, through computer simulation, it is possible to verify the behavior of mechanical components not only when under interference, but also during their manufacturing process. In this way, there is a saving of raw material, in addition to time during the product development process, since, by using computer resources, tests that use trial and error during this process become unnecessary. One type of mechanical component to which computer simulation can be applied is the crosshead, also known as a universal joint or cardan crosshead. The main part of the manufacturing process of a crosshead is forging, a type of mechanical forming responsible for giving the desired shape to the mechanical component through its plastic deformation, and which is divided into three types: cold, morning and hot. This process can be simulated through computer simulation software specific to processes involving plastic deformation. From a crosshead made by an automotive forging shop, the main objective of the work consisted of simulating the cold forging process and the morning using the computer simulation software QForm UK. Subsequently, a comparison was made between the results obtained through the simulation, with the data that were obtained in a practical way, such as the demonstration between cold deformation and hardness, fibering, in addition to the analysis of cavity filling, discovered in the part and not in the tooling and comparison between the cold process and the morning. With this, comprehensive results were obtained, where the cavity filling was shown to be adequate, however, high were observed in the part and in the tool. Also note points that present plastic deformation in the instrument. The fibering was shown to be similar to the real part, while the sample between cold deformation and hardness diverged between some points.

Keywords: Computer simulation, crosshead, forging.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação da conexão entre cruzeta e eixos de entrada e saída.....	13
Figura 2 - Forças atuantes em uma cruzeta	14
Figura 3 - Forjamento em matriz fechada	14
Figura 4 - Fluxo de grãos em processos de (a) forjamento; (b) fundição e (c) usinagem	15
Figura 5 - (a) Cruzeta obtida por meio do forjamento com canal de rebarba; (b) forjamento de precisão.....	16
Figura 6 - Influência da temperatura no processo de forjamento	17
Figura 7 - Processo de simulação computacional em conformação mecânica.....	19
Figura 8 - (a) Cruzeta com sinalização de defeitos superficiais; (b) sem sinalização	20
Figura 9 - Fluxograma das etapas realizadas no trabalho.....	21
Figura 10 – Medidas da cruzeta em [mm] à esquerda; cruzeta real à direita	22
Figura 11 - Medidas em [mm] das matrizes em vista superior à esquerda, e vista frontal à direita.....	22
Figura 12 - Esboço da dinâmica do ferramental em vista de seção.....	23
Figura 13 - Curva de escoamento a 20 OC do aço 16MnCrS5	25
Figura 14 - Pontos onde foram realizadas medidas de microdureza vickers na seção em corte da cruzeta.....	28
Figura 15 - Malha automática na peça e no ferramental	29
Figura 16 - Montagem pré simulação em 1/4 e com recurso de espelhamento	30
Figura 17 - Preenchimento da cavidade em corte na seção transversal e cruzeta formada em vista superior	31
Figura 18 - Comparação fibramento simulado vs real	31
Figura 19 - (a) Pontos onde foram realizadas as medidas; (b) deformações nestes pontos, (c) microdureza vickers.....	33
Figura 20 - Tensão desenvolvida na peça e comparação entre as rebarbas da peça simulada vs real	34
Figura 21 - À esquerda, tensão no ferramental, à direita, deformação plástica no ferramental do processo a frio.....	35
Figura 22 - Comparação entre temperaturas a frio à esquerda vs a morno à direita	35
Figura 23 - Tensão do processo a morno à esquerda; do processo a frio à direita	36
Figura 24 - Comparação entre a cruzeta real, à esquerda e a renderização da cruzeta simulada, à direita	36

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Vantagens e desvantagens do forjamento a frio	17
Quadro 2 - Principais softwares de simulação computacional aplicado a processos de conformação mecânica	19

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do aço 16MnCrS5	24
Tabela 2 - Composição química do aço M2	24
Tabela 3 - Composição química do aço H13	25
Tabela 4 - Parâmetros de simulação	28
Tabela 5 - Propriedades da malha.....	29
Tabela 6 - Microdureza vickers em pontos específicos da seção transversal da cruzeta.....	32

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICO	12
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1 CRUZETA	13
2.2 FORJAMENTO DE CRUZETAS	14
2.2.1 Forjamento a frio	16
2.2.2 Forjamento a morno	17
2.2.3 Forjamento a quente	17
2.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	18
2.4 SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE FORJAMENTO DE CRUZETAS	19
3 MATERIAIS E MÉTODOS	21
3.1 DIMENSÕES	21
3.2 ESBOÇO E PROJETO DA DINÂMICA DO FERRAMENTAL	22
3.3 PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO	23
3.3.1 Material da peça	23
3.3.2 Material do ferramental	24
3.3.3 Força necessária	25
3.3.4 Volume necessário	26
3.3.5 Outros parâmetros	26
3.4 METALOGRAFIA	26
3.5 ANÁLISE DE FIBRAMENTO	27
3.6 MICRODUREZA VICKERS	27
3.7 RESUMO DOS PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO	28
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	30
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	30
4.2 ANÁLISE DO PROCESSO DE PREENCHIMENTO DA CAVIDADE E FORMAÇÃO DA CRUZETA	30
4.3 ANÁLISE DO FIBRAMENTO (SIMULADO VS REAL)	31
4.4 ANÁLISE DA DEFORMAÇÃO VS DUREZA (SIMULADO VS REAL)	32
4.5 ANÁLISE DAS TENSÕES DESENVOLVIDAS NA PEÇA E NO FERRAMENTAL	33

4.6 COMPARAÇÃO ENTRE A SIMULAÇÃO A FRIO E A MORNO.....	35
4.7 RENDERIZAÇÃO E COMPARAÇÃO.....	36
5 CONCLUSÃO.....	37
6 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	38
REFERÊNCIAS	39

1 INTRODUÇÃO

A cruzeta é o componente mecânico responsável pela transmissão de torque e movimento rotativo entre dois eixos que não estão em linha reta, gerando a flexibilidade necessária para que os eixos possam mover-se em diferentes ângulos. Sua aplicação principal é nos veículos automotivos, como carros e caminhões, no entanto, também é utilizada em máquinas industriais e agrícolas que requerem transmissão de potência entre eixos na qual não estão perfeitamente alinhados. Dessa forma, a cruzeta é um componente mecânico que necessita de elevada resistência mecânica, assim como elevada resistência ao impacto, portanto, sendo necessário apresentar uma boa relação entre dureza e tenacidade.

Atualmente, utiliza-se o forjamento como processo de fabricação mais comum para obtenção de uma cruzeta. Os diversos tipos de aplicações e produtos obtidos por meio do forjamento apresentam uma ótima relação entre a qualidade e os custos de produção. Neste caso, destaca-se de, entre as principais características mecânicas de componentes forjados, a excelente relação entre resistência mecânica e peso, assim como uma elevada resistência a fadiga e ao impacto (RODRIGUES; MARTINS, 2010). Os processos de forjamento podem ser classificados em função da temperatura na qual são realizados, abrangendo três tipos de operações fundamentais; a frio, a morno e a quente (RODRIGUES; MARTINS, 2010).

É comum observar um ciclo iterativo de tentativa erro durante o processo de desenvolvimento de produtos forjados (PINTO, 2017). Dessa forma, a simulação computacional entra como uma ferramenta auxiliar no processo de desenvolvimento de produtos na conformação mecânica.

A grande vantagem da utilização da simulação numérica está na realização do *try-out* virtual: previsão das geometrias intermediária e final do produto, definição da sequência de conformação ideal e análise de tensões e deformações no produto e no ferramental. Reduz-se assim tempo e custo no desenvolvimento de novos produtos e nas melhorias de processos (JUSTINA; KÖNIG, 2007).

Baseado na citação acima, pode-se afirmar que, a utilização da simulação computacional aplicada a processos de conformação se faz necessário como meio de eliminar o ciclo iterativo de tentativa e erro realizado pelos projetistas e técnicos durante o processo de desenvolvimento de componentes forjados. Atualmente, os *softwares* de simulação se tornaram ferramentas essenciais durante o processo de desenvolvimento e otimização de produtos fabricados por conformação mecânica, tendo no mercado *softwares* que se baseiam em diferentes métodos de solução, sendo os métodos mais utilizados: elementos finitos, volumes finitos, elementos de contorno (SCHAEFFER *et al*, 2012). Alguns dos *softwares* mais utilizados na simulação de

processos de conformação mecânica são: EESY-FORM, DEFORM, FORGE, Simufact, QForm UK e MSC Superforge (SCHAEFFER *et al*, 2012).

A cruzeta por se tratar de um componente advento do processo de forjamento, tem em seu processo de produção uma grande vantagem ao ser desenvolvida utilizando a simulação computacional pois, por meio desta, torna-se possível obter parâmetros relevantes para o processo, como:

- Linhas de fluxo (fibramento);
- Tensões desenvolvidas na peça e na matriz;
- Temperaturas;
- Deformações em pontos específicos;
- Defeitos não visíveis a olho nu;
- Simulação de tratamento térmico;
- Previsão de microestrutura final;
- Gráficos.

1.1 OBJETIVO GERAL E ESPECÍFICO

O objetivo geral deste trabalho consiste em realizar a simulação de forjamento de uma cruzeta utilizando o *software* de simulação numérica QForm UK. O trabalho se dá a partir de uma cruzeta doada por uma forjaria automotiva localizada no Rio Grande do Sul, onde a mesma será utilizada como base para obtenção do produto final simulado, bem como para posterior comparação entre dados fornecidos pós simulação e dados obtidos experimentalmente. Posteriormente, como objetivos específicos, será realizado:

- a. Análise do processo de preenchimento da cavidade e formação da cruzeta;
- b. Ataque químico para revelação das linhas de fluxo da peça forjada (fibramento);
- c. Análise do fibramento (comparação entre a simulação *vs.* real);
- d. Ensaio de microdureza vickers em regiões específicas da seção transversal da cruzeta.
- e. Análise da deformação *vs.* dureza (simulado *vs.* real);
- f. Análise das tensões desenvolvidas na peça e nas ferramentas durante o forjamento;
- g. Simulação dos processos a frio e a quente, com posterior comparação entre os dois.

