

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e dos
 Materiais
PPGE3M

Fernando Silveira de Aguiar

Estudo e análise do forjamento a quente de um aço SAE 1045.

Porto Alegre
2022

FERNANDO SILVEIRA DE AGUIAR

ESTUDO E ANÁLISE DO FORJAMENTO A QUENTE DE UM AÇO SAE 1045.

Dissertação submetida ao Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia, modalidade Acadêmica.

Orientador: Prof. Dr. Ing- Lirio Schaeffer

Porto Alegre

2022

FERNANDO SILVEIRA DE AGUIAR

ESTUDO E ANÁLISE DO FORJAMENTO A QUENTE DE UM AÇO SAE 1045.

Esta dissertação foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia na área de Processos de Fabricação e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Comissão Examinadora designada pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Prof. Dr. Lirio Schaeffer
Orientador

Prof. Dr. Vinicius Martins
Coorientador

BANCA EXAMINADORA

Dr. Eng. Fabricio Dreher – Renner Herrmann S.A. _____

Prof. Dr. Mario Wolfart Junior – IFC _____

Prof. Dr. Renato Mazzini Callegaro – IFSul _____

Suplente: Dr. Eng. Alberto Moreira Guerreiro Brito– UFRGS _____

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho aos meus familiares, em especial a minha esposa Fernanda Silva, minha filha Ana Clara, meu Pai Saulo Aguiar e minha irmã Daiane Aguiar, pois eles formam o esteio que sustenta a minha vida.

“In memoriam a minha mãe Ana Marta, que foi um exemplo de ser humano, principalmente no que diz respeito a bondade e carinho com o próximo.

AGRADECIMENTOS

Agradecer alguém em específico se torna algo um tanto difícil, talvez nunca se consiga agradecer da forma que essas pessoas mereceriam. Então agradeço aos familiares já citados na dedicatória pois são as pessoas no qual dividimos nossos anseios e preocupações, aqueles que são os primeiros a nos dar a mão para levantar e seguir o caminho ao nosso lado, são essas pessoas que acompanham e acompanharam de perto todas as dificuldades no decorrer desse caminho.

Agradeço aos professores, que tem a habilidade e a missão de multiplicar conhecimento.

Agradeço imensamente as pessoas do Sr. Andrei Faria e Sr. Jaime Faria, que abriram as portas da empresa Metalmoto e me acolheram como peça chave na empresa, e como se não bastasse, encaram a “missão mestrado” me dando todo o apoio e incentivo necessário no que era possível.

Agradeço a UFRGS pelos recursos disponibilizados, desde equipamentos e maquinários até softwares de simulação como Simufact form, que foi fundamental para execução deste trabalho.

Agradeço muito a equipe do LDTM e CBCM pelo apoio sempre que necessário, aos colegas Eng. Bruno Cordeiro pelo suporte de sempre e ao Eng. André Rosiak que sempre se dispôs a auxiliar no que fosse preciso.

Gratidão ao orientador deste trabalho, professor Dr. Lírio Schaeffer, uma pessoa que possui muita sinceridade, honestidade e humildade, um orientador que do seu jeito simples te auxilia e direciona, deixando que seu trabalho seja desenvolvido conforme seus pensamentos e ele como orientador apenas apara as arestas e nos coloca mais próximo dos trilhos quando acha necessário. Fica meu sinceros agradecimentos.

Ao Prof. Dr Vinicius Martins, agradeço pelo incansável apoio, no qual me acompanha desde a graduação como orientador e agora como Coorientador, onde sempre se colocou ao meu lado desde a primeira ideia de me tornar mestre.

Encerro os agradecimentos agradecendo ao criador do universo, seja ele quem for, agradeço a essa energia que nos move a bilhões de anos, agradeço por ter me mantido rodeado pelas pessoas já aqui citadas e tantas outras que fazem minha vida ter sentido.

RESUMO

O trabalho foi realizado a partir de um estudo teórico-experimental com o objetivo de reduzir custos na fabricação de parafusos tipo olhal, utilizados em máquinas agrícolas com volume anual de consumo na faixa de 45mil peças. Os parafusos são obtidos por processo de forjamento a quente e fabricados em aço SAE 1045. Essas geometrias de peças possuem uma furação comumente feita por meio do processo de usinagem. O presente estudo desenvolveu um novo forjado, com redução do material na região central da peça onde é localizada a furação, para que esse furo pudesse ser feito com a peça ainda quente com auxílio de um punção, aproveitando assim o calor que foi gerado via aquecedora (eletro recalçadora) para o processo de forjamento. A geratriz proposta eliminou o processo de usinagem, ganhando tempo de máquina e reduziu os custos com os insumos específicos (ferramentas de corte, fluido refrigerante, óleos protetivos), apenas a redução de massa da nova geratriz permitiu uma grande redução de matéria prima. A partir da simulação feita via *software* “simufact forming” foi analisado o preenchimento da cavidade, pontos de possíveis defeitos do forjamento que poderiam interferir na furação e os principais pontos de contato da peça com a ferramenta, posteriormente, fez-se os desenhos de todo o ferramental (matriz, punção, rebarbador) para dar início ao experimento prático. No experimento foram forjadas e furadas 4.000 peças, que apresentaram resultado satisfatório. Ferramental e punção apresentaram desgaste moderado devido ao número de ciclos, mas sem nenhuma interferência dimensional que impactasse a qualidade da peça. Concluiu-se que a simulação computacional trouxe resultados coerentes e assertivos com relação ao processo experimental. Com essa geratriz proposta, conseguiu-se economizar 1ton de material por ano, e sendo feita a furação de forma sequencial conseguiu-se reduzir 225 horas de usinagem. Comprovando a vantagem desse aproveitamento da caloria da peça forjada.

Palavras chave: Forjamento, furação, simulação computacional, rebarbação.

ABSTRACT

The work is carried out from a theoretical-experimental study, with the objective of reducing costs in the manufacture of an eyelet type, hot forged, manufactured in SAE 1045 steel and which are used in agricultural machinery. These part geometries have a hole made through the machining process, after forging, and the present study aims to develop a new forging in which it has a relief so that a part can be hot drilled with the aid of a punch in it. Forging process, taking advantage of the heat generated via heating (electro pressurizer) for the forging process. The project under study consists of a die with a pre-drilled hole for subsequent hot drilling. In the same tool, the deburring tool and the punch were coupled to make the drilling, without the need for any subsequent machining process, machine time and specific machining inputs (cutting tools, coolant, protective oils). A die with the desired profile was created, at the sketch level via "simufact formed" software, where the filling of the cavity, points of possible bending of the material that could interfere with the drilling and the main contact points of the part with the tool were analyzed. Susceptible to premature wear of the punch or die, the drawings of the entire tooling (die, punch, deburring) were subsequently made to start the practical experiment. In the experiment, 4,000 pieces were forged and drilled, with a satisfactory result. Tooling and punching wear due to the number of cycles, but without any interference in the dimension of the part. With this process of preform and sequential punching, it was possible to save 1.5 ton of material, due to the generatrix developed for punching. Proving the advantage of using the calorific energy of the forged part.

Keyword (s): Forging, punching, simulation, deburring

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: (a) Piercing, diminuição de espessura material forjado para posterior furação por puncionamento (b) punching [https://www.schulergroup.com : acessado em 01/02/2022]. ...	22
Figura 2: Prensa de fricção (www.rollforming-line.com.br , acesso em 10/03/2020)	24
Figura 3: Parâmetros fundamentais de forjamento [27].....	25
Figura 4: Curva de revenimento do aço SAE H13 (www.villares.com.br , acesso 04/04/2021) ...	29
Figura 5: Geometria de canais e cavidades de rebarba [11].	30
Figura 6: Ângulos de Saída [27].....	31
Figura 7: Embarrilamento do material conformado [13].....	35
Figura 8: Curvas de escoamento do aço SAE 1045 para diferentes temperaturas disponíveis no software Simufact Forming 15.0.....	40
Figura 9: Microestrutura de um aço SAE1045 com ataque de nital 2% 500x[25].	42
Figura 10: Fluxograma das etapas realizadas	43
Figura 11: Espectrômetro modelo Foundry Master Pro.....	45
Figura 12: Geometria aplicada no ensaio do anel. (Dimensões em milímetros)	46
Figura 13: Prensa de fricção 80Ton marca Gutmann (altura 3,2metros).....	47
Figura 14: Eletro recalçadora, SOLD, 75KVA de potência	48
Figura 15: Modelos de parafuso tipo olhal aplicado em máquinas agrícolas.....	49
Figura 16 Modelo esquemático da peça forjada e posteriormente furada em centro de usinagem.....	49
Figura 17: Geratriz sugerida com pré-furo (a) e geratriz em 2D com dimensional em mm ...	50
Figura 18: Geratriz forjada proposta (a), esquema ilustrando geratriz entre as matrizes (b).51	
Figura 19 Pré-forma utilizada para o forjamento	52
Figura 20 Nuvem de densidade de malha aplicada a pré-forma para refino da malha na região de interesse	54
Figura 21a: Perfil forjado anteriormente	54
Figura 22: Distribuição da deformação equivalente ao longo das peças	55
Figura 23: Distribuição da temperatura ao longo da peça	56
Figura 24:Distribuição da tensão equivalente ao longo da peça	57
Figura 25: Microestrutura da barra trefilado com ataque de nital 2% e aumento de 400X....	59
Figura 26: Curvas de calibração ensaio do anel para o aço SAE 1045 a 1000 °C	60
Figura 27: Curvas de calibração ensaio do anel para o aço SAE 1045 a 850 °C	61
Figura 28: Proposta de matriz unificada.....	62
Figura 29 Estratégia de usinagem via software Edgecam.....	63
Figura 30: Cavidade usinada do perfil com detalhe (a).	63
Figura 31: Detalhamento do ferramental.....	64

Figura 33: Punção com face côncava	64
Figura 34: Eletro recalçadora em operação gerando pré-forma.	65
Figura 35: Pré-forma (amassamento) para posicionar na matriz forja final	66
Figura 36: : Forjamento do perfil em estudo com pré-furo, e no detalhe imagem da peça forjada ainda com a rebarba.	66
Figura 37: Peça na posição de rebarbação e no detalhe (A) peça ja rebarbada.	67
Figura 38: Etapa de furação a quente. Detalhe (A) peça alojada e punção guiado para furação, detalhe (B) peça ja furada.....	67
Figura 39: Primeiro lote de 1000 peças forjados	68
Figura 40: Metalografia da peça após forjamento com ataque de nital 2%, estrutura perlítica com rede de ferrita ao contorno dos grãos(Aumento 400x)	69
Figura 41: Geometria final em corte.....	69
Figura 42: Punção após primeiro lote de 1000 peças	74
Figura 43: Aresta do punção após 4000 ciclos.....	75
Figura 44: Superfície Matriz após 1000 peças	75
Figura 45: Cavidade após 4000 peças, apresentou desgaste.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Velocidades dos vários tipos de equipamentos para forjar [17]	24
Tabela 2: Composição química AISI H13 [13]......	28
Tabela 3: Composição química dos aços carbono [11]......	41
Tabela 4 Parâmetros térmicos e mecânicos utilizados na simulação numérica da etapa de forjamento (Etapa 2)......	53
Tabela 5: Determinação da composição química por espectrometria atômica	58
Tabela 6: Dados de entrada ensaio do anel.....	59
Tabela 7: Comparativo custos de forjamento x usinagem.....	77
Tabela 8: Comparativos de economia de matéria prima	78

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área	[mm ²]
Ac	Constante do material	[adimensional]
Ap	Área projetada	[mm ²]
Ar	Área da rebarba	[mm ²]
c _M	Calor específico do material	[J/g°C]
d	Diâmetro	[mm]
d ₀	Diâmetro inicial	[mm]
d _p	Diâmetro do punção	[mm]
D	Dureza	[HB / HRC]
D _p	Diâmetro total da peça puncionada	[mm]
F	Força	[N]
h ₀	Altura inicial	[mm]
h	Altura	[mm]
h _m	Altura média	[mm]
h ₁	Altura final	[mm]
k	Tensão limite de elasticidade em cisalhamento puro	[N/mm ²]
k _{f0}	Tensão de escoamento inicial	[N/mm ²]
k _{f1}	Tensão de escoamento para φ=1	[N/mm ²]
k _f	Tensão de escoamento	[N/mm ²]
k _{f_m}	Tensão de escoamento média	[N/mm ²]
LR	Limite de resistência	[Mpa]
LE	Limite de escoamento	[Mpa]
m	Fator de atrito	[adimensional]
m1	Constantes empíricas da equação de Hensel e Spittel, que dependem do material.	[adimensional]
m2	Constantes empíricas da equação de Hensel e Spittel, que dependem do material.	[adimensional]
m3	Constantes empíricas da equação de Hensel e Spittel, que dependem do material.	[adimensional]
QS	Perda termica por unidade de tempo	[Kj/h]
R	Raio	[mm]

t	Tempo	[s]
T_0	Temperatura inicial	[°C]
T_f	Temperatura Ferramenta	[°C]
T	Temperatura	[°C]
V	Volume	[mm ³]
v_f	Velocidade da ferramenta	[mm/s]
V_t	Velocidade tangencial do volante	[mm/s]

Símbolos Gregos

μ	Coeficiente de atrito	[adimensional]
φ_m	Deformação verdadeira	[adimensional]
$\dot{\varphi}_m$	Velocidade de deformação	[s ⁻¹]
α_0	Ângulo de folga ferramenta	[°]
σ_z	Tensão normal	[N/mm ²]
r	Tensão de cisalhamento	[N/mm ²]
ρ	Densidade	[g/m ³]
α	Coeficiente de transferência de calor	(J/°Cms)
Δr	Varição do raio	[mm]
Δx	Varição da distância em “x”	[mm]
p	Tensão normal de contato entre as superfícies	[N/mm ²]

ABREVIATURAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul

CNC - Comando Numérico Computadorizado

AISI - *American Iron and Steel Institute*

SAE - *Society of Automotive Engineers*

TEP - Teoria Elementar da Plasticidade

DIN – *Deutsche Industrie Norm*

MMC - Máquina de Medição por Coordenadas

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	JUSTIFICATIVA.....	18
1.2	OBJETIVO GERAL	18
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	20
2.1	Forjamento.....	20
2.1.1	Forjamento a quente	21
2.1.2	Furação por puncionamento (punching).....	22
2.2	Equipamentos para o Forjamento a Quente	23
2.2.2	Prensa.....	23
2.2.3	Prensas de fuso ou de fricção.....	23
2.2.4	Parâmetros fundamentais do forjamento	25
2.3	Matrizes para forjamento	25
2.3.1	Aços para matrizes de forjamento a quente.....	26
2.3.2	Aço AISI H13.....	27
2.3.2.1	Resistência ao Revenido	28
2.3.2.2	Duplo ou Triplo Revenido	29
2.3.3	Canal e cavidade da rebarba	30
2.3.4	Ângulo de saída	31
2.3.5	Cálculos para forjamento em matriz fechada.....	31
2.3.6	Força necessária para forjar	32
2.3.7	Temperatura durante o processo de forjamento	32
2.3.8	Perda térmica por contato com a ferramenta.....	33
2.3.9	Velocidade de deformação.....	33
2.4	Coeficiente de atrito	34

2.5	Simulação computacional.....	36
2.5.1	Parâmetros de entrada.....	38
2.5.2	Efeitos das variações dos parâmetros de entrada	38
2.6	Curva de Escoamento do aço SAE 1045.....	39
2.7	Aços carbono.....	40
2.7.1	Considerações Gerais.....	Erro! Indicador não definido.
2.7.2	Aço SAE 1045.....	41
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	43
3.1	Caracterização do material a ser forjado	44
3.1.1	Caracterização por espectrometria atômica.....	44
3.1.2	Caracterização por metalografia	45
3.2	Ensaio do anel para a determinação do coeficiente de atrito.....	45
3.3	Equipamentos utilizados no forjamento	47
3.3.1	Prensa.....	47
3.4	Geometria da peça em estudo.....	48
3.5	Definição da geratriz para forjamento	50
4	APLICAÇÃO DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	52
4.1	Análise da simulação	54
5	ANÁLISE EXPERIMENTAL	58
5.1	Caracterização do material SAE 1045	58
5.2	Obtenção das curvas de calibração via ensaio do anel	59
5.3	Desenvolvimento do ferramental de forjamento.....	61
5.4	Fabricação das Matrizes.....	62
5.5	Descrição do processo experimental de forjamento	65
5.6	Forjamento experimental	68
5.7	Análise do material forjado.....	68
5.8	Análise da Troca Térmica	69

5.8.1	Cálculo do aumento de temperatura pelo efeito do trabalho de conformação	69
5.8.2	Cálculo da perda de temperatura pelo contato com a ferramenta	72
5.8.3	Cálculo espessura da rebarba	72
5.8.4	Cálculo da força conforme SPUR	73
6	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	74
6.1	Comportamento do ferramental	74
6.2	Resultados em custos.....	77
6.3	Resultados cálculos	78
7	CONCLUSÕES	79
8	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	80
	REFERÊNCIAS.....	80

1 INTRODUÇÃO

Um processo de forjamento a quente convencional possui cinco passos básicos: corte da geratriz, aquecimento, forjamento (em uma ou mais etapas), rebarbação e tratamento térmico.

Turk, Perus e Tercelj [1] citam que aproximadamente 17% do custo para fabricação de peças forjadas são provenientes do ferramental, devido o mesmo ser fabricado de material mais nobre, o que torna a vida útil das matrizes um fator de extrema relevância e importância para gestão desse custo de processo e ser uma empresa competitiva.

No processo de forjamento a quente, muito se estuda o processo de conformação da geometria final, mas por vezes não são levados em consideração os processos posteriores de rebarbação e de calibração (quando necessário), os quais são imprescindíveis, em inúmeros casos, para a produção da peça final que por vezes, o forjamento tradicional à quente não consegue atender tamanha precisão.

Projetou-se uma ferramenta que em apenas um “*set-up*” seja possível executar o forjamento, a rebarbação e a furação a quente, substituindo o processo de usinagem CNC para furar o parafuso, o que elimina 225 horas de máquina usinagem por ano, gerando também uma economia aproximada de 1ton de material por ano e também redução de 3 *set-up*'s para apenas um.

Com a validação desse ferramental, além da redução de horas e disponibilidade de recursos de usinagem, foi reduzido o consumo de material. Conforme Kuhlmann [2] aproximadamente metade do custo de um forjado se faz em função do custo da matéria prima, que nesse estudo chegou-se a redução de aproximadamente 1ton por ano, assim como os demais custos de energia elétrica e mão de obra. Haverá também um ganho importante no tempo de “*setup*” das ferramentas, pois foi necessário fixar apenas um ferramental para executar o processo completo, o que anteriormente haviam mais dois “*set-up*'s”. Sendo assim, este dispositivo é considerado uma ferramenta economicamente viável e ecologicamente apreciado.

1.1 JUSTIFICATIVA

Atualmente o mercado agrícola no ramo de plantadeiras vem em uma crescente, comparado aos anos anteriores (2016 e 2017). Com isso a agilidade e qualidade exigida da cadeia de fornecedores das grandes montadoras de máquinas e implementos vem se tornando cada vez mais um diferencial, e por sua vez, para ser competitivo com a cadeia base de fornecedores, o mesmo precisa estar sempre propondo melhorias e reduções de custos expressivas para se manter na base.

Por meio desse cenário, o estudo de melhoria proposto traz um dos componentes mais utilizados em máquinas plantadeiras, que são os parafusos de tipo olhal, na qual apresenta uma alta demanda de volume anual, sendo um item que possui diversas etapas em seus processos de fabricação, como: corte, forjamento, rebarbação, furação, laminação de rosca e zincagem. Sendo essa furação feita em centro de usinagem CNC, no qual poderia ser substituída por uma perfuração mecânica, aproveitando a alta temperatura de forjamento da peça, reduzindo uma etapa e desgastes de ferramentais de usinagem, alto custo de uma máquina CNC, comprimento de material cortado, movimentação da peça e redução de *set-up*'s.

1.2 OBJETIVO GERAL

Reduzir significativamente os custos de fabricação do componente estudado, criando uma geratriz que se possa executar a furação por puncionamento com a peça ainda quente do forjamento.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O trabalho foi realizado em três etapas principais: simulação computacional do forjamento, aplicação prática na empresa e acompanhamento do estado do ferramental após fabricação em maior escala, tendo como objetivos específicos:

- Desenvolver um novo perfil de forjamento, com um alívio centralizado que permita, que o mesmo possa ser furado com auxílio de um punção aproveitando a alta temperatura da peça recém forjada.
- Identificar, por meio de sistemas de simulação numérica, a geometria da

geratriz mais adequada para a fabricação da peça em estudo.

- Analisar com auxílio de *software* Simufact.forming, o comportamento da peça proposta e comparar com a peça forjada anteriormente, sem pré-furo.
- Analisar o preenchimento da cavidade via simufact forming
- Comparar os resultados das simulações de ambas (forjado antigo e forjado proposto)
- Fazer experimento prático e posteriormente em alto volume para analisar o desgaste do ferramental e eficiência da furação a quente.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo apresenta as informações contida na literatura, que serviram de referências para o desenvolvimento da pesquisa e a construção deste trabalho.

2.1 FORJAMENTO

Com o crescimento industrial juntamente com a competitividade entre as empresas de diversos ramos tem levado as mesmas a agirem na busca pela melhoria dos processos produtivos e dos seus produtos, por meio de técnicas de organização, layout, tecnologias e fabricação que atendam às exigências do mercado e reduzam custos de produção, tornando esses processos mais flexíveis, rápidos e econômicos [3].

No início do século XX, as forjarias tiveram uma considerada mudança, isso deu-se com os avanços científicos e os primeiros estudos realizados sobre o comportamento dos materiais empregados, análise experimental dos processos, tecnologia dos materiais e determinação da curva de escoamento dos diversos materiais [4]. A evolução da indústria traz aos dias de hoje uma necessidade de produção em massa, onde reduzir custos e aumentar margem de resultados são os principais fatores. Com tudo também a qualidade dos produtos forjados caminha junto com essa evolução da indústria.

Lange [5] destaca que o forjamento é um dos principais processos de conformação mecânica, no qual pode ser classificado em dois grupos: matriz aberta ou em matriz fechada, podendo ser realizado a quente, a morno e a frio. No presente estudo, o forjamento a quente foi detalhado, seguido de duas etapas, que são a rebarbação e furação a quente.

Por meio do forjamento, é possível obter as diversas formas e dimensões de peças, utilizando diversos materiais metálicos como aços carbono, aços-liga, aços inoxidáveis, ligas de alumínio, cobre, titânio, etc. De modo geral, todos os materiais metálicos podem ser deformados e, inclusive, forjados.

No processo de conformação algumas variáveis devem ser levadas em consideração, as quais são agrupadas e relacionadas aos seguintes fatores: material a ser conformado, ferramental, condições de interface, zonas de deformação, equipamento usado, ambiente e características finais do produto [6].

Em relação ao material a ser conformado, há condições específicas relativas à matéria-prima do tarugo a serem considerada como: tensão de escoamento, taxa de deformação,

temperatura, microestrutura, condições superficiais do tarugo, propriedades termofísicas e conformabilidade.

