

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

LIKA LIVIA KUSSABA

INVESTIGAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO ATRITO SOBRE
AS FORÇAS DE FORJAMENTO NO PROCESSO DE
RECALQUE

SÃO CARLOS -SP

2021

LIKA LIVIA KUSSABA

INVESTIGAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO ATRITO SOBRE AS FORÇAS DE FORJAMENTO
NO PROCESSO DE RECALQUE

Trabalho de conclusão de curso
apresentado à Universidade Federal de
São Carlos, para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Tácito
Malavolta

São Carlos-SP

2021

Kussaba, Lika Livia

Investigação da influência do atrito sobre as forças de
forjamento no processo de recalque / Lika Livia Kussaba
-- 2021.
58f.

TCC (Graduação) - Universidade Federal de São Carlos,
campus São Carlos, São Carlos
Orientador (a): Prof. Dr. Alexandre Tácito Malavolta
Banca Examinadora: Prof. Dr. Mariano Eduardo Moreno,
Prof. Dr. Sérgio Henrique Evangelista
Bibliografia

1. Forjamento por recalque. 2. Influência do atrito nas
forças de forjamento. 3. Simulação por elementos finitos.
I. Kussaba, Lika Livia. II. Título.

Ficha catalográfica desenvolvida pela Secretaria Geral de Informática
(SIn)

DADOS FORNECIDOS PELO AUTOR

Bibliotecário responsável: Ronildo Santos Prado - CRB/8 7325



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA - CCEMec/CCET

Rod. Washington Luís km 235 - SP-310, s/n - Bairro Monjolinho, São Carlos/SP, CEP 13565-905
Telefone: (16) 33519703 - <http://www.ufscar.br>

DP-TCC-FA nº 28/2021/CCEMec/CCET

Graduação: Defesa Pública de Trabalho de Conclusão de Curso

Folha Aprovação (GDP-TCC-FA)

FOLHA DE APROVAÇÃO

LIKA LIVIA KUSSABA

INVESTIGAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO ATRITO SOBRE AS FORÇAS DE FORJAMENTO NO PROCESSO DE RECALQUE

Trabalho de Conclusão de Curso

Universidade Federal de São Carlos – Campus São Carlos

São Carlos, 29 de novembro de 2021

ASSINATURAS E CIÊNCIAS

Cargo/Função	Nome Completo
Orientador	Alexandre Tácito Malavolta
Membro da Banca 1	Mariano Eduardo Moreno
Membro da Banca 2	Sérgio Henrique Evangelista



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Tácito Malavolta, Docente**, em 29/11/2021, às 18:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Mariano Eduardo Moreno, Docente**, em 29/11/2021, às 18:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Sergio Henrique Evangelista, Docente**, em 29/11/2021, às 18:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufscar.br/autenticacao>, informando o código verificador **0537307** e o código CRC **6E8F3C05**.

AGRADECIMENTO

Gostaria de agradecer primeiramente à minha família, que foi fundamental para eu chegar a este momento como a pessoa que sou. Gostaria de agradecer especialmente aos meus pais, Teresa Harumi Murata Kussaba e Celso Ossamu Kussaba, por estarem sempre ao meu lado, me apoiando em minhas escolhas e serem grandes exemplos em quem pude me espelhar. Ao meu irmão, Victor Akira Murata Kussaba, que além de me incentivar, me proporcionou momentos incríveis de descontração. Gostaria de agradecer também ao meu namorado, Victor Barros Teixeira que me deu suporte intelectual e emocional durante todo esse processo da graduação.

Agradeço também meu professor orientador, Alexandre Tácito Malavolta, que me deu suporte para trabalhar com um tema relacionado à área em que eu já estava atuando, além de todo o auxílio durante a confecção deste trabalho.

Adicionalmente, agradeço a todos os professores da UFSCar com quem eu tive contato que compartilharam diversos conhecimentos e experiências da melhor maneira possível. Assim como meus colegas de curso que passaram pelas mesmas coisas que eu, podendo me dar grande suporte nesta jornada.

RESUMO

Apesar de ser um processo bastante antigo, o forjamento tem grande importância ainda nos dias atuais, sendo aplicado nas mais diversas indústrias (automotiva, aeroespacial, ferramentas, entre outras). Esta variedade deve-se às características que o forjado oferece (alta resistência, uniformidade, possibilidade de produção em larga escala, variedade de tamanhos) associado ao desenvolvimento dos materiais e outros processos de acabamento. Estas peças são fabricadas através de diferentes tipos de forjamento, dentre eles, pode-se citar um bastante comum, o recalque. O recalque trata do achatamento de uma peça de forma simples com consequente alargamento da mesma, a fim de obter formas úteis. Neste trabalho, realizaram-se dois estudos para verificar a influência da força de atrito no processo de forjamento por recalque. Inicialmente, foi considerado o recalque em matriz aberta de um tarugo cilíndrico para validar os métodos da fatia e de simulação por elementos finitos no cálculo das forças. Obteve-se correspondência considerável para os três casos de atrito, porém, para o caso sem atrito, observa-se um resultado aproximadamente 100 kN superior na força máxima. Isto pode ser explicado pois, no software, foi considerado coeficiente de atrito (μ) de 0,0001 e não nulo, já que o software não consegue atingir esta situação fictícia. Em seguida, realizou-se um estudo do forjamento por recalque de um eixo escalonado em três situações, a não utilização de lubrificante, a lubrificação com mistura de grafite e água e ainda a lubrificação com solução salina. Ao plotar as curvas de força por distância entre matrizes para cada um dos casos, notou-se grande semelhança entre elas, exceto pelo valor máximo encontrado, 13 mega-Newton (MN) para o caso sem lubrificação, 10 MN utilizando grafite e água e 12,2 MN com a solução salina.

Palavras-chave: Forjamento. Recalque. Força de forjamento.

ABSTRACT

Although it is a very old process, forging still has great significance until current days, being applied in numerous areas (automotive, aerospace, tooling, and others). This variety is due to the characteristics found in forgings (high resistance, homogeneity, large-scale production possibilities, wide size range) along with material and finishing processes development. These part types are manufactured using different forging types, among which, upsetting can be pointed out as a very common process. Upsetting regards the reduction of the height of a simple-shaped part height resulting in its enlargement, in order to obtain a useful part. This paper studies the influence of lubricant usage in upsetting forging process. At first, the open die upsetting of a cylindrical billet was considered in order to validate the slice and finite elements simulation methods to get to the forging forces. Great correlation was obtained for all three friction-cases, however, a result of approximately 100 kN higher is observed for the maximum force obtained with finite elements simulation. This can be explained by the fact that non-friction situation cannot be reached by the software, therefore, it was adopted 0,0001 as friction coefficient instead of null. Afterwards, a study on upsetting process of a stepped shaft was conducted in three different situations, no lubricant usage, a mix of graphite and water as lubricant and salt solution as lubricant. Plotting the force per tooling distance curves for each case, great resemblance is observed in all three of them, except for the maximum force found, 13 MN for non-lubricated situation, 10 MN using water and graphite and 12,2 MN using salt solution.

Keywords: Forging. Upsetting. Forging forces.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Engrenagem forjada por forjamento de precisão	16
Figura 2 - Exemplos de matriz aberta	19
Figura 3 - Exemplo matriz fechada com rebarba.....	19
Figura 4 - Exemplos matrizes fechadas sem rebarba	20
Figura 5 - Exemplo de recalçamento	20
Figura 6 - a) Extrusão direta; b) Extrusão indireta; 1- Produto, 2 - matriz, 3 - tarugo, 4 - calço, 5 - container inicial, 6 - pistão, 7 - calço da matriz, 8 - conector	21
Figura 7 - Exemplo de operação de hobbing a) confinado; b) livre.....	21
Figura 8 - Forjamento orbital.....	22
Figura 9 - Forjamento de sinterizados.....	22
Figura 10 - Processo de nosing	23
Figura 11 - Cunhagem.....	23
Figura 12 - Processo de ironing	24
Figura 13 - Curvas tensão-deformação do aço para diferentes temperaturas	24
Figura 14 - Componentes prensa tipo martelo de queda	27
Figura 15 - Principais componentes prensa mecânica	28
Figura 16 - Influência da taxa de deformação nas curvas tensão X deformação.....	29
Figura 17 - Principais componentes prensa hidráulica	29
Figura 18 - Sistema de acionamento de prensas hidráulicas a) com acumulador; b) direto .	30
Figura 19 - Componentes de prensas tipo fuso (a) movida por atrito (b) movida por motor elétrico.....	31
Figura 20 - Variáveis do processo de forjamento	33
Figura 21 - Recalque em matriz fechada em prensa horizontal. 1:matriz fixa; 2: matriz móvel; 3 e 4: anteparos; 5: excêntrico; 6: porta-punção; 7: punção.....	34
Figura 22 - Exemplo de curva de força em recalçamento em matriz fechada	35
Figura 23 - Compressão de tarugo cilíndrico. F: força instantânea; R0: raio inicial; h0: altura inicial; h: altura instantânea; p: pressão instantânea; r: distância da fatia ao centro do tarugo; dr: diferencial do raio	37
Figura 24 - Tensões aplicadas em fatia de tarugo cilíndrico sob compressão.....	38
Figura 25 - Interface software Qform	40
Figura 26 - Objetos definidos como peça de trabalho de ferramentas no software	41
Figura 27 - Curva tensão X deformação do material utilizado na simulação	42
Figura 28 - Eixo carretel e principais dimensões.....	43
Figura 29 – Vista isométrica de um dos blocos e corte do punção utilizados no forjamento do eixo sob estudo.....	44
Figura 30 - Primeiro estágio com tarugo	44
Figura 31 - Segundo estágio de forjamento	45
Figura 32 - Terceiro estágio de forjamento	45
Figura 33 - Quarto estágio de forjamento.....	45
Figura 34 - Resultados de tensão efetiva [MPa] para diferentes alturas no caso $\mu=0,2$	50
Figura 35 – Resultados de tensão efetiva [MPa] obtidos em cada um dos estágios para a situação sem lubrificação.....	53
Figura 36 – Resultados de tensão efetiva [MPa] obtidos em cada um dos estágios para a situação com lubrificação de grafite e água	53
Figura 37 - Resultados de tensão efetiva [MPa] obtidos em cada um dos estágios para a	

situação com lubrificação de solução salina 54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características de diferentes tipos de prensas martelo	26
Tabela 2 - Diferentes tipos de prensa de fuso e suas características.....	32
Tabela 3 - Parâmetros de simulação do primeiro estágio para o caso sem lubrificação.....	46
Tabela 4 - Parâmetros de simulação do segundo estágio para o caso sem lubrificação.....	47
Tabela 5 - Resultados obtidos pelo método da fatia para $\mu = 0,0$	48
Tabela 6 - Resultados obtidos pelo método da fatia para $\mu = 0,1$	49
Tabela 7 - Resultados obtidos pelo método da fatia para $\mu = 0,2$	49

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Resultado de força exercida pela ferramenta para o caso sem atrito	50
Gráfico 2 - Resultados de força exercida pela ferramenta para o caso de coeficiente de atrito 0,1	51
Gráfico 3 - Resultados de força exercida pela ferramenta para o caso de coeficiente de atrito 0,2	51
Gráfico 4 - Forças [kN] obtidas para cada situação de lubrificação em função da distância entre ferramentas	55