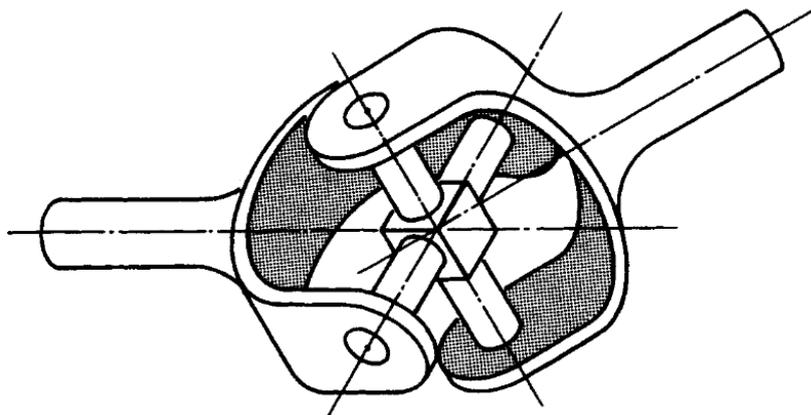
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Esta seção será destinada para apresentar a fundamentação teórica referente aos tópicos abordados neste trabalho.

2.1 CRUZETA

Clarence W. Spicer, em 1904, após graduar-se em engenharia, registrou um componente mecânico cuja função era realizar a conexão e transmitir torque e potência entre dois eixos que não estão perfeitamente alinhados (VESALI *et al*, 2012). Deste então, a cruzeta, ou junta universal, como também é chamada, é amplamente utilizada na indústria automotiva e de máquinas e implementos agrícolas. Sob a forma de uma cruz, é conectada à um eixo de entrada e de saída, conforme mostra a Fig. 1.

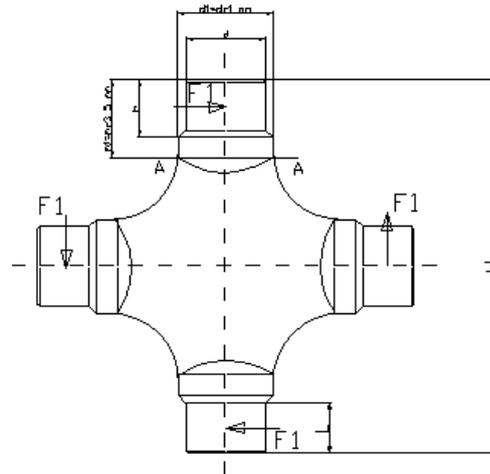
Figura 1 – Representação da conexão entre cruzeta e eixos de entrada e saída



Fonte: SHIGLEY; MISCHK, 1996.

Quando em operação, a cruzeta está sob cargas de torque, flexão, axiais, radiais e cisalhamento. Portanto, a fabricação deste componente deve contar com materiais de alta resistência mecânica. A Fig. 2 exemplifica as forças atuantes em uma cruzeta.

Figura 2 - Forças atuantes em uma cruzeta



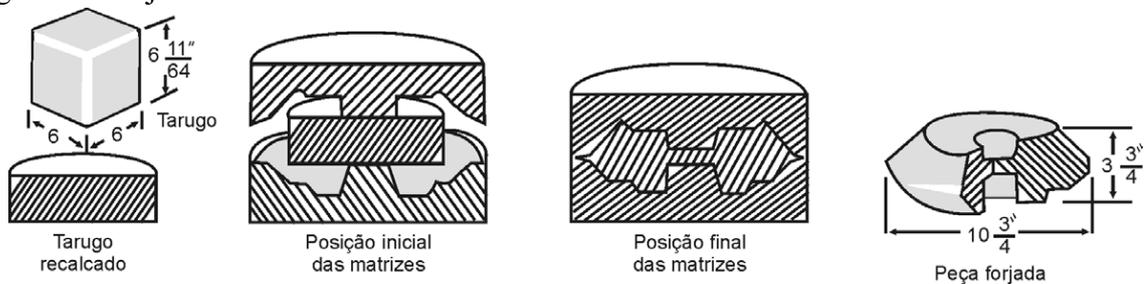
Fonte: AVRIGEAN *et al*, 2014.

O aço-liga é comumente utilizado na fabricação de cruzetas devido as altas cargas de torque na qual o componente está sujeito. A presença de elementos de liga no aço que, além de garantir uma maior resistência mecânica, melhora a temperabilidade do aço, que é tratado termicamente após o processo de forjamento, e, também garante uma alta resistência a corrosão devido a presença de cromo e níquel em sua composição química (BELDEN, 2018).

2.2 FORJAMENTO DE CRUZETAS

O termo forjamento é utilizado para dar nome a um processo de deformação plástica que tem como objetivo comprimir o material através de forças compressivas exercidas por ferramentas de martelos de queda, prensas hidráulicas, mecânicas ou de fricção até que a peça adquira a geometria desejada (RODRIGUES; MARTINS, 2010). A Fig. 3 exemplifica um processo de forjamento em matriz fechada.

Figura 3 - Forjamento em matriz fechada

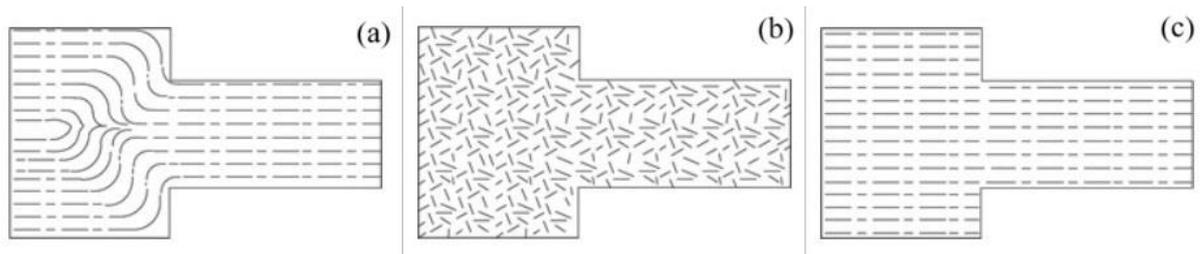


Fonte: HELMAN; CETLIN, 2015.

Empregar o processo de forjamento em uma cruzeta se justifica pela relação entre o custo e a qualidade. Na maioria dos casos, as peças forjadas adquirem uma elevada tensão de ruptura,

maior resistência a fluência e vida em fadiga, além disso, o forjamento refina o tamanho de grão, assim como promove um fluxo mais uniforme do mesmo (ASM HANDBOOK, 1988). Na Fig. 3 é possível observar a diferença no fluxo de grãos após o processo de forjamento, fundição e usinagem, o que justifica, em determinados casos, a opção pelo forjamento em relação aos demais processos de fabricação.

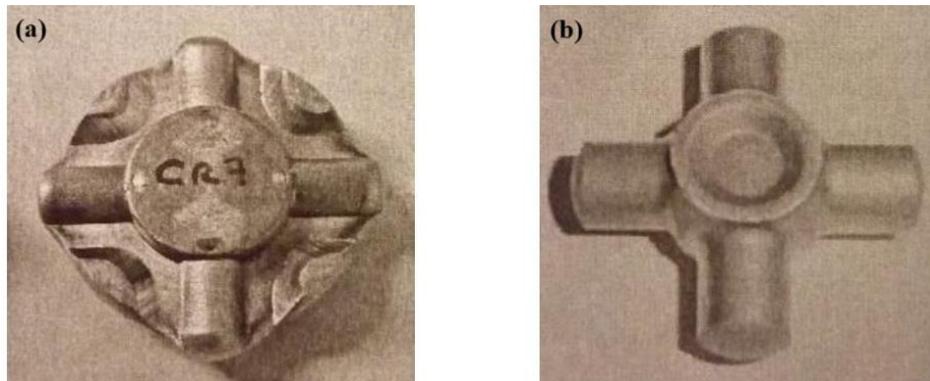
Figura 4 - Fluxo de grãos em processos de (a) forjamento; (b) fundição e (c) usinagem



Fonte: Adaptado de CFS FORGE, 2024.

No entanto, o forjamento pode ser classificado em diferentes tipos em função da temperatura em que o processo é realizado, sendo; forjamento a frio (em temperatura ambiente); a morno (em temperatura acima da temperatura ambiente, porém abaixo da temperatura de recristalização) e a quente (acima da temperatura de recristalização). A temperatura é um dos parâmetros mais importantes no que se refere a diferentes tipos de forjamento, uma vez que, as propriedades mecânicas presentes na peça após o forjamento são totalmente dependentes da temperatura empregada no processo (SAAD *et al*, 2018). Outro meio de classificar o processo de forjamento é; matriz fechada e matriz aberta. O forjamento em matriz aberta é utilizado para peças que podem variar de metros de diâmetro ou comprimento e que podem pesar toneladas, portanto, sendo empregado para peças grandes (ASM HANDBOOK, 1988). O forjamento em matriz fechada é normalmente realizado em peças menores, que demandam uma melhor precisão dimensional, assim como um melhor acabamento superficial (RORIGUES; MARTINS, 2010). Na Fig. 5 uma cruzeta obtida por meio do forjamento de precisão.

Figura 5 - (a) Cruzeta obtida por meio do forjamento com canal de rebarba; (b) forjamento de precisão



Fonte: Adaptado de RORIGUES; MARTINS, 2010.

2.2.1 Forjamento a frio

O forjamento a frio refere-se a um processo de forjamento realizado a temperatura ambiente, o que torna possível que os componentes advindos deste tipo de forjamento possuam uma elevada precisão dimensional, assim como um acabamento próximo ao da peça final (SCHAEFFER, 2022). Além disso, a deformação plástica a frio é responsável pelo fenômeno de encruamento. À medida que um material dúctil é deformado plasticamente a frio, ele se torna mais duro, e, adquire maior resistência mecânica, transformação que é denominada encruamento, ou, endurecimento por deformação a frio (CALLISTER, 2016). Entretanto, as propriedades mecânicas adquiridas através do encruamento podem ser revertidas por meio de tratamentos térmicos, como o recozimento. Essa reversão é resultado de dois processos que acontecem a elevadas temperaturas, como a recuperação e recristalização, seguido de um crescimento do tamanho de grão (CALLISTER, 2016).

Contudo, os custos de produção devem ser levados em conta para não inviabilizar o processo, tendo em vista a sobrecarga, quebra e desgaste excessivo das ferramentas, tornando a opção pelo forjado em detrimento de uma peça obtida por meio de outro processo de fabricação a depender do volume da produção e de quanto a peça forjada se aproxima da geometria final (SCHAEFFER, 2022). No quadro 1 é listado vantagens e desvantagens do forjamento a frio.