Tratando-se o ferramental, deve se observar algumas questões muito pertinentes, que estão relacionadas a geometria das ferramentas, as condições superficiais de acabamento, o material, a dureza, os tratamentos térmicos e a temperatura de trabalho em função da relação peça/matriz. Além dos tipos de matrizes (fechadas e abertas). Para matrizes fechadas as geometrias das matrizes empregadas apresentam uma complexidade considerada média. Utiliza-se para a produção em larga escala de diversos tipos de aços e ligas. Deve-se atentar para a conservação do ferramental diante da necessidade deste processo exigir um número elevado de ciclos para considerá-lo economicamente viável [7].

A interface ferramenta-peça é extremamente importante para obter-se um bom forjado, e deve-se observar alguns fatores como: tipo de lubrificante, quantidade de lubrificante, temperatura de trabalho, resfriamento na camada de interface, tensão de cisalhamento e atrito.

São características importantes relativas à zona de deformação da peça: fluxo de metal, velocidade, taxa de deformação e transferência de calor. Além dos tipos de prensa e equipamento usado no processo, nota-se que a velocidade e força, são os principais fatores [7].

Relativo ao produto, observa-se: geometria da peça, precisão e tolerâncias dimensionais, acabamento superficial desejado, microestrutura, propriedades mecânicas e metalúrgicas.

Por fim, as condições relativas ao ambiente são: capacidade de mão de obra disponível, qualidade do ar, poluição sonora; geração de resíduos líquidos; controle de produção e equipamentos disponíveis.

2.1.1 Forjamento a quente

O processo de forjamento consiste no aquecimento de um tarugo até determinada temperatura e posteriormente seguido de uma conformação mecânica, geralmente por prensa. O processo inicia pelo corte das barras, em serra ou por cisalhamento em prensas ou guilhotinas, para obtenção do tarugo/blank ou billet. Os tarugos passam por um aquecimento em um forno e 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. Após conformada a peça, gera-se uma rebarba em seu contorno que são retiradas em uma operação de corte por cisalhamento em matriz e rebarbador, com a peça ainda quente

imediatamente após o forjamento. Ao finalizar essa operação de rebarbar os forjados são tratados termicamente para obter-se uma microestrutura adequada à usinagem. As matrizes de forja devem ser pré-aquecidas (150 °C) para que não trinque ou quebre por choque térmico com a peça conformada. Após forjar a primeira peça deve-se verificar as dimensões do forjado. Caso seja necessário algum ajuste no ferramental para atender as especificações do produto, o mesmo deve ser feito novamente [7][8].

2.1.2 Furação por puncionamento (punching)

O processo de furação por puncionamento (*punching*, em inglês) surge como uma alternativa econômica e alta produtividade para confecção de furos em componentes metálicos. Comparando-se a furação por puncionamento com os métodos de usinagem, percebe-se que a furação por puncionamento é um método fácil, rápido e econômico, pois além de apresentar um bom resultado dimensional e acabamento, o mesmo evita o uso de fluídos de corte, ferramentas de usinagem e equipamentos específicos. Essa técnica de perfuração é realizada em algumas vezes como um processo auxiliar em conjunto com outros processos de forjamento. Pode ser usado para criar uma cavidade, rebaixo ou furo na peça [16].

Na literatura pesquisada, o processo de puncionamento, está em maior parte relacionado com chapas de espessuras mais finas, geralmente para os casos em que se necessita a perfuração de uma espessura maior, como o presente trabalho, o meio científico carece de estudos relacionados a este tipo de pesquisa.

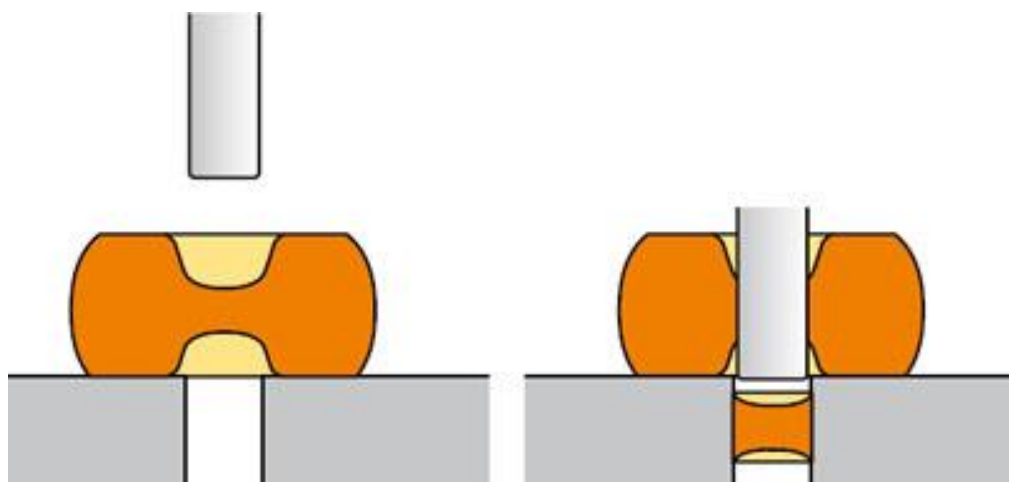


Figura 1: (a) Piercing, diminuição de espessura material forjado para posterior furação por puncionamento (b) punching [<https://www.schulergroup.com>: acessado em 01/02/2022].

2.2 EQUIPAMENTOS PARA O FORJAMENTO A QUENTE

A seleção do equipamento de forjamento depende de alguns fatores, sendo desde a complexidade do forjado e capacidade de deformação do material [14]. No forjamento a quente geralmente são utilizadas prensas e os martelos. Atualmente existem três tipos de prensas: mecânicas, hidráulicas e as de fuso/ fricção. Esses três tipos de prensas são frequentemente utilizadas em processos de forjamento e também na conformação de chapas e estampagem. Em contrapartida os martelos são empregados no forjamento a quente, especificamente em peças de grande porte.

2.2.2 Prensa

As prensas são máquinas utilizadas para conformação mecânica ou prensagem de algum material sob força de compressão. As prensas são acionadas de forma mecânica (fricção / excêntricas / martelo) ou hidráulicas. No caso de prensas excêntricas, as mesmas transformam movimento de manivela e um movimento de rotação em linear [26]. Já as prensas hidráulicas possuem um pistão, que é acionado para gerar a compressão. Uma desvantagem desse tipo de equipamento é a sua baixa velocidade, pois fica isso faz com que a ferramenta fique em contato com a peça durante mais tempo, podendo levar a perda de calor. Porém a prensa hidráulica apresenta uma vantagem importante, devido sua baixa velocidade a mesma consegue garantir tolerâncias dimensionais mais precisas, em virtude do seu avanço controlado [26].

2.2.3 Prensas de fuso ou de fricção

As prensas de fuso ou de fricção como são conhecidas (Figura 2), utilizam um sistema composto por embreagem, engrenagens, acionamento elétrico ou hidráulico, empregado para acelerar um volante montado em um fuso que converte energia cinética angular em movimento linear de um cabeçote.

Seu funcionamento consiste de discos de acionamento, que ficam girando continuamente e iniciam um golpe quando um dos discos é pressionado contra o volante por um Servo motor. Este volante aciona o fuso onde está o cabeçote com a matriz superior [16].



Figura 2: Prensa de fricção (www.rollforming-line.com.br, acesso em 10/03/2020)

A Figura 2 exibe a prensa de fricção possui a sua estrutura, o volante e os discos de acionamento em ferro Fundido. Os eixos e o fuso principal são forjados em aço SAE 4141. A Tabela 1 apresenta as velocidades características de alguns equipamentos de forjamento.

Tabela 1: Velocidades dos vários tipos de equipamentos para forjar [17]

Máquinas de energia limitada			
Equipamento	Veloc. "v" (m/s)	Veloc. inicial de conformação (1/s)	Veloc. média (m/s)
Martelos	5 a 7	(**) $w_O = 40$ a 160	$w_m = (0,85 \text{ a } 0,9) \cdot w_O$
Prensas de fricção	0,3 a 0,4	$W_O = 4$ a 25	
Máquinas de força limitada			
Prensas Hidráulicas	0,2 a 0,5	$w_O = 0,01$ a 10	$w_m = (1,3 \text{ a } 1,6) \cdot w_O$
Máquinas de curso limitado			
(*) Prensas mecânicas	0,4 a 0,6	$W_O = 4$ a 25	$w_m = (0,3 \text{ a } 0,4) \cdot w_O$

* prensas de manivela e excêntricas,

** $w_O = v / h_o$ (v = velocidade do equipamento e h_o = altura inicial do tarugo)

2.2.4 Parâmetros fundamentais do forjamento

Diversos parâmetros são mostrados na Figura 3, por exemplo a partir da matéria prima diversas variáveis estão ligadas como composição química, microestrutura, propriedades mecânicas e defeitos superficiais.

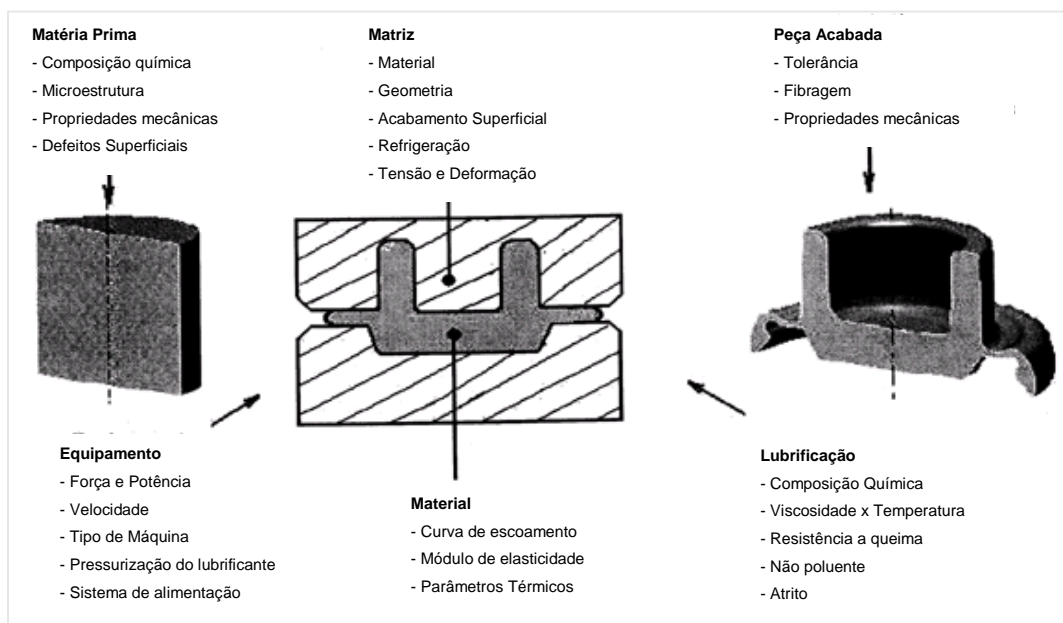


Figura 3: Parâmetros fundamentais de forjamento [27].

Observa-se que tensões e deformações, força e potência e outras variáveis são características em função da Matriz, das peças acabadas entre outras. Foi elencado seis parâmetros, que possui suas variáveis respectivamente e permitem determinar as propriedades desejadas.

2.3 MATRIZES PARA FORJAMENTO

O custo de construção de uma matriz é bem alto, podendo constituir de 50 a 60% do custo total do componente. Por isso a importância de um desenvolvimento assertivo além de cuidados especiais em pré-aquecimento e manutenção das mesmas, impacta muito no cliente final, em função da vida útil da ferramenta [23].

Ao fazer o desenvolvimento de um ferramental, espera-se que o mesmo consiga ser otimizado para evitar perdas de material, mas também para prolongar a vida útil da matriz.

O projetista define a cavidade, baseado na peça que foi feita, determina a contração da peça em função da temperatura do processo de forjamento, depois o projeto é encaminhado para fabricação por usinagem, podendo ser parametrizado com um *software* CAM.

2.3.1 Aços para matrizes de forjamento a quente

Durante o processo de forjamento as matrizes estão sujeitas a altos impactos. Sendo assim, considerando esse alto impacto, no forjamento a quente convencional as matrizes apresentam uma área de choque para absorver o impacto no fechamento, que podem provocar danos em regiões das ferramentas, causando deformações permanentes como trincas e até mesmo a variação dimensional [12]. Ainda no forjamento a quente, as matrizes estão sujeitas a solicitações térmicas devidas as altas temperaturas durante o processo. Em função dessas solicitações a que estão expostas as ferramentas de forjamento estabelecem-se os seguintes requisitos para o material adequado à fabricação de matrizes:

- Alta dureza, tenacidade e resistência à fadiga;
- Alto limite de escoamento e alongamento;
- Alta resistência a quente;
- Insensibilidade a oscilações térmicas de curta duração e
- Alta resistência ao desgaste.

Assim, os materiais mais indicados e atualmente utilizados são os aços ligados ao Cr, Mo, V, W e Ni.

A principal característica dos aços para matrizes de forjamento a quente é a sua resistência ao trabalho a quente. Devido as altas temperaturas geradas no processo. Quanto maior a temperatura de trabalho, menor a resistência mecânica dos aços ferramenta [28].

O tarugo ou billet normalmente possui temperatura na faixa de 1000 °C, portanto o número de repetições e tempo de contato da peça com a ferramenta também se torna um fator importante

A superfície da ferramenta é aquecida durante o processo de forjamento, quanto mais alta a temperatura e maior for o tempo de contato, maior foi a temperatura da superfície, podendo chegar na faixa de 550 °C por exemplo, gerando assim um revenimento na ferramenta, trazendo por consequências a diminuição da dureza superficial e resistência mecânica da mesma. Desta forma, a resistência ao revenimento (perda em dureza e alívio de tensões) torna-se fundamental [28]

A dureza a quente é assegurada pela presença dos elementos de liga como tungstênio, molibdênio, cromo e vanádio [25].

A tenacidade (capacidade de um material absorver energia e deformar permanentemente sem fraturar) é também, uma propriedade importante, a falta de tenacidade pode gerar trincas que dependendo do tamanho podem se propagar e danificar a matriz de forma permanente.

Uma outra característica importante é a resistência a fadiga térmica, que são geradas pela expansão e contrações produzidas pelos choques térmicos entre peça e ferramenta e também pela condição de superfície da matriz. As trincas por fadiga geralmente iniciam em pontos onde a tensão é maior

Mecanismos de falha mais comuns em matrizes de forjamento.

- 1- Desgaste abrasivo.
- 2- Fadiga térmica.
- 3- Fadiga mecânica.
- 4- Deformação plástica

A capacidade do material ser temperado (temperabilidade), quando maior for, maior a profundidade que o mesmo pode ser endurecido. Isso depende unicamente da composição química do material e da curva específica de tratamento térmico.

2.3.2 Aço AISI H13

Os aços mais utilizados na fabricação de matrizes para trabalho a quente é o aço SAE H13, pois um aço para essa aplicação se faz necessário que o mesmo possua grande resistência ao desgaste e aos esforços de compressão. Nas matrizes que trabalham a quente e para o forjamento também a quente devem ser considerados os aspectos relacionados as propriedades mecânicas do material. Os materiais para essa aplicação, são os aços que contém como principais elementos de liga o Cromo, Tungstênio, Molibdênio e o Vanádio [11].

Ainda que exista uma grande gama de matérias desenvolvidos para essa finalidade (conformação a quente) e também para suprir as mais diversas aplicações, o aço SAE H13 fica entre os mais utilizados no forjamento, devido ao mesmo possuir excelente desempenho para

trabalho a quente, pois combina dureza e resistência à fratura, resistência a choques térmicos e às trincas por fadiga térmica, características importantes para ferramentas de forjamento [12]. A Tabela 2 exibe a composição química do aço ferramenta SAE H13.

Tabela 2: Composição química AISI H13 [13].

Elemento	C	Cr	Si	Mo	Mn	V
% peso	0,32-0,45	4,75-5,5	0,8-1,2	1,1-1,75	0,2-0,5	0,8-1,2

A composição química do aço SAE H13 é conforme Tabela 2. Esses tipos de aços são conhecidos por sua resistência ao desgaste, trincas, fadiga térmica, e alta resistência mecânica, assim como boa tenacidade e usinabilidade; boa estabilidade dimensional durante o tratamento térmico.

2.3.2.1 Resistência ao Revenido

Uma das principais características que uma matriz de forjamento deve possuir é a resistência ao desgaste, e o mesmo está muito relacionado a perda de dureza da ferramenta quando está em trabalho. Essa perda de dureza, também chamada de revenimento pode auxiliar no surgimento de trincas. Sendo assim, o aumento da resistência ao revenimento do material torna-se essencial para o aumento da vida útil desta ferramenta [28]. A Figura 4 mostra a curva de revenimento do aço H13, evidenciando perda de dureza do aço quando o mesmo é submetido a elevadas temperaturas.

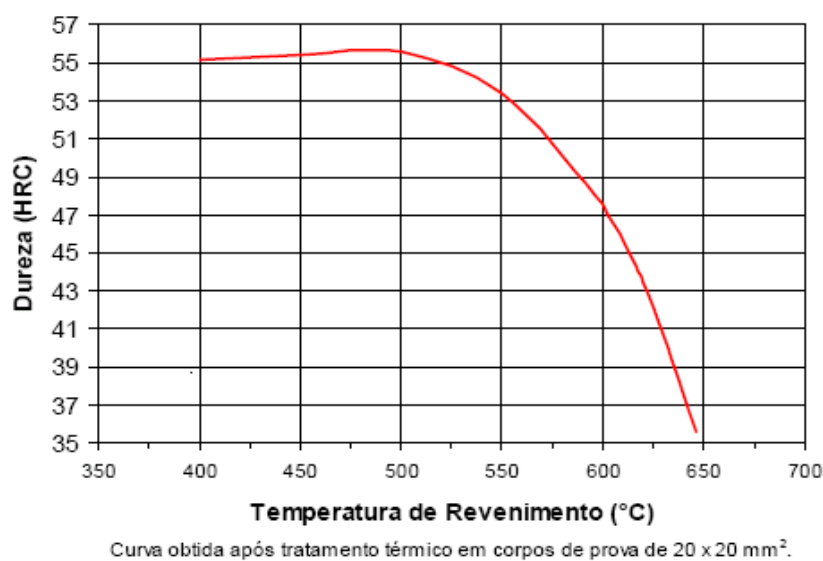


Figura 4: Curva de revenimento do aço SAE H13 (www.villares.com.br, acesso 04/04/2021)

Nota-se que a dureza do aço SAE H13 consegue manter em torno de 55 HRC até 525 °C, e posteriormente o declínio é acentuado rapidamente conforme mostra a curva que com o aumento de 100 °C, o material perde 20 HRC de dureza.

2.3.2.2 Duplo ou Triplo Revenido

Os materiais ricos em elementos de liga como os aços ferramenta, são beneficiados ao serem revenidos, pois garante um aumento de tenacidade e o endurecimento secundário. Além disso, os carbonetos de elementos de liga, resistem ao coalescimento quando expostos ao calor. Os átomos desses elementos movimentam-se basicamente por difusão substitucional, por meio do reticulado cúbico de corpo centrado do ferro na condição microestrutural de martensita revenida. A difusão mais lenta torna as distâncias percorridas por difusão muito curtas, produzindo assim os carbonetos de elementos de liga muito finos e pouco espaçados que é o mecanismo ideal para esse processo. Tal difusão, por ser lenta, retarda o coalescimento dos carbonetos durante o serviço em elevadas temperaturas, tornando os aços ferramenta resistentes ao amolecimento durante operações de trabalho a quente. Define-se como a temperatura máxima de operação de um aço ferramenta como sendo a sua temperatura de revenido. Esta restrição limita o coalescimento, garantindo estabilidade microestrutural e propriedades mecânicas imutáveis [29].

Os elementos de liga influenciam evitando que toda a microestrutura se forme como martensita, devido a tendência em se ligar ao carbono reduzindo o coeficiente de difusão,

gerando austenita retida, que logo após no primeiro revenimento a altas temperaturas se tornam carbonetos interripas na martensita revenida, que são responsáveis por reduções importantes na tenacidade ao impacto. Então é feito um segundo revenimento em seguida para esferoidizar esses carbonetos, reduzindo seu efeito fragilizante [29].

Ainda para alguns materiais é possível executar um terceiro revenimento para esferoidizar os carbonetos persistentes ou até mesmo revenir a martensita formada após o primeiro ou segundo revenido.

2.3.3 Canal e cavidade da rebarba

A rebarba (flash, em inglês) nada mais é do que o excesso de material ao redor da peça, ela é formada no movimento de fechamento das matrizes, onde esse canal provoca o estrangulamento provocando tensões compressivas na cavidade das matrizes, auxiliando o preenchimento da cavidade. A força aumenta de forma mais rápida quando inicia a formação da rebarba. Essa etapa do processo é importante, pois a partir desse ponto o forjamento começa a alcançar a forma desejada (Figura 5) [23].

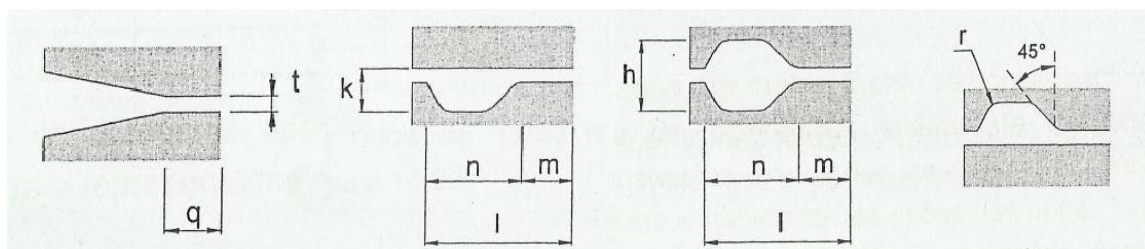


Figura 5: Geometria de canais e cavidades de rebarba [11].

Nota-se o detalhamento da geometria de canais e das cavidade de rebarbas (*Flash Gutter*, em inglês) A espessura da rebarba pode ser calculada em função da área projetada da peça ainda sem rebarba, por meio da equação 1:

Eq. 1

$$h = 0,015 \cdot \sqrt{A}$$

h = altura

A = área

0,015 = constante

2.3.4 Ângulo de saída

Especificar corretamente os ângulos de saída é um fator importante, pois é ele o responsável pela redução do esforço de extração da peça na matriz de forjamento, se o ângulo não é projetado corretamente, a peça fica mais tempo em contato com a matriz podendo provocar a diminuição da dureza, diminuindo a vida útil da mesma, além do desgaste precoce da cavidade. A Figura 6 mostra em linha tracejada a peça em sua forma final, e o contorno e a peça forjada com os ângulos de saída.