LISTA DE SIGLAS

ASM American Society of Metals

RAM Random Access Memory

LISTA DE SÍMBOLOS

MN	mega-Newton
TB	terabyte
GB	gigabyte
F	força
R_0	raio inicial
h_0	altura inicial
h	altura instantânea
\bar{p}	pressão média
r	raio instantâneo
d_r	diferencial do raio
d_θ	diferencial do ângulo
σ_θ	tensão angular
σ_r	tensão radial
$d\sigma_r$	diferencial da tensão radial
P	pressão instantânea
μ	coeficiente de atrito
F_r	força radial
σ_e	tensão efetiva
dP	diferencial de pressão
C	constante
°C	graus Celsius
MPa	mega-Pascal
mm	milímetros
Ni	Níquel
Cr	Cromo
Mo	Molibdênio
\emptyset	diâmetro
ε	deformação
F_{anali}	força obtida de maneira analítica
kN	kilo-Newton
U	coeficiente global de transferência da calor

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	17
2.1	OBJETIVO GERAL	17
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1	FORJAMENTO	18
3.1.1	Tipos de forjamento	18
3.1.2	Tipos de equipamento	25
3.2	LUBRIFICAÇÃO	32
3.3	FORJAMENTO POR RECALQUE	34
4	MATERIAIS E MÉTODOS	36
4.1	MATERIAIS	36
4.2	MÉTODOS	36
4.2.1	Método da fatia elementar	36
4.2.2	Método dos elementos finitos	40
4.2.3	Estudo de caso – eixo escalonado	42
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
5.1	RECALQUE EM MATRIZ ABERTA	48
5.2	ESTUDO DE CASO – EIXO ESCALONADO	52
6	CONCLUSÕES	56
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57

1 INTRODUÇÃO

O trabalho em metais tem seus primeiros registros em torno de 8000 a.C. em diversas regiões e era caracterizado pela moldagem de minérios utilizando batidas de pedra (ASM INTERNATIONAL, 1998). Pode-se caracterizar como uma segunda era do trabalho com metais a estampagem de joias e moedas utilizando placas de pedras gravadas. Por volta do século XVIII surgiram as primeiras matrizes gravadas semelhantes às que conhecemos atualmente (CENTRO BRASILEIRO DE FORJARIAS, 1990).

Atualmente, segundo ASM International (2005), uma definição simples do processo é a transformação de um metal de geometria simples em uma forma útil e pode ser realizado de diversas maneiras como a laminação, a extrusão, o forjamento a quente, o forjamento a frio, o forjamento a morno, entre outros.

Além do desenvolvimento do processo, novas tecnologias de materiais e tratamentos térmicos favoreceram o crescimento desta indústria. De acordo com o Centro Brasileiro de Forjarias (1990), o processo é utilizado em diversas indústrias, tais como a automotiva, a aeroespacial, a de armamentos, a de equipamentos hidráulicos, a ferroviária e até mesmo a de instrumentos cirúrgicos.

Apesar de se tratar de um processo bastante antigo, o dinamismo do mercado atual faz com que as variáveis do forjamento estejam sempre se atualizando. Além disto, a urgência destas atualizações torna as simulações numéricas altamente relevantes para este desenvolvimento uma vez que pode substituir alguns testes físicos de maneira muito mais ágil (REIS, 2001).

Nas últimas décadas, pode-se citar o desenvolvimento do forjamento de precisão, que é o forjamento de engrenagens já em seu formato final, sem necessidade de operações posteriores (Figura 1). Um exemplo do auxílio das simulações por elementos finitos é o estudo realizado por Cai, Dean e Hu (2004), que verifica a influência de diferentes geometrias e atrito no fluxo de linhas do forjado e carga necessária.

Figura 1 - Engrenagem forjada por forjamento de precisão



Fonte: Cai, Dean e Hu, 2004

Um processo bastante utilizado no forjamento de peças é o recalque, que consiste na redução de altura do material, pode ocorrer em matriz aberta ou fechada. As principais variáveis que influenciam este processo são o atrito e a rugosidade superficial tanto da ferramenta quanto da peça (MISIRLI, 2014).

Diversos trabalhos foram conduzidos para estudar a influência do atrito no forjamento. Entre eles, Hong e Yeh (2018) realizaram experimentos com ferramentais e peças de diferentes rugosidades superficiais e geraram um modelo de regressão, que foi validado utilizando o software de simulação DEFORM-3D. Malayappan e Esakkimuthu (2006) estudaram a utilização de diferentes lubrificantes em uma das superfícies de contato entre ferramenta e tarugo cilíndrico de alumínio e estabeleceram uma relação entre a utilização de lubrificante e a geometria gerada.

Neste trabalho, será estudada a utilização de três diferentes lubrificantes no forjamento de um eixo escalonado através do processo de recalque, verificando as forças necessárias em cada situação para que se atinja a forma final desejada.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O principal objetivo deste trabalho é avaliar a influência da força de atrito no processo de forjamento, através da análise das forças necessárias no recalçamento de material tanto em casos de matriz aberta quanto matriz fechada utilizando-se de diferentes lubrificantes.

Para o caso de matriz aberta, foram realizados estudos analíticos para a previsão da força de forjamento necessária para o recalçamento de um cilindro, que foram comparadas com valores obtidos através de simulação por método dos elementos finitos. No caso da matriz fechada, foi considerado o recalçamento de um cilindro em um eixo escalonado utilizando uma prensa mecânica horizontal e ferramental de 4 estágios não simultâneos. Foram analisadas as forças em 3 situações diferentes de lubrificação, a sem lubrificação, a utilização de mistura de grafite e água e a utilização de solução salina.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Além do objetivo principal, a monografia visa:

- Fazer a revisão bibliográfica que embasará as análises, permitindo melhor compreensão do processo sendo estudado;
- Identificar métodos de cálculo da força média aplicada durante o processo de forjamento e compará-los;
- Comparar os resultados obtidos analítica e computacionalmente;
- Realizar estudo de caso de forjamento de um eixo escalonado com a finalidade de identificar pontos de melhorias no processo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a fundamentação teórica utilizada no desenvolvimento da monografia, iniciando pela definição de forjamento, passando pelos tipos do processo, modelagem matemática do processo de recalque e, por fim, uma explicação do forjamento horizontal de eixo escalonados.

3.1 FORJAMENTO

O processo de forjamento é definido como a deformação plástica de metais pré-formados em tarugos ou chapas até a forma desejada através da pressão de ferramentas conhecidas como matrizes (ASM INTERNATIONAL, 1998). Este processo se tornou bastante utilizado nas áreas automotiva, aeroespacial, armamentista, hidráulica, entre outras (CENTRO BRASILEIRO DE FORJARIAS, 1990).

Segundo Shaeffer (2021), esta ampla utilização deve-se às vantagens oferecidas pelo produto, sendo as principais:

- Baixo desperdício de material;
- Capacidade de atingir excelentes propriedades mecânicas e metalúrgicas;
- Capacidade de produção de grandes lotes.

Porém, segundo ASM International (2005), os elevados investimentos iniciais nas ferramentas levam à necessidade de produção de lotes grandes. Além da necessidade de diversas etapas para atingir a forma desejada sem que haja defeitos de forjamento ou degradação das propriedades do material.

Além disso, devido ao grande desenvolvimento do processo, pode-se trabalhar com diferentes materiais, tamanhos e formas de forjados e associar os produtos a diversos processos de acabamento e montagem (CENTRO BRASILEIRO DE FORJARIAS, 1990).

3.1.1 Tipos de forjamento

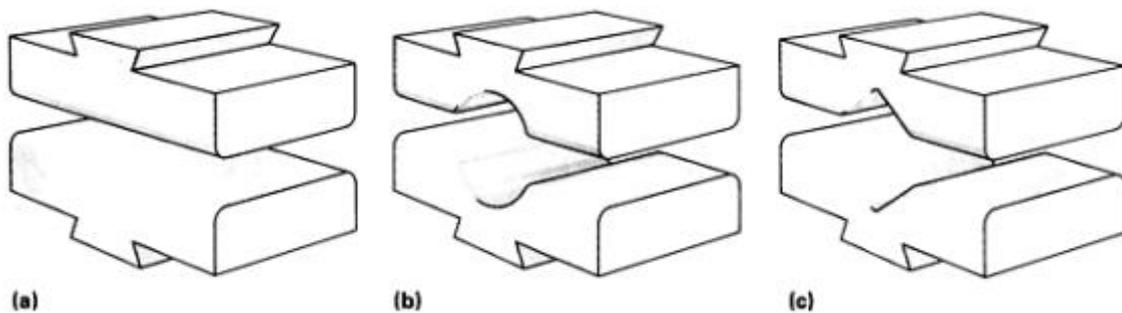
Segundo ASM International (2005), o processo pode ser dividido em alguns tipos, de maneira geral, tem-se o forjamento em matriz, a extrusão, o *hobbing*, o

forjamento orbital, o forjamento de sinterizados, o *nosing*, o cunhamento e o *ironing*.

O forjamento em matriz é aquele em que todas as dimensões da peça são controladas, ou seja, um tarugo é deformado de forma a preencher toda a cavidade impressa da matriz (CENTRO BRASILEIRO DE FORJARIAS, 1990). Este pode ainda ser dividido em forjamento em matriz aberta (Figura 2), fechada com rebarba (Figura 3), fechada sem rebarba (Figura 4) ou recalçamento, que trata da redução de uma das dimensões do tarugo com conseqüente aumento nas outras direções (Figura 5).

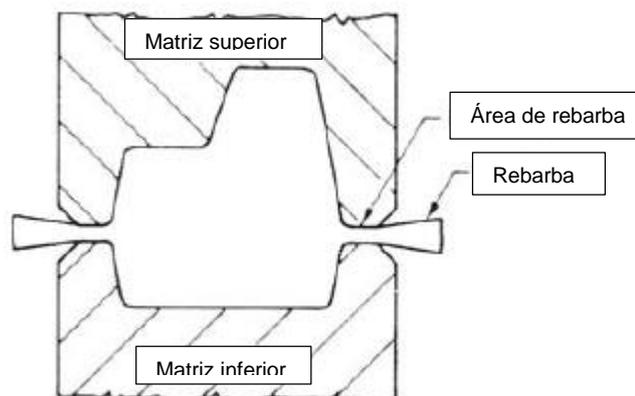
Estes processos são utilizados na fabricação de peças automotivas, ferroviárias, itens de forjamento de precisão, componentes para geradores de energia, entre outras (ASM INTERNATIONAL, 2005).