Quadro 1 - Vantagens e desvantagens do forjamento a frio

Vantagens	Desvantagens
Menor quantidade de matéria prima requerida	Necessidade de prensas de maior capacidade
Redução ou eliminação de operações subsequentes	Pressões elevadas nas ferramentas
Melhoria nas propriedades mecânicas da peça	Necessidade de recozimento intermediário para obtenções de grandes deformações
Bom acabamento superficial	Viável economicamente apenas para grandes lotes de peças

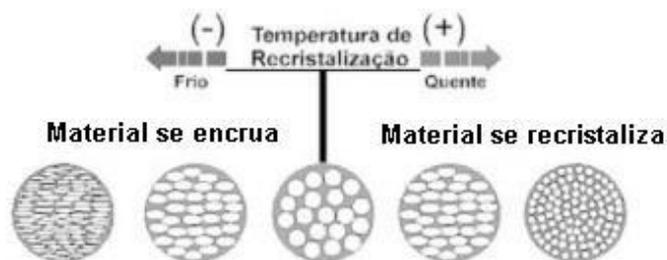
Fonte: Adaptado de SCHAEFFER, 2022.

2.2.2 Forjamento a morno

O forjamento a morno é um tipo de forjamento que consiste em realizar o processo em temperaturas intermediárias entre o forjamento a frio e a quente, normalmente entre 600 °C a 900 °C, portanto, o grau de endurecimento por deformação é menor em relação ao forjamento a frio (SCHAEFFER, 2022). O módulo de elasticidade do aço varia de acordo com a temperatura (CALLISTER, 2016). No entanto, o aquecimento realizado no processo a morno permite que peças sejam forjadas com menor esforço do que no processo a frio.

As propriedades mecânicas após o forjamento a morno são dependentes das condições empregadas no processo, tais como: temperatura, velocidade de deformação e condições de resfriamento. Em relação aos processos convencionais, é possível obter tensões de escoamento de 10% a 50% superiores (SCHAEFFER, 2022). Na Fig. 6 é possível visualizar a influência da temperatura nos diferentes tipos de forjamento.

Figura 6 - Influência da temperatura no processo de forjamento



Fonte: BRAGA, 2005.

2.2.3 Forjamento a quente

O forjamento a quente pode ser caracterizado como um processo que é realizado em uma temperatura acima da temperatura de recristalização do material, o que o torna mais dúctil e, portanto, é necessário menos esforço durante o processo de forjamento (PINTO, 2017). A

recristalização é descrita como a formação de um novo conjunto de grãos livres de deformação (CALLISTER, 2016). Neste processo é possível realizar grandes deformações, uma vez que, o material encontra-se mais dúctil, entretanto, os metais podem, na maioria das vezes, apresentar oxidação, o que implica em um acabamento superficial de má qualidade, o que não acontece em processos de forjamento a frio e a morno (CALLISTER, 2016). A grande desvantagem do processo a quente pode-se dizer que é o alto custo relacionado ao aquecimento das ferramentas, que demanda um elevado consumo energético (RODRIGUES; MARTINS, 2010).

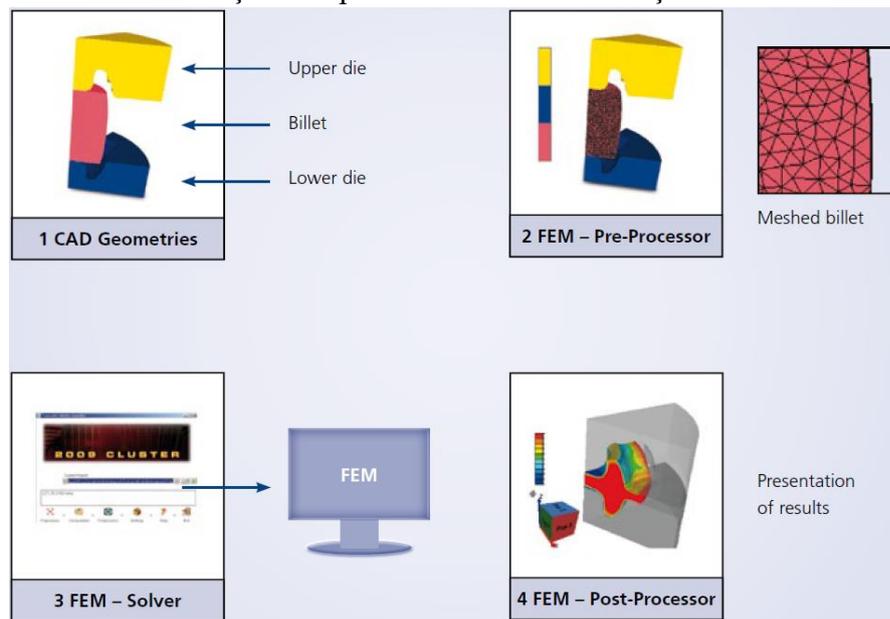
2.3 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Atualmente, em indústrias que trabalham com processos de fabricação, a busca por possibilidades para aumentar a produtividade é constante. A simulação computacional desses processos acelera o desenvolvimento do produto e garante uma produção otimizada (SCHAEFFER, 2022).

O desenvolvimento de técnicas de simulação computacional, como aquelas baseadas no método dos elementos finitos, tem proporcionado uma ligação vital entre os avanços no projeto de ferramentas e equipamentos e na melhoria da compreensão do comportamento dos materiais. Essas técnicas de simulação são fundamentais para a previsão de diversas variáveis críticas no processo de forjamento, como cargas de tensão, deformação plástica, taxa de deformação e temperaturas. (ASM HANDBOOK, 1988).

Segundo (HEIZMANN, 2013), o primeiro passo para aplicar a simulação computacional ao processo de forjamento consiste em realizar o desenho em *software* CAD, transferir para o simulador, sendo o tipo de simulação mais usual, o método dos elementos finitos, onde as geometrias são divididas em infinitos elementos de pequenos volumes. Após este passo, é aplicado os parâmetros de simulação e condições de contorno. Como fase final, o *software* realiza a simulação e entrega os resultados. Na fig. 7 é exemplificado o processo.

Figura 7 - Processo de simulação computacional em conformação mecânica



Fonte: HEIZMANN, 2013.

Portanto, a visualização através da simulação de regiões com maiores deformações e temperatura é fundamental para identificar quais regiões do componente forjado foi afetado por fenômenos como encruamento ou recristalização. Além disso, realizar o projeto de ferramentas através de *softwares* CAD e testá-las através da simulação computacional elimina a necessidade de construir ferramentas físicas e realizar testes de tentativa e erro que resulta em elevado custo financeiro (ASM HANDBOOK, 1988). No quadro 2 abaixo é mostrado alguns dos principais *softwares* utilizados para este fim.

Quadro 2 - Principais *softwares* de simulação computacional aplicado a processos de conformação mecânica

Nome	Fabricante
Easy-Form	CPM Gesellschaft für Computeranwendung
Deform	ScientificForming Technologies Corporation
Forge	Transvalor AS
Marc Autoforge	MARC Analysis Research Corporation
Simufact	Simufact
QForm UK	Quantor
MSC Superforge	Technical Project Coordinator

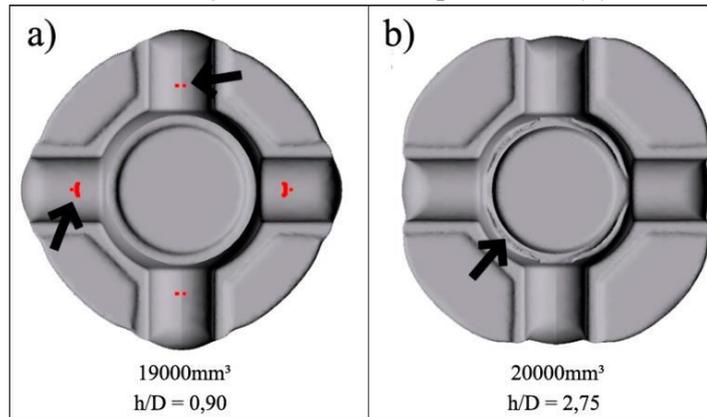
Fonte: Adaptado de SCHAFFER *et al.*, 2012.

2.4 SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE FORJAMENTO DE CRUZETAS

Tendo em vista um processo otimizado e eficiente para fabricação de uma cruzeta, utilizar a simulação computacional como ferramenta auxiliar no projeto de ferramentas para forjar uma cruzeta é com certeza a melhor técnica atualmente. De acordo com MAFIA *et al.* (2022), em

seu estudo relacionado a simulação de forjamento a quente de uma cruzeta utilizando o *software* QForm UK, foi possível observar que a relação entre a altura e o diâmetro (h/D) do tarugo quando muito baixa ou muito alta, pode causar defeitos na peça. Tal descoberta se deu porque o *software* possui uma função de detecção de defeitos de sobreposição que são difíceis de visualizar a olho nu. Na Fig. 8 é possível visualizar os defeitos descritos.

Figura 8 - (a) Cruzeta com sinalização de defeitos superficiais; (b) sem sinalização



Fonte: MAFIA *et al.*, 2022.

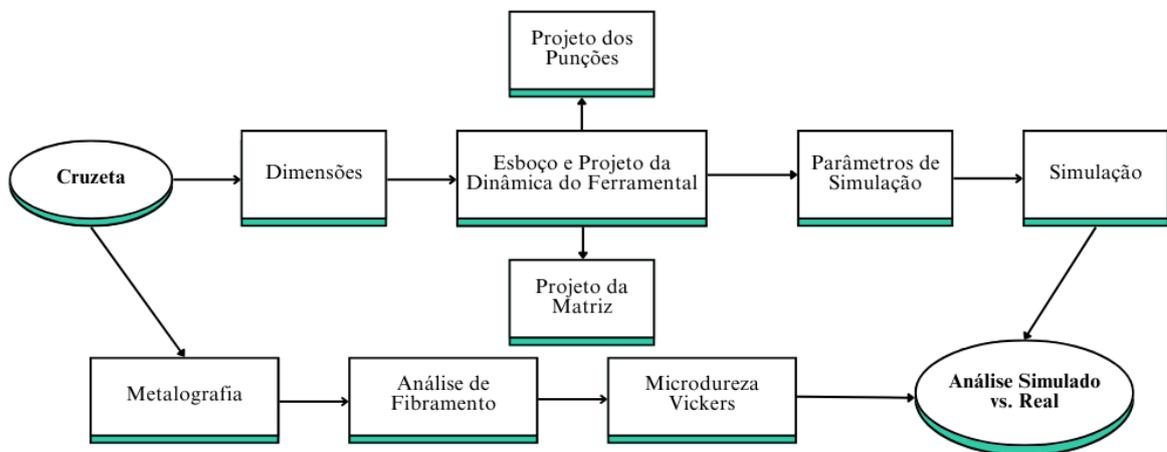
Segundo MAFIA *et al.* (2022), a simulação computacional também se mostrou uma ferramenta eficiente e precisa no que se refere aos parâmetros fornecidos em relação aos obtidos experimentalmente, como; fibragem, taxa de deformação, temperatura. Para WERMUTH *et al.* (2022), foi possível conseguir, através da simulação computacional, estimar parâmetros de temperatura para forjar uma cruzeta bimetalica de modo que não ocorresse trincas ou danos específicos ao componente.