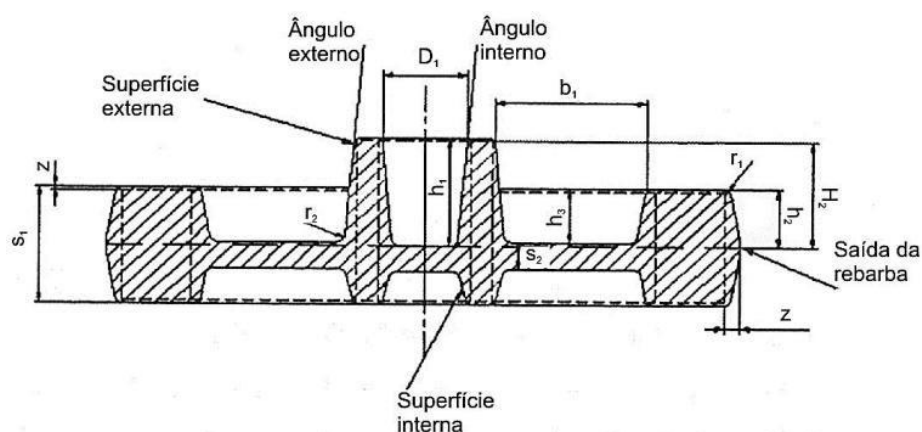


Figura 6: Ângulos de Saída [27]

2.3.5 Cálculos para forjamento em matriz fechada

Muitas pesquisas relatam formas utilizadas para se calcular a força de forjamento. Existem diferentes métodos para se chegar a ela, todavia cada um traz consigo vantagens e limitações. Eles podem ser classificados como métodos analíticos, numéricos e experimentais [14].

O cálculo da força necessária para deformação no forjamento é difícil de se obter com precisão, pois além da complexidade própria da deformação plástica, existem questões relacionadas ao da peça com a matriz, trocas térmicas entre peça e ferramenta, entre outros. Em função disto, realiza-se uma simplificação que permite a estimativa da ordem de grandeza das forças envolvidas [14].

2.3.6 Força necessária para forjar

Conhecer a força necessária para o forjamento de uma peça são parâmetros fundamentais para qualquer projeto, tanto para determinar a máquina/equipamento de forja quanto dimensionar o ferramental. Há um grande número de métodos para a determinação desses parâmetros: desde fórmulas empíricas bastante simplificadas como o cálculo de força conforme SPUR descrito da equação 2, passando por modelos analíticos baseados na teoria elementar da plasticidade, também chamada de TEP, até sofisticados métodos numéricos como elementos finitos, implementados em programas de computador.

Eq. 2

$$F_{max} = K_f \left[\left(1,5 + \frac{b}{2h} \right) \cdot A_p + \left(1,5 + \frac{b}{h} + 0,08 \frac{d1}{h} \right) A_r \right]$$

Onde:

b – Largura da rebarba [mm]

k_f – Tensão de escoamento [N/mm²]

h - Espessura da rebarba [mm]

A_p – Área projetada [mm²]

$d1$ – Diâmetro total da peça forjada [mm]

A_r – Área projetada da rebarba [mm²]

2.3.7 Temperatura durante o processo de forjamento

Durante o processo de forjamento ocorre uma transformação do trabalho de conformação em aumento de temperatura. Esse aumento de temperatura devido ao trabalho de conformação (ϑ_c) pode ser calculado pela equação 3 [27]:

Eq. 3

$$\vartheta_c = \frac{k_f \cdot \varphi}{c_M \cdot \rho} \cdot a$$

Onde:

a – Parcela de energia não transmitida em calor (0,9)

k_f – Tensão de escoamento (N/mm²)

φ - Deformação Verdadeira (-)

c_M - Calor Específico do Material (J/g°C)

ρ - Densidade do Material (massa específica)(g/m³)

2.3.8 Perda térmica por contato com a ferramenta

A perda de temperatura devido ao contato com a ferramenta (matriz) normalmente com temperatura inferior à da peça, pode ser calculado pela equação 4 [27]:

Eq. 4

$$\vartheta = \vartheta_F + (\vartheta_M - \vartheta_F)e^{\left(-\frac{\alpha \cdot t}{c_M \cdot \rho \cdot h}\right)}$$

Onde:

ϑ - Temperatura da peça após conformação (°C)

ϑ_F - Temperatura da Ferramenta (°C)

ϑ_M - Temperatura inicial da Geratriz (°C)

t – Tempo de contato peça e ferramenta (S)

α – Coeficiente de transferência de calor ferramenta-peça (J/°C m s)

c_M - Calor Específico do Material (J/g°C)

ρ - Densidade do Material (massa específica)(g/m³)

h – Altura da peça ou da região de cálculo (m)

2.3.9 Velocidade de deformação

A velocidade da ferramenta para o caso de uma prensa excêntrica não é constante durante a conformação, portanto é dada em função da velocidade tangencial do volante, descrita na equação 5 [27]:

Eq. 5

$$V_f = V_t \cdot \sqrt{1 - \left(1 - \frac{h-h_0}{R}\right)^2}$$

Onde:

V_f - velocidade da ferramenta (mm/s)

V_t - velocidade tangencial do volante (mm/s)

h - altura média (mm)

h_0 - altura da geratriz (pré-forma) (mm)

R- Raio do volante

2.4 COEFICIENTE DE ATRITO

Na conformação mecânica, um dos fatores que desempenham uma importante função é o atrito, sendo ele desejável para que o material se conforme na cavidade, porém, também deve ser analisado para que o excesso de atrito não venha a diminuir a vida útil das matrizes a médio e a longo prazo, assim como o acabamento da peça produzida que pode também ser afetada [9]. Medir o atrito não é algo fácil, embora já existam diversos métodos possíveis para esse fim.

Um dos ensaios mais importantes para determinar o coeficiente de atrito é o ensaio de compressão do anel, onde os corpos de prova são sujeitos a uma carga que leva o anel a uma redução, sendo que a variação nos diâmetros internos e externos do anel se darão pelo atrito gerado entre as placas e a superfície do anel [10]. O ensaio é feito ou pode ser feito com e sem lubrificante, dependendo da análise que está sendo feita, e pode então chegar a alguns resultados onde os corpos de prova ao serem comparados possuam diferentes geometria pelo fato de ter ou não lubrificação. (11).

O ensaio de compressão do anel é um método experimental utilizado para a determinação das condições de atrito nos processos de conformação mecânica. Foi inicialmente proposto por Kunogi, em 1956, e então, desenvolvido por Male e Cockcroft entre 1964-65 [10]. O ensaio propicia uma avaliação qualitativa, mas quando associado a modelos matemáticos, é possível ainda quantificar o atrito.

A técnica do teste do anel envolve uma simples operação de recalque em um corpo

de prova em forma de anel. A variação de diâmetro para uma determinada variação na espessura é função do atrito interfacial. Se o atrito é zero o anel deforma-se como um disco sólido, com cada elemento fluindo radialmente para fora em uma taxa proporcional a sua distância ao centro. Quando existe atrito na interface a condição torna-se energeticamente favorável à existência de um raio neutro, que é a linha de divisão da região em que o material fluirá radialmente para fora e da outra que fluirá em sentido oposto. A magnitude do atrito irá determinar a localização do raio neutro e, portanto, a variação do raio interno para uma dada deformação em espessura, sendo que, o decréscimo do raio interno é mais acentuado quando o atrito é elevado.

Nos processos de conformação, entre eles o forjamento, a força aplicada ao se executar a pressão para deformação transmitida pela matriz, o que provoca uma movimentação entre a ferramenta e o componente deformado. Neste movimento entre as partes é onde pode ser verificada a presença do atrito no processo de conformação conforme Figura 7 onde um embarrilamento pode ser notado. Este parâmetro tem relação direta com a vida útil das matrizes bem como com a qualidade da peça [12].

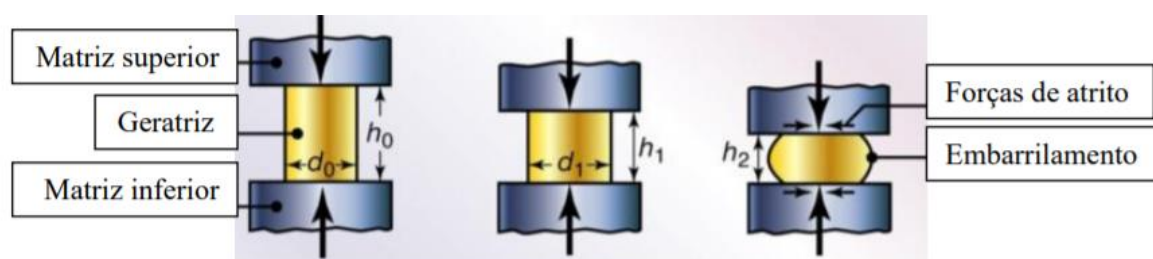


Figura 7: Embarrilamento do material conformado [13]

Entre o ferramental e a peça existe o atrito que tem uma forte relevância, pois o mesmo é responsável pelo escoamento do material pela matriz e pode gerar possíveis defeitos de preenchimento. Para reduzir o atrito entre a ferramenta e a peça, pode-se utilizar algum tipo de lubrificação, no qual conforme ALTAN [14], podem ser qualificados e definidos em três tipos:

- Condição a Seco: ausência de lubrificação entre as superfícies;
- Condição Hidrodinâmica: apresenta camada de lubrificante entre as superfícies;
- Condição de Contorno: lubrificação intermediária entre as condições anteriores.

A forma que é considerada a mais eficaz para reduzir o atrito é utilizando lubrificantes específicos, no qual o principal objetivo é diminuir e até mesmo eliminar a aderência do forjado na matriz, funcionando também como um isolante térmico reduzindo perdas de calor entre os componentes do processo [15].

Realizando-se sucessivas deformações na altura para um dado material de trabalho e condições específicas de lubrificação, é possível obter curvas de calibração para o atrito. Cada geometria de anel tem suas curvas de calibração específicas. A geometria mais usual é a que respeita a proporção 6:3:2, onde o primeiro número denota o diâmetro externo; o segundo número o diâmetro interno, enquanto que o último denota a altura do anel [15].

As dimensões do anel não são tão relevantes nos ensaios a temperatura ambiente. Entretanto, quando se faz necessário um maior controle de temperatura, recomenda-se utilizar anéis maiores para evitar as perdas térmicas. A grande vantagem do teste do anel é não necessitar medições de força e, envolver grande escala de deformação do material de trabalho, conforme o caso prático no qual se faz o estudo. Este teste pode também ser usado para classificar diferentes tipos de lubrificantes para processos de forjamento [15].

2.5 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A simulação computacional consiste em uma ferramenta utilizada para representar situações reais em ambiente virtual, de forma a simular os possíveis resultados e permitir a compreensão do comportamento das variáveis, auxiliando no processo de avaliação de estratégias operacionais [19]. As principais vantagens na utilização da simulação computacional nos processos de conformação como forjamento é que se obtém informações detalhadas sobre tensões, esforços, temperatura, deformações, assim como o preenchimento da cavidade [20]. De acordo com Medeiros [21], a simulação computacional tem grande relevância para a pesquisa e geração de conhecimento, pois lida com sistemas complexos e com grande interação entre suas partes, permitindo um alto grau de interação entre o pesquisador e seu objeto de pesquisa.

Pode-se dizer que os programas de simulação computacional se tornaram uma ferramenta essencial no que diz respeito a desenvolvimentos e tecnologias de processo. Atualmente existem diversos programas com essa finalidade e alguns disponibilizam algumas soluções diferentes.

No Brasil, as grandes forjarias utilizam pacotes de elementos finitos. Entretanto, ainda há grande dificuldade para difusão desta tecnologia, principalmente devido ao seu custo elevado e a carência de profissionais para área de conformação mecânica.

A indústria voltada para conformação mecânica teve a oportunidade nos últimos anos de poder utilizar softwares de simulação mais aprimorados e em meados de 1990, a maioria dos programas possibilitava a simulação do processo de forjamento para peças de simetria axial e outras onde o fluxo de material pudesse ser aproximado como ocorrendo em apenas duas dimensões [22].

Hoje pode-se dizer que essa ferramenta (simulação) tornou-se essencial no desenvolvimento de novas tecnologias no que diz respeito a conformação. Já são diversos programas comercializados no mercado, todos trazendo pontos em comum e ao mesmo tempo diferentes soluções. Os métodos de solução mais empregados são elementos finitos e volumes finitos [30].

Independente do software que se utilize, alguns pré-requisitos são fundamentais para a obtenção de bons resultados na simulação [34]. Destaca também que entre estes pré-requisitos tem-se a introdução no programa de valores confiáveis para as propriedades físicas e mecânicas e das condições de contorno. Para que seja feita a simulação a peça é discretizada via software, onde a mesma fica com uma superfície semelhante a uma malha, constituída de triângulos ou quadriláteros que tem em seus vértices os chamados nós, que acabam unindo essas pequenas partes formando uma malha. No caso tridimensional são usados tetraedros ou hexaedros. É por meio dela (malha), que se monta um sistema de equações, cuja solução permite determinar as grandezas de interesse no fenômeno utilizado [13].

Conforme ocorre a simulação a peça vai mudando de forma e causando grande deformação da malha, esse processo dependendo da máquina (computador / processador) pode levar até mesmo dias para se obter um resultado satisfatório [20].

O *software* Simufact.forming® utiliza o MSC.Marc® como solucionador para o Método de Elementos Finitos. Este solucionador usa o método de integração implícita para realizar uma solução transitória no tempo. Neste tipo de integração, a cada passo de tempo o solucionador resolve o sistema de equações lineares do modelo numérico, fazendo iterações até atingir um critério de convergência. Assim, é um método que garante a solução correta, porém necessita de mais recursos de hardware [20].

Embora a precisão dos resultados de uma simulação dependa da qualidade do software utilizado, ela também é fortemente influenciada pelos dados de entrada. Uma grande quantidade de valores para parâmetros mecânicos e térmicos, os quais são utilizados para caracterização de

um processo, são utilizados em análises de elementos finitos. Desse modo, é óbvio que os resultados das simulações podem ser significativamente afetados por variações em alguns valores desses parâmetros, assim como, o efeito de certas variações similares possa ter efeitos de pequena consequência [31].

2.5.1 Parâmetros de entrada

Estudos envolvendo a determinação de parâmetros termo-mecânicos, bem como o efeito de suas variações, ainda são relativamente escassos quando comparados com estudos prático/teóricos de processos de forjamento [32], [33], [34]. Parâmetros como velocidade de deformação e temperatura de matrizes são bem conhecidos e controlados na indústria. Entretanto poucas investigações têm sido realizadas sobre o efeito das variações nos demais parâmetros de entrada com relação aos resultados das simulações de processos de forjamento.

Em um dos estudos publicados sobre determinação de parâmetros de entrada, Kopp e Phillip [31] [35] salientam a importância de sua correta determinação em processos de forjamento a quente para a análise computacional, apresentando novos métodos e modelos para determinação de parâmetros térmicos e sobre o coeficiente de atrito. Wilson et al. [36] apresentam um modelo térmico acoplado a um modelo de atrito obtendo resultados promissores, tanto qualitativamente quanto quantitativamente para diversas combinações de materiais da interface peça- ferramenta e lubrificantes.

Doege et al. [37] desenvolvem um novo modelo de transferência de calor e atrito para melhorar a exatidão dos resultados de simulações de processos de forjamento a quente de precisão para aço baixa liga, obtendo resultados promissores. Polozine e Schaeffer [38] apresentam novos métodos para a determinação do valor médio da emissividade total e o coeficiente médio de transferência de calor por convecção para a liga de alumínio 6061 e aço SAE 1045.

2.5.2 Efeitos das variações dos parâmetros de entrada

Os parâmetros que possuem grande efeito devem ser especificados com melhor exatidão do que os de menor influência. Assim, o trabalho é facilitado, racionalizando a aplicação de recursos para determinação de parâmetros [39], [40], examinam o efeito da variação do coeficiente de atrito na simulação do forjamento a quente de uma pá de turbina, onde aumentando o valor do coeficiente de atrito de 0,1 para 0,2 resulta um acréscimo entre 35

e 45% na carga de forjamento. Em outros estudos, analisam, respectivamente, a influência da elasticidade das matrizes [41] e da rigidez da prensa [42] como função da distribuição de deformação plástica equivalente, a componente vertical de tensão e a temperatura do forjado no final do processo de forjamento isotérmico de uma pá de turbina.

2.6 CURVA DE ESCOAMENTO VERDADEIRA DO AÇO SAE 1045

No forjamento, a curva de escoamento é essencial para quantificar a força e o trabalho envolvidos no processo. Além de serem dados essenciais para o projeto de matrizes e máquinas de conformação. A tensão de escoamento “ k_f ” pode ser representada por diferentes equações determinadas experimentalmente. As curvas de escoamento podem ser obtidas pela conformação à frio quando o corpo de prova se encontra com temperatura ambiente, ou pelo processo de conformação a quente, quando a temperatura está acima da temperatura de recristalização do material [11].

Para a conformação à quente são necessários um maior número de variáveis e características para a determinação da curva de escoamento k_f . Leva-se em conta a influência da temperatura (ϑ), a velocidade de deformação ($\dot{\varphi}$), a deformação verdadeira (φ). Em tudo o que já se estudou sobre forjados de forma científica direcionado ao comportamento do mesmo em processo, a curva de escoamento pode ser obtida por meio de ensaios de tração, torção ou compressão. E sua obtenção justifica-se pela simplicidade de fabricação dos corpos de prova cilíndricos e pela facilidade de execução em máquinas de ensaio convencionais [18].

A Figura 8 apresenta as curvas de escoamento do aço SAE 1045 para diferentes temperaturas disponíveis na biblioteca do *software* Simufact Forming 15.0. O *software* possui em sua biblioteca informações referentes ao comportamento mecânico do material em diferentes temperaturas (700 – 1250 °C) e velocidades de deformação (0,01 – 500 s^{-1}).

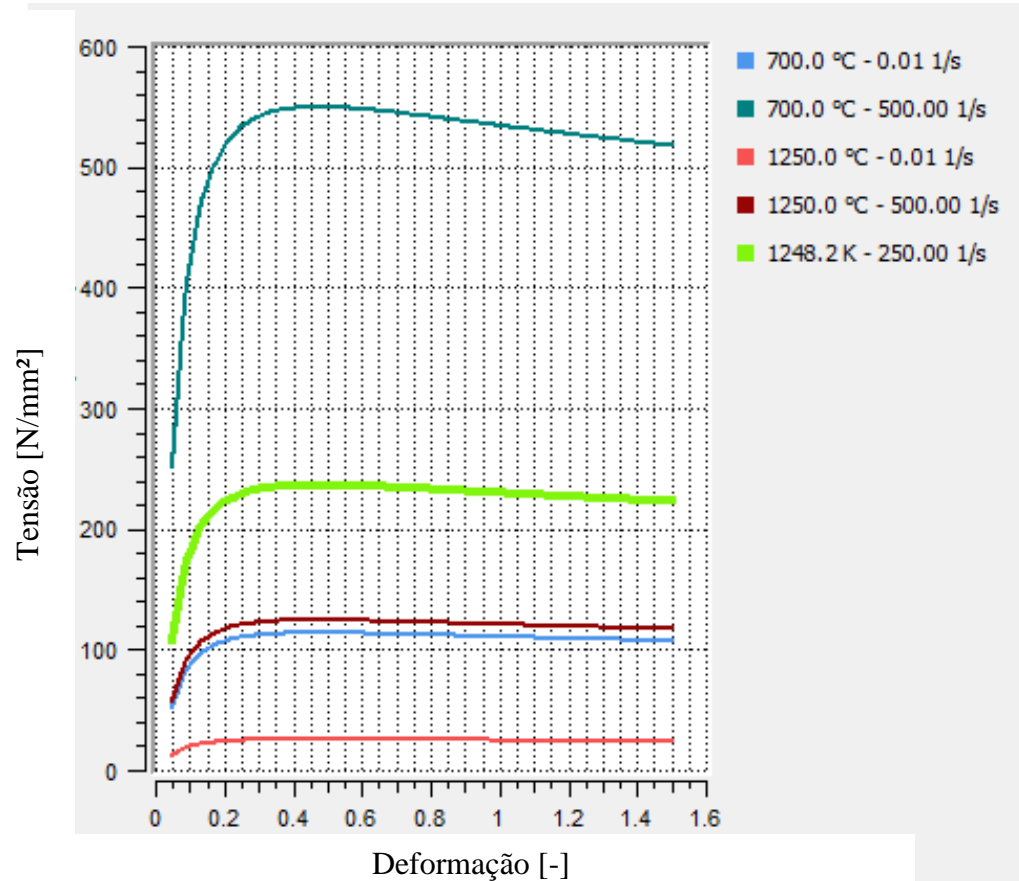


Figura 8: Curvas de escoamento do aço SAE 1045 para diferentes temperaturas disponíveis no software Simufact Forming 15.0.

As curvas apresentadas na Figura 8, podem ser expressas matematicamente de acordo com o modelo de Hensel-Spittel conforme equação 6:

Eq. 6

$$k_f = A \cdot e^{m_1 \cdot T} \cdot T^{m_8} \cdot \varphi^{m_2} \cdot e^{\left(\frac{m_4}{\varphi} + m_6 \cdot \varphi\right)} \cdot (1 + \varphi)^{(m_5 \cdot T)} \cdot \dot{\varphi}^{(m_3 + m_7 \cdot T)}$$

2.7 AÇOS CARBONO

. O aço geralmente contém entre 0,005% e 2,0% em peso de carbono. Os ferros fundidos contêm, normalmente, entre 2,0% e 4,5% em peso de carbono. Além da liga aço carbono, também são acrescentados outros metais para dar características desejadas ao material, como Níquel, Manganês, Cromo, Fósforo, Silício, Molibdênio, entre outros. A quantidade de adição total desses elementos de liga é o que os diferencia, chamados de aços de baixa liga

quando possuem 5% ou menos desses elementos, e aços de alta liga, quando este valor é ultrapassado [18].

2.7.1 Aço SAE 1045

O aço SAE 1045 é um aço de médio carbono, com 0,43% a 0,50% de carbono em sua composição, baixa temperabilidade e de médio limite de resistência à tração, entre 570 MPa e 700 MPa. Este aço geralmente é fornecido na condição de laminado a quente ou trefilado, ocasionalmente na condição normalizada. O material tem boa usinabilidade e tem uma capacidade reduzida de ser temperado por meio de secções até cerca de 60 mm. Não é um aço satisfatório para nitretação devido à falta de elementos de liga adequados. Quando aplicado no processo de forjamento o mesmo deve ser realizado na temperatura mínima de 870 °C e máxima de 1240 °C. Trata-se de um aço que é usado extensivamente por todos os setores da indústria para aplicações que exigem maior resistência mecânica e resistência ao desgaste do que os aços de baixo carbono. As aplicações típicas são: eixos, parafusos, bielas, pinos diversos, rolos, etc.

A Tabela 3 apresenta a composição química do aço SAE1045 já com teor de carbono e demais constituintes conforme descritos [11].

Tabela 3: Composição química aço SAE1045 [11].

SAE	C	P	Si	s
1045	0,43 - 0,50	0,04Max	0,6Max	0,05

Salienta-se que o percentual de Enxofre (S) e fósforo (P) deve ser o mínimo possível e o máximo aceitável, evitando a formação de compostos na microestrutura para não fragilizar do aço. A Figura 9 apresenta metalografia do aço SAE 1045 onde se observam algumas microestruturas como ferrita e perlita condizente com a composição.