Figura 2 - Exemplos de matriz aberta



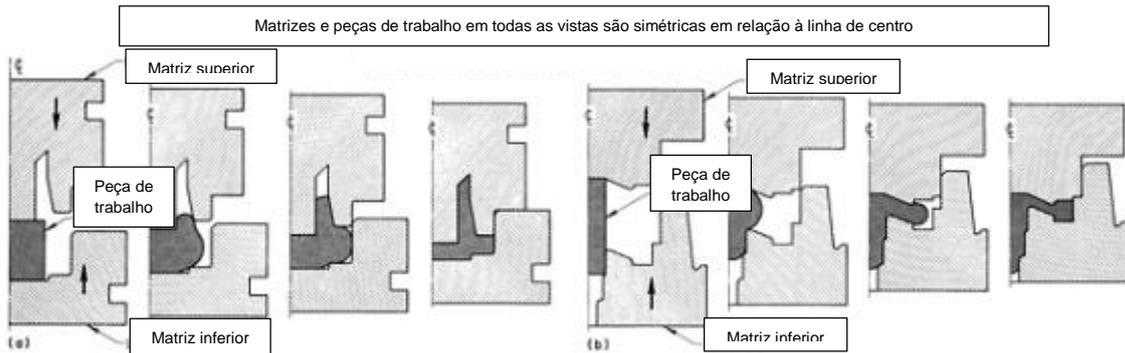
Fonte: ASM International, 1998

Figura 3 - Exemplo matriz fechada com rebarba



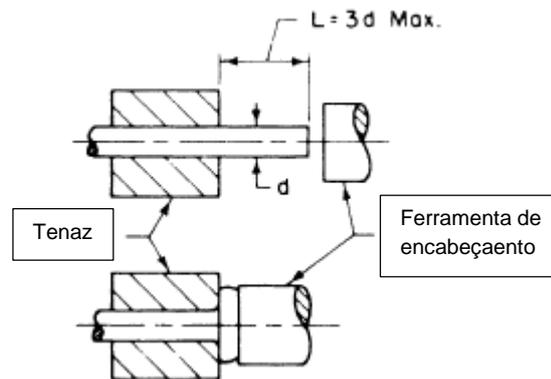
Adaptado de: ASM International, 2005

Figura 4 - Exemplos matrizes fechadas sem rebarba



Adaptado de: ASM International, 1998

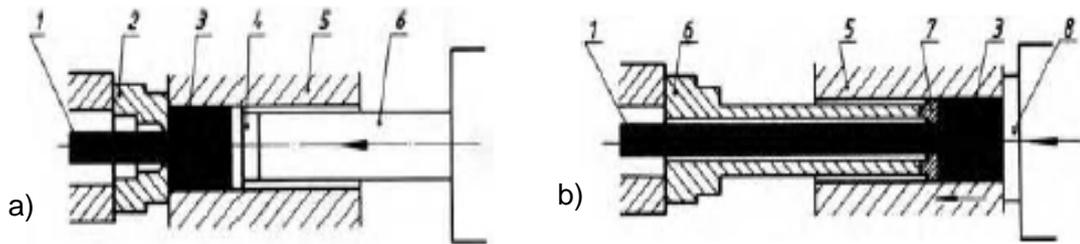
Figura 5 - Exemplo de recalçamento



Adaptado de: ASM International, 2005

A extrusão, segundo Tschachtsch (2005), é um processo em que a pressão em um recipiente contendo a matéria prima aumenta, até que o material comece a sair por um orifício, adquirindo sua forma. Este processo pode ainda ser dividido em extrusão direta, em que o material e o pistão responsável pelo aumento de pressão de deslocam no mesmo sentido, e extrusão indireta, em que o material e pistão deslocam-se em sentidos contrários (Figura 6).

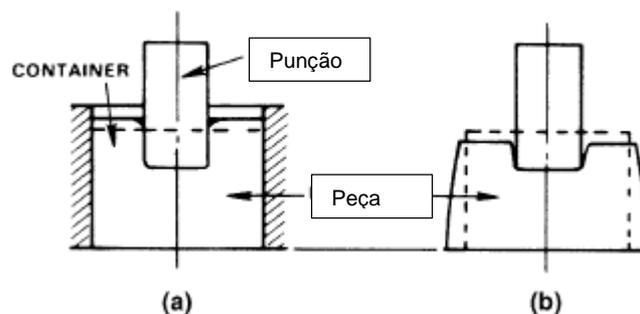
Figura 6 - a) Extrusão direta; b) Extrusão indireta; 1- Produto, 2 - matriz, 3 - tarugo, 4 - calço, 5 - container inicial, 6 - pistão, 7 - calço da matriz, 8 - conector



Fonte: Tschaetsch, 2005

O *hobbing* é uma operação para gerar impressões na peça pressionando um punção contra ela, podendo ser feito em um container, que recebe o nome de confinado (Figura 7a), ou sem o container, chamado de livre (Figura 7b). É um processo bastante utilizado na fabricação de matrizes e moldes com impressões rasas (ASM INTERNATIONAL, 2005).

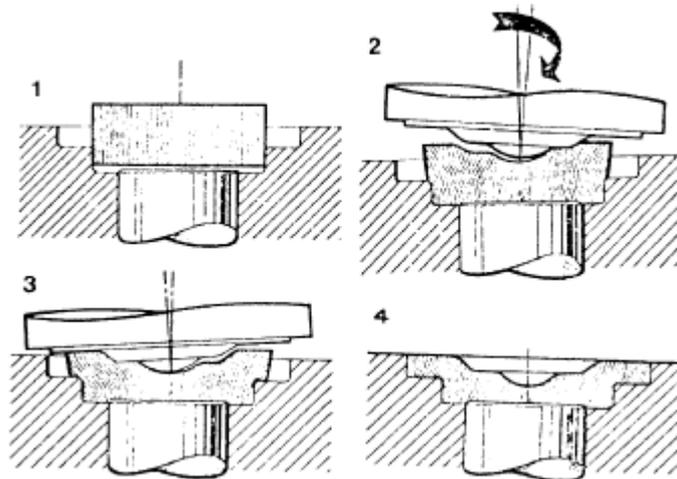
Figura 7 - Exemplo de operação de hobbing a) confinado; b) livre



Adaptado de: ASM International, 2005

Segundo ASM International (2005), o forjamento orbital produz peças com rebaixo semelhante às produzidas em matriz fechada sem rebarba, porém a matriz superior realiza movimento orbital, espiral, planetário ou em linha reta, enquanto a matriz inferior se movimenta em direção a ela (Figura 8). É utilizado na fabricação de engrenagens cônicas, anéis e capas de mancais.

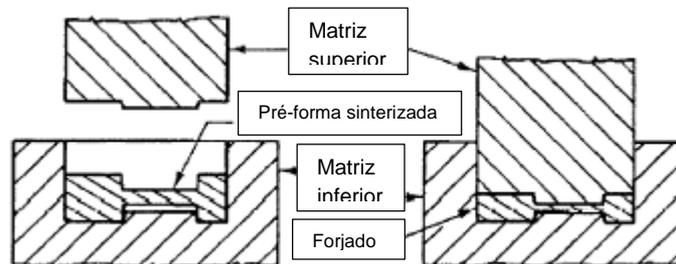
Figura 8 - Forjamento orbital



Fonte: ASM International, 2005

Ainda segundo a ASM International (2005), o forjamento de sinterizados, como o nome sugere, é o forjamento de pó de metal previamente sinterizado (Figura 9). É um processo bastante utilizado na indústria automobilística.

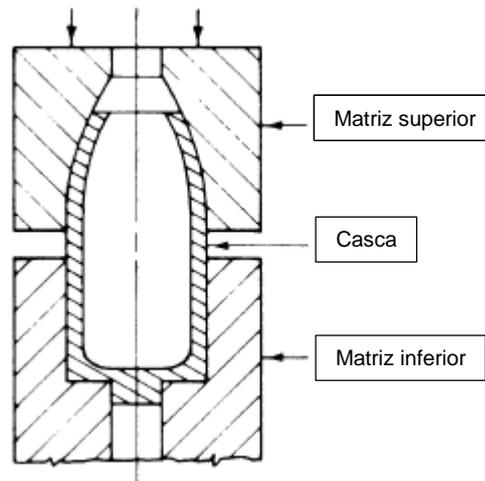
Figura 9 - Forjamento de sinterizados



Adaptado de : ASM International, 2005

O *nosing* trata do fechamento da abertura de um tubo ou casca através da pressão de uma matriz impressa (Figura 10), utilizado no forjamento de containers de gás sob pressão (ASM International, 2005).

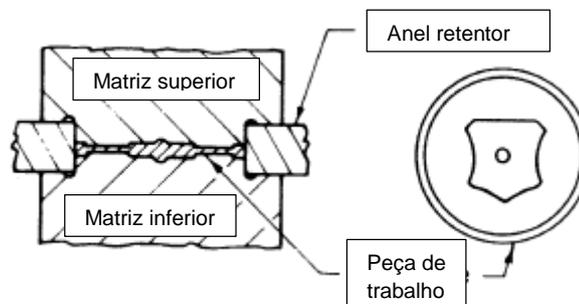
Figura 10 - Processo de nosing



Adaptado de: ASM International, 2005

Segundo Tschaetsch (2005), o processo de cunhagem trata da alteração da espessura da peça trabalhada, sem grandes deslocamentos de material (Figura 11). Seus produtos podem ser utilizados tanto pela indústria mecânica quanto elétrica, para itens decorativos, entre outros.

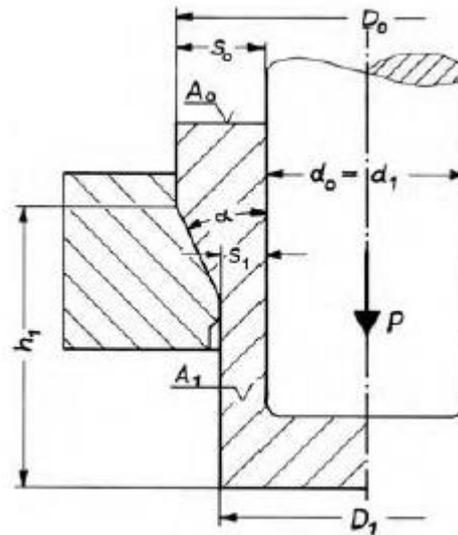
Figura 11 - Cunhagem



Adaptado de: ASM International, 2005

Finalmente, o processo de *ironing* realiza a redução da espessura da parede de estruturas em forma de casca, caso esta parede não seja capaz de absorver a tensão aplicada, o fundo da peça pode ser danificado (Figura 12). Conforme dito anteriormente, é um processo para produção de peças tipo casca para diversas aplicações, podendo até mesmo produzir superfícies internas cônicas.

Figura 12 - Processo de ironing

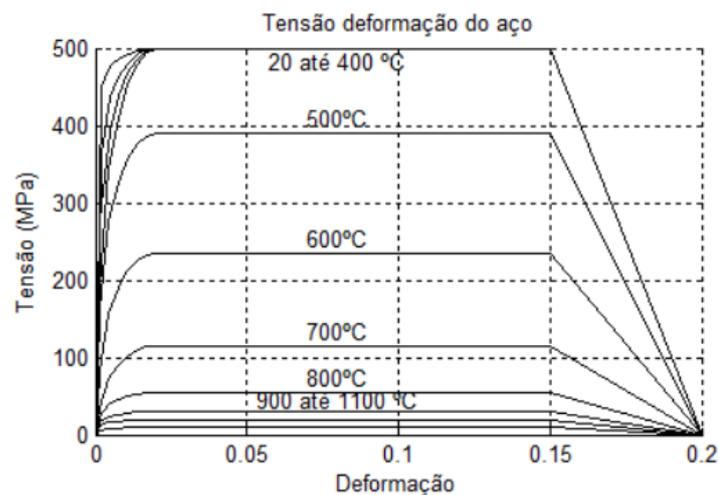


Fonte: Tschaetsch, 2005

Além destas divisões, o processo de forjamento pode ser caracterizado pela temperatura em que a peça a ser deformada se encontra. Pode-se falar de forjamento a quente, a morno ou ainda a frio, porém a divisão entre estes não está muito bem definida.

O forjamento a quente é o mais amplamente utilizado, uma vez que os metais a altas temperaturas, apresentam menor resistência e maior ductilidade (Lange, 1985), como é ilustrado na Figura 13, ou seja, menor esforço é necessário para gerar a mesma deformação.

Figura 13 - Curvas tensão-deformação do aço para diferentes temperaturas



Fonte: Suaznábar; Silva; Pierin, 2014.