Além disso, *softwares* como o QForm UK possuem funções para simular tratamentos térmicos e microestrutura final, parâmetros importantes, tendo em vista que cruzetas normalmente passam por tratamentos térmicos após o processo de forjamento.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho desenvolveu-se a partir de uma cruzeta doada por uma forjaria automotiva. Com o objetivo de desenvolver e explorar habilidades na simulação computacional aplicada a conformação mecânica, foi traçado um roteiro cujo objetivo principal é a simulação do processo de forjamento da cruzeta doada, com posterior comparação entre parâmetros obtidos de forma prática, com parâmetros obtidos via simulação. O *software* utilizado no processo de simulação foi o QForm UK. Na Fig. 9 é apresentado um fluxograma das etapas empregadas no trabalho.

Figura 9 - Fluxograma das etapas realizadas no trabalho

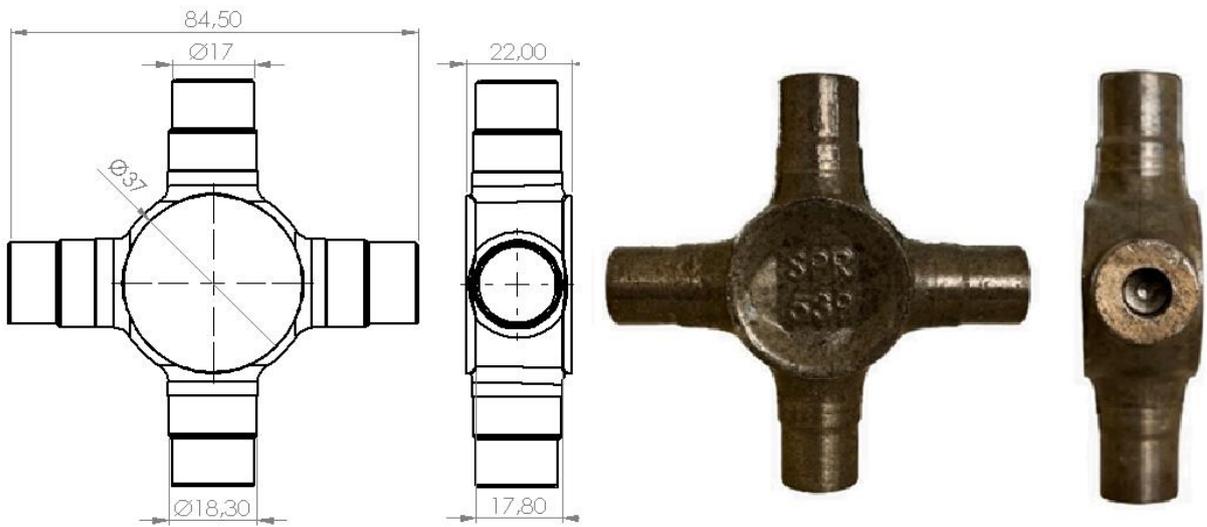


Fonte: Próprio autor, 2024.

3.1 DIMENSÕES

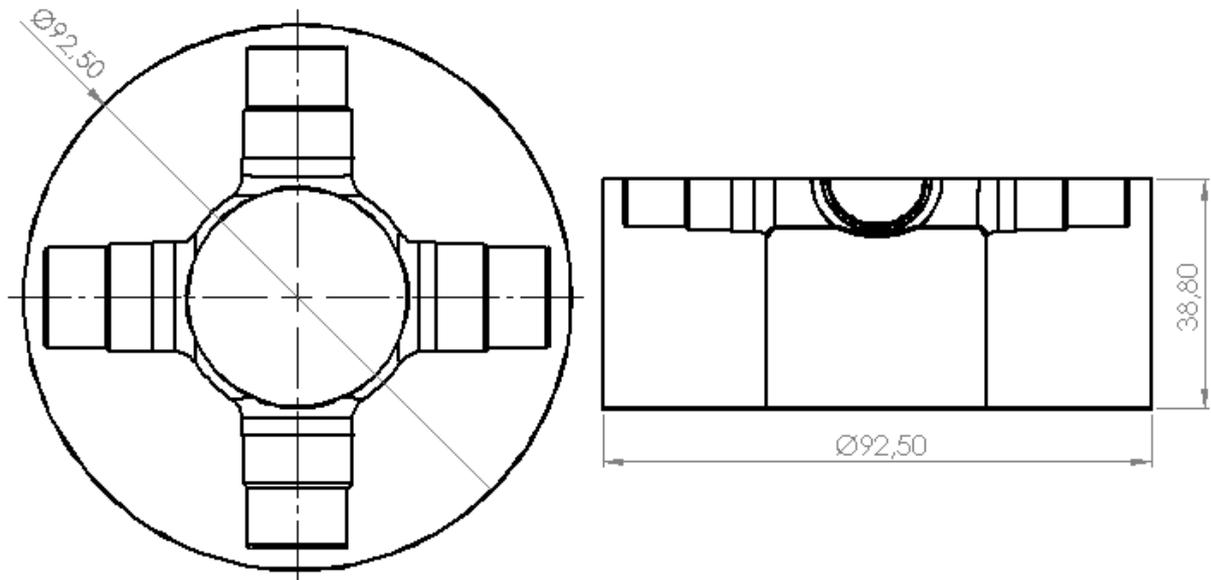
A primeira etapa consiste em medir a cruzeta, pois, para realizar o projeto do ferramental é necessário realizar o desenho em *software* CAD da mesma. O desenho com as dimensões da peça é utilizado para obter a cavidade com o volume da peça a ser forjada. Para isso, foi utilizado o SolidWorks, onde a peça foi desenhada de acordo com a geometria e dimensões da peça original. Na Fig. 10, as medidas da cruzeta em [mm] e, na Fig. 11, da matriz superior e inferior, que são iguais.

Figura 10 – Medidas da cruzeta em [mm] à esquerda; cruzeta real à direita



Fonte: Próprio autor, 2024.

Figura 11 - Medidas em [mm] das matrizes em vista superior à esquerda, e vista frontal à direita

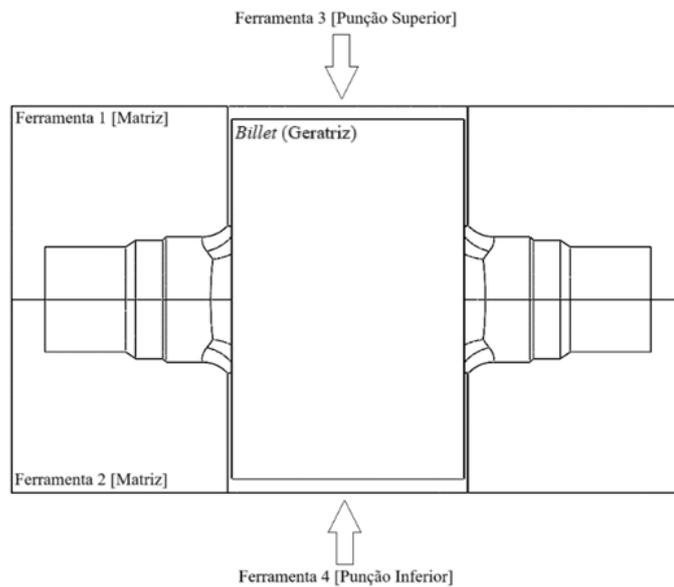


Fonte: Próprio autor, 2024.

3.2 ESBOÇO E PROJETO DA DINÂMICA DO FERRAMENTAL

Sabendo que, a simulação será realizada a frio e a morno, processos que tem como objetivo o forjamento de precisão, com alta tolerância dimensional e sem desperdício de material, não foi utilizado canal de rebarba. Portanto, optou-se por utilizar dois punções para comprimir o material na cavidade da matriz, sendo punção superior e inferior. Na Fig. 12 é mostrado uma vista de seção do esboço de como é a dinâmica do ferramental.

Figura 12 - Esboço da dinâmica do ferramental em vista de seção



Fonte: Próprio autor, 2024.

3.3 PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

Definir parâmetros de simulação é uma das etapas mais importantes durante o processo, pois nesta etapa são definidos parâmetros como:

- Material a ser utilizado na peça;
- Material do ferramental;
- Temperatura de processo;
- Força necessária para forjar a peça;
- Volume adequado para preencher a cavidade;
- Resfriamento pós forjamento.

Os parâmetros adotados foram os mesmos, ou, os mais próximos possíveis dos parâmetros que foram empregados no processo de forjamento real da peça. Para isso, alguns parâmetros foram baseados na literatura e trabalhos disponíveis, bem como em informações cedidas pelo fabricante da peça.

3.3.1 Material da peça

Atualmente, os aços considerados bainíticos estão sendo amplamente empregados a processos de forjamento pela sua combinação entre resistência mecânica e tenacidade (MAFIA *et al*, 2022). A adição de elementos de liga como Mn e Cr facilitam a transformação bainítica. O aço 16MnCr5 (SAE 5115), que pode ser considerado um aço bainítico, é utilizado para fabricação de uma gama diversa de componentes, como eixos, rodas dentadas, cames e cruzetas

(ESPINOZA et al, 2024). A composição do aço pode, ainda, conter uma porcentagem a mais de enxofre (S), o que melhora sua usinabilidade e não altera suas propriedades mecânicas de forma significativa. Como ponto de partida para escolha do material a ser empregado na simulação, considerando informações previamente obtidas em relação a peça real e informações extraídas da literatura, foi definido o material da peça como sendo o aço 16MnCrS5. Os parâmetros como curva de escoamento, coeficiente de transferência de calor, composição química e outros relacionados ao material já são inclusos no banco de dados de diversos materiais que o *software* QForm UK possui, inclusive do aço em questão. Na tabela 1 é mostrado a composição química.

Tabela 1 - Composição química do aço 16MnCrS5

C	Si	Mn	P	S	Cr
0,14	0,4	1,3	0,035	0,04	1,1

Fonte: QForm UK, 2024.

3.3.2 Material do ferramental

A escolha do material do ferramental é, também, uma decisão a ser levada em consideração os aspectos relacionados ao tipo de processo de forjamento, pois, de acordo com o que foi apresentado na seção 2.2.1 e 2.2.2, o forjamento a frio gera um maior desgaste no ferramental, sendo onde as tensões e desgaste são ainda maiores. De acordo com (SCHAEFFER, 2022), aços M2 e M3 são recomendados para o ferramental sob estas condições. Portanto, como parâmetro de simulação, foi utilizado aço M2 nas matrizes e punções devido sua elevada dureza e resistência mecânica, que apresenta, segundo o banco de dados do QForm UK, uma dureza Rockwell de 62 HRC e um limite de escoamento de 2320 MPa. Na tabela 2 a composição química do aço M2.