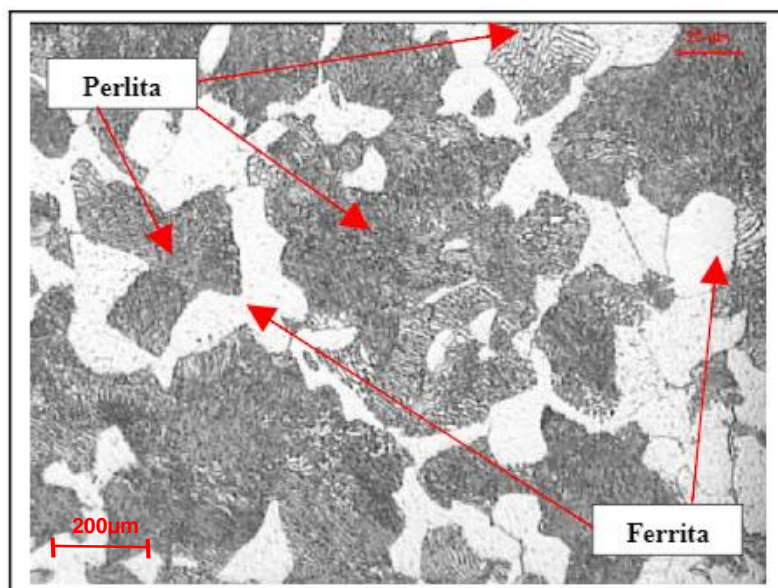


Figura 9: Microestrutura de um aço SAE1045 com ataque de nital 2% 500x[25].

A Figura 9 aponta a diferenciação das microestruturas constituintes no aço SAE 1045.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse capítulo foi abordado toda a metodologia aplicada no presente estudo, assim como os materiais e equipamentos aplicados. A Figura 10 apresenta o fluxograma de forma sequencial em que o estudo foi desenvolvido.

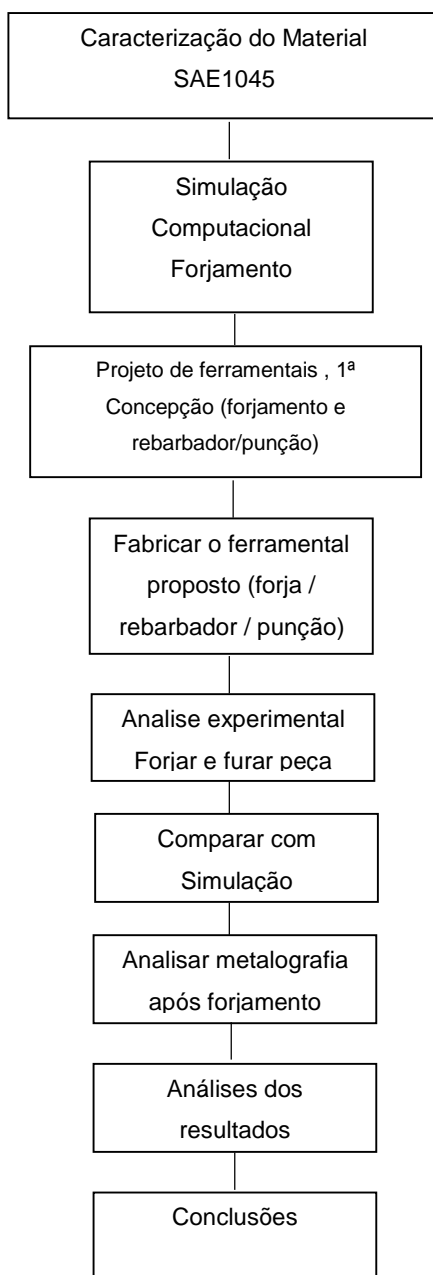


Figura 10: Fluxograma das etapas realizadas

A metodologia experimental aplicada neste trabalho foi com intuito de desenvolver uma peça forjada em aço SAE1045 com pré-furo, e posteriormente efetuar a furação a quente, por puncionamento, aproveitando a alta temperatura de forjamento. Com isso comparou-se o desempenho deste processo de furação a quente com o processo de usinagem.

A solução encontrada foi desenvolver uma ferramenta de forja na qual a mesma unificasse todos os processos (forja, rebarbação e furação) todos utilizando a mesma prensa de fricção.

O estudo em questão divide-se em quatro principais etapas, sendo elas:

- Caracterização do material (Microestrutura, dureza, espectrometria e ensaio do anel)
- Simulação computacional via software (Simufact)
- Desenvolvimento do ferramental (Matriz de forja, Rebarbador, Punção)
- Fabricação do ferramental
- Experimento prático

O item em estudo possui um volume de produção anual de aproximadamente 45 mil peças/ano, no qual utiliza 220 horas ano para fazer a furação em centro de usinagem.

A peça forjada é fabricada em aço SAE 1045, e as matrizes utilizadas para seu forjamento são confeccionadas aço ferramenta SAE H13, sendo os rebarbadores de aço DIN D6.

Após a definição do perfil da peça final desenvolveu-se o projeto das matrizes de forjamento, assim como rebarbador, punção de furação e toda a estrutura da mesma. Foi utilizado o *software* SolidWorks para se fazer o projeto e o detalhamento do mesmo. Depois de finalizado o projeto, as matrizes foram submetidas a simulação por elementos finitos, utilizando o *software* Simufact.Forming®, no qual posteriormente foi analisado seus resultados.

3.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL (BARRA)

A caracterização do material é fundamental para conhecer a matéria prima antes do processo de forjamento e identificação de possíveis problemas oriundo da siderurgia.

3.1.1 Caracterização por espectrometria atômica

Se faz necessário para um bom desenvolvimento do estudo que seja feita a caracterização do material SAE 1045 que foi forjado, para que se conheça a microestrutura, composição química. Utilizou-se um espectrômetro de emissão ótica (fabricante Oxford Instruments, modelo Foundry Master Pro) conforme Figura 11, e pode-se obter a composição química da barra trefilada.



Figura 11: Espectrômetro modelo Foundry Master Pro

O ensaio foi realizado utilizando o Método de Ensaio E415 para Análise de Carbono e Aços Baixa Liga por Espectrometria de Emissão Atômica por Faísca.

3.1.2 Caracterização por metalografia

Foi feita a análise metalográfica da barra trefilada para observar a microestrutura e tamanho de grão antes do forjamento e também análise da microestrutura posterior ao forjamento, utilizando Microscópio Metalográfico Olympus em conformidade com ASTM E1951:2014, com condições ambientais de temperatura 23 °C ($\pm 5^\circ\text{C}$) / Umidade relativa $\leq 70\%$.

Para realizar a metalografia foi necessário preparar uma amostra com lixamento gradual conforme granulometria da lixa 200 / 400 / 600/ 1000 e 1200 Mesh, até que fosse obtido uma superfície homogênea, com riscos do lixamento em um mesmo sentido e posteriormente polimento com alumina 3 μm , utilizando o equipamento politriz, com auxílio de pano de polimento.

3.2 ENSAIO DO ANEL PARA A DETERMINAÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO

A quantificação do atrito entre as superfícies das ferramentas e do material de trabalho durante o forjamento foi realizada por meio do ensaio do anel. Os ensaios (não-isotérmicos) foram realizados em duas temperaturas: 850 e 1000 °C.

A geometria definida para os anéis segue a proporção de 6:3:2, proporção que é padronizada e utilizada no ensaio, sendo elas as medidas de diâmetro externo, diâmetro interno e altura dos anéis. A geometria definida para esse estudo está descrita na Figura 12.

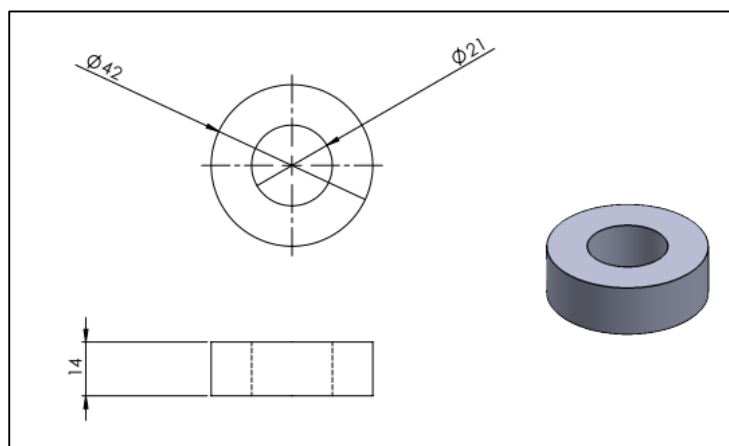


Figura 12: Geometria aplicada no ensaio do anel. (Dimensões em milímetros)

Aplicou-se essas dimensões por serem medidas próximas da geratriz em estudo. Para obtenção dos corpos de prova foi utilizado um torno mecânico convencional e usinadas 20 amostras. Nenhuma preparação ou acabamento específico foi aplicado as superfícies com intuito de reduzir a rugosidade, preferiu-se manter as condições mais próximas ao processo de forjamento. Nos ensaios, as amostras foram aquecidas a 850 e 1000 °C por aproximadamente 30 minutos para completa homogeneização da temperatura e posteriormente foram submetidos a diferentes reduções em altura. As condições de ensaio buscaram reproduzir as mesmas condições empregadas no processo real da empresa onde foi desenvolvido o trabalho, portanto se considerou como dados de entrada os dados utilizados normalmente no processo da forjaria onde ocorreu o experimento, para que refletisse o estado real, sendo então temperatura da ferramenta em 100 °C. O ferramental utilizado no ensaio do anel foi SAE H13, com rugosidade de $R_a=0,17 \mu\text{m}$, sendo então classe de rugosidade N4.

Os corpos de prova foram medidos antes e depois do ensaio (diâmetro interno, externo e espessura).

3.3 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NO FORJAMENTO

Um dos elementos mais importante no processo de forjamento é o equipamento utilizado na fabricação do componente.

3.3.1 Prensa

Para o forjamento da peça em estudo utilizou-se uma prensa de fricção da marca GUTMANN, a qual possui capacidade de força de 40ton (40000Kgf) e diâmetro de volante de 700mm (Figura 13).

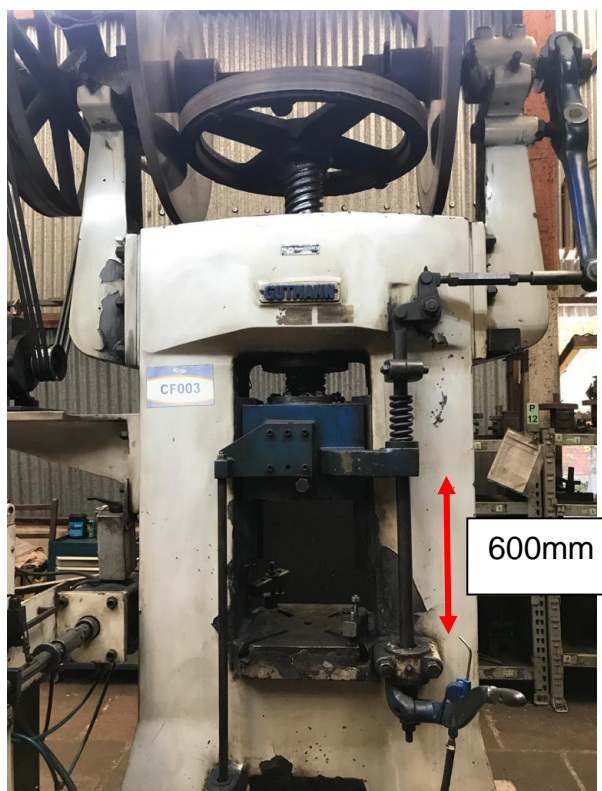


Figura 13: Prensa de fricção 80Ton marca Gutmann (altura 3,2metros)..

A Figura 13 mostra a prensa de fricção com as matrizes de forjamento fixadas sobre os platôs da máquina. Aqueceu-se as peças a uma temperatura de 1000 °C, em uma eletro-recalcadora (Figura 14) que fica posicionada ao lado da prensa com intuito de diminuir o tempo de movimentação e perda térmica. O recalque não necessita dimensional específico, apenas aproximação e foi utilizado o processo de recalque padrão determinado no processo da empresa.

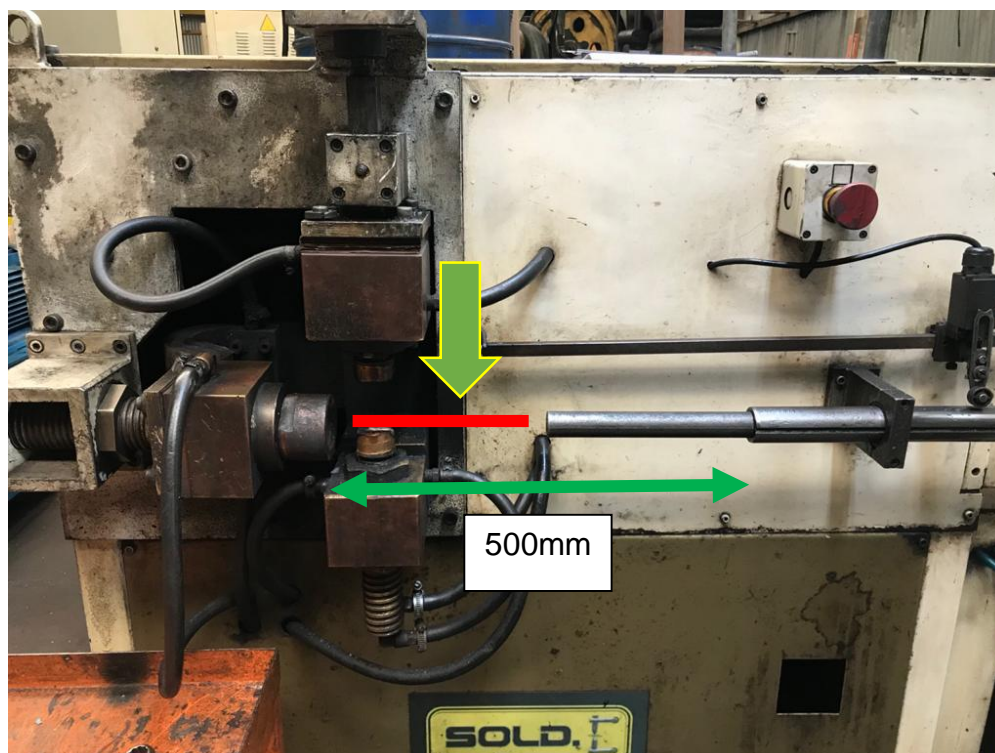


Figura 14: Eletro-recalcadora, SOLD, 75KVA de potência

A Figura 14 exibe a eletro-recalcadora da marca SOLD, onde a peça (ilustração em vermelho) são colocadas como mostra a seta indicativa.

3.4 GEOMETRIA DA PEÇA EM ESTUDO

Parafusos tipo olhal (Figura 15) possuem rosca em uma das extremidade e furo na outra, geralmente por processos de usinagem (furo) e laminação/usinagem (rosca), podendo os mesmos serem normatizados conforme DIN444 ou não padronizado conforme projeto do cliente. A geometria final em estudo é de propriedade do cliente, porém a geometria forjada para se fazer a furação foi o ponto chave para o desenvolvimento desse estudo. A peça final possui um furo de diâmetro de 21mm +/- 0,5 mm. Quando este furo é realizado pelo processo de usinagem, mesmo que com as tecnologias existentes, o processo demanda tempo, homem/máquina e ferramenta de usinagem de custo elevado, mesmo que seja um processo simples, porém possui um grande volume de produção.



Figura 15: Modelos de parafuso tipo olhal aplicado em máquinas agrícolas.

A Figura 15 exhibe dois parafusos tipo olhal em diferentes tamanhos. O processo atual do item consiste em processo de corte, forjamento e rebarbação, ficando conforme a figura 16a. Após resfriamento, a peça vai para o centro de usinagem para executar o processo de furação (Figura 16b).

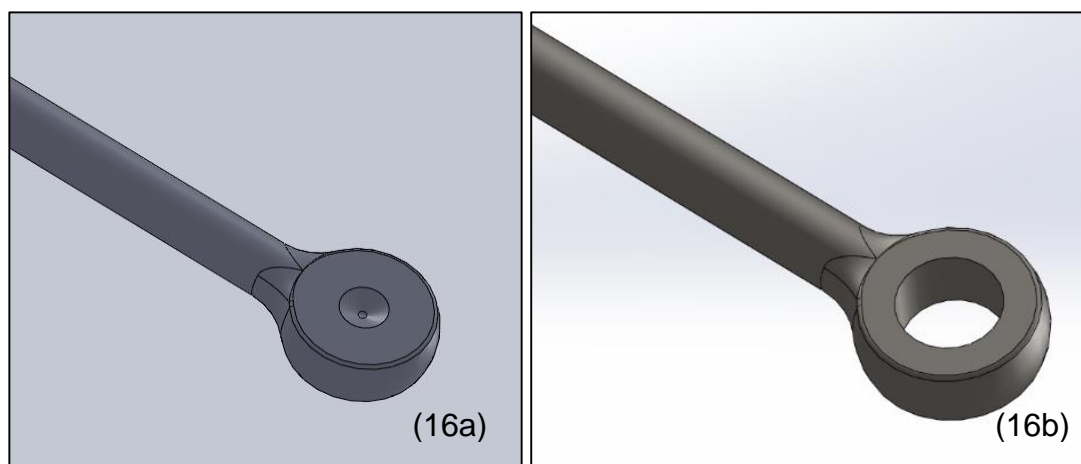


Figura 16 Modelo esquemático da peça forjada e posteriormente furada em centro de usinagem.

A Figura 16a representa a peça forjada utilizada anteriormente, onde a mesma era maciça na região do furo, apenas com um pequeno alívio auxiliar da broca. E a Figura 16b demonstra a peça furada.

3.5 DEFINIÇÃO DA GERATRIZ PARA FORJAMENTO

Definiu-se a geometria da peça conforme Figura 17, que possui o alívio para posterior furação com a peça ainda quente, (*Piercing*, Perfuração em inglês). Tal modelamento 3D feito via *software* SolidWorks, no qual foi também utilizado para gerar a modelagem das matrizes. A Figura 17a ilustra a peça com o geometria final desenhado em 3D. A Figura 17b apresenta a geometria final da peça em 2D com as dimensões utilizadas.

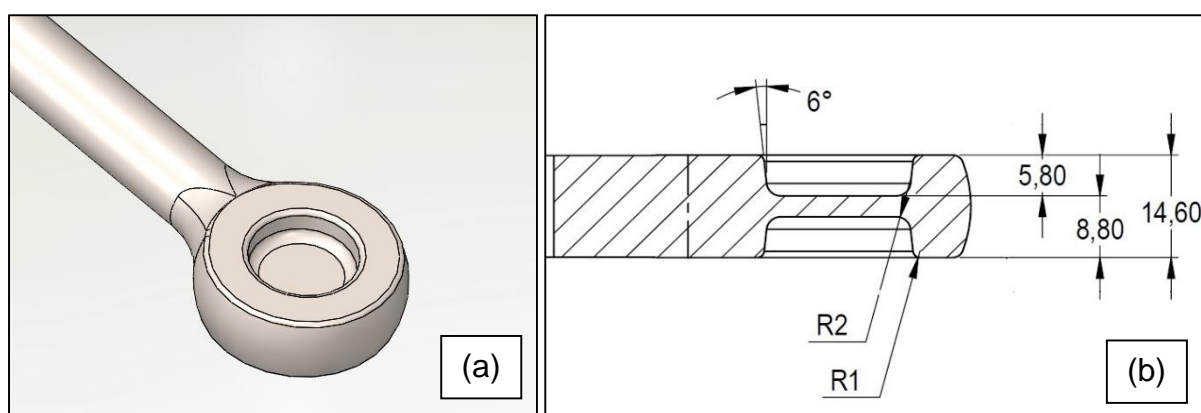


Figura 17: Geratriz sugerida com pré-furo (a) e geratriz em 2D com dimensional em mm

As principais dimensões da peça forjada proposta estão na Figura 17, os ângulos de saída foram definidos em 6° , conforme literatura [6]. Portanto foi definido conforme sugerido para que não ocorresse nenhuma dificuldade para retirar a peça da cavidade, devido adesão da mesma na ferramenta

A definição desse perfil foi feita com intuito de executar uma diminuição de espessura na região do furo do projeto da peça (*Piercing*, Perfuração em inglês) para ser puncionado a quente (*Punching*, Puncionamento em inglês), porém ao mesmo tempo calibrando o dimensional das paredes laterais. A Figura 18, em corte, ilustra a peça com rebarba e com o rebaixo proposto para posterior furação.

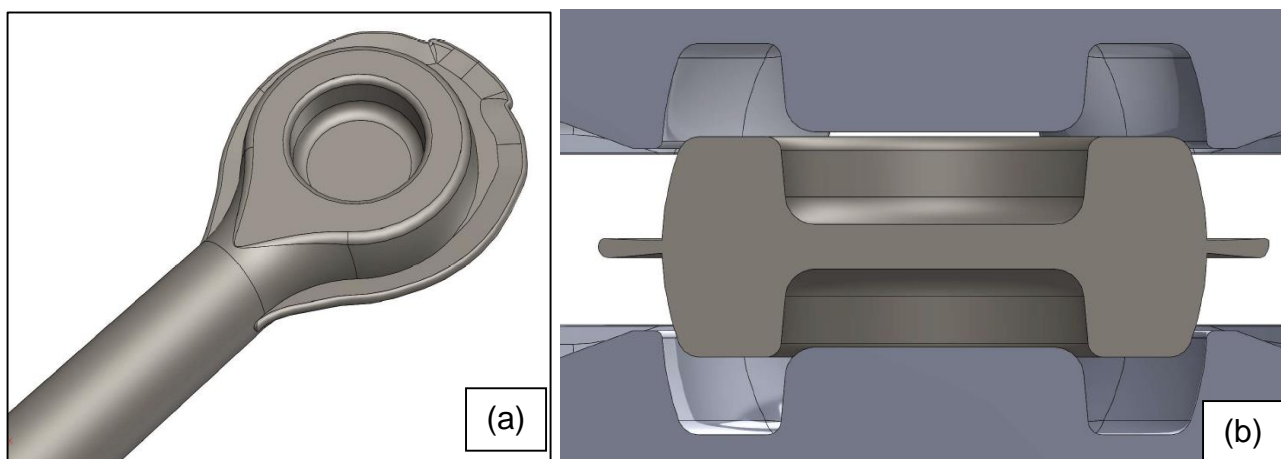


Figura 18: Geratriz forjada proposta (a), esquema ilustrando geratriz entre as matrizes (b).

Nota-se na Figura 18a o desenho 3D da peça forjada com a rebarba. E a Figura 18b ilustra a peça e as matrizes superior e a inferior.

4 APLICAÇÃO DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A simulação numérica foi utilizada para avaliar e analisar preenchimento da cavidade, assim como as tensões, esforços, temperatura e deformações. O Método dos Elementos Finitos foi escolhido para a análise numérica do processo e, devido à geometria da peça, foram realizadas simulações numéricas 3D. O *software* utilizado nas simulações foi o Simufact Forming 15.0.