O forjamento a frio, apesar do nome, não acontece através do resfriamento da matéria prima, mas sim sem a adição de energia a ela, ou seja, à temperatura ambiente (Lange, 1985). Como demonstrado pelo gráfico da Figura 13, a baixas temperaturas, o metal apresenta maior resistência à deformação, tornando maiores os esforços necessários para atingir determinada deformação.

Segundo a ASM International (2005), o forjamento a morno ocorre abaixo da temperatura de recristalização, que para os aços, significa temperaturas em torno de 700 a 800 °C. Este tipo de processo é utilizado em substituição ao forjamento a frio a fim de reduzir as tensões necessárias.

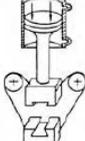
Tanto o forjamento a frio quanto o forjamento a morno são bastante utilizados no processo de forjamento de precisão, por apresentarem boas tolerâncias dimensionais e acabamento superficial (ASM INTERNATIONAL, 2005).

3.1.2 Tipos de equipamento

Quando se trata de equipamento, o forjamento utiliza prensas que podem ser divididas em martelo, mecânica, hidráulica e de fuso.

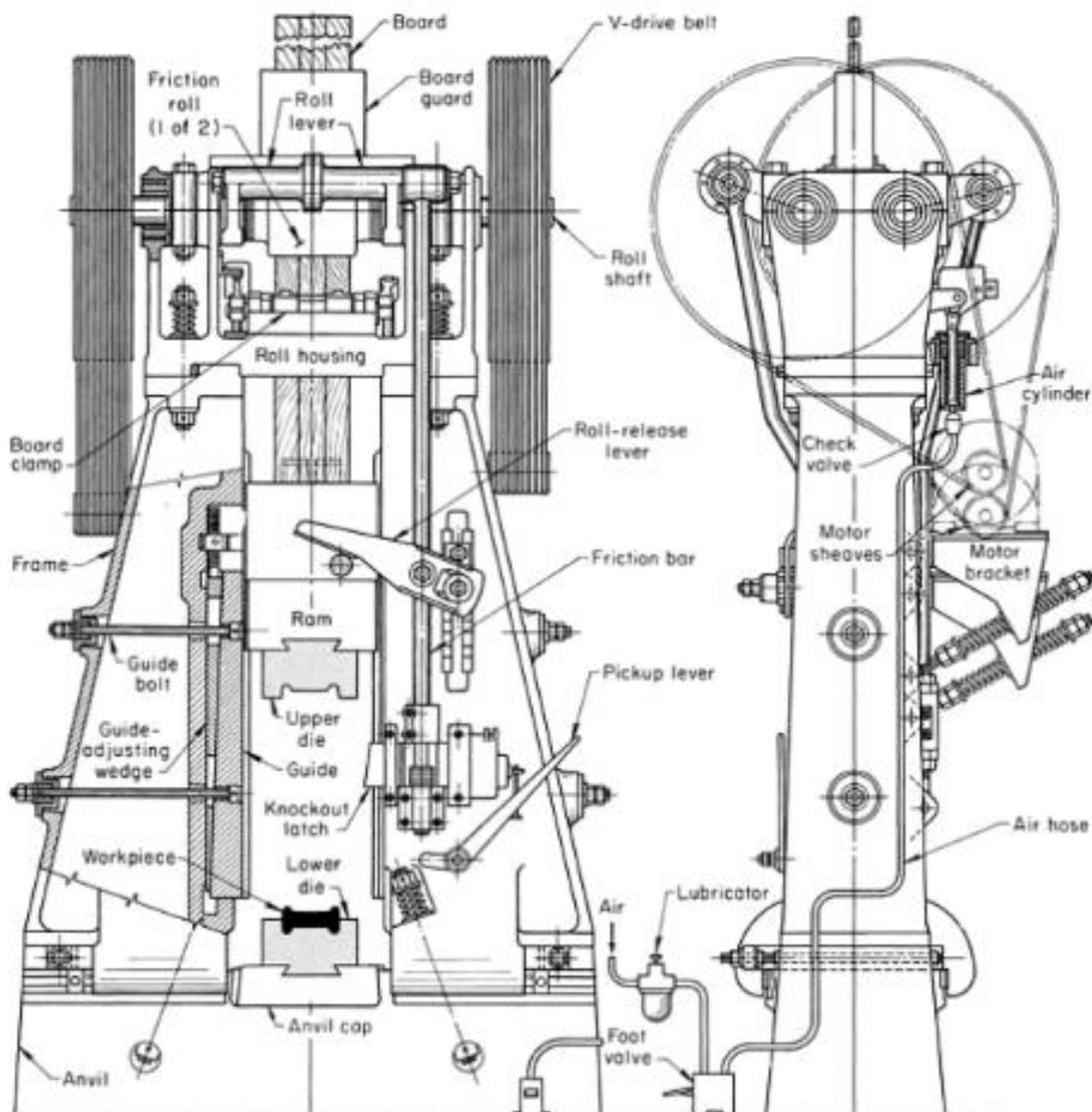
As prensas do tipo martelo são as mais largamente utilizadas devido à variedade de aplicações que consegue atender, além de ser a de menor investimento inicial (ASM INTERNATIONAL, 1998). Estas prensas são ainda divididas de acordo com seu tipo de acionamento, podendo ser de queda, ou seja, utiliza a gravidade; de dupla ação, que utiliza tanto pressão pneumática ou hidráulica quanto a gravidade para acelerar o martelo; ou ainda de contra golpe, que possui dois martelos que se movimentam um em direção ao outro (TSCHAETSCH, 2005). A Tabela 1 mostra algumas características de cada uma delas. Os principais componentes de uma prensa tipo martelo podem ser vistos na Figura 14.

Tabela 1 - Características de diferentes tipos de prensas martelo

Elements and parameters	Hammers with anvil block			Double-acting hammers	Hammers without anvil block	
	Drop hammers				Counterblow hammers	
	Coupling with belt	with chain	with hydraulics			with bands
						
Lifting mechanism	Belt	Chain	Piston rod	Piston rod	Differential piston	
Pressure mechanism	–	–	–	Piston	Piston	
Energy for working movement	Free fall			Air Compressed oil	Air Compressed oil	Compressed oil
Max. drop height in m	2	1.3	1.3	1.3	–	–
Ram acceleration a (m/s ²)	$a < g$			$a > g$	$a > g$	
Impact velocity v_A (m/s)	approx. 5			6	6 – 8	8 – 14
Work capacity $W = m \cdot v^2/2$	$m \cdot g \cdot h$			$m \cdot g \cdot H + P \cdot 10^{-1} \cdot A \cdot H$	$\frac{(m_1 + m_2)}{2} \cdot v^2$	
Max. work capacity W (kNm)	80	100	160	200	1000	1000

Fonte: Tschaetsch, 2005.

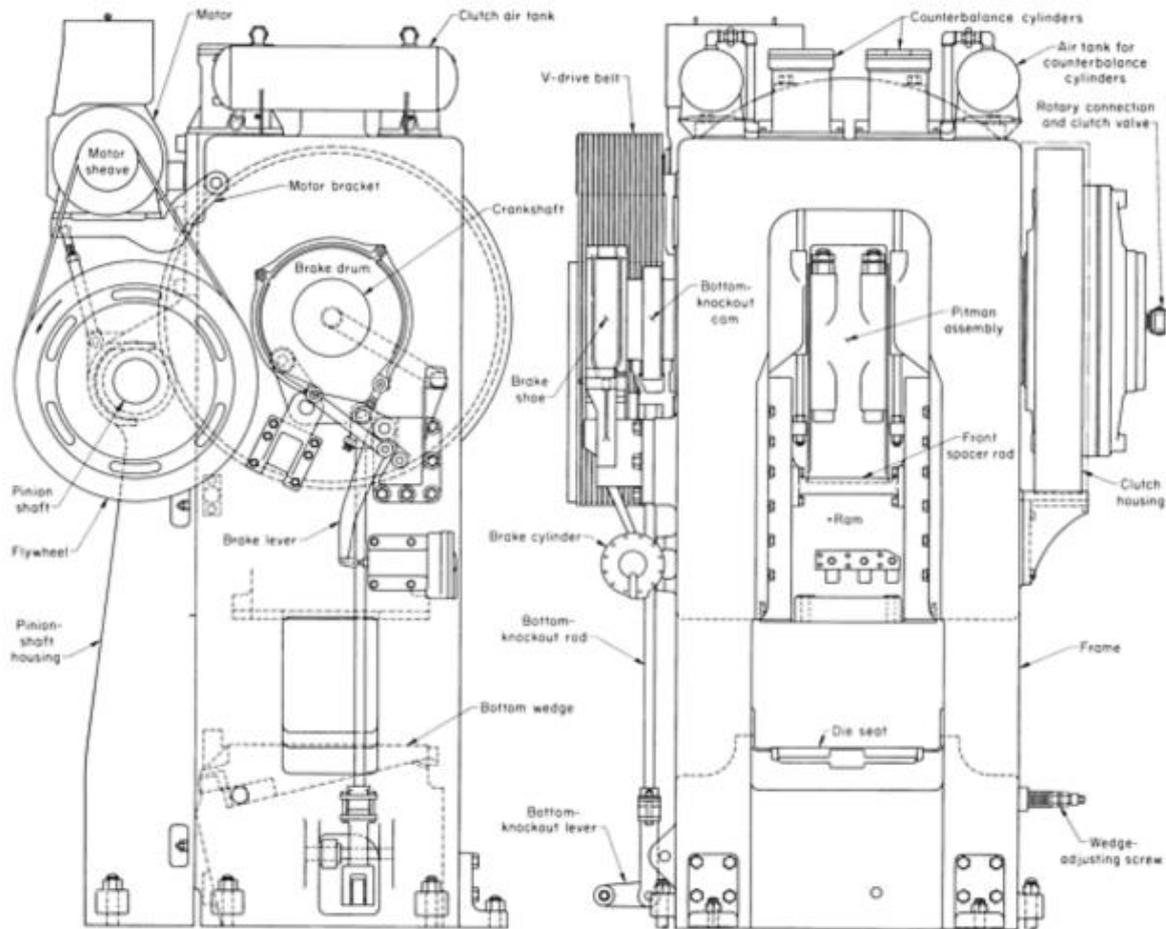
Figura 14 - Componentes prensa tipo martelo de queda



Fonte: ASM International, 1998.

Nas prensas mecânicas, o movimento circular do motor elétrico é transferido para a matriz superior, associada ao punção da máquina, através de mecanismos como engrenagens, eixo excêntrico e alavancas. A matriz inferior fica estacionária, junto à estrutura do equipamento. Este tipo de prensa é classificado de acordo com a força que é capaz de exercer, podendo variar entre 2,7 e 142 MN (ASM International, 1998). Os principais componentes deste tipo de prensa estão demonstrados na Figura 15.

Figura 15 - Principais componentes prensa mecânica

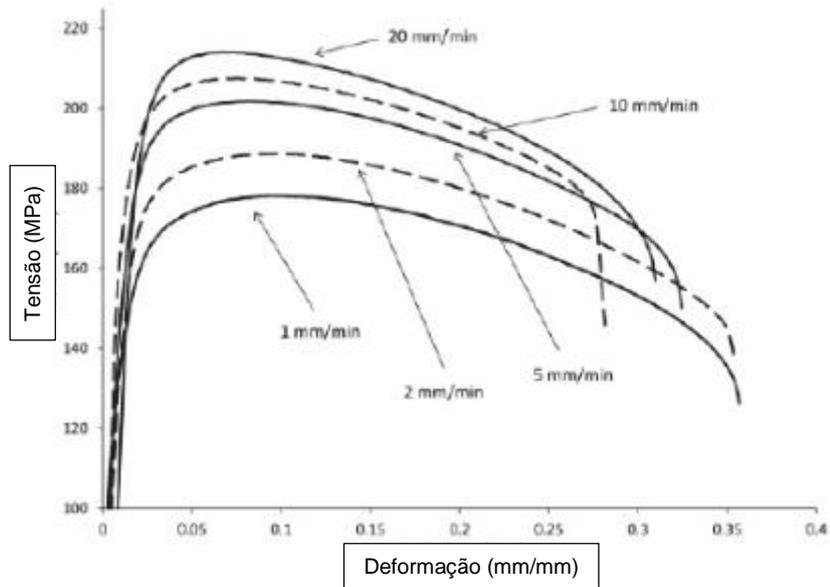


Fonte: ASM International, 1998.