Tabela 2 - Composição química do aço M2

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	W
0,92	0,5	0,4	0,03	0,03	4,5	5,3	2,2	6,7

Fonte: QForm UK, 2024.

Para o forjamento a morno, segundo (SCHAEFFER, 2022), aço H13 é comumente utilizado, pois, o processo, por ser realizado à uma temperatura intermediária, não demanda uma elevada resistência mecânica em comparação ao processo a frio, não justificando utilizar aço M2 para o processo. Através do banco de dados do QForm UK, o aço H13 possui uma

dureza Rockwell de 53 HRC e um limite de escoamento de 1607 MPa. Na tabela 3 abaixo a composição química do mesmo.

Tabela 3 - Composição química do aço 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, 2024.

3.3.3 Força necessária

Segundo BATALHA *et al.* (2011), a força de forjamento é dada pela Eq.1 abaixo.

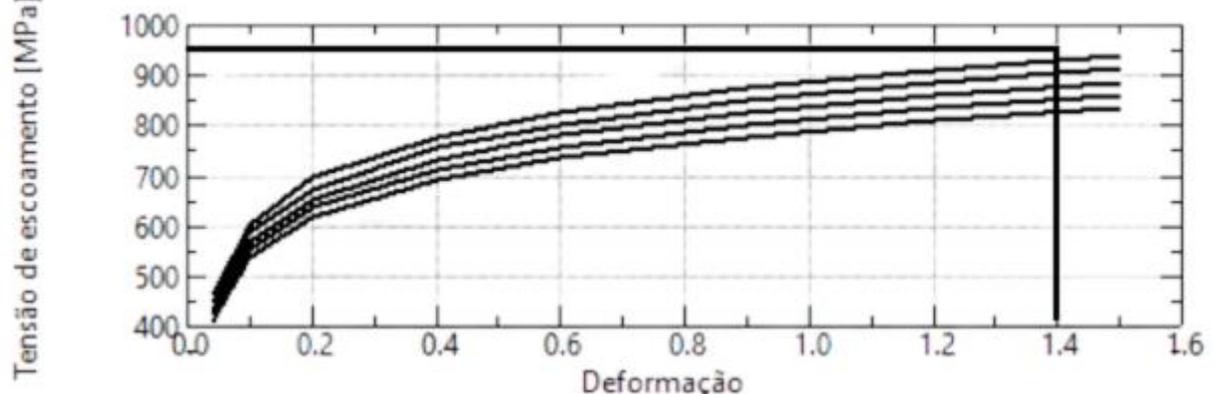
$$F = \sigma_m \times A_0 \times C \quad (1)$$

Onde:

- σ_m – Tensão média de escoamento;
- A_0 – Área da seção transversal da peça;
- C – Constante empírica que depende da complexidade da matriz.

A tensão média de escoamento foi obtida através da curva de escoamento do material utilizado na peça, presente no banco de dados do QForm UK. Para isso, utilizou-se como parâmetro a curva para a temperatura de 20 °C, assim como a maior deformação disponível no gráfico, como mostra a Fig. 13, onde definiu-se a tensão máxima e mínima de escoamento como 950 MPa e 400 MPa, respectivamente.

Figura 13 - Curva de escoamento a 20 °C do aço 16MnCrS5



Fonte: Adaptado de QForm UK, 2024.

A constante empírica 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.

Portanto, para o processo em questão, foi utilizado $C = 8$. Logo, utilizando a Eq. 1, a força de forjamento necessária será:

$$F = 675 \times \frac{\pi \times 36,2^2}{4} \times 8 = 5,5 \times 10^6 N = 5,5 MN$$

3.3.4 Volume necessário

Para calcular o volume necessário foi utilizado a equação 2. O volume foi obtido através do SolidWorks, com isso, foi necessário adequar um diâmetro e altura para o *billet* (geratriz), o que foi feito através de iterações.

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

Onde:

- V - Volume necessário para preencher a cavidade;
- D - Diâmetro da peça;
- h - Altura da peça.

Portanto, tendo o volume necessário e o diâmetro, podemos obter a altura do *billet*, na qual foi calculado utilizando a Eq. 2, sendo então:

$$V = 48654,49 mm^3$$

$$D = 36,2 mm$$

$$h = \frac{48654,49 mm^3}{\frac{\pi \times (36,2 mm)^2}{4}} = 47,27 mm$$

3.3.5 Outros parâmetros

Outros parâmetros como velocidade, atrito e transferência de calor serão utilizados valores padrão pré estabelecidos pelo QForm UK. Coeficientes de transferência de calor e condutividade térmica, por exemplo, é tabelado no *software* através do banco de dados de materiais, ou, para as condições de contorno empregadas no processo. Para o resfriamento, inicialmente foi definido como resfriamento em ar.

3.4 METALOGRAFIA

Com o objetivo de realizar uma análise de fibramento da peça simulada com a peça real, foi realizado uma metalografia na peça, seguindo a norma ASTM E3-95, na qual seguiu os seguintes passos:

- Corte na seção transversal da cruzeta;
- Lixamento da seção utilizando lixas com granulometria de 80 até 2000;
- Polimento em alumina em suspensão - 1 μ m;
- Ataque químico específico para revelar fibramento, (50%HCl + 50% H₂O), à quente (80 °C), por 20 min em acordo com a norma NBR 8108;
- Lixamento e polimento para evidenciar as linhas de fluxo (Fibramento).

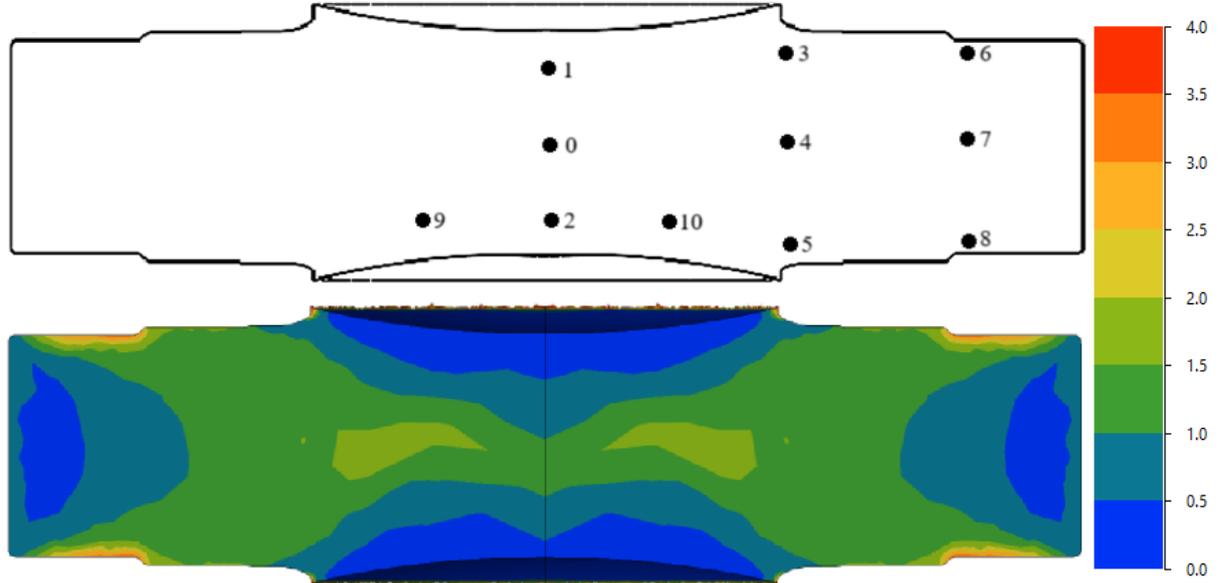
3.5 ANÁLISE DE FIBRAMENTO

O fibramento, também chamado de linhas de fluxo, são linhas visíveis a olho nu que representam o caminho que o material percorreu durante o forjamento. O fluxo de linhas indica também a direção na qual o material tem maior resistência mecânica, ductibilidade, tenacidade e resistência à fadiga (ASM HANDBOOK, 1988). Esta etapa do trabalho foi destinada a comparação entre as linhas de fluxo fornecidas pela simulação e as linhas obtidas através da metalografia da peça real.

3.6 MICRODUREZA VICKERS

Na seção 2.2.1 foi citado o fenômeno do encruamento, que é o endurecimento da peça por deformação a frio. Este aumento de dureza se reflete nas regiões que obtiveram a maior deformação. Uma elevada dureza em pontos específicos da peça pode levar a trincas e a futuras fraturas, portanto, conhecer estes pontos é de suma importância. Para o trabalho, foram realizadas medidas de dureza vickers na cruzeta real em diferentes pontos, mas, principalmente nos pontos de maior deformação, com objetivo de realizar uma comparação entre os pontos de maior deformação *vs.* dureza nos mesmos. Para isso, foi utilizado uma carga de 0,5kgf (HV0,5), onde foram realizadas três medidas para cada ponto, com a finalidade de obter a média entre cada ponto. Na Fig. 14 é mostrado os pontos, bem como as regiões de maior e menor deformação na seção transversal da peça.

Figura 14 - Pontos onde foram realizadas medidas de microdureza vickers na seção em corte da cruzeta



Fonte: Próprio autor, 2024.

3.7 RESUMO DOS PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO

Nesta seção será apresentado, na tabela 4, um resumo dos parâmetros que foram empregados para realizar a simulação.