A simulação do processo de forjamento nesse estudo foi utilizada para avaliar o preenchimento do molde e a fabricação de peças dentro das especificações. Além disso, também são analisados parâmetros envolvidos no processo, tais como: geometria do billet, geometria da matriz e dos canais de rebarba, força de forjamento, temperatura da peça e da matriz, atrito, entre outros. Por meio dos resultados apresentados pela simulação pôde-se verificar se a peça forjada foi obtida livre de defeitos. Além disso, nesta etapa são definidos o tipo de processo (o forjamento foi a quente ou o frio), e a quantidade de matrizes utilizadas na simulação.

A simulação numérica do processo foi feita para a etapa de forjamento a quente, partindo da pré-forma da Figura 19 já desenvolvida anteriormente pela empresa.

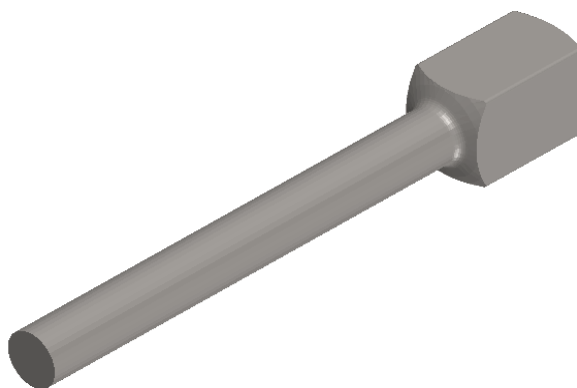


Figura 19 Pré-forma utilizada para o forjamento

A pré-forma da Figura 19 já existia no processo da empresa, portanto foi simulado apenas o forjamento da peça nova e da peça que era forjada anteriormente. A Tabela 4 apresenta os parâmetros utilizados na simulação numérica para o forjamento. Os dados de temperatura e tempo são valores aproximados dos desenvolvidos no processo prático. O valor de coeficiente de transferência de calor por convecção ao ar foi definido experimentalmente para o aço SAE 1045, assim como o coeficiente de transferência de calor por condução (geratriz e ferramenta).

Tabela 4 Parâmetros térmicos e mecânicos utilizados na simulação numérica da etapa de forjamento (Etapa 2).

Parâmetros utilizados na simulação numérica		
Tipo de malha		Triangular
Tamanho de malha (na região de interesse)		0,8 mm
Temperatura inicial das ferramentas		100 °C
Material das ferramentas		SAE H13
Material da pré-forma		SAE 1045
Temperatura inicial da pré-forma		1000 °C
Coeficiente de Transferência de calor por convecção ao ar		30 W/m ² .K [1]
Coeficiente de Transferência de calor por condução (pré-forma/ferramentas)		15 kW/m ² .K [2]
Coeficiente de atrito		0,5
Informações da prensa	Tipo	Mecânica
	Deslocamento máximo	500 mm
	Revolução	261 rpm

Os valores referentes a troca de calor durante o processo, foram extraídos da literatura. Já a curva de escoamento do aço SAE 1045 foi extraída da biblioteca do *software* simufact, enquanto o coeficiente de atrito foi apresentado na Tabela 4, no qual definido experimentalmente por meio do ensaio do anel.

Para reduzir o tempo de cálculos na simulação do forjamento, foi utilizada uma malha grosseira na região da peça não submetida a deformação plástica. Na região crítica da peça, onde ocorre a deformação, foi criada uma janela de densidade de malha, conforme a Figura 20. Assim, na área de interesse, a malha triangular foi refinada apresentando um tamanho de 0,8 mm.

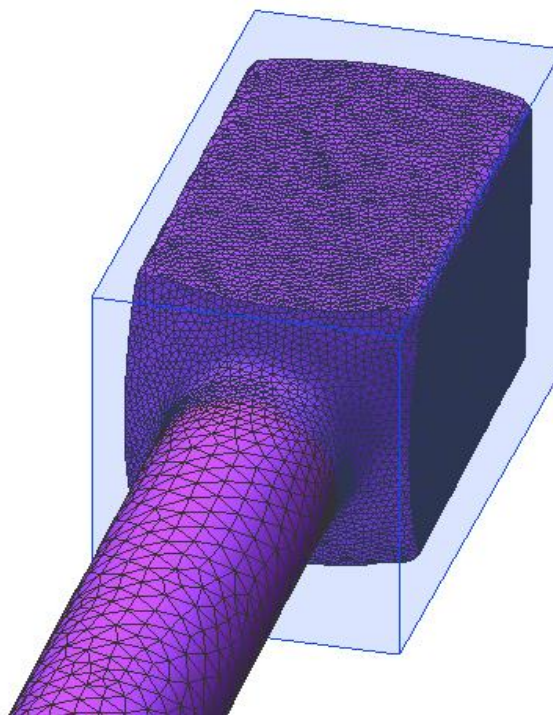


Figura 20 Nuvem de densidade de malha aplicada a pré-forma para refino da malha na região de interesse

Nota-se na Figura 20 o refinamento da malha na área contornada pelo cubo que demonstra a região de contorno, em que ocorreu o processo de forjamento.

4.1 ANÁLISE DA SIMULAÇÃO

A simulação foi feita para analisar os comportamentos da peça na ferramenta (matriz), assim como preenchimento da cavidade, análise de tensões e distribuição de deformação. Os dados de entrada para a simulação estão na Tabela 5.

Fez-se também a simulação no perfil que era forjado anteriormente, para poder analisar os comportamentos de ambas (Figura 21a) (Figura 21b).

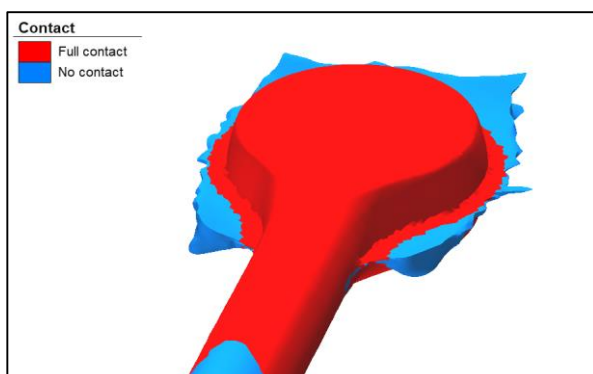


Figura 21a: Perfil forjado anteriormente

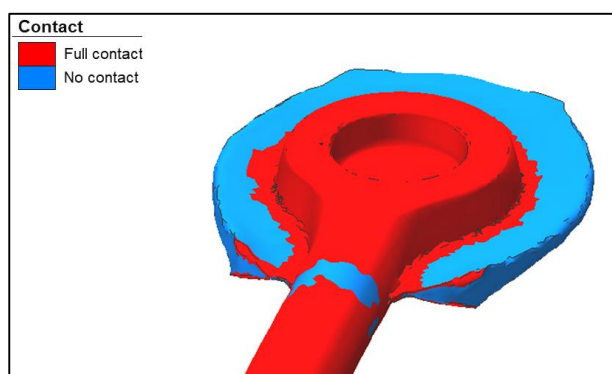


Figura 21b: Perfil forjado (proposto)

A primeira observação é de que tanto a ferramenta da peça anterior (Figura 21a), quanto a ferramenta nova (Figura 21b), ambas apresentaram fechamento e contato pleno na região conformada, o que era um fator importante esse preenchimento para a peça proposta no estudo.

Já a deformação equivalente (Figura 22), na ferramenta anterior tende a não ter uma deformação elevada devido a mesma ter um perfil maciço, diferentemente do perfil proposto que é mais delgado e tem mais áreas de contato em perfil com a matriz.

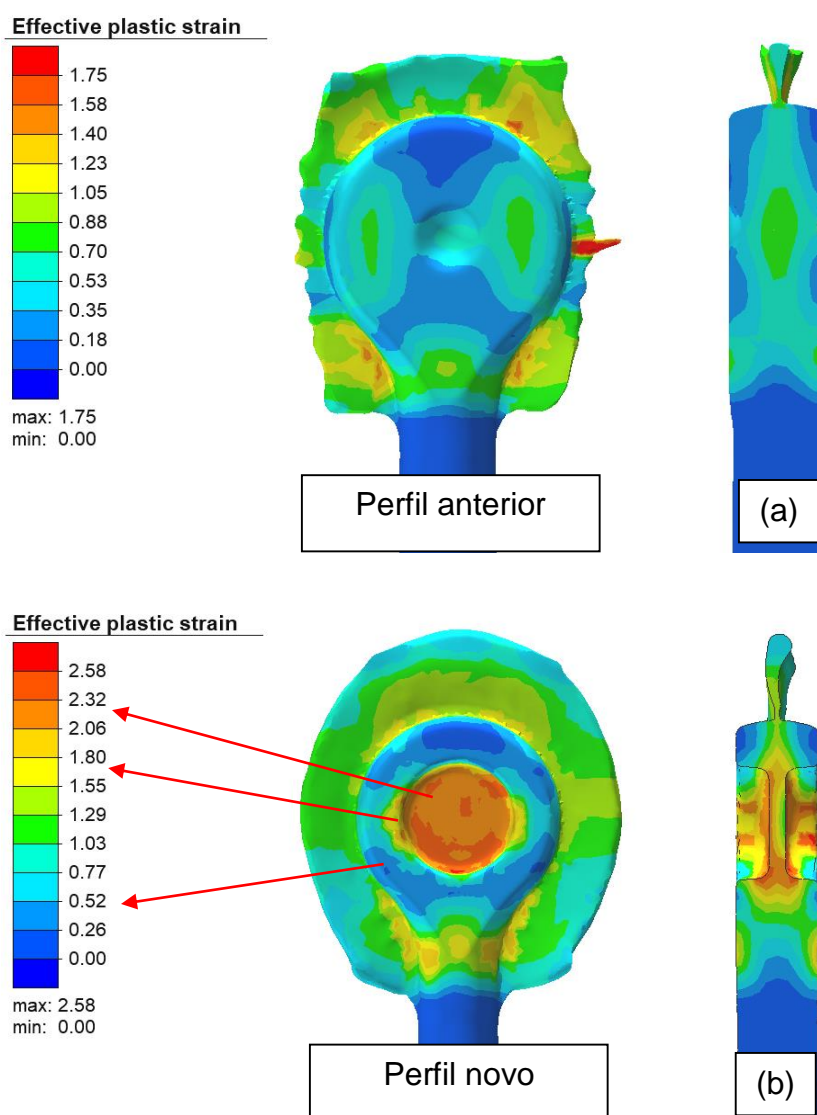


Figura 22: Distribuição da deformação equivalente ao longo das peças

Na Figura 22 a distribuição de deformação equivalente apresentou diferenças significativas comparando o perfil anterior com o novo, em virtude da geratriz anterior não ter o rebaixo para posterior furação a quente. As cores laranja e vermelha mostram que a região do rebaixo teve maior deformação equivalente.

Na Figura 23 pode-se notar que a distribuição de temperatura foi semelhante nas áreas similares entre as peças, porém, a peça proposta (Figura 23b) manteve temperatura elevada, na faixa de 981 °C ainda no centro, o que facilitou a furação por puncionamento.

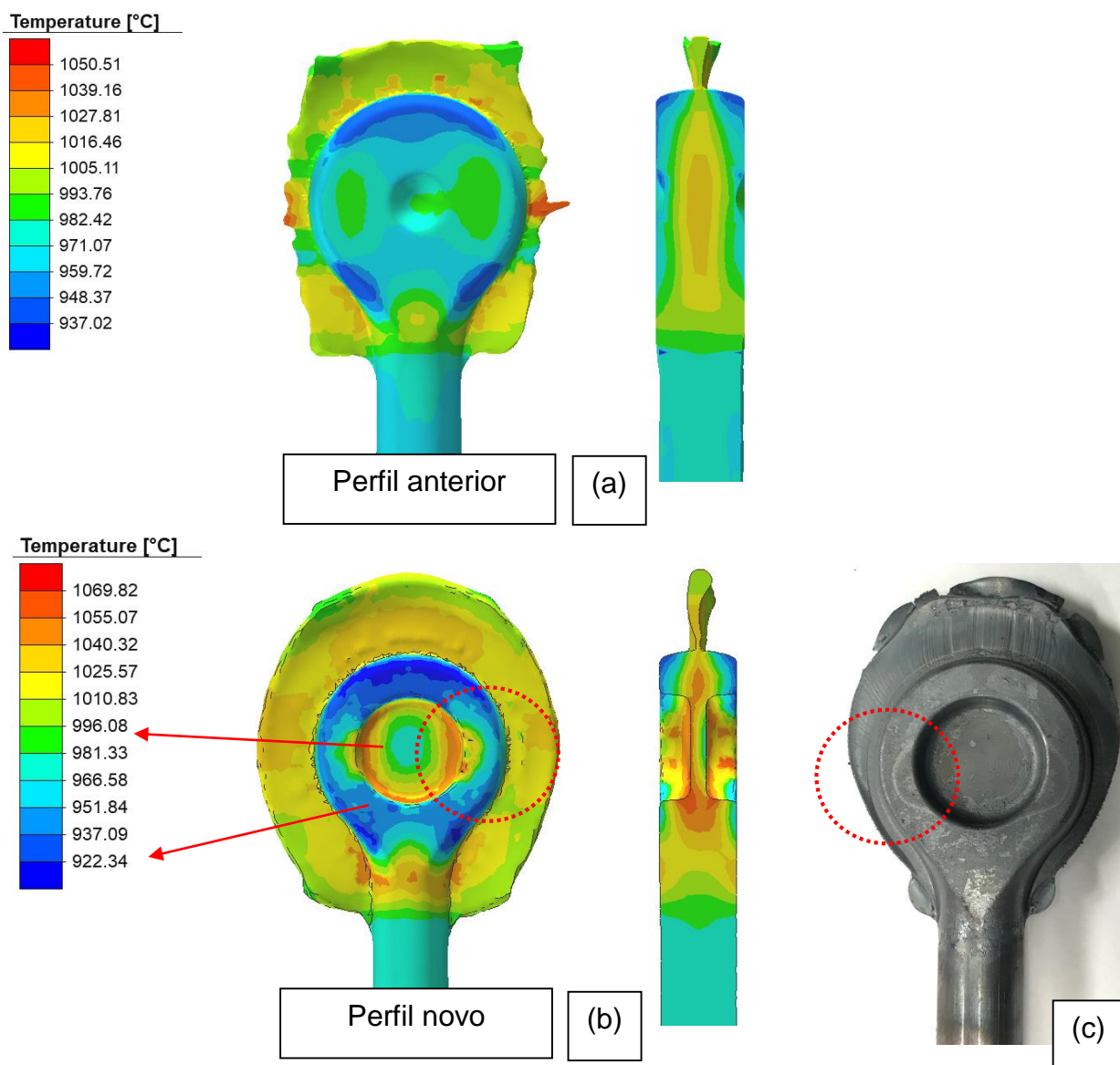


Figura 23: Distribuição da temperatura ao longo da peça

Pode-se notar que a peça física (Figura 23c) representou a peça simulada (Figura 23b), tendo em vista os pontos em que a mesma tem a mesma oscilação de temperatura. Comparando com a figura 23a (processo antigo), não ocorreram diferenças expressivas, apenas na região do alívio que na geratriz nova apresenta maior temperatura no núcleo.

No que diz respeito à distribuição das tensões equivalentes, na Figura 24 pode-se ver uma grande similaridade entre as peças, seja ao forjado anterior quanto o novo forjado. Esperava-se que o rebaixo pudesse concentrar tensões mais elevadas, mas não ocorreu, ambas mantiveram na faixa de 245 MPa máximo.

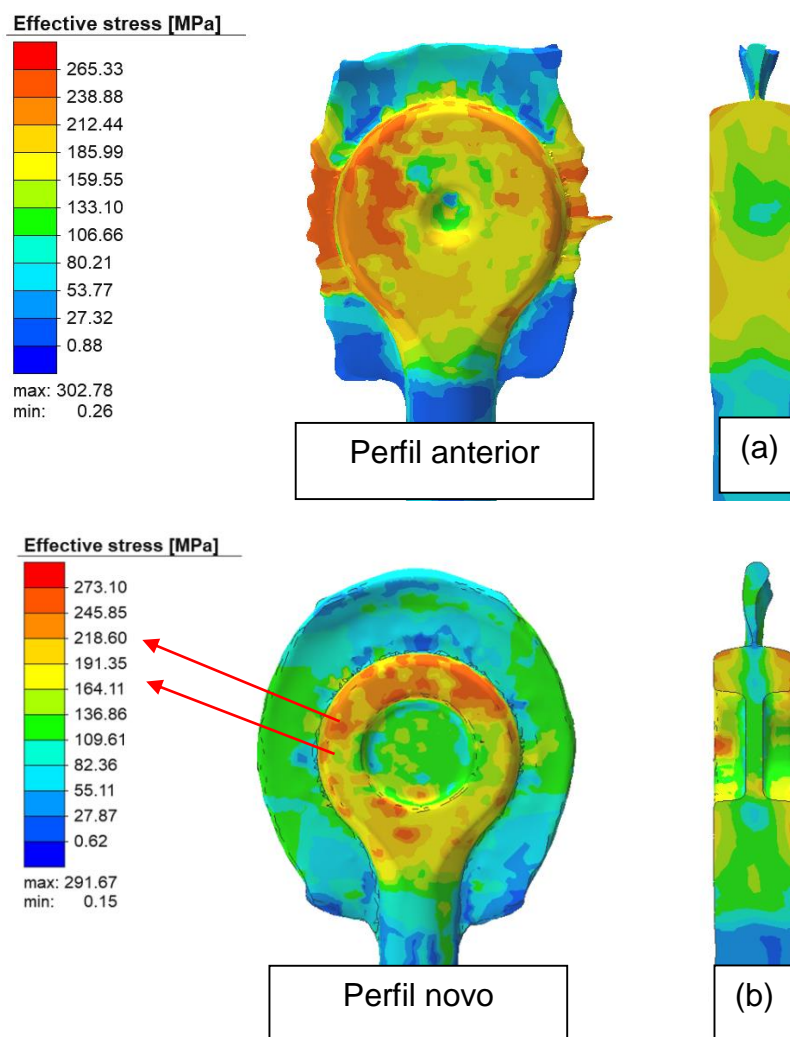


Figura 24: Distribuição da tensão equivalente ao longo da peça

A distribuição de tensão na figura 24 ficou equivalente ao perfil antigo, ambas concentram maior tensão na região do diâmetro maior.

5 ANÁLISE EXPERIMENTAL

Esse capítulo traz os experimentos realizados, baseados no que foi apresentado em materiais e métodos feitas no presente estudo, para posterior discussão dos resultados no capítulo seguinte.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL SAE 1045

Com auxílio de um espectrômetro foi realizada a análise química do material. A espectrometria do material apresentou valores claramente equivalentes as características do SAE 1045, conforme Tabela 5, que evidencia os valores encontrados e conferem com os valores do certificado (Anexo 2).

Tabela 5: Determinação da composição química por espectrometria atômica

Elemento Químico <i>Chemical Elemen</i>	Valor Médio <i>Mean Value (%)</i>	Desvio padrão <i>Standard deviation (%)</i>
Ferro (Fe)	98,5000	0,0001
Carbono (C)	0,4847	0,0065
Silício (Si)	0,2490	0,0093
Manganês (Mn)	0,6177	0,0251
Fósforo (P)	0,0122	0,0006
Enxofre (S)	0,0089	0,0012
Cromo (Cr)	0,0632	0,0025
Molibdênio (Mo)	0,0121	0,0068
Níquel (Ni)	0,0140	0,0026
Alumínio (Al)	0,0202	0,0007
Cobalto (Co)	0,0027	0,0016
Cobre (Cu)	0,0169	0,0019
Nióbio (Nb)	0,0010	0,0001
Titânio (Ti)	0,0025	0,0048

Seguido dessa análise, obteve-se também a metalografia do material (barra) antes do forjamento, onde a estrutura apresentada na barra foi uma estrutura perlítica com rede de ferrita no contorno dos grãos. O tamanho de grão apresentado foi de 10,1 ASTM.

Nota-se que o material do aço SAE 1045 está com a sua composição correta pelos elementos encontrados na Tabela 6 e comparados com a Literatura [11]. Seguido dessa análise, obteve-se também a metalografia do material (barra) antes do forjamento, onde a estrutura apresentada na barra foi uma estrutura perlítica com rede de ferrita no contorno dos grãos (Figura 25). O tamanho de grão apresentado foi de 10,1 ASTM.

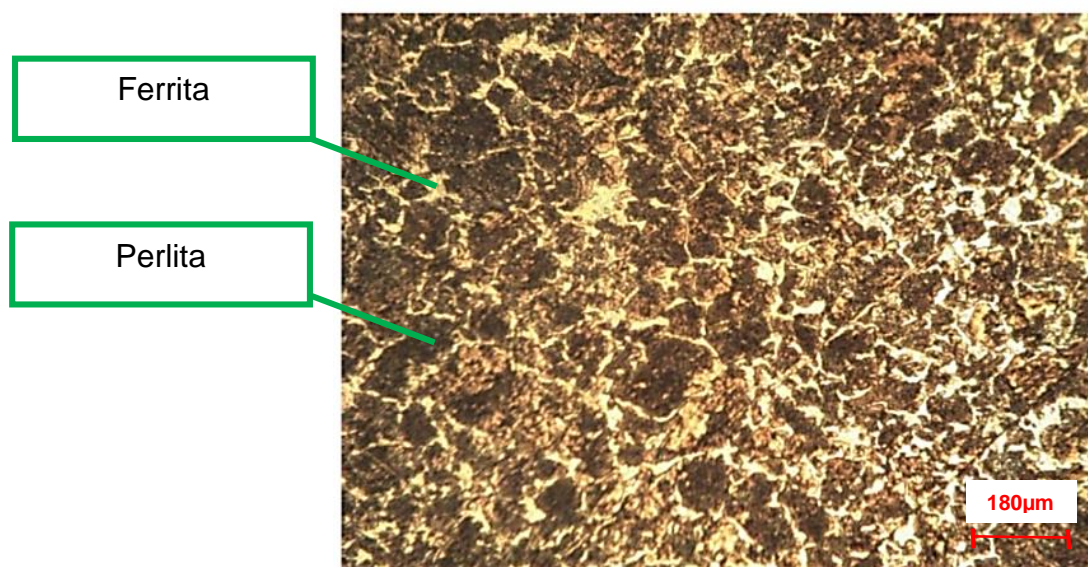


Figura 25: Microestrutura da barra trefilado com ataque de nital 2% e aumento de 400X

A Figura 25 apresenta a metalografia do aço SAE 1045 trefilado, que observa estruturas como ferrita (região mais clara) e perlita (região mais escura) conforme literatura [11].

5.2 OBTENÇÃO DAS CURVAS DE CALIBRAÇÃO VIA ENSAIO DO ANEL

O ensaio do anel foi executado em duas temperaturas, sendo elas 1000 °C e 850 °C, levando em consideração a perda térmica que a peça tem após o aquecimento e saída do forno, formação da pré-forma e forma final. A diferença de 150 °C é um valor aproximado de perda de temperatura durante o processo de forjamento. Nas duas temperaturas analisadas, o coeficiente de atrito foi definido como sendo igual a 0,5.

Os dados de entrada aplicados ao ensaio estão descritos na Tabela 6:

Tabela 6: Dados de entrada ensaio do anel.