Quando comparadas às prensas do tipo martelo, as prensas mecânicas apresentam tolerâncias finais mais apertadas e menor tempo de produção. Apesar disto, apresentam elevado custo inicial e aplicação mais restrita uma vez que não é capaz de alterar a força de impacto (ASM International, 1998).

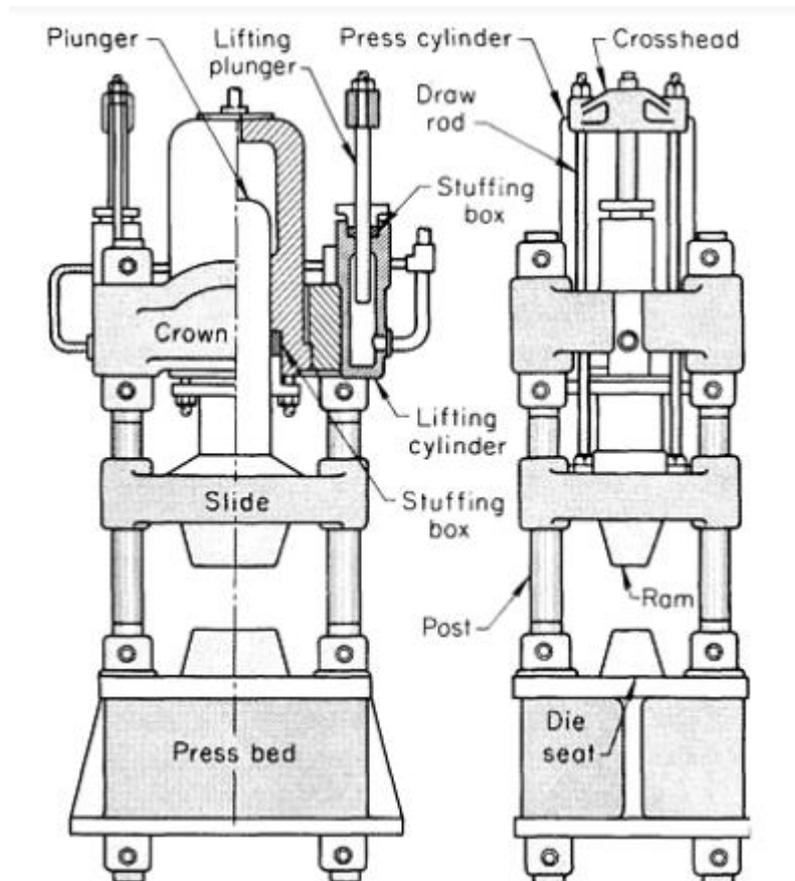
Ainda de acordo com a ASM International (1998), as prensas hidráulicas são compostas por sistemas de alta pressão compostos por cilindros e pistões hidráulicos que realizam rápido movimento de aproximação seguido de amassamento lento da peça final, o que permite controle da taxa de deformação, que exerce grande influência nas propriedades mecânicas dos metais (Figura 16). Os principais componentes de prensas hidráulicas podem ser vistos na Figura 17.

Figura 16 - Influência da taxa de deformação nas curvas tensão X deformação



Adaptado de: Quintana et.al., 2016

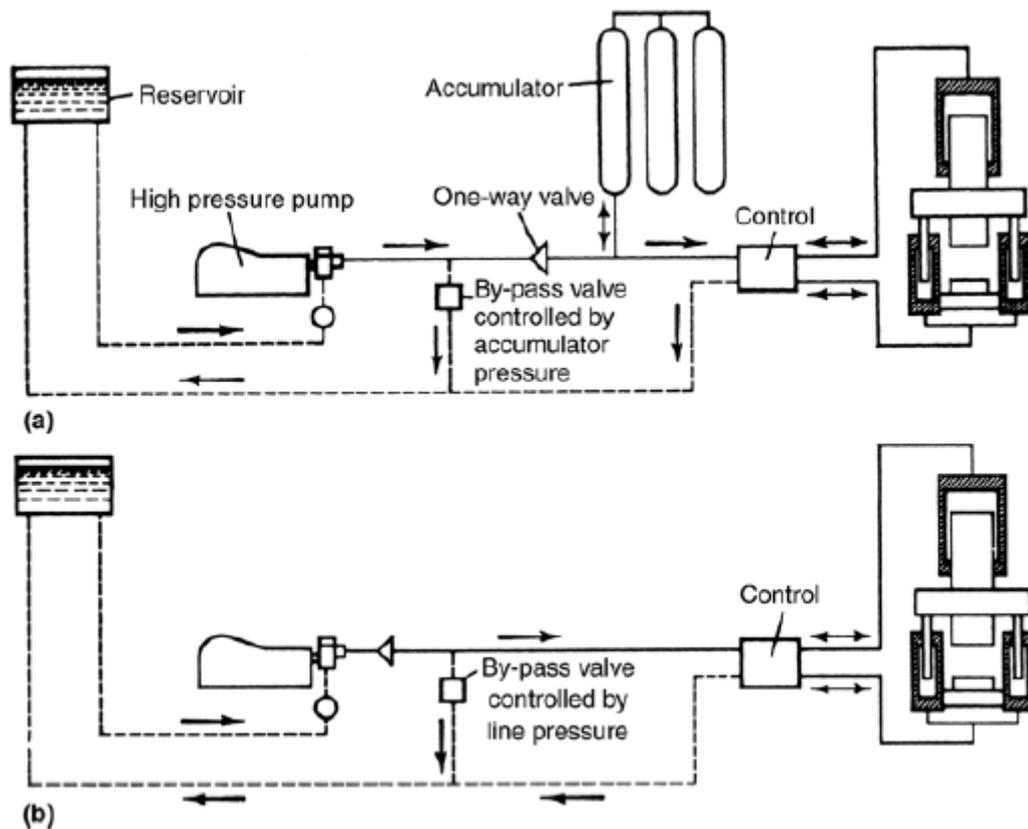
Figura 17 - Principais componentes prensa hidráulica



Fonte: ASM International, 1998.

De acordo com a ASM International (2005), seu acionamento pode ser feito de maneira direta, em que a bomba está diretamente ligada na prensa (Figura 18b), ou utilizando-se de um acumulador de pressão, que como o próprio nome diz, armazena pressão que pode ser utilizada na linha de acionamento da prensa (Figura 18a).

Figura 18 - Sistema de acionamento de prensas hidráulicas a) com acumulador; b) direto

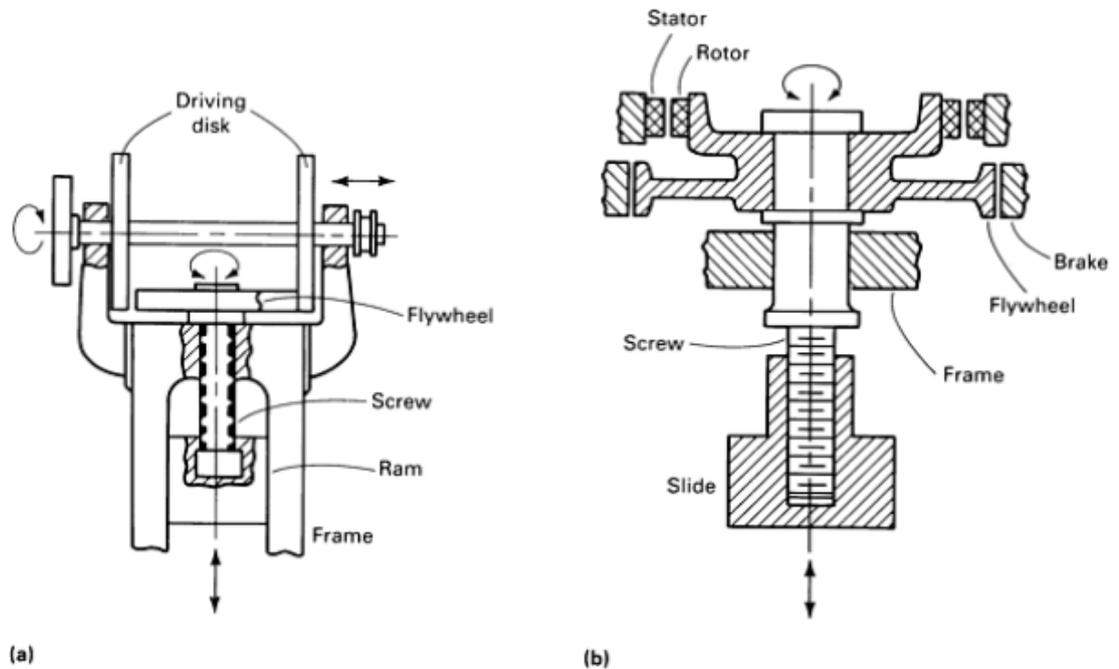


Fonte: ASM International, 2005.

Este tipo de equipamento apresenta vantagens de controle das características do impacto em qualquer região do curso da prensa, o que pode ser utilizado para melhorar manutenção e vida de ferramentas. Porém apresenta investimento inicial ainda mais elevado e menor taxa de produtividade que as mecânicas.

Segundo Tschaetsch (2005), as prensas do tipo fuso, assim como as prensas mecânicas, possuem um volante, porém seu movimento circular é transmitido ao socador através de um eixo roscado. É bastante utilizada para forjamento de pás de turbinas (ASM International, 1998). Duas configurações de prensas do tipo fuso e seus principais componentes podem ser observadas na Figura 19.

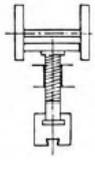
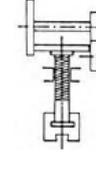
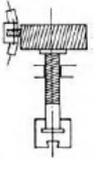
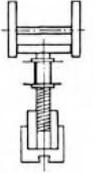
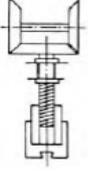
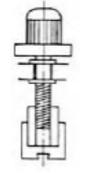
Figura 19 - Componentes de prensas tipo fuso (a) movida por atrito (b) movida por motor elétrico



Fonte: ASM International, 1998.

Assim como as prensas do tipo martelo, as de fuso podem ser divididas de acordo com o acionamento utilizado. A Tabela 2 mostra algumas das características dos diferentes tipos de prensas de fuso.