Tabela 4 - Parâmetros de simulação

Peça		Ferramentas	
Forjamento a Frio		Forjamento a Frio	
Material	16MnCrS5	Material	M2
Temperatura	20[°C]	Temperatura	20[°C]
Curva de Escoamento	QForm UK	Forjamento a Morno	
Conductividade Térmica	50,3 - 40,6 [W/(m.K)]	Material	H13
		Temperatura	300[°C]
		Equipamento	
Calor Específico	470 - 714 [J/(kg.K)]	Tipo	Prensa Hidráulica
		Carga	5,5MN
Forjamento a Morno			
Temperatura	900[°C]	Lubrificação	Gráfite + Água

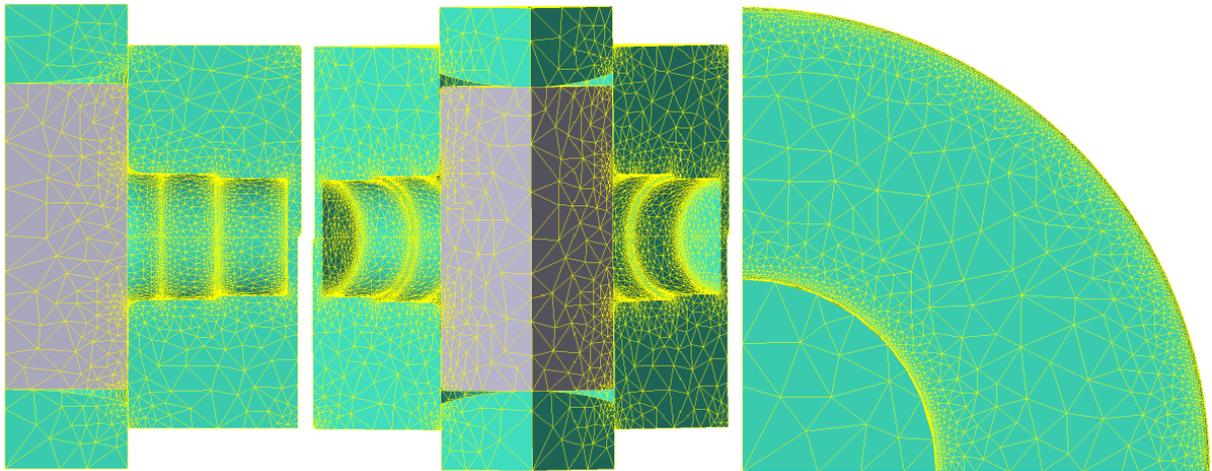
Fonte: Próprio autor, 2024.

Além dos parâmetros mostrados, as seguintes condições de contorno foram empregadas:

- Tipo de Malha: Remesh Automático;
- Emissividade: 0,6;
- Transferência de Calor: 30 [W/m²K];
- Etapas: 1;
- Resfriamento: Em Ar.

Com isso, na Fig. 15 é mostrado a malha no ferramental e peça, assim como a tabela 5 informações referentes ao número de nós.

Figura 15 - Malha automática na peça e no ferramental



Fonte: Próprio autor, 2024.

Tabela 5 - Propriedades da malha

Objeto	Nós na Superfície	Nós Internos	Total de nós	Elementos de superfície	Elementos Volumétricos
Peça	8426	7683	16109	16848	73042
Matriz Superior	8891	4664	13555	17778	54837
Matriz Inferior	8880	4634	13514	17756	54549
Punção Superior	711	229	940	1418	3388
Punção Inferior	707	223	930	1410	3328
Total	27615	17433	45048	55210	189114

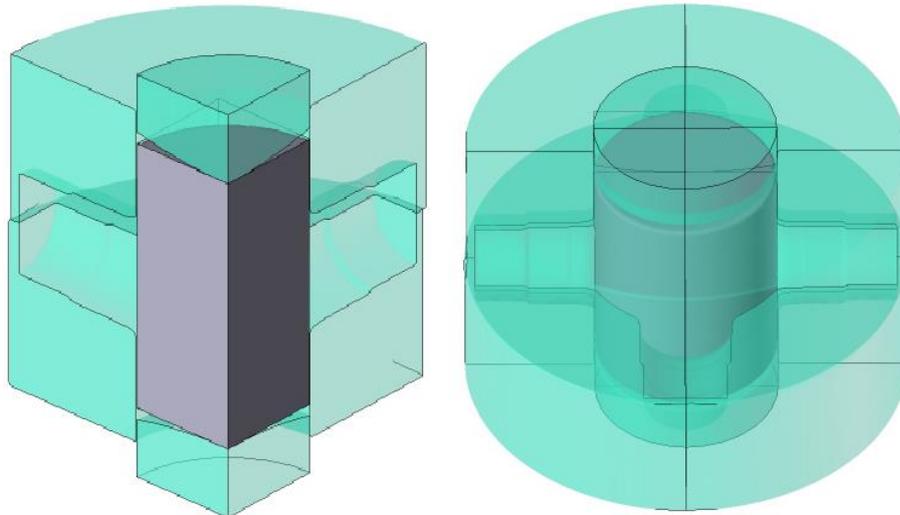
Fonte: Próprio autor, 2024.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Inicialmente, como meio de economizar recursos computacionais e tornar a simulação mais rápida, foi realizado a simulação utilizando $\frac{1}{4}$ da peça e do ferramental, isto porque, o *software* possui um recurso que permite o espelhamento, logo, dado o fato de que a peça e o ferramental são simétricos, os resultados são os mesmos para as demais partes. Além disso, optou-se por utilizar um ferramental circular, com o objetivo de eliminar cantos vivos e regiões retangulares, uma vez que, a malha criada pelo QForm UK na peça e no ferramental, tende a ser mais refinada nessas regiões, o que torna a simulação mais lenta e passível de erros. Na Fig. 16 pode-se observar a disposição do ferramental em $\frac{1}{4}$ e com o recurso de espelhamento ativado, respectivamente.

Figura 16 - Montagem pré simulação em $\frac{1}{4}$ e com recurso de espelhamento



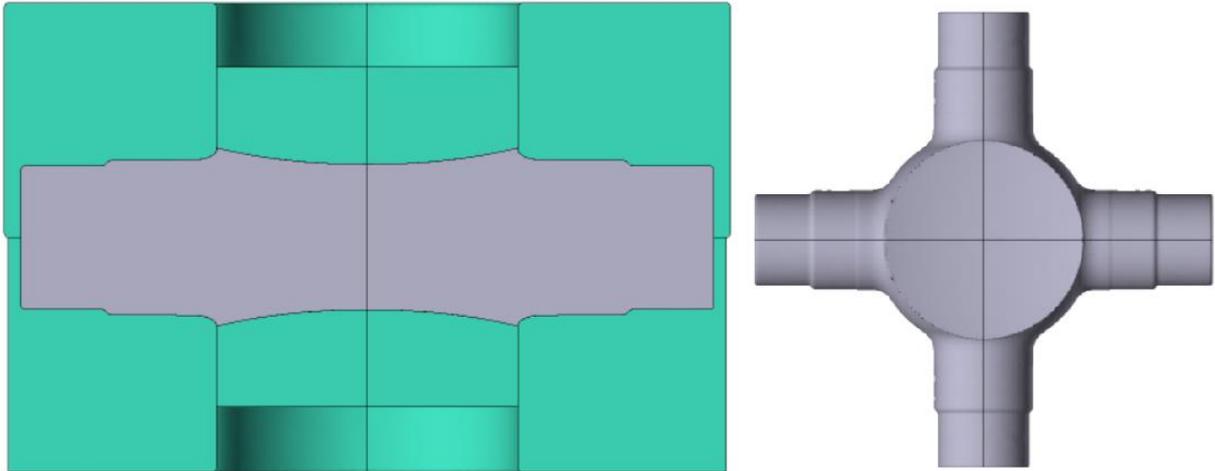
Fonte: Próprio autor, 2024.

4.2 ANÁLISE DO PROCESSO DE PREENCHIMENTO DA CAVIDADE E FORMAÇÃO DA CRUZETA

O preenchimento correto da cavidade é de suma importância para a obtenção de um produto final com alta precisão dimensional, sem rebarbas e tensões residuais. Para isso, a simulação computacional se faz necessária como um meio de adequar o volume e preenchimento correto da cavidade utilizando o *software*. Quando o arquivo do tarugo é exportado do SolidWorks para o QForm UK, há uma pequena perda de volume. Portanto, como meio de corrigir tal perda, foi realizado adições de pequenos valores, que variam entre 0,3 e 0,5mm na altura do tarugo, até que se obtivesse o volume e preenchimento adequado de

cavidade. Na Fig. 17 pode-se observar que o preenchimento foi adequado e a formação da cruzeta ocorreu de acordo com o esperado.

Figura 17 - Preenchimento da cavidade em corte na seção transversal e cruzeta formada em vista superior

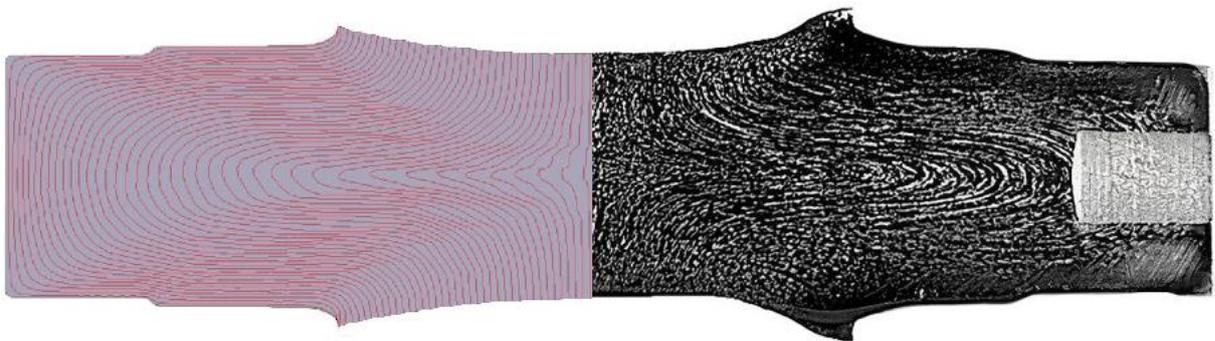


Fonte: Próprio autor, 2024.

4.3 ANÁLISE DO FIBRAMENTO (SIMULADO VS REAL)

A análise do fibramento, ou linhas de fluxo, consistiram em utilizar a função matriz de linhas, do QForm UK, para representar as linhas de fluxo do material no simulador, onde foram utilizadas 40 linhas verticais. O principal objetivo se deu em comparar as linhas de fluxo obtidas através da simulação do processo a frio, com as linhas obtidas por meio da peça cortada em seção transversal. Na Fig. 18 pode-se comparar, à esquerda, o fibramento através da simulação, e, à direita, o fibramento na peça real, após metalografia.

Figura 18 - Comparação fibramento simulado vs real



Fonte: Próprio autor, 2024.

4.4 ANÁLISE DA DEFORMAÇÃO VS DUREZA (SIMULADO VS REAL)

Na tabela 6 observa-se os valores de microdureza Vickers da peça bruta de forjamento.