Dimensões das amostras	Diâmetro Externo Ø	42 mm
	Diâmetro Interno Ø	21 mm
	Altura	14 mm
Velocidade da ferramenta	5 mm/s	
Lubrificação	Sem lubrificante	
Temperatura das placas de compressão	100 °C	

Os dados utilizados foram todos baseados nas dimensões e condições reais de ensaio.

Verificando as curvas obtidas destaca-se o fato das curvas de calibração de $\mu=0,4$ e $\mu=0,5$ serem praticamente idênticas. A Figura 26 apresenta a curva de calibração do aço SAE 1045 a 1000 °C.

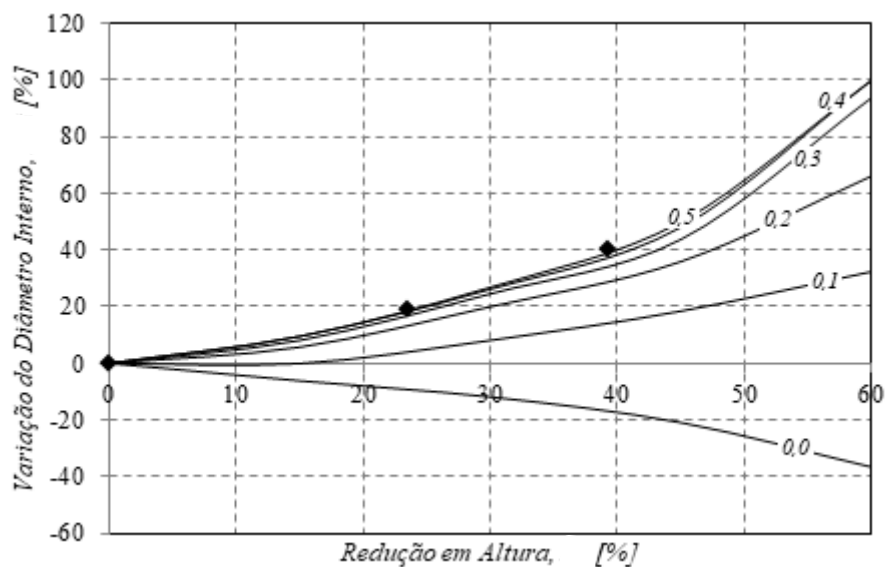


Figura 26: Curvas de calibração ensaio do anel para o aço SAE 1045 a 1000 °C

Observa-se na Figura 26, que a diferença entre as curvas do coeficiente de atrito de $\mu=0,4$ e $\mu=0,5$ são muito próximas, mas os pontos de intersecção dos resultados obtidos nos ensaios em 1000 °C ficaram sobre a curva de $\mu=0,5$. A Figura 27 apresenta a curva de calibração do aço SAE 1045 a 850 °C.

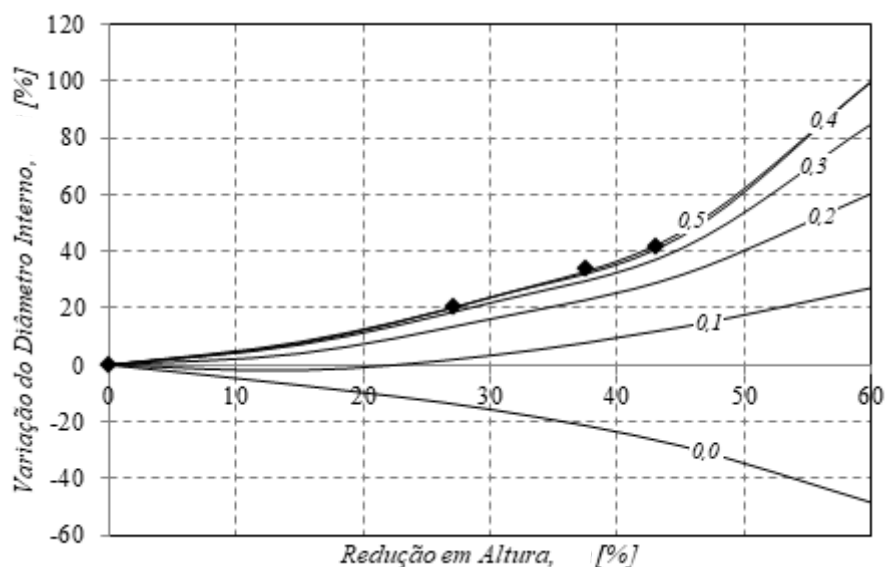


Figura 27: Curvas de calibração ensaio do anel para o aço SAE 1045 a 850 °C

Nota-se na Figura 27, que a diferença entre as curvas do coeficiente de atrito de $\mu=0,4$ e $\mu=0,5$ são muito próximas, mas os pontos de intersecção dos resultados obtidos nos ensaios em 850 °C ficaram sobre a curva de $\mu=0,5$.

5.3 DESENVOLVIMENTO DO FERRAMENTAL DE FORJAMENTO

O ferramental proposto traz em sua estrutura um sistema guiado por colunas para garantir um bom alinhamento no fechamento da matriz e com as matrizes superior e inferior intercambiáveis de aço SAE H13, facilitando a troca quando as mesmas precisarem ser substituídas ou reformadas por desgaste. Chegou-se a uma proposta de ferramental de forja e rebarbação unificado (Figura 28) no qual adaptou-se na mesma matriz o rebarbador (item 3) juntamente com o punção de furação um punção guiado (item 4) para fazer a furação, aproveitando o aquecimento do material, eliminando então a utilização de uma máquina CNC para fazer este processo.

A sequência de etapas propostas na matriz conforme mapeado na Figura 28 é:

- 1- Pré-forma pós encalque
- 2- Perfil final
- 3- Rebarbador
- 4- Punção para furação a quente e bucha guia do punção
- 5- Batente para limitar e garantir comprimento total da peça

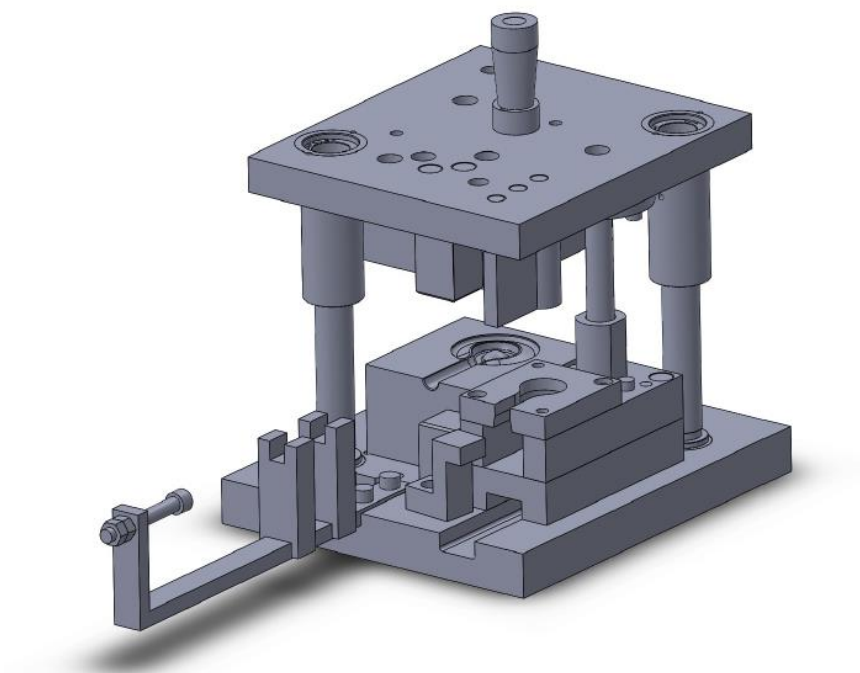


Figura 28: Proposta de matriz unificada

5.4 FABRICAÇÃO DAS MATRIZES

O material utilizado na fabricação de matrizes para forjamento a quente deve suportar temperaturas elevadas, neste caso, os da classe H, conforme mencionado na revisão de literatura, foi selecionado o aço, cuja composição química está exposta na Tabela 2 e o material utilizado está conforme ANEXO 1.

Os desenhos em CAD, foram desenvolvidos no SolidWorks, e importou-se para um *software* chamado Edgecam, no qual foi feita a estratégia de manufatura em usinagem (CAM). A Figura 29 mostra a matriz no *software* Edgecam, com as linhas geradas da estratégia de usinagem que representam o caminho percorrido pela ferramenta.

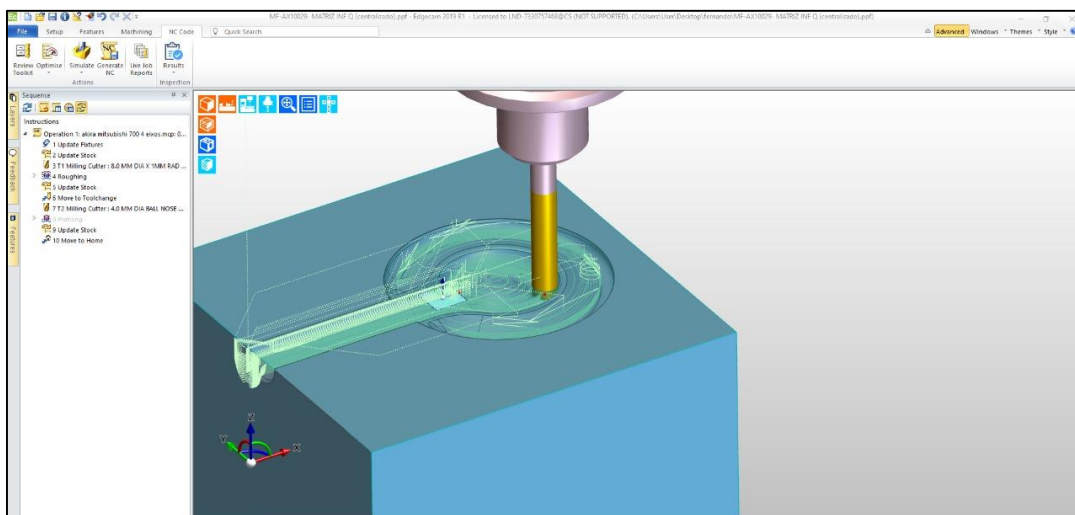


Figura 29 Estratégia de usinagem via software Edgecam

A Figura 29 ilustra a matriz com a cavidade a ser usinada, com a ferramenta de topos esférico sendo substituídas por outras ferramentas de topo esférico para realizar o processo de usinagem por fresamento CNC. Depois de finalizado o programa de estratégia de usinagem 3D no *software* Edgecam, os dados são enviados ao Centro de Usinagem para a fabricação das matrizes inferior e superior. A máquina utilizada para isso é um centro de usinagem vertical da Hyundai, modelo VX-480, com comando Siemens.

A Figura 30 mostra a matriz após usinagem no centro de usinagem, ainda sem tratamento térmico.

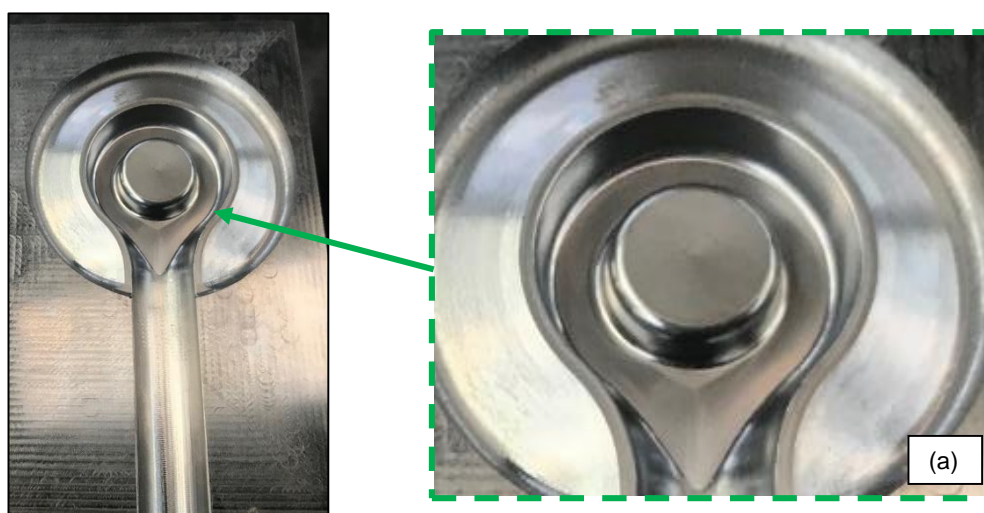


Figura 30: Cavidade usinada do perfil com detalhe (a).

A usinagem foi baseada no projeto deste estudo, com isso, respeitou-se todas as especificações conforme Figura 31. A matriz após usinagem foi submetida a medição em

máquina de medição por coordenadas (MMC), afim de verificação para os próximos passos do presente estudo.

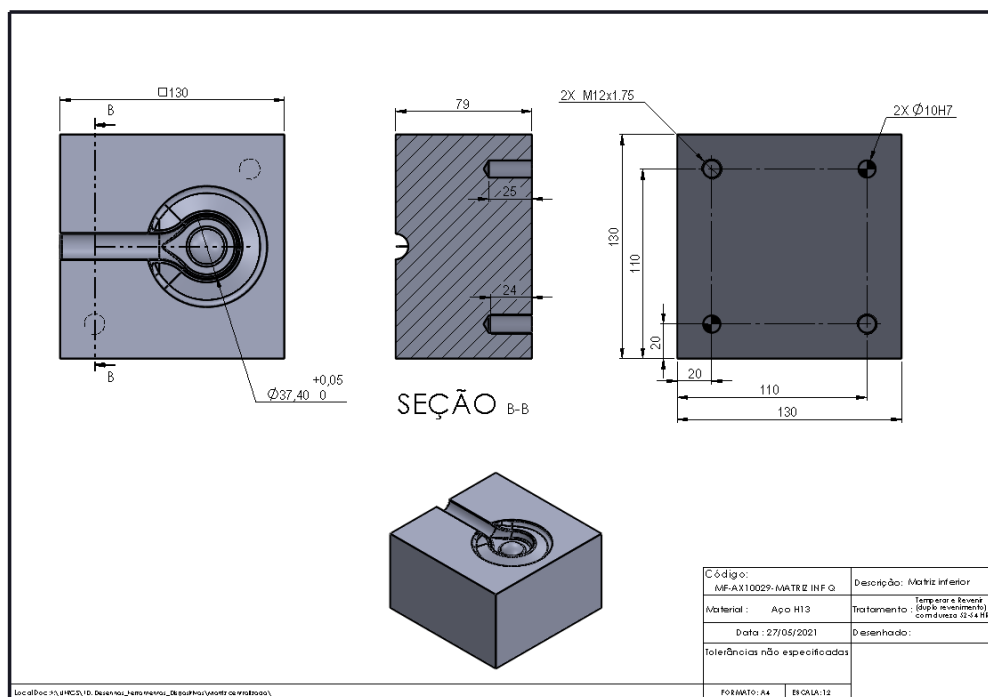


Figura 31: Detalhamento do ferramental

Foram utilizadas 2 ferramentas de usinagem na fabricação das matrizes, primeiro uma fresa inteira de topo de 8mm de diâmetro para o desbaste inicial, depois uma fresa inteira de topo esférico de 4 mm para acabamento.

As matrizes foram submetidas ao processo de tratamento térmico de têmpera e revenimento, seguido de um duplo revenimento, pois conforme literatura, convém que seja aplicada esse beneficiamento para um bom desempenho do ferramental relacionado ao aumento da vida útil do mesmo. A dureza estabelecida foi de 52 a 56 HRC.

Para fabricação do punção de furação utilizou-se o aço SAE H13, seguido de têmpera e revenimento, retificação e nitretação a plasma com uma camada de 0,2 mm e teve sua face perfilada (côncava) para reduzir o contato com a peça a ser furada conforme Figura 33.

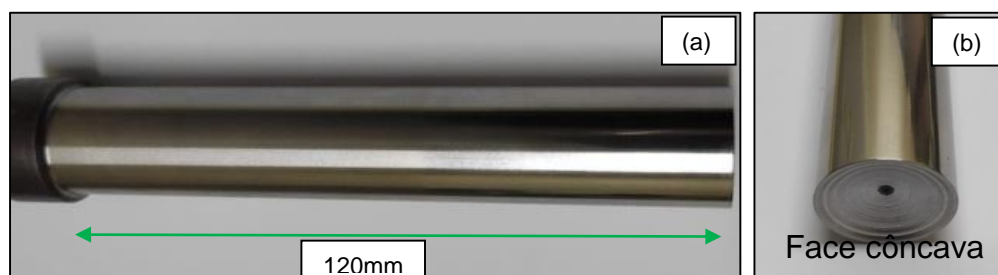


Figura 32: Punção com face côncava

5.5 DESCRIÇÃO DO PROCESSO EXPERIMENTAL DE FORJAMENTO

Após a realização da simulação e a fabricação do ferramental fez-se o forjamento da peça. Os mesmos parâmetros da simulação foram utilizados no intuito de comparar os resultados obtidos na simulação numérica e dados analíticos com os experimentos realizados.

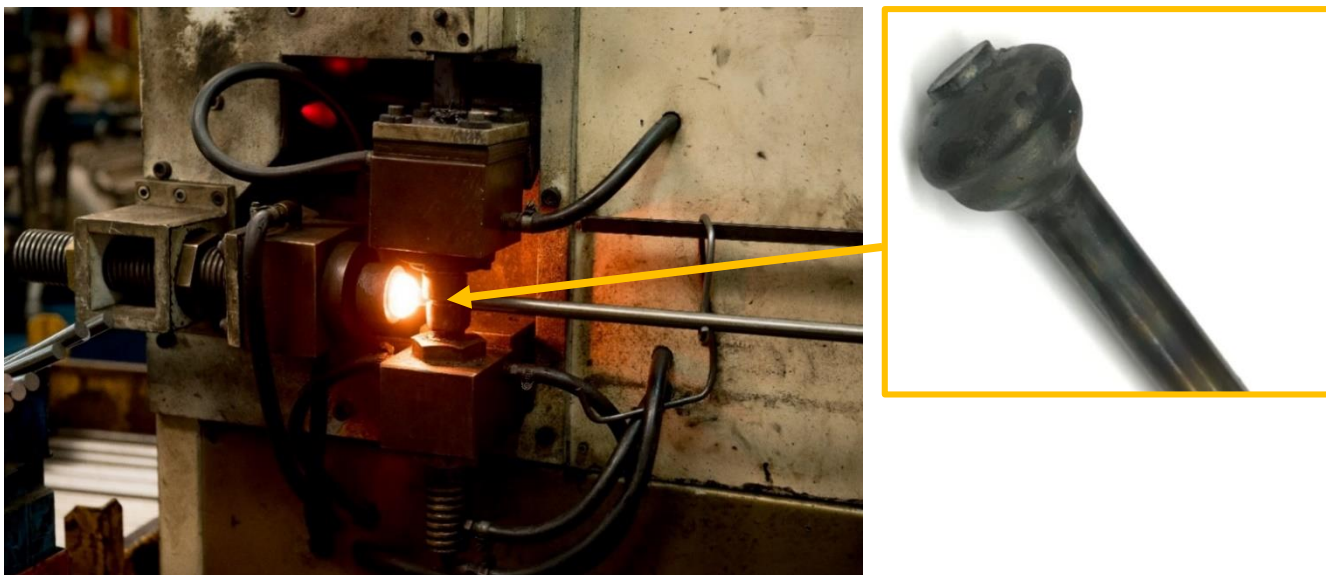


Figura 33: Eletro recalcadora em operação gerando pré-forma.

Sendo assim, o recalque foi feito na eletrorecalcadora e posteriormente fez-se o ciclo de forjamento conforme Figuras 35, 36, 37 e 38.

A Figura 35 ilustra a pré-forma, que é utilizada apenas para reduzir a área do recalque gerado, fazendo assim esse amassamento e posicionando na cavidade. Adotou-se esse mesmo amassamento já utilizado pela empresa no para o forjado anterior.

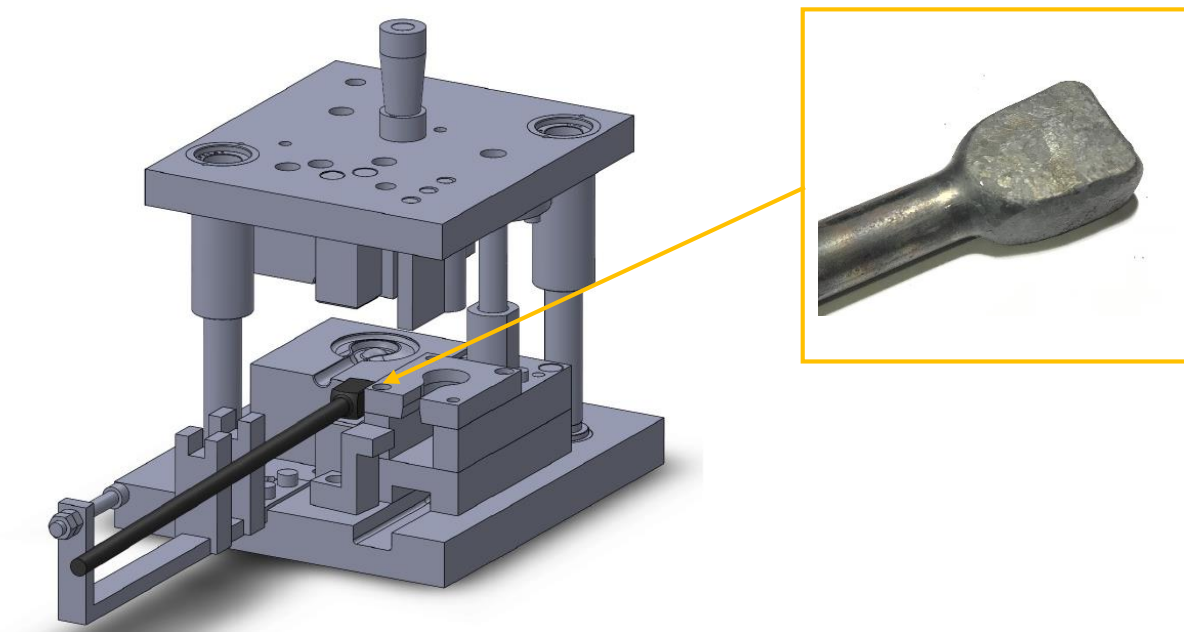


Figura 34: Pré-forma (amassamento) para posicionar na matriz forja final

A Figura 35 mostra a pré-forma em cinza escura posicionada na matriz. A próxima etapa consiste em forjar o perfil em estudo, já com o pré-furo para posterior furação ainda quente (Figura 36).