Tabela 2 - Diferentes tipos de prensa de fuso e suas características

	Screw presses with spindle moved axially by friction			Screw presses with fixed spindles (Vincent presses)			
	Three-disc screw press	Four-disc screw press	Hydraulically-driven screw press	Three-disc screw press	Conical disc screw press	Screw press with direct electro-magnetic drive	Wedge screw press
Energy transmission	 Friction-driven	 Friction-driven	 Pinion	 Friction-driven	 Friction-driven	 Direct	 Wedge
Max. work capacity (kNm)	800	no longer built		800	no longer built		800
Nominal press force (max.) (kN)	31 500	140 000		20 000	125 000		31 500
Recoil impact force (max.) (kN)	63 000	300 000		40 000	250 000		63 000
Impact velocity v in m/s	0.7 to 1 m/s						
Work capacity (kNm)	$W = \frac{\omega^2 \cdot I_d}{2} = \left(\frac{\pi \cdot n_f}{30} \right)^2 \cdot \frac{I_d}{2}$						
Required rotation speed n_f for W_1 (n_f in min^{-1})	$n_f = \sqrt{\frac{182 \cdot W_1}{I_d}} \quad W_1 = \text{work capacity required for forming}$						

Fonte: Tschachtsch, 2005.

Estas prensas disponibilizam maior energia por golpe do que prensas mecânicas, melhor vida de ferramenta e velocidade de impacto (ASM International, 1998). Contudo, somente permitem operação com força total na região central do socador e possui menor taxa de produção (Lange, 1985).

3.2 LUBRIFICAÇÃO

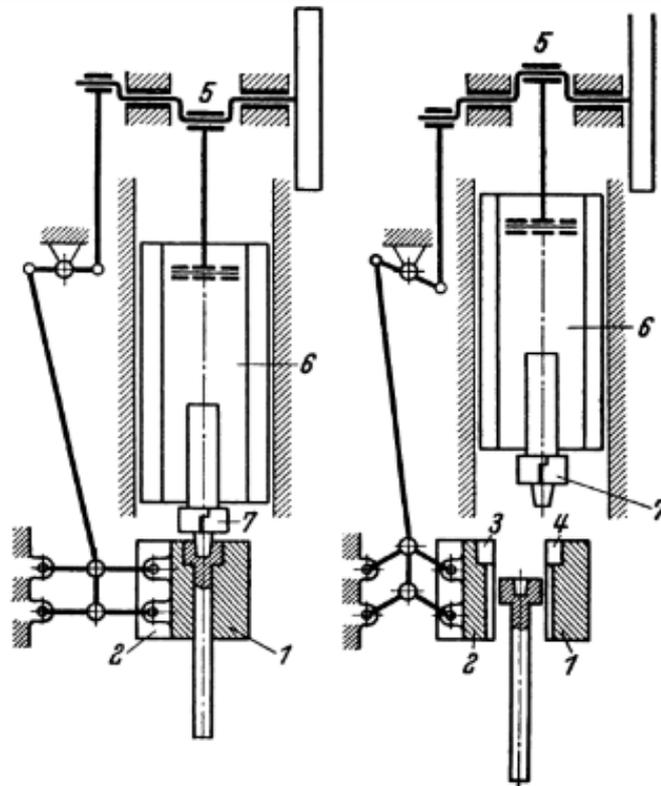
Da Figura 20, nota-se que a lubrificação é uma das 4 variáveis do processo que influenciam na força e energia necessárias para o processo (ASM International, 1998). Geralmente, seleciona-se o lubrificante com menor coeficiente de atrito a fim de minimizar a força requerida (LANGE, 1985).

3.3 FORJAMENTO POR RECALQUE

O processo de recalque pode ser caracterizado pela redução da altura de um tarugo em matriz aberta (MISIRLI, 2014), ou ainda como a redução da altura e conseqüente conformação de um tarugo em matriz fechada (ASM INTERNATIONAL, 2005). Pode ser utilizado na fabricação de peças simples como parafusos e engrenagens ou ainda de formas mais complexas como ferramentas que requerem recalque e furação simultâneas, apresentando ampla variedade de tamanhos (ASM INTERNATIONAL, 1998).

O recalque em matriz aberta é bastante utilizado para fabricação de pré-formas que serão utilizadas em prensas verticais e, portanto, muitas vezes utiliza-se o mesmo equipamento. O recalque em matriz fechada contudo, é feito em prensa horizontal, que tem como principais componentes o bloco fixo, o bloco móvel, o porta-punções e o excêntrico Figura 21.

Figura 21 - Recalque em matriz fechada em prensa horizontal. 1:matriz fixa; 2: matriz móvel; 3 e 4: anteparos; 5: excêntrico; 6: porta-punção; 7: punção

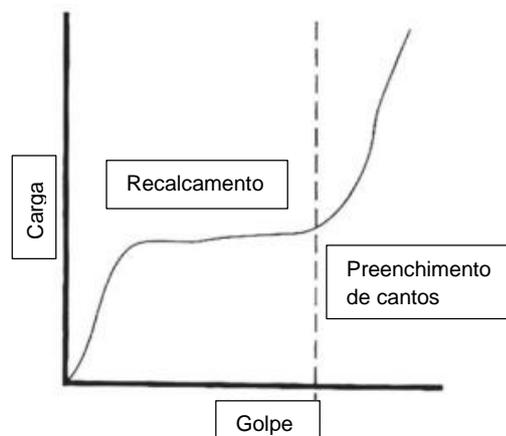


Fonte: ASM International, 2005

Segundo ASM International (2005), para determinar a viabilidade do processo de forjamento, inicialmente deve-se determinar a força e energia requeridas pelo processo. Estes dois fatores irão determinar o tamanho da máquina a ser utilizada, que, quando superdimensionada, gera custos extras e menores taxas de produção e quando subdimensionada, frequentes falhas por manutenção.

No caso do recalque em matriz fechada, as forças necessárias são bem maiores que em matriz aberta, já que o material passa a sofrer resistência das paredes do ferramental até preencher toda a cavidade. Um exemplo de curva de força por avanço do punção está ilustrado na Figura 22. Observa-se que a curva apresenta um aumento inicial, uma faixa de baixa inclinação e, após a linha tracejada, começa a subir significativamente devido ao contato entre peça e matriz, fazendo com que a prensa tenha que forçar o material para preencher os cantos do ferramental (ASM International, 2005).

Figura 22 - Exemplo de curva de força em recalque em matriz fechada



Fonte: ASM Intenational, 2005

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta parte do trabalho, serão apresentados os materiais utilizados para fazer as simulações de forjamento assim como a maneira com que foram conduzidos os estudos.

4.1 MATERIAIS

Para este estudo utilizou-se um notebook Lenovo Z400, com Windows 10 64-bit, Intel Core i7-3520M, HD de 1 terabyte (TB) e 8 gigabyte (GB) de *random access memory* (RAM). Para as simulações, foi instalado no notebook descrito o software Qform na versão 10.1.3. Para a comparação entre os métodos, utilizou-se o Excel 2013.

No estudo de caso, além dos materiais citados anteriormente, utilizou-se também o software SolidWorks na versão 2017 para fazer os desenhos a serem carregados no Qform para simulação.

4.2 MÉTODOS

Aqui serão descritas as metodologias utilizadas durante o trabalho.

Conduziu-se um primeiro estudo de comparação entre o método da fatia elementar e o método dos elementos finitos para obtenção das forças de forjamento. Para isto, considerou-se um processo de recalque em matriz aberta de um corpo cilíndrico de cobre aplicando-se 3 diferentes coeficientes de atrito.

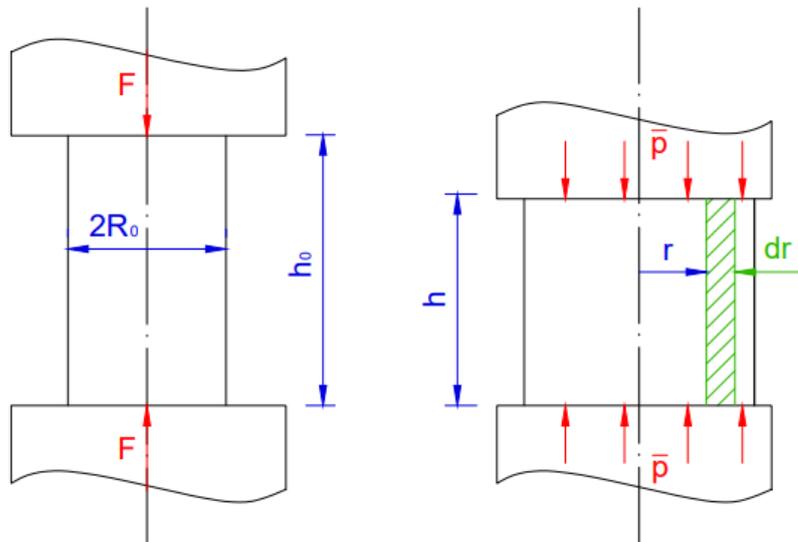
Em seguida, estudou-se a influência, sobre as forças de forjamento, da variação do lubrificante no processo de recalque em matriz fechada de um eixo escalonado. Neste caso, os resultados foram obtidos somente através de simulações computacionais.

4.2.1 Método da fatia elementar

Os esforços do processo de forjamento podem ser obtidos analiticamente por alguns métodos, entre eles o da deformação homogênea, o da fatia elementar, do limite superior e inferior, das linhas de deslizamento, entre outros (MÉTODOS...

Desconhecido). Neste trabalho, será utilizado o método da fatia elementar, em que é considerada a aplicação de força em um tarugo cilíndrico, reduzindo sua altura e aumentando seu diâmetro (Figura 23).

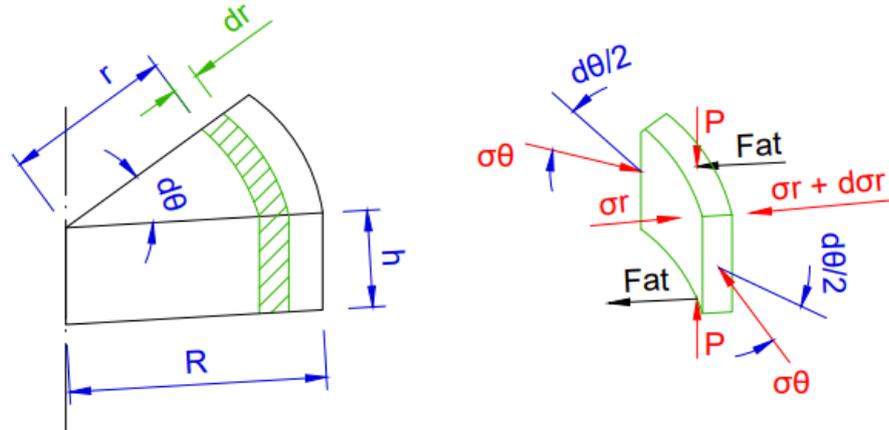
Figura 23 - Compressão de tarugo cilíndrico. F : força instantânea; R_0 : raio inicial; h_0 : altura inicial; h : altura instantânea; \bar{p} : pressão instantânea; r : distância da fatia ao centro do tarugo; dr : diferencial do raio



Fonte: Autora.

Como o nome do método diz, considera-se somente uma fatia do tarugo para analisar as cargas nele aplicadas adotando-se um sistema de coordenadas cilíndrico. A Figura 24 mostra estas cargas, sendo $d\theta$ o diferencial do ângulo, P a pressão instantânea, σ_θ a tensão angular, σ_r a tensão radial, F_{at} a força de atrito e $d\sigma_r$ o diferencial da tensão radial.

Figura 24 - Tensões aplicadas em fatia de tarugo cilíndrico sob compressão



Fonte: Autora.