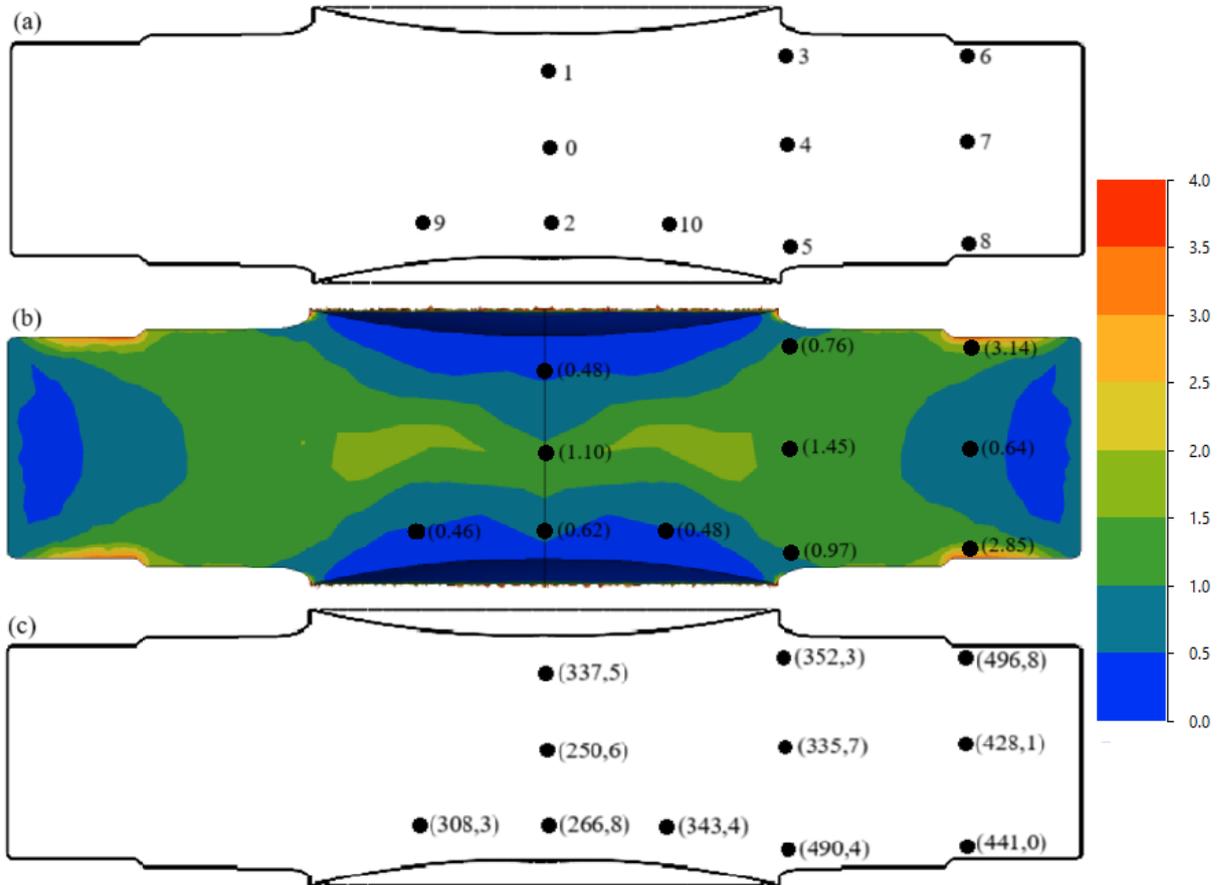
Tabela 6 - Microdureza vickers em pontos específicos da seção transversal da cruzeta

	Ponto										
[HV0,5]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Medida 1	193,8	373,6	285,1	314,6	287,2	497,6	545,2	416	403,1	304,3	379,1
Medida 2	271,6	303,7	229,9	331,6	365	484,3	478,2	404,5	450,6	284,4	265,6
Medida 3	286,5	335,1	285,4	410,6	354,8	489,4	467	463,8	469,4	336,2	385,5
Média	250,6	337,5	266,8	352,3	335,7	490,4	496,8	428,1	441,0	308,3	343,4
Desvio Padrão	40,64	28,59	26,09	41,83	34,52	5,48	34,53	25,68	27,90	21,34	55,07

Fonte: Próprio autor, 2024.

A Fig. 19 mostra de forma mais clara e de fácil comparação, a variação de microdureza em comparação a variação de deformação a frio na peça. Na figura podemos visualizar que houve uma divergência entre pontos de maior deformação com pontos de maior dureza. Era esperado que, pontos que concentram maior deformação a frio, tivessem também uma maior dureza, dado ao fato de que a deformação a frio promove o encruamento do material, elevando a dureza. Pode-se observar que, apenas no ponto 6 e 8 a elevada deformação também promoveu uma elevada dureza. Portanto, a não ocorrência de picos de dureza nos demais pontos, assim como pontos com deformação relativamente baixa e dureza alta, podem ser decorrentes de transformações metalúrgicas que aconteceram no forjamento da peça real, mas que não aconteceram no processo simulado. Além disso, o encruamento depende não só da deformação, mas como da temperatura e quantidade de deformação. Nos pontos 6 e 8 podemos observar que a deformação se mostrou expressivamente maior do que as deformações nos demais pontos, o que pode indicar que, a deformação nos demais pontos não foi suficientemente elevada para que houvesse encruamento.

Figura 19 - (a) Pontos onde foram realizadas as medidas; (b) deformações nestes pontos, (c) microdureza vickers

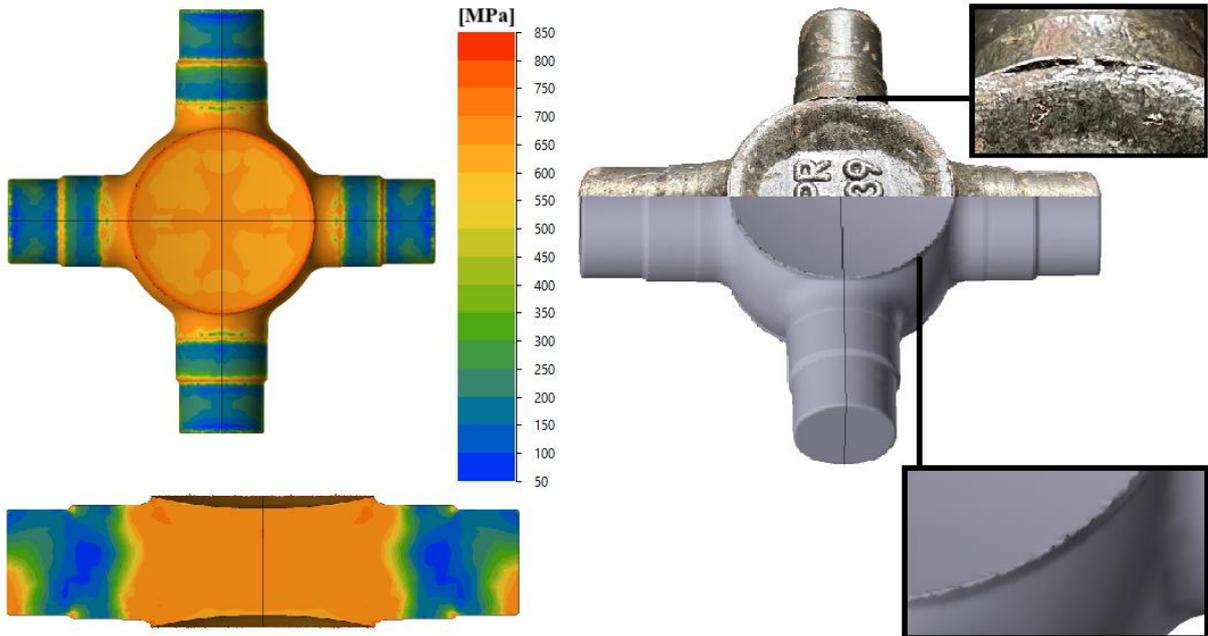


Fonte: Próprio autor, 2024.

4.5 ANÁLISE DAS TENSÕES DESENVOLVIDAS NA PEÇA E NO FERRAMENTAL

Através da simulação podemos visualizar as tensões desenvolvidas na peça e na matriz. Com isso, podemos identificar locais com elevadas tensões, onde a tensão atinge valores próximos ou maiores do que a tensão de ruptura do material. Esses pontos se mostram relevantes ao serem analisados pois, uma elevada tensão pode causar pequenas rebarbas e defeitos. Na Fig. 20 é possível observar que, em determinados pontos as tensões se tornam elevadas, com valores de tensão máxima e mínima de 803,54 MPa e 63,01 MPa, respectivamente. Também podemos observar que, pontos onde há maiores tensões, como na parte superior da peça, tendem a formar pequenas rebarbas e defeitos, tal fato observou-se também na peça real.

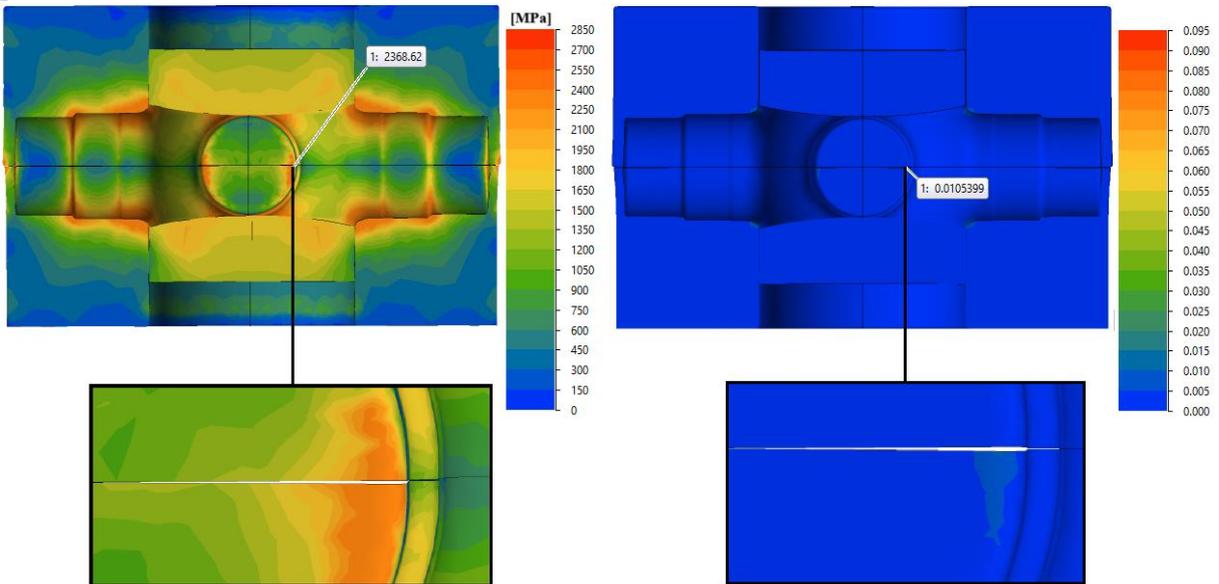
Figura 20 - Tensão desenvolvida na peça e comparação entre as rebarbas da peça simulada vs real



Fonte: Próprio autor, 2024.