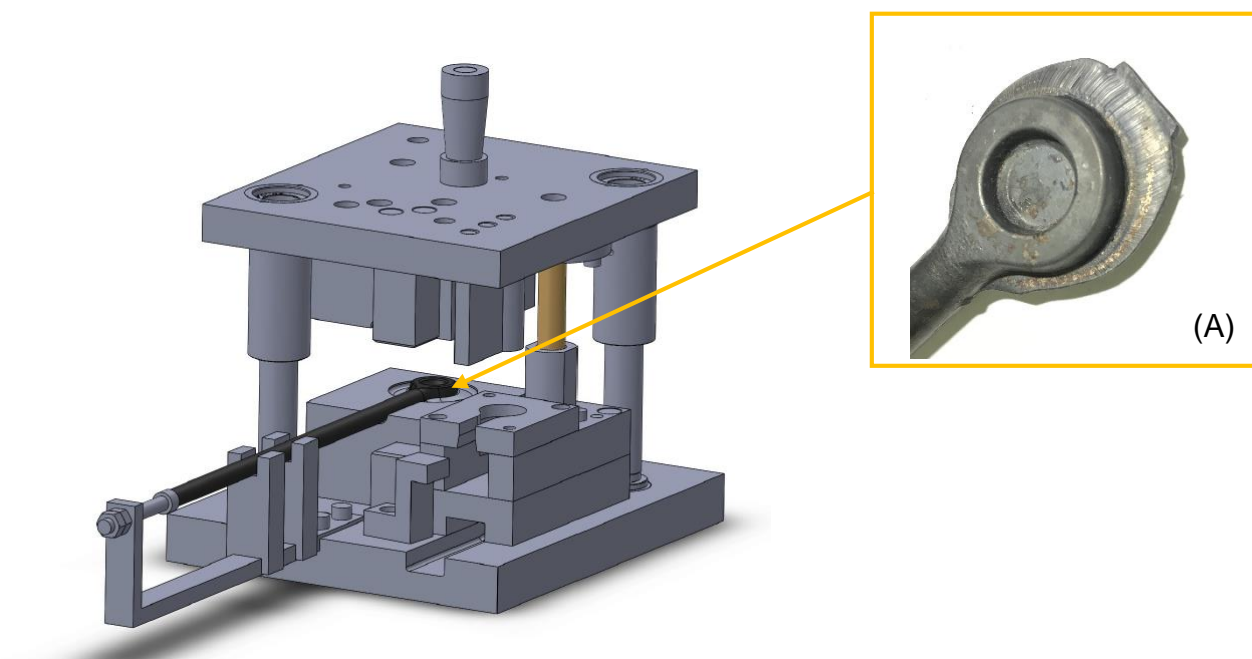


Figura 35: : Forjamento do perfil em estudo com pré-furo, e no detalhe imagem da peça forjada ainda com a rebarba.

A Figura 36 ilustra a forja final da peça, faltando apenas a etapa de rebarbação e furação, essa é uma das principais etapas. Na etapa seguinte consiste na rebarbação da peça (Figura 37).

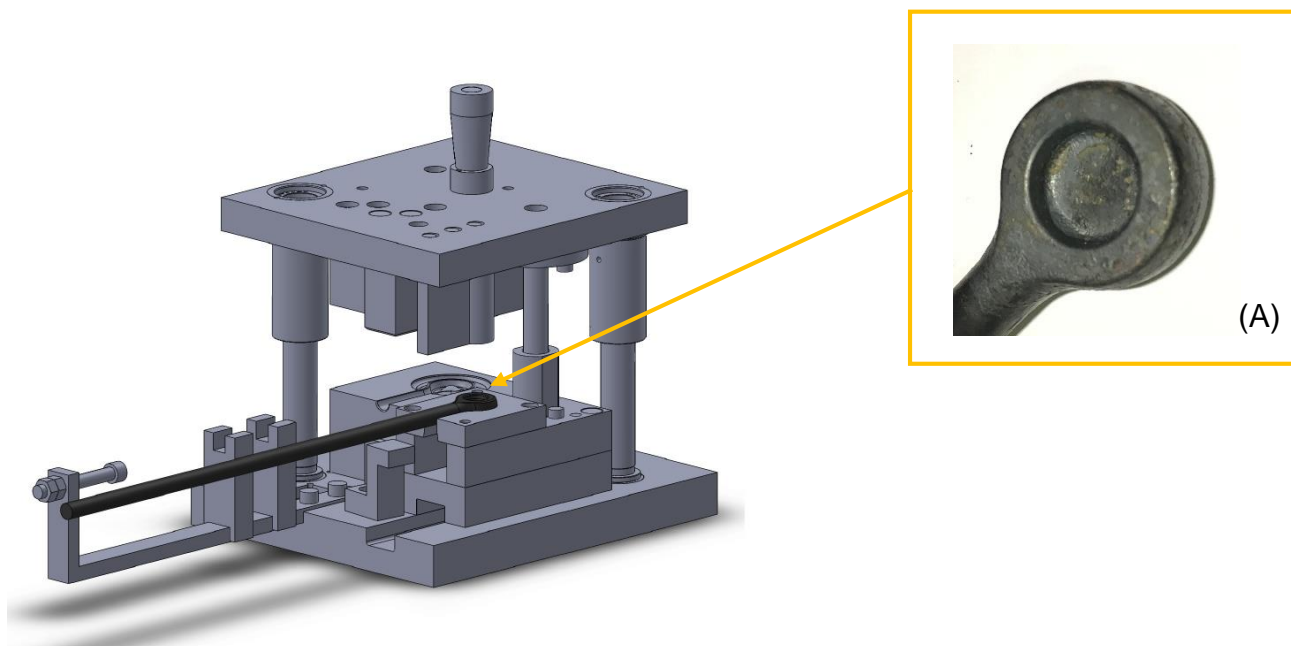


Figura 36: Peça na posição de rebarbação e no detalhe (A) peça já rebarbada.

A última etapa da sequência é a etapa de furação. Na Figura 38, pode-se notar que a peça é alojada em uma espécie de “gaveta”. Já no detalhe (A) da Figura 38 é possível ver o punção dentro da bucha guia para efetuar a furação e no detalhe (B) é a peça já acabada com a furação feita por puncionamento.

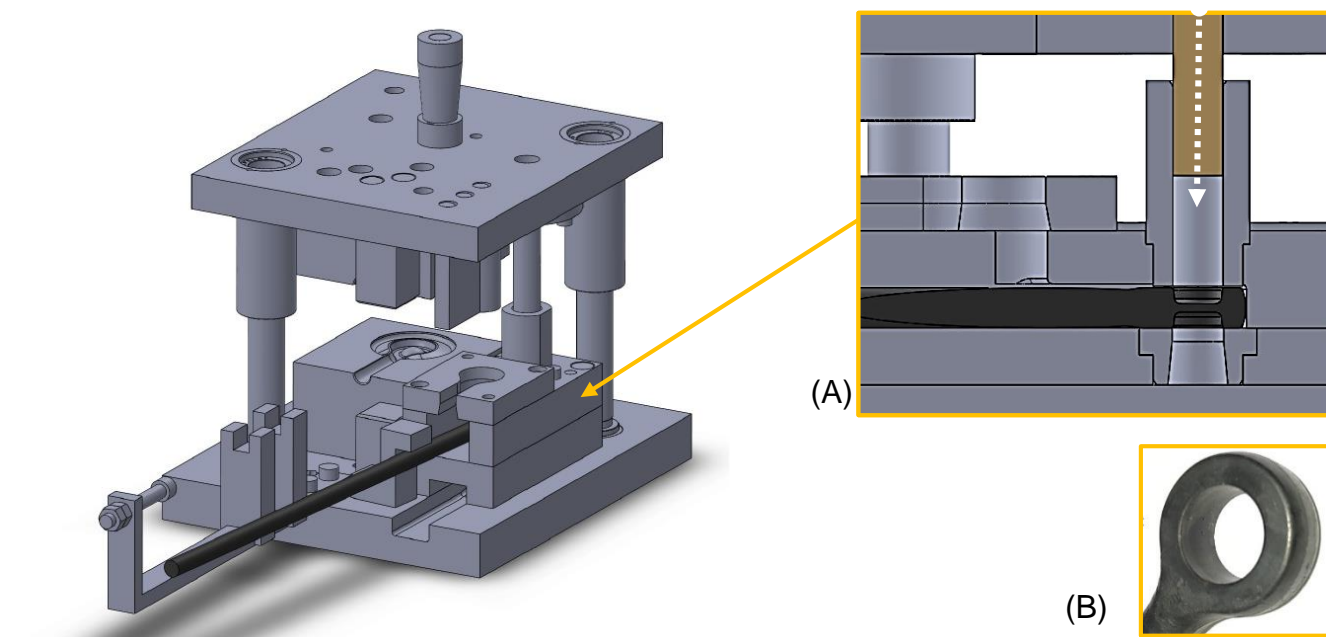


Figura 37: Etapa de furação a quente. Detalhe (A) peça alojada e punção guiado para furação, detalhe (B) peça já furada.

5.6 FORJAMENTO EXPERIMENTAL

Seguindo os passos descritos na sequência de Figuras anteriores, deu-se início ao processo experimental. Foram utilizadas cerca de 50 peças a nível de *set-up* e posteriormente foram separados lotes maiores, chegando a lotes de 1000 peças, totalizando 4000 peças, onde a cada lote o processo era interrompido e verificado o comportamento da ferramenta, vida útil da matriz e do punção, além de verificar as condições dimensionais das peças forjadas.

Após esses primeiros ensaios práticos a matriz foi submetida a produção, onde um lote de 1000 peças foi forjado (Figura 39).



Figura 38: Primeiro lote de 1000 peças forjados

5.7 ANÁLISE DO MATERIAL FORJADO

Foi feita a metalografia da peça após forjada, para observar alguma mudança significativa em sua estrutura. Notou-se que o tamanho de grão ficou em torno de 9,2 ASTM (Figura 40).

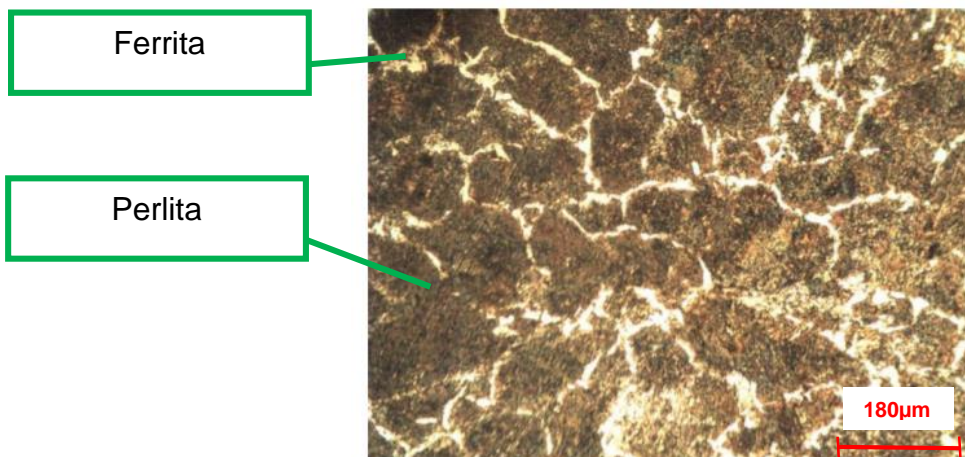


Figura 39: Metalografia da peça após forjamento com ataque de nital 2%, estrutura perlítica com rede de ferrita ao contorno dos grãos(Aumento 400x)

A Figura 40 apresenta a metalografia do aço SAE 1045 forjado, observa estrutura perlítica com rede de ferrita (região mais clara), conforme literatura [11].

5.8 ANÁLISE DA TROCA TÉRMICA

5.8.1 Cálculo do aumento de temperatura pelo efeito do trabalho de conformação

Na análise da troca térmica foi considerada uma altura média de 8,6 mm conforme mostra a Figura 41.

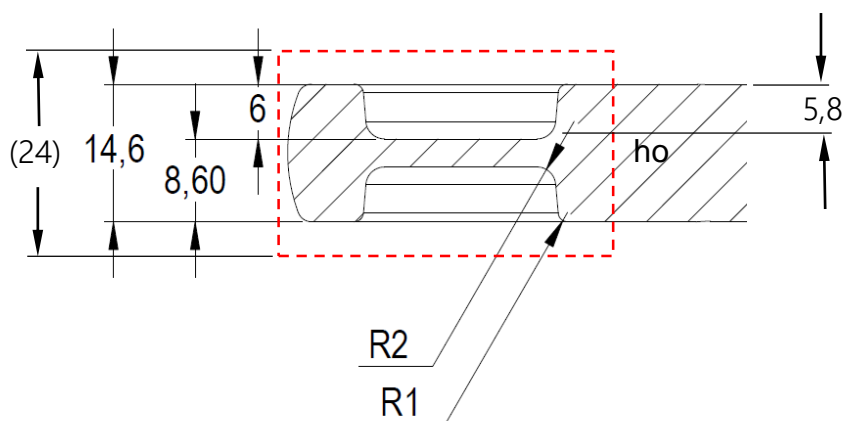


Figura 40: Geometria final em corte

Dessa forma, a deformação verdadeira média em altura desenvolvida no processo é dada por:

Eq. 7

$$\varphi = \ln \frac{h}{h_0} = \ln \frac{5,8}{24} = 1,42$$

Sendo:

h- altura média considerada (mm)

ho – altura da geratriz (pré-forma) (mm)

A velocidade da ferramenta pode ser definida por:

Eq. 8

$$V_f = V_t \cdot \sqrt{1 - \left(1 - \frac{h-h_0}{R}\right)^2}$$

$$Vt = \omega \cdot R$$

$$Vt = 0,18 \cdot 350$$

$$Vt = 63 \text{ mm/s}$$

$$V_f = 63 \cdot \sqrt{1 - \left(1 - \frac{5,8 - 24}{350}\right)^2}$$

$$V_f = 20,16 \text{ mm/s}$$

A velocidade de deformação pode ser expressa por:

Eq. 9

$$\dot{\varphi} = \frac{V_f}{h} = \frac{20,16}{5,8} = 3,47 \text{ s}^{-1}$$

Modelo matemático de Hensel Spittel expresso por:

Eq. 10

$$k_f = A \cdot e^{m_1 \cdot T} \cdot T^{m_8} \cdot \varphi^{m_2} \cdot e^{\left(\frac{m_4}{\varphi} + m_6 \cdot \varphi\right)} \cdot (1 + \varphi)^{(m_5 \cdot T)} \cdot \dot{\varphi}^{(m_3 + m_7 \cdot T)}$$

Parâmetros para material aço SAE 1045:

$$A = 1521,31$$

$$m_1 = -0,0027$$

$$m_2 = -0,1265$$

$$m_3 = 0,1454$$

$$m_4 = -0,05958$$

$$m_5 = m_6 = m_7 = m_8 = 0$$

$$\varphi = 1,42$$

Resultando na equação:

$$k_f = 1521,31 \cdot e^{-0,0027 \cdot 1000} \cdot 1,42^{-0,1265} \cdot e^{\left(\frac{-0,05958}{1,42}\right)} \cdot 3,47^{(0,1454)}$$

$$k_f = 1521,31 \cdot 0,067 \cdot 0,955 \cdot 0,9591 \cdot 1,19$$

$$k_f = 111,90 \text{ MPa}$$

Aumento da Temperatura por Trabalho de Conformação:

Eq. 11

$$\vartheta_c = \frac{k_f \cdot \varphi}{c_M \cdot \rho} \cdot a$$

$$\vartheta_c = \frac{111,9 \cdot 1,42}{0,46 \cdot 7850000} \cdot 0,9$$

$$\vartheta_c = 0,0000813375 \cdot 0,9$$

$$\vartheta_c = 0,000090375$$

$$\vartheta_c = \textit{insignificante}$$

5.8.2 Cálculo da perda de temperatura pelo contato com a ferramenta

Temperatura final após contato com a ferramenta mais fria:**Tempo de contato**

Eq. 12

$$t_c = \frac{\Delta h}{Vf}$$

$$t_c = \frac{10,8}{111,90} = 0,096s$$

$$\vartheta = \vartheta_F + (\vartheta_M - \vartheta_F)e^{\left(-\frac{\alpha \cdot t_c}{c_M \cdot \rho \cdot h}\right)}$$

$$\vartheta = 100 + (1000 - 100)e^{\left(-\frac{6500 \cdot 0,096}{0,46 \cdot 7850000 \cdot 0,0058}\right)}$$

$$\vartheta = 100 + (1000 - 100)0,980$$

$$\vartheta = 982,0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Sendo:

$$\vartheta_F = 100 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\vartheta_M = 1000 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\alpha = 6500 \text{ J/g}^\circ\text{C}$$

$$c_M = 0,46 \text{ J/g}^\circ\text{C}$$

$$\rho = 7850000 \text{ g/m}^3$$

5.8.3 Cálculo espessura da rebarba

Eq. 13

$$h = 0,015 \cdot \sqrt{A}$$

h = altura

Ap = área projetada

0,015 = constante

$$h = 0,015 \cdot \sqrt{1133,54}$$

$$h = 0,55mm$$

5.8.4 Cálculo da força conforme SPUR

Eq. 14

$$F_{max} = Kf \left[\left(1,5 + \frac{b}{2h} \right) \cdot A_p + \left(1,5 + \frac{b}{h} + 0,08 \frac{d1}{h} \right) A_r \right]$$

b = largura da rebarba [mm]

h = Espessura da rebarba [mm]

A_p = Área projetada ($\pi d1^2 / 4$) [mm]

d1 = Diâmetro total da peça forjada [mm]

A_r = Área projetada rebarba [mm]

$$F_{max} = 111,9 \left[\left(1,5 + \frac{4}{2 \cdot 0,55} \right) \cdot 1133,54mm + \left(1,5 + \frac{4}{0,55} + 0,08 \frac{38}{0,55} \right) 186,2 \right]$$

$$F_{max} = 79,59ton$$

6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Este capítulo tem o objetivo de realizar a discussão dos resultados obtidos no desenvolvimento da pesquisa, avaliar após o ciclo de produção experimental e discutir com a literatura.

6.1 COMPORTAMENTO DO FERRAMENTAL

Ao término dos 1000 ciclos pode-se analisar que a mesma apresentou pouco desgaste (Figura 42), além do desempenho dimensional das peças que não apresentaram variações.

A análise do punção também foi feita após 1000 peças forjadas e notou-se que o mesmo conseguiu manter um bom acabamento do furo perfurado, porém o material adere ao punção, mesmo ele sendo retificado.

Uma lubrificação mais efetiva foi uma alternativa, porém acaba gerando perda térmica e corre o risco do mesmo ficar preso na peça ou desgastar ainda mais rápido.



Figura 41: Punção após primeiro lote de 1000 peças

A Figura 42 exhibe o punção após a produção de 1000 peças. Com o mesmo punção seguiu-se o forjamento seguido da furação, e o mesmo suportou mais 4000 mil peças, porém aderindo material a sua superfície (Figura 43), se tornando inviável seguir os testes devido estar arranhando a superfície do furo, podendo prejudicar a montagem da peça no cliente final.

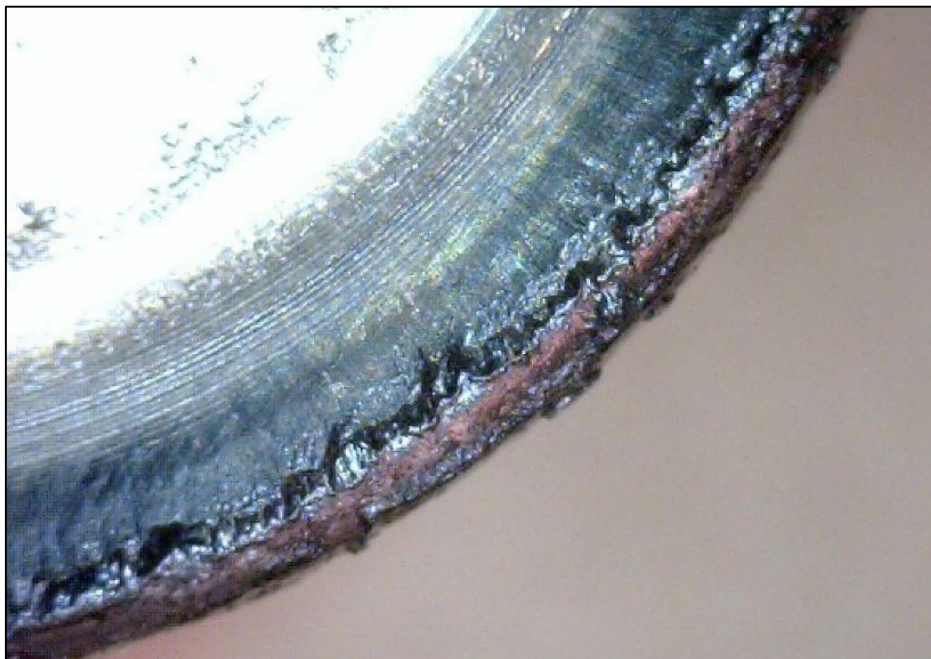


Figura 42: Aresta do punção após 4000 ciclos

A Figura 43 exibe a aresta do punção com material aderido do processo de forjamento após 4.000 ciclo. Considerou-se positivo o resultado referente ao punção, pois o mesmo conseguiu fazer 4000 ciclos e atendeu as especificações de acabamento. O punção em si não teve arranhões profundos, devido o mesmo possuir nitretação, mas o material começou a aderir as paredes do punção, principalmente na sua aresta.

A superfície da matriz apresentou um desgaste próximo a haste da peça forjada, a Figura 44 exibe a matriz, após 1000 peças forjadas.



Figura 43: Superfície Matriz após 1000 peças

Após a matriz ser submetida a mais 4000 ciclos como o punção, o desgaste na região da pré-forma apresentou deformação superficial mais severa, caracterizando um desgaste, o que não inviabilizou a produção, mas por boa prática da empresa optou-se por encerrar os testes e recuperar o ferramental.

Conforme citado na revisão da literatura, a troca de calor entre ferramenta e billet durante um longo período pode ocasionar o revenimento da superfície, causando perda de dureza superficial e gerando amassamentos conforme a Figura 45.



Figura 44: Cavidade após 4000 peças, apresentou desgaste.

Embora no somatório a cavidade tenha suportado 4000 peças (Figura 45), o custo caso o ferramental venha a trincar, propagar uma trinca e ficar inutilizado se torna mais alto do que prover um triplo revenimento, conforme sugerido na literatura [28], no qual esse processo iria esferoidizar os carbonetos persistentes ou até mesmo revenir a martensita formada após o primeiro ou segundo revenido, gerando mais resistência na superfície.

Um fator importante é a relação ao coeficiente de atrito, pois, os autores [10] trazem simulações a quente variando o coeficiente de atrito, sendo 0,1 a 0,2 a carga de forjamento eleva em 35%, o que nesse caso para um processo em uma forjaria simples, onde a prática do uso de lubrificantes com frequência pelo forjador seja deficitária, esse desgaste apresentado seria retardado, pois a carga aplicada na cavidade seria reduzida.

6.2 RESULTADOS EM CUSTOS

Os resultados apresentados conseguem-se comparar alguns números importantes referente a custos operacionais e material.

Tomando por base o volume anual da peça estudada, a mesma possui um volume de venda de 45mil peças ano, sendo assim, a Tabela 8 compara a redução obtida por eliminar um processo de usinagem e fazer por furação a quente.

Tabela 7: Comparativo custos de forjamento x usinagem

CUSTO PROCESSO USINAGEM + FORJARIA	
Valor hora Célula Forja 1	R\$150,00
Valor hora Centro de Usinagem CNC	R\$ 150,00
Quantidade peças x hora CNC (200 peças)	$45.000 / 200 = 225$ horas de usinagem por ano $225 \times R\$150,00 \text{ hora} = R\$33.750,00$ por ano gastos em usinagem

Considerando que a usinagem não foi mais necessária, a empresa terá 225 horas de máquina CNC disponível, deixando assim de gastar R\$33.750,00 em usinagem ou convertendo em disponibilidade de máquina para novos produtos.