Considerando-se o equilíbrio das forças atuando na direção radial para obter a equação 1.

$$\sum F_r = 0 \rightarrow \sigma_r(rd\theta h) - (\sigma_r + d\sigma_r)(r + dr)(d\theta h) - 2\mu P(rd\theta dr) + 2\sigma_\theta \sin \frac{d\theta}{2}(hdr) = 0 \quad (1)$$

Desprezando os termos de segunda ordem e dividindo a equação por $rdrd\theta h$, obtém-se a equação 2.

$$\frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{r} - \frac{d\sigma_r}{dr} - \frac{2\mu P}{h} = 0 \quad (2)$$

Considerando o problema quase isostático, pode-se adotar a simplificação mostrada na equação 3, que quando colocada na equação 2, resulta na equação 4.

$$\sigma_r = \sigma_\theta \quad (3)$$

$$-\frac{d\sigma_r}{dr} = \frac{2\mu P}{h} \quad (4)$$

O critério de von-Misses está apresentado e desenvolvido conforme axissimetria da equação 3 na equação 5.

$$\sigma_e = \sqrt{\frac{(-\sigma_r + \sigma_\theta)^2 + (-\sigma_r + P)^2 + (-\sigma_\theta + P)^2}{2}} = -\sigma_r + P \quad (5)$$

Como a tensão de escoamento é uma constante, derivando a equação 5, obtém-se a equação 6.

$$d\sigma_r = dP \quad (6)$$

Substituindo na equação 4, obtemos o resultado apresentado na equação 7 que, quando integrada, resulta na equação 8.

$$\frac{dP}{P} = -\frac{2\mu}{h} dr \quad (7)$$

$$\ln P = -\frac{2\mu r}{h} + C \quad (8)$$

Na superfície externa do tarugo (posição $r = R$), a tensão radial é nula, portanto, a equação 5 se torna a equação 9.

$$\sigma_e = P \quad (9)$$

Aplicando a equação 8 no ponto na superfície do tarugo (posição $r = R$), temos o apresentado na equação 10.

$$C = \ln \sigma_e + \frac{2\mu R}{h} \quad (10)$$

Substituindo a constante encontrada na equação 8, finalmente obtemos a equação 11 para pressão em função do raio, em que ε é a deformação, calculado pela equação 12.

$$P = \sigma_e \varepsilon^{\frac{2\mu}{h}(R-r)} \quad (11)$$

$$\varepsilon = \ln \frac{h}{h_0} \quad (12)$$

Manipulando a definição de pressão mostrada na equação 13 e substituindo a pressão pela equação 11, obtém-se a equação 14 para a força de forjamento.

$$P = \frac{F}{\pi r^2} \quad (13)$$

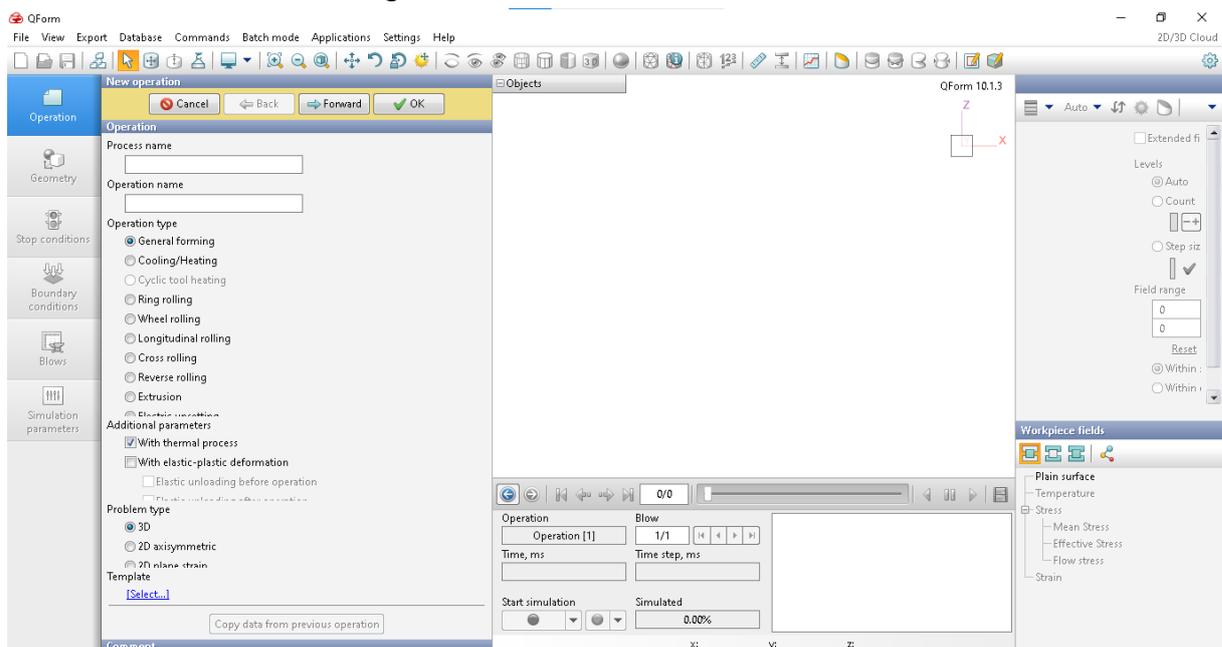
$$F = \sigma_e \varepsilon \frac{2\mu}{h} (R-r) \pi r^2 \quad (14)$$

4.2.2 Método dos elementos finitos

As simulações computacionais foram realizadas utilizando o software Qform 10.1.3 (Figura 25), desenvolvido para a simulação, pelo método dos elementos finitos, de diversos processos de conformação de metais. Ele é capaz de simular problemas termo-mecânicos considerando as condições de perdas para o ambiente, perdas devidas à interação entre peça e ferramenta e características do equipamento.

Inicia-se a simulação criando um novo processo.

Figura 25 - Interface software Qform



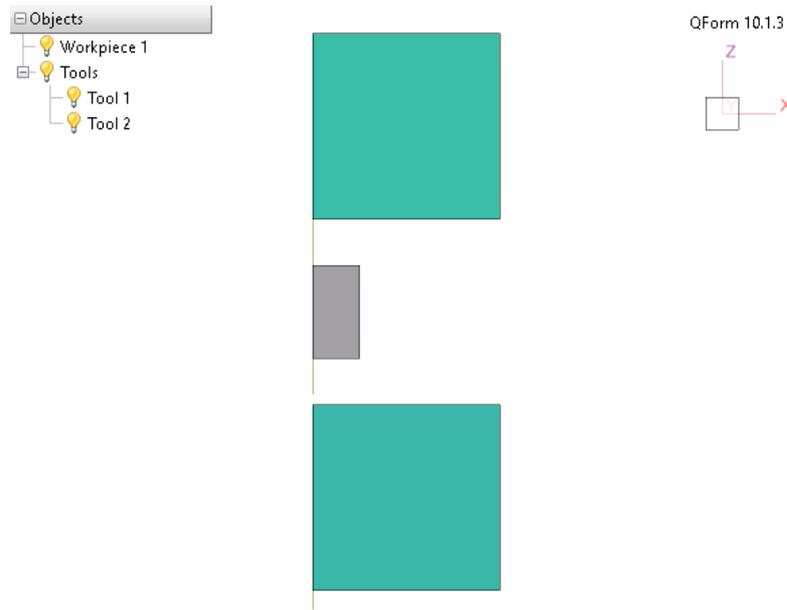
Fonte: Autora

Neste momento pode-se nomear o processo a ser simulado, assim como a operação dentro do processo. O tipo de operação deve ser definido como *General forming*, os parâmetros adicionais, com processo térmico e o tipo de problema alterado para 2D axissimétrico.

Na etapa seguinte, utilizou-se a ferramenta geometria paramétrica para desenhar metade do tarugo e das ferramentas separadamente, uma vez que na etapa

anterior já foi definido como problema axissimétrico. As geometrias devem ser corretamente convertidas para peça de trabalho e ferramentas 1 e 2, os objetos devem ficar conforme Figura 26.

Figura 26 - Objetos definidos como peça de trabalho de ferramentas no software

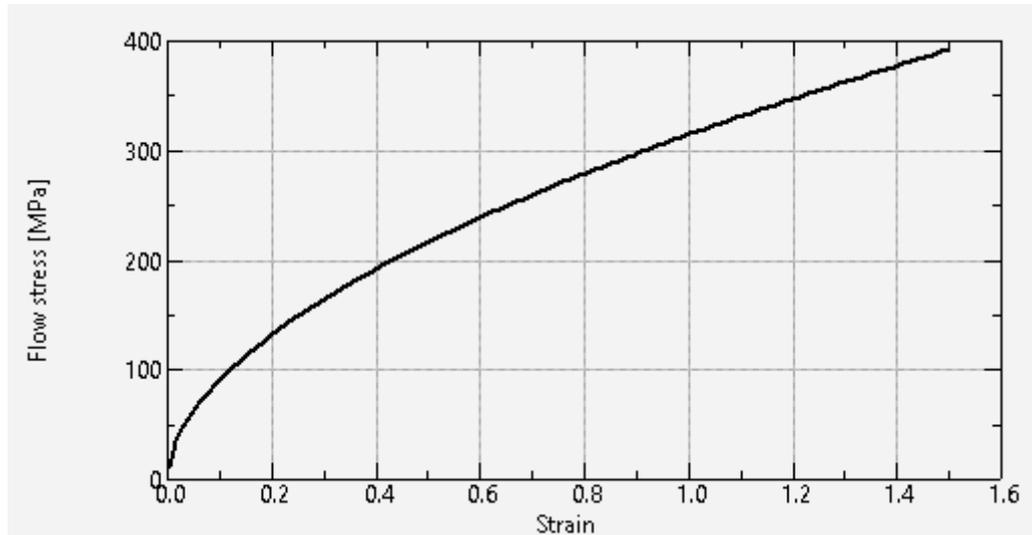


Fonte: Autora

No módulo de parâmetros da peça, utilizou-se uma lei de potência, dada pela equação 15, para representar o comportamento do material, assumido como cobre recozido a 25°C, gerando assim a curva mostrada na Figura 27.

$$\sigma = 315\varepsilon^{0,54} \text{ MPa} \quad (15)$$

Figura 27 - Curva tensão X deformação do material utilizado na simulação



Fonte: Autora

Passando para o próximo módulo, define-se a ferramenta 1 com capacidade de 10 MN e a 2, +OZ, que representa o travamento da base da matriz X-X. O lubrificante deve ser criado um para cada um dos coeficientes de atrito utilizando a lei de Coulomb. Utilizou-se o H13 HRC50 da base de dados como o material das ferramentas e a mesma temperatura da peças.

Nas condições de parada, estabeleceu-se a distância de 6,25 mm, que representa os 75% de redução da altura pretendidos.

Já para as condições de contorno, criou-se um ambiente com temperatura de 30°C, que é a média de um ambiente de uma forjaria que trabalha principalmente com processos a quente.

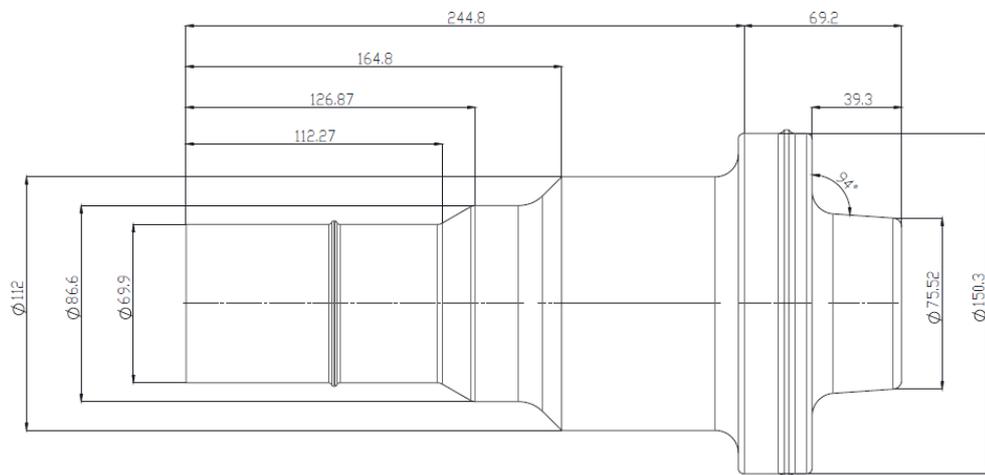
Os próximos módulos foram deixados conforme padrão do software. Com estas configurações, o programa foi rodado 3 vezes, uma para cada coeficiente de atrito. Os gráficos foram gerados pelo próprio software, porém exportados para Excel para facilitar a comparação dos resultados.