No ferramental, tanto no processo a frio, como no processo a morno, foram identificados pontos com elevadas tensões, cujo valor máximo chegou a 2750 MPa, onde, em determinados pontos das matrizes, ocorreu deformação plástica devido a elevada tensão, como mostra na Fig. 21. A elevada tensão ocorreu na extremidade do ferramental, onde a peça termina de escoar. Nos pontos em questão, as elevadas tensões e deformações plásticas podem ter sido resultado da pequena espessura da matriz na região, o deixando mais suscetível a falhas.

Figura 21 - À esquerda, tensão no ferramental, à direita, deformação plástica no ferramental do processo a frio

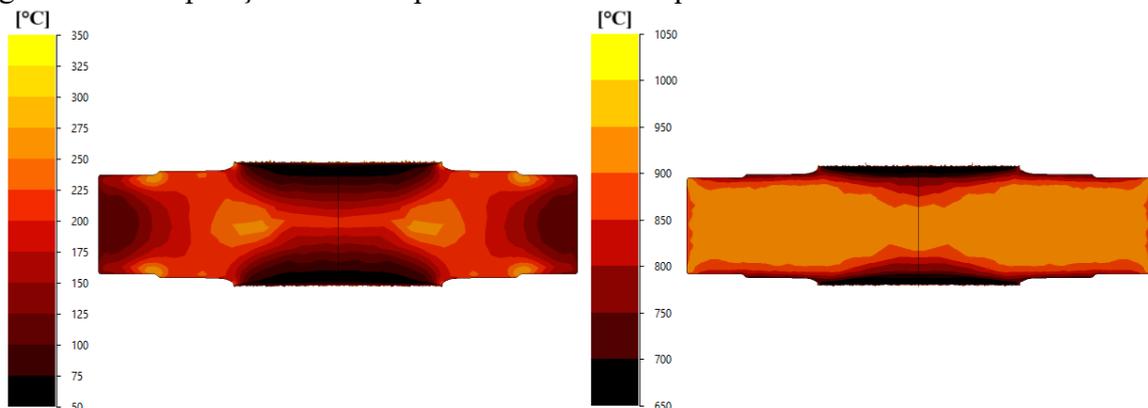


Fonte: Próprio autor, 2024.

4.6 COMPARAÇÃO ENTRE A SIMULAÇÃO A FRIO E A MORNO

Como análise adicional, foi possível realizar a simulação alterando apenas a temperatura e o material do ferramental, caracterizando uma simulação a morno, realizada utilizando uma temperatura de 900 °C e alterando o material do ferramental para o aço ferramenta H13. Com isso, observou-se que, alguns parâmetros, como temperatura e tensão desenvolvida na peça fossem diferentes, o que já era esperado. O principal parâmetro e de maior relevância foi a temperatura, isto porque altas temperaturas durante o processo de forjamento a morno tendem a causar uma recristalização do material, tal fenômeno abordado na seção 2.2.2. A Fig. 22 mostra a diferença entre as temperaturas.

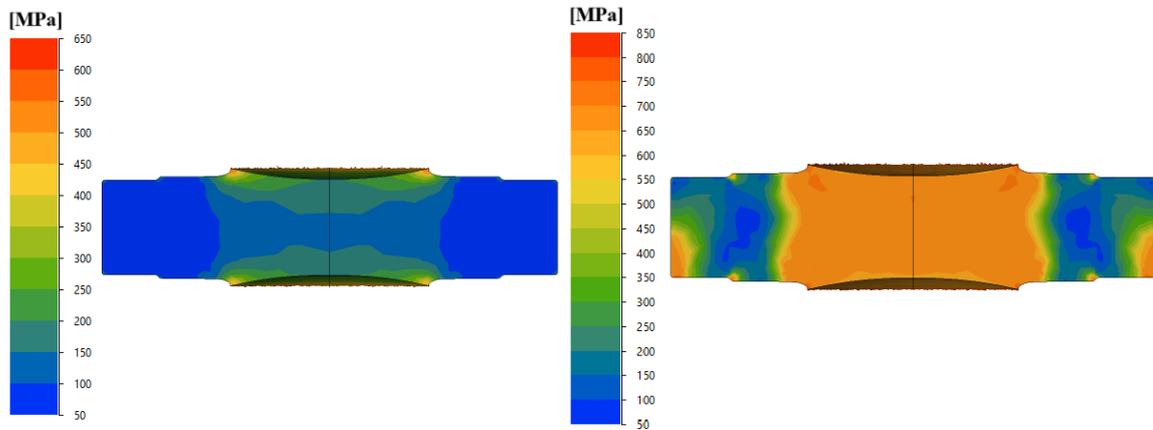
Figura 22 - Comparação entre temperaturas a frio à esquerda vs a morno à direita



Fonte: Próprio autor, 2024.

Em relação as tensões, era esperado que as tensões fossem menores no processo a morno, porque o material quando está sob alta temperatura tende a ser mais dúctil, o que exija uma menor tensão para deformá-lo, o que foi confirmado pela comparação entre as tensões desenvolvidas a morno e a frio, respectivamente, mostrado na Fig. 23. Portanto, observa-se que o processo a morno possui uma maior homogeneidade quanto a distribuição de tensão, onde às elevadas tensões foram observadas apenas nas bordas da peça, com valores próximos a 600 MPa, enquanto que no processo a frio, uma maior região ficou sob tensões acima de 650 MPa.

Figura 23 - Tensão do processo a morno à esquerda; do processo a frio à direita



Fonte: Próprio autor, 2024.

4.7 RENDERIZAÇÃO E COMPARAÇÃO

Como meio de comparação mais realista entre a cruzeta simulada e a cruzeta real, foi utilizado o SolidWorks, onde, através do suplemento PhotoView360, foi possível renderizar e visualizar a cruzeta simulada de uma forma mais realista. O QForm UK possui a opção de exportar a peça simulada em formato STL, que é suportado pelo SolidWorks. Na Fig. 24 podemos visualizar tal comparação.

Figura 24 - Comparação entre a cruzeta real, à esquerda e a renderização da cruzeta simulada, à direita



Fonte: Próprio autor, 2024.

5 CONCLUSÃO

Por fim, conclui-se que o trabalho proporcionou um resultado satisfatório, apesar da divergência entre alguns resultados obtidos via simulação com resultados obtidos experimentalmente, é possível afirmar que o *software* se mostra essencial como ferramenta auxiliar em processos de conformação mecânica. O preenchimento da cavidade se mostrou adequado, no entanto, foram encontrados pontos com elevadas tensões, que formaram rebarbas e pequenos defeitos na peça, estes também observados na peça real. As linhas de fluxo se mostraram semelhantes a fibragem da peça real. No ferramental, foi observado uma elevada tensão, assim como pequenos pontos onde ocorreram deformação plástica. Na comparação entre o processo a frio e a morno, observou-se que o processo a morno as tensões na peça são menores, o que é explicado pela temperatura do processo. Com isso, alguns pontos podem ser destacados e que reforçam as vantagens em simular o processo:

- Identificação de pontos críticos;
- Formação de rebarbas e defeitos;
- Pontos com elevadas tensões e deformações;
- Pontos com elevada temperatura;
- Regiões deformadas não visíveis a olho nu;
- Visualização do processo como um todo.

6 SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Para futuros trabalho, é sugerido a otimização do processo de forjamento através de um projeto detalhado do ferramental sem que haja deformações ou elevadas tensões, assim como um processo otimizado para o forjamento da peça, reduzindo ao máximo as rebarbas e pequenos defeitos decorrente de elevadas tensões.

REFERÊNCIAS

- RODRIGUES, Jorge; MARTINS, Paulo. Tecnologia Mecânica Vol.II: Tecnologia da Deformação Plástica. 2005.
- JUSTINA, L.D; KÖNIG, R.D. Simulação numérica dos processos de conformação a frio de elementos de fixação. São Paulo, 2017.
- PINTO, J.P.R.P. Forjamento em matriz fechada em peças de aço. 2017. Dissertação de Mestrado. (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) – Universidade do Porto, 2017.
- MARQUES, Angela Selau; MARTINS, Vinicius; SCHAEFFER, Lírio. BENEFÍCIOS DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL NO PROCESSO DE FORJAMENTO. Porto Alegre, 2012.
- ASM INTERNATIONAL. ASM Handbook: Volume 14: Forming and Forging. 1988.
- STEEL FORGING. Steel Forging. Disponível em: <https://www.steelforging.org/>. Acesso em: 2 jun. 2024.
- BELDEN. Belden. Disponível em: <https://www.belden.com/>. Acesso em: 2 jun. 2024.
- CALLISTER JR., William D. Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução. 9. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2016.
- ASTM INTERNATIONAL. Standard Guide for Preparation of Metallographic Specimens. ASTM E3-95, 1995.
- AVRIGEAN, Eugen; PASCU, Adrian Marius; OLEKSIK, Valentin Stefan, Study of the Cardan Cross Using the Experimental and Analytical Method, Procedia Engineering, v. 100, p. 499–504, 2015.
- SAAD, Mohammad; AKHTAR, Shagil; SRIVASTAVA, Mudit; et al. Role of Simulation in Metal Forming Processes. Materials Today: Proceedings, v. 5, 2018.
- SANTOS, Thomas; ALBA, Diego. ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DO FORJAMENTO DE UMA CRUZETA BIMETÁLICA. 2022.
- VESALI, Farzad; REZVANI, Mohammad Ali; KASHFI, Mohammad. Dynamics of universal joints, its failures and some propositions for practically improving its performance and life expectancy. Journal of Mechanical Science and Technology, v. 26, n. 8, p. 2439–2449, 2012.
- HELMAN, H.; CETLIN, P. R. Fundamentos da Conformação - Mecânica dos Metais. Artliber Editora Ltda, 2015.
- SHIGLEY, J. E.; MISCHKE, C. R. Standard Handbook of Machine Design. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1996.

HEIZMANN, B. A. Jochen; VOLZ, Hans Ulrich. Simulation of forging processes. Hagen: Jung, Boucke GmbH & Co. KG, 2013.

BRAGA, L. F. Simulação Computacional por Elementos Finitos do Processo de Forjamento em Matriz Fechada de Rodas SAE 4140 de Utilização em Ponte Rolante. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, 21 dez. 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8108: Ataque com reativos metalográficos em ligas ferrosas. ABNT, 1983.

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