Já a célula de forja possui esse custo fixo, sendo assim, a furação não agregou um custo expressivo na célula de forjamento devido a mesma aproveitar o aquecimento que já seria desperdiçado deixando a peça resfriar dentro da caixa.

Um outro resultado importante de ser considerado é que o corte da peça anterior era feito com 500 mm, com a nova proposta o mesmo teve seu comprimento de corte reduzido para 475 mm, conforme comparação Tabela 9.

Tabela 8: Comparativos de economia de matéria prima

Comprimento de corte Peça com Usinagem	500 mm
Comprimento de corte Peça com Furação a quente	475 mm
DIFERENÇA	25 mm

Considerando o volume anual de 45 mil peças ano x 25 mm, tem-se uma redução de equivale a uma tonelada de material por ano, o que em valores atuais estimasse em R\$7000,00 só em matéria prima

6.3 RESULTADOS CÁLCULOS

Os cálculos aplicados apresentaram resultados satisfatórios e coerentes com a simulação computacional. Referente a perda térmica por contato com a ferramenta pode-se evidenciar que a temperatura máxima da peça na simulação ficou na faixa de 996 °C, comparado com o cálculo de perda térmica por contato com a ferramenta o valor final foi de 980°C, o que seria uma diferença de 16°C.

Para dimensionamento da prensa aplicada no processo fez-se o cálculo de força de forjamento, que no caso o resultado foi de 79,58Ton. Fez o forjamento em uma prensa Gutmann de 80Ton e o preenchimento da cavidade e da peça ficaram uniformes, sem falhas ou dobras.

7 CONCLUSÕES

A aplicação do processo de furação a quente (punching) em parafusos tipo olhal de aço SAE 1045 aplicados em implementos agrícolas é uma alternativa bem eficiente e que apresentou resultados satisfatórios com relação ao processo aplicado anteriormente (usinagem). O ferramental proposto com o alívio (piercing) apresentou bom desempenho e forjou 4000 peças. O preenchimento da cavidade ocorreu de maneira uniforme, sem gerar sobras ou ponto frio nas peças.

No software simufact pode-se também concluir que a assertividade dos resultados se fazem muito coerentes com a peça física, a perda térmica apresentada no software foi coerente com os cálculos manuais, que também demonstra boa confiabilidade. Pode-se cada vez mais desenvolver e utilizar esse recurso na indústria, pois comparando os custos aplicados para fazer um ferramental e o mesmo apresentar alguma falha, pode-se ter um custo expressivo em material caso a ferramenta seja fabricada sem que haja uma simulação, além das perdas de horas de usinagem para confecção e o tratamento térmico da mesma.

Ainda sobre os ganhos mais sistêmicos e de gestão, a peça ao ser perfurada já está pronta para o processo de laminação de rosca e tratamento térmico, eliminando transporte para um processo subsequente (furar via CNC). Pode-se eliminar a mão de obra mais elevada que é de operador dedicado (225 horas) para fazer o item em uma máquina CNC, além obviamente dos tempos de *set-up* que ficam mais reduzidos. Esses números durante o ano expressam aproximadamente 45mil peças fabricadas e uma redução expressiva financeiramente, concluindo que o processo de furação a quente é viável.

O ensaio do anel trouxe informações importantes, que serviram como dados de entrada fundamentais para a simulação computacional no que diz respeito ao atrito, fazendo com que a simulação computacional e o experimento prático tivessem um bom resultado e coerência entre si.

Pode-se concluir também que o acabamento do punção e a dificuldade de lubrificação afetam diretamente nas questões referente a aderência do material a superfície do mesmo.

Não menos importante são as questões referente a sustentabilidade ou aproveitamento de energia, tendo em vista que o aquecimento utilizado para fazer a furação já estaria disponível em consequência do forjamento a quente, portanto consegue-se perceber esse ganho em não desperdiçar o calor que já foi gerado para forjar.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Testar diferentes perfiz de punção e tratamento térmico, para um viabilizar um maior número de ciclos.

Seria importante um estudo também para otimizar a pré-forma (geratriz).

Um outro estudo possível seria testar um perfil de punção diferente, como um sextavado, normalmente feito com brochadeira quando feita em larga escala.

REFERÊNCIAS

- [1] TURK, R., PERUS, I., TERCELJ, M. New starting points for the prediction of tool wear in hot forging. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2004.
- [2] DOUGLAS, R.; KUHLMANN, D. Guidelines for precision hot forging with applications. *Journal of Materials Processing Technology*, Amsterdam, v.98, p.182-188, 2000.
- [3] BUTTON, S.T.; LIMA, C.A. e, 1995, Programa de Cursos de Extensão - Curso de Especialização - Fabricação e Automação da Manufatura: Sistemas Flexíveis de Ferramental, OFA – 05, Capítulo III, FEM – UNICAMP, 2005.
- [4] RAVASSARD, P. Troca rápida de fabricação em conformação a frio. *Máquinas e Metais*, 9p, 1989.
- [5] LANGE, K. *Handbook of metal forming*, McGraw-Hill Book Co, 1985.
- [6] SCHAEFFER, L. *Forjamento Tecnologia do Processo*. 1ª. ed. Porto Alegre: Editora Gráfica da UFRGS, 2020.
- [7] 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.
- [8] SOUZA, J. H. Estudo do processo de Corte de Chapas por Cisalhamento. Porto Alegre, pg65, 2001.
- [9] BRITO, A. Análise teórico-experimental dos processos de expansão, redução e inversão de extremidades de tubos de parede fina em matriz. Tese de doutorado. UFRGS - PPGEM, Porto Alegre/RS, 2006
- [10] BÖESCH JÚNIOR, P. R.; MARTINS, V.; SCHAEFFER, L. Determinação do coeficiente de atrito pelo ensaio de compressão do anel: uma revisão. *Revista Thema*, v. 8, p. 1-11, 2011.
- [11] MARTINS, P.; RODRIGUES, J. *Tecnologia Mecânica: Tecnologia Da Deformação Plástica (Vol. II)*. Lisboa: Escolar Editora, 2005.
- [12] SOFUOGLU, 1999 SOFUOGLU, H., RASTY, J. On the measurement of friction coefficient utilizing the ring compression test. *Tribology international*. n. 32, p. 320-335, 1999.

- [13] SELAU, A. M; Estudo do forjamento de peças vazadas a partir de geratriz tubular. Dissertação de Mestrado. UFRGS – PPGEM / Porto Alegre/RS 2013.
- [14] ALTAN, 1999 ALTAN, T.; OH, S.; GEGEL, H. Conformação de metais: Fundamentos e aplicações, São Carlos: EESC-USP, 1999.
- [15] SAIKI, 2006 SAIKI, H.; ZHAN, Z.H.; MARUMO, Y.; et al. Evaluation of contact conditions in hot forging of pure aluminum using examination. Journal of materials processing technology, n. 177, p. 243-246, 2006.
- [16] BRITO, 2004 BRITO, O.; Estampos de Corte. São Paulo, Ed. Hemus, 2004.
- [17] GARCIA, A.; SPIM, J.A.; SANTOS, C.A. **Ensaaios dos materiais**. 2ª Ed. Campinas: LTC – Livros Técnicos e Científicos, 2002
- [17] GABARDO, J. F., Estudo da tenacidade do aço ferramenta H13. Dissertação (Mestre em Engenharia Mecânica do curso de Mestrado em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Paraná, na área de Manufatura, 71p, 2008.
- [18] GRÜNING, K., Técnica da conformação, Ed. Polígono, São Paulo, 1973.
- [19] PEGDEN et al. Introduction to simulation using SIMAN. São Paulo: Ed. McGraw Hill, 1990.
- [20] ROQUE, C. Aplicação do Método dos Elementos Finitos no Planejamento da Sequência de Forjamento a Frio. Dissertação de Mestrado. Campinas: UNICAMP, 1996.
- [21] MEDEIROS, LUCIANO FRONTINO DE; MOSER, ALVINO; SANTOS, NERI DOS. Simulação computacional como técnica de pesquisa na administração. Revista Intersaberes, v. 9, n. especial, p.441-459, jul.- dez. 2014.
- [22] BRAMLEYU, A. N., & MYNORS, D. The Use Of Forging Simulation Tools. Materials and Design, v. 21, n. 4, p. 279-286, 2000.
- [23] BRUCELLE, O., & BERNHART, G. Methodology for service life increase of hot forging tools. Journal of Materials Processing Technology, v.87, p. 235-246, 1999.
- [24] DIETER, G. E. Metalurgia Mecânica. 2ª Edição, Rio de Janeiro: Guanabara Dois. 1981.

- [25] CHIAVERINI, V. Aços e Ferros Fundidos. 6a edicao, 576 p. Sao Paulo. Publicacao da Associacao Brasileira de Materiais, 1988.
- [26] CETLIN, P. R.; HELMAN, H. Fundamentos da Conformação Mecânica dos Metais. 2a edicao, 263 p. Sao Paulo, Artliber Editora, 2005.
- [27] SCHAEFFER, L. Forjamento - Introdução ao Processo. 2ª edição. Porto Alegre, RS / Brasil: Imprensa Livre, 2006.
- [28] MESQUITA, R. A; HADDAD, P. T. Propriedades Fundamentais dos Aços Ferramenta para Matrizes de Forjamento. XXIX Senafor, Porto Alegre, 2009
- [29] KRAUSS, G. Steels: Processing, Structure and Performance. ASM International, Ohio, 2005.
- [30] Simulation in der Massivumformung, Deutsche Massivumformung. Infostelle Industrieverband Massivumformung e. V. Deutschland, Februar 2006.
- [31] KOPP, R.; PHILLIP, F. Physical parameters and boundary conditions for the numerical simulation of hot forming processs. Steel Research, v. 63, n. 9, p. 392-398, 1992.
- [32] SNAPE R. G., CLIFT S. E., BRAMLEY A. N. Parametric sensitivity analyses for FEA of hot steel forging. Journal of Materials Processing Techonology, v. 125- 136, p. 353-360, 2002.
- [33] CHITKARA, N. R.; Kim, Y. J. Near-net shape forging of a crown gear: some experimental results and an analysis. International Journal Of Machine and Tools Manufacturer, v. 41, p. 325-346, 2001.
- [34] BRITO, A.M.G.; MELLO, S.; GEIER, M. e SCHAEFFER, L. Otimização do Forjamento de uma Coroa pelo Método de Volumes Finitos. Anais da VII conferência internacional de forjamento (XXIII SENAFOR) em Porto Alegre/RS nos dias 16 e 17/10/03 - Pág.: 193-194.
- [35] PHILIPP F. Physikalische Prozeßdaten für di numerische Simulation von Warmumformverfahren. Umformtechnische Schriften Band 40. 1993 Verlang Stahleisen mbH, Düsseldorf.
- [36] WILSON, W. R. D.; SCHMID, S. R.; LIU, J. Advanced simulations for hot forging: heat transfer model for use with the finite element method. Journal of Materials Processing Technology, v. 155, p. 1912-1917, 2004.
- [37] DOEGE E., ALASTI M., SCHMIDT-JÜRGENSEN R. Accurate friction and heat

transfer laws for enhanced simulation models of precision forging processes. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 150, p. 90-99, 2004.

[38] POLOZINE, A.; SCHAEFFER, L. Exact and approximate methods for determining the thermal parameters of the forging process. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 170, p. 611-615, 2005.

[39] MAJERUS, J. N., JEN, K. P., GONG H. Quantitative data for precision, closed-die, forging: internal deformations and computer simulations. *International Journal on Machining Tools Manufacturing*, v. 37, n. 4, p. 523-554, 1997.

[40] OU. H., BALENDRA, R. Preform design for forging of aerofoil section using FE simulation. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 81, p. 144-150, 1998.

[41] OU. H., BALENDRA, R. Die-elasticity for precision forging of aerofoil sections using finite element simulation. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 76, p. 58-62, 1998.

[42] OU H., LAN J., ARMSTRONG C. G., PRICE M. A. An FE simulation and optimization for the forging of aeroengine components. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 151, p. 208-220, 2004.

[43] TOTTEN, George E. *Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies*. 2. ed. New York, CRC, 2007.

[44] TOTTEN, G. E. et al. *Handbook of Quenchants and Quenching Technology*. ASM International, 1993.

[45] KIM, D.H.; LEE, H. C; KIM, B. M; KIM, K.H. Estimation of die service life against plastic deformation and wear during hot forging process. *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 166, p. 372 - 380, 2005.

[46] KIM, D.H.; KIM, B. M; KANG, C.G. Die life considering the deviation of preheating billet temperature in hot forging proces. *Finite Elements in Analisis and Design*, vol. 41, p. 1255 - 1269, 2005.



[47] KIM, D.H.; KIM, B. M; KANG, C.G. Estimation of die life for a die cooling method in a hot forging process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 27, p.33-39, 2005.

[48] KRAUSS, G. *Steels: Heat treatment and processig principles*. 1a edicao, 497 p. ASM Internatinal, United States of America, 1990.

[49] MAGALHAES, F. C; PERTENCE, A. E. M; CAMPOS, H. B; AGUILAR, M. T. P; CETLIN, P. R. Simulação numérica do desgaste de uma matriz de forjamento a quente. XXIX Senafor, Porto Alegre, 2009.

[50] BABU, S; RIBEIRO, D; SHIVPURI, R. Material and Surface Engineering for Precision Forging Dies. The Ohio State University - Prepared for Precision Forging Consortium - Ohio Aerospace Institute and Nacional Center for Manufacturing Sciences, 1999.


Anexo 1: Certificado de Matéria Prima Ferramental (Aço H13)

		ACOS FAVORIT DISTRIBUIDORA LTDA-MATRIZ AV. FREDERICO AUGUSTO RITTER, 2570 94930-650 -CACHOEIRINHA/RS FONE: (51)3470.9000 FAX: (51)3471.1002 CNPJ: 92.216.209/0001-05 INSC. EST.: 177/0103446		CERTIFICADO DE QUALIDADE QUALITY CERTIFICATE Nº : 585462 / 003					
CLIENTE / CUSTOMER METALMOTO IND COM DE MOTOPECAS LTDA									
Produto / Product ACO AISI H13 BLOCO		84.000X 135.000X 0.135 (2 PDC)		I.L. M63692	Nota Fiscal / Invoice 585462				
Data / Date 25/07/2019		OC 16140		IC	Peso / Weight (Kg) 25.728				
Corrida / Heat 4856770									
Composição Química / Chemical Composition									
C	SI	MN	P	S	CR	MO	V	NI	CU
0.3900	0.9400	0.3600	0.0230	0.0010	5.1600	1.2700	0.8400	0.1500	0.0500
AL	SN	W							
0.0260	0.0050	0.0400							
Propriedades Mecânicas / Mechanical Prop									
Dureza Hardness	Limite Resistência Tensile Strength	Limite Escoamento Yield Point	Alongamento Elongation	Estricção Reduction of Area	Tam. Grão Austenítico Austenitic Grain Size	Grau Esferoidização Degree of Globularizing			
HBW	MPa	MPa	%	%	ASTM	%			
205									
Observações / Observation NB 0,02%; B <0,0005%; PB <0,0025%; AS <0,005%; BI <0,005%; H <0,00010%; N 0,0113% * ULTRASSOM APROVADO CONFORME NORMA ASTM A388 * DUREZA CONFORME NORMA ASTM A370.					 GELSON JUNG Controle de Qualidade Quality Control				
COPIA FIEL DO CERTIFICADO ORIGINAL FORNECIDO PELA USINA COPY OF THE ORIGINAL CERTIFICATE PROVIDED BY THE MILL									
CACHOEIRINHA 25 DE JULHO DE 2019									

Anexo 2: Certificado de Matéria Prima da peça em estudo (Aço AISI SAE 1045)

ArcelorMittal Aços Longos		CERTIFICADO DE QUALIDADE				 ArcelorMittal							
Numero: 0006932858/2020													
Sistema de Gestão Integrado - Normas ISO9001, ISO14001, OHSAS18001 e IATF16949													
Cliente: METALMOTO INDUSTRIA E COMERCIO DE M	Pedido:	Material: 113244	Aço: 1045	Corrida: H492704	Ordem de Venda: 8783443	Nota Fiscal: 000306211							
Produto: TREFILADO REDONDO	Especificação:	Bitola: 14,60 mm	Acond.: 6.000 mm	Nº Lotes: 4	Peso (Kg): 4913								
Análise Química													
C	Mn	Si	P	S	Al	Cu	Cr	Ni	Sn	Mo	V	Pb	B
0.4450	0.6930	0.2490	0.0220	0.0049	0.0215	0.0228	0.0572	0.0216	X	0.0041	0.0019	X	0.0003
Complementares													
MACROGRAFTA-C	MACROGRAFTA-R	MACROGRAFTA-S											
X	X	X											

Anexo 3: Limites de resistência do material conforme fornecedor (Aço AISI SAE 1045)

GERÊNCIA DE PRODUÇÃO DE SABARÁ ENGENHARIA DE PRODUTOS E PROCESSOS		 ArcelorMittal Aços Longos - Trefilados																																																																																																													
CARACTERIZAÇÃO DE PRODUTO																																																																																																															
PRODUTO: BARRA DE AÇO TREFILADA REDONDA AÇO: 1045 – CONFORME TABELA DE AÇOS ARCELORMITTAL DIÂMETRO: BITOLAS DE 04,60 mm a 77,79 mm – COMPRIMENTO 3,0 m a 6,0 m																																																																																																															
1 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA:																																																																																																															
<table border="1"> <thead> <tr> <th>AÇO</th> <th>%C</th> <th>%Si</th> <th>%Mn</th> <th>%P</th> <th>%S</th> <th>%Cr</th> <th>%Ni</th> <th>%Mo</th> <th>%Cu</th> <th>%Al</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1045D (*)</td> <td>0,430</td> <td>0,150</td> <td>0,600</td> <td>Máx.</td> <td>Máx.</td> <td>Máx.</td> <td>Máx.</td> <td>Máx.</td> <td>Máx.</td> <td>Máx.</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">ARCELORMITTAL</td> <td>a</td> <td>a</td> <td>a</td> <td>0,030</td> <td>0,030</td> <td>0,200</td> <td>0,250</td> <td>0,06</td> <td>0,350</td> <td>0,080</td> </tr> <tr> <td>0,480</td> <td>0,300</td> <td>0,900</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>1045C (*)</td> <td>0,430</td> <td>0,150</td> <td>0,600</td> <td>Máx.</td> <td>Máx.</td> <td>Máx.</td> <td>Máx.</td> <td>Máx.</td> <td>Máx.</td> <td>-----</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">ARCELORMITTAL</td> <td>a</td> <td>a</td> <td>a</td> <td>0,040</td> <td>0,050</td> <td>0,200</td> <td>0,250</td> <td>0,06</td> <td>0,200</td> <td></td> </tr> <tr> <td>0,500</td> <td>0,300</td> <td>0,900</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>ABNT 1045</td> <td>0,430</td> <td>0,150</td> <td>0,600</td> <td>Máx.</td> <td>Máx.</td> <td>Máx.</td> <td>Máx.</td> <td>Máx.</td> <td>Máx.</td> <td>-----</td> </tr> <tr> <td></td> <td>a</td> <td>a</td> <td>a</td> <td>0,040</td> <td>0,050</td> <td>0,200</td> <td>0,250</td> <td>0,06</td> <td>0,350</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td>0,500</td> <td>0,300</td> <td>0,900</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	AÇO	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%Cu	%Al	1045D (*)	0,430	0,150	0,600	Máx.	Máx.	Máx.	Máx.	Máx.	Máx.	Máx.	ARCELORMITTAL	a	a	a	0,030	0,030	0,200	0,250	0,06	0,350	0,080	0,480	0,300	0,900								1045C (*)	0,430	0,150	0,600	Máx.	Máx.	Máx.	Máx.	Máx.	Máx.	-----	ARCELORMITTAL	a	a	a	0,040	0,050	0,200	0,250	0,06	0,200		0,500	0,300	0,900								ABNT 1045	0,430	0,150	0,600	Máx.	Máx.	Máx.	Máx.	Máx.	Máx.	-----		a	a	a	0,040	0,050	0,200	0,250	0,06	0,350			0,500	0,300	0,900								<p>(*)Aço 1045D: Produzido em usina integrada, Alto-forno+ Aciaria LD: Matéria-prima: Minério de ferro. (*) Aço 1045A: Produzido via Aciaria Elétrica: Matéria-prima: Sucata. Os diâmetros até 38,10 mm podem ser produzidos nos dois aços. Diâmetros acima de 38,10 mm (1.1/2") até 77,79 mm somente no aço 1045A.</p>		
AÇO	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%Cu	%Al																																																																																																					
1045D (*)	0,430	0,150	0,600	Máx.	Máx.	Máx.	Máx.	Máx.	Máx.	Máx.																																																																																																					
ARCELORMITTAL	a	a	a	0,030	0,030	0,200	0,250	0,06	0,350	0,080																																																																																																					
	0,480	0,300	0,900																																																																																																												
1045C (*)	0,430	0,150	0,600	Máx.	Máx.	Máx.	Máx.	Máx.	Máx.	-----																																																																																																					
ARCELORMITTAL	a	a	a	0,040	0,050	0,200	0,250	0,06	0,200																																																																																																						
	0,500	0,300	0,900																																																																																																												
ABNT 1045	0,430	0,150	0,600	Máx.	Máx.	Máx.	Máx.	Máx.	Máx.	-----																																																																																																					
	a	a	a	0,040	0,050	0,200	0,250	0,06	0,350																																																																																																						
	0,500	0,300	0,900																																																																																																												
2 - CARACTERÍSTICAS METALGRÁFICAS:																																																																																																															
<p>Estrutura típica de laminado a quente e normalizado, à partir do qual são trefiladas as barras, constituída de ferrita e perlita lamelar. Micro-inclusões, Máx. 3,0, série fina para os tipos A, B, C e D – ASTM E-45 – Método A Tamanho de Grão Ferrítico 5 a 8 – ASTM E-112 Descarboxinação Parcial Tipo 2 e 3 – Máx. 1,0% do diâmetro da barra. SAE J419 Defeitos Superficiais, Grau 3 conforme NBR 8647</p>																																																																																																															
3 - CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS:																																																																																																															
<p>Os valores das características mecânicas, são médias históricas de ensaios sobre barras produzidas e tem reprodutibilidade, em função da repetitividade da análise química das corridas e da estabilidade dos processos de fabricação. Considerada uma taxa de trefilação com redução em área de +/- 15%. Valores abaixo, sujeitos a variação de +/-5%</p>																																																																																																															
		Barras Ø 04,60 até 77,79mm																																																																																																													
LIMITE DE RESISTENCIA	(LR)	710 a 880 Mpa																																																																																																													
LIMITE DE ESCOAMENTO	(LE)	600 a 740 MPa																																																																																																													
ALONGAMENTO	(A)	A = Min. 8 %																																																																																																													
DUREZA	(D)	210 a 260 HB																																																																																																													