4.2.3 Estudo de caso – eixo escalonado

Para o estudo de caso, com o auxílio do software Qform, foi avaliada a variação do esforço de forjamento variando-se o lubrificante utilizado no processo de forjamento de um eixo escalonado em prensa mecânica horizontal, também conhecida como recalçadora.

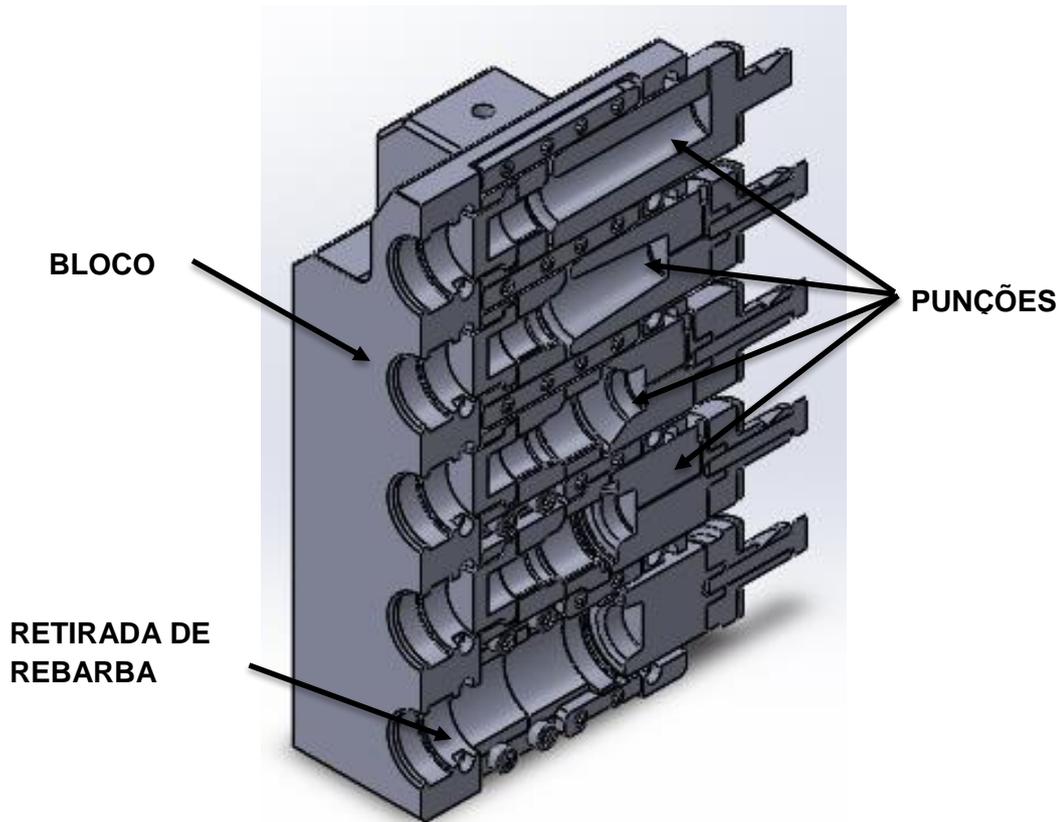
A peça em estudo é um eixo do tipo carretel (eixo com engrenagens usinadas em seu comprimento) utilizado em transmissões de caminhões, mostrado na Figura 28 somente com as cotas principais devido a questões de sigilo da empresa fabricante. É um item forjado sequencialmente em uma prensa horizontal de 16 MN com 5 estágios não simultâneos, sendo o último deles somente para retirada da rebarba sem preenchimento de novas cavidades e, portanto, não foi considerado durante a simulação. Um dos lados do ferramental, assim como um corte dos punções utilizados podem ser observados na Figura 29.

Figura 28 - Eixo carretel e principais dimensões



Fonte: Autora

Figura 29 – Vista isométrica de um dos blocos e corte do punção utilizados no forjamento do eixo sob estudo



Fonte: Autora.

Nota-se que o ferramental é dividido em diversos componentes, isto se deve à utilização do mesmo bloco com diferentes montagens para diferentes peças. Para a simulação, contudo, esta divisão de componentes não é significativa e pode ser desconsiderada, restando somente a forma interna do bloco e o punção.

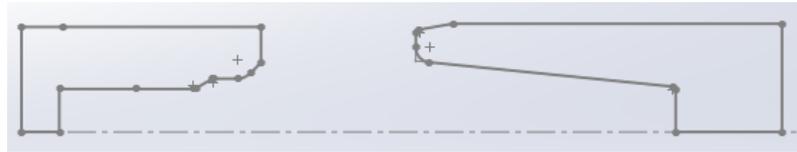
Como o eixo é axissimétrico, para cada estágio, foi desenhado um *sketch* com metade da forma interna do bloco e do punção separadamente com uma linha de centro. Para a primeira forma, desenhou-se também metade do tarugo (Figura 30) com $\text{Ø}69,85$ mm e 628 mm de comprimento. Os demais estágios estão demonstrados nas Figura 31, Figura 32 e Figura 33 na sequência em que ocorrem.

Figura 30 - Primeiro estágio com tarugo



Fonte: Autora

Figura 31 - Segundo estágio de forjamento



Fonte: Autora

Figura 32 - Terceiro estágio de forjamento



Fonte: Autora

Figura 33 - Quarto estágio de forjamento



Fonte: Autora

Iniciaram-se as simulações pelo caso sem lubrificação, para o qual, foram definidos os parâmetros mostrados na Tabela 3..

Para o segundo estágio, os parâmetros estão na Tabela 4. O terceiro estágio segue exatamente os mesmos parâmetros do anterior. Já para o quarto estágio, o único parâmetro que sofrerá alteração é a distância da condição de parada, que deve ser estabelecida em 3 mm.

Além da situação sem lubrificação, simulou-se a utilização de uma mistura de grafite e água e ainda uma solução salina como lubrificantes, para os três casos, considerou-se a lei de Levanov. Os parâmetros de simulação são mantidos para todos os estágios, alterando-se somente o lubrificante na seção de parâmetros da ferramenta, selecionando o equivalente especificado na base do software.

Tabela 3 - Parâmetros de simulação do primeiro estágio para o caso sem lubrificação

Parâmetros da simulação 1° estágio		
Operação	Tipo da operação	Deformação genérica
	Tipo do problema	2D axissimétrico
Geometria	Carregar arquivo	Arquivo DXF feito em SolidWorks
Parâmetros da peça	Material	20NiCrMo3 (1-6527)
	Temperatura	1200 °C
Parâmetros da ferramenta	Acionamento 1	Prensa mecânica de 16 MN porém com curso de 1500 mm
	Acionamento 2	+OZ
	Lubrificante	Sem lubrificação
	Material	H13HRC50
	Temperatura	160°C
Condições de parada	Distância	20 mm
Condições de contorno	Ambiente	Temperatura de 30°C
Golpes	Número de golpes	1
	Resfriamento no ar	5 segundos
	Resfriamento na matriz	2 segundos
Parâmetros de simulação	-	Mantidos os padrões definidos pelo software

Fonte: Autora

Tabela 4 - Parâmetros de simulação do segundo estágio para o caso sem lubrificação

Parâmetros da simulação 2° estágio		
Operação	Tipo da operação	Deformação genérica
	Tipo do problema	2D axissimétrico
Geometria	Carregar arquivo	Arquivo DXF feito em SolidWorks
Parâmetros da peça	Material	Obtidos do estágio anterior
	Temperatura	
Parâmetros da ferramenta	Acionamento 1	Prensa mecânica de 16 MN porém com curso de 1500 mm
	Acionamento 2	+OZ
	Lubrificante	Sem lubrificação
	Material	H13HRC50
	Temperatura	160°C
Condições de parada	Distância	15 mm
Condições de contorno	Ambiente	Temperatura de 30°C
Golpes	Número de golpes	1
	Resfriamento no ar	2 segundos
	Resfriamento na matriz	2 segundos
Parâmetros de simulação	-	Mantidos os padrões definidos pelo software

Fonte: Autora

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 RECALQUE EM MATRIZ ABERTA

Tanto para o método da fatia quanto para o método de elementos finitos, considerou-se um tarugo cilíndrico de $\varnothing 25\text{mm}$ e 25mm de altura de cobre recozido com redução de 75% na altura para 3 situações de atrito diferentes, sem atrito, $\mu = 0,1$ e $\mu = 0,2$.

Aplicando o método da fatia apresentado na seção anterior aos casos de $\mu=0,0$, $\mu = 0,1$ e $\mu = 0,2$, foram obtidos, respectivamente, os resultados apresentados nas Tabela 5, Tabela 6, Tabela 7, em que a coluna 1 representa a porcentagem de redução da altura; a coluna 2 representa a altura em mm do tarugo; a coluna 3 contém a área da circunferência de contato entre peça e ferramenta em mm^2 ; a coluna 4 mostra o raio em mm; a coluna 5 representa a deformação calculada pela equação 12; a coluna 6 mostra a tensão obtida aplicando a lei de potência do material apresentada na equação 14 em MPa; a coluna 7 contém a pressão obtida pela equação 11 em MPa; e finalmente, a coluna 8 mostra a força calculada pela equação 14 dividida por 1000 para adequação de unidade (kN).

Tabela 5 - Resultados obtidos pelo método da fatia para $\mu = 0,0$

Situação 1: $\mu = 0,0$							
Redução	h [mm]	A [mm^2]	R [mm]	ϵ	σ [MPa]	P [MPa]	Fanali [kN]
0%	25,000	490,874	12,500	0,000	0,000	0,000	0,000
15%	21,250	577,499	13,558	0,163	118,086	118,086	68,195
30%	17,500	701,248	14,940	0,357	180,525	180,525	126,593
45%	13,750	892,498	16,855	0,598	238,597	238,597	212,947
60%	10,000	1227,185	19,764	0,916	300,475	300,475	368,738
75%	6,250	1963,495	25,000	1,386	375,762	375,762	737,806

Fonte: Autora

Tabela 6 - Resultados obtidos pelo método da fatia para $\mu = 0,1$

Situação 2: $\mu = 0,1$

Redução	h [mm]	A [mm ²]	R [mm]	ϵ	σ [MPa]	P [MPa]	Fanali [kN]
0%	25,000	490,874	12,500	0,000	0,000	0,000	0,000
15%	21,250	577,499	13,558	0,163	118,086	123,109	71,095
30%	17,500	701,248	14,940	0,357	180,525	190,800	133,798
45%	13,750	892,498	16,855	0,598	238,597	258,096	230,350
60%	10,000	1227,185	19,764	0,916	300,475	340,066	417,324
75%	6,250	1963,495	25,000	1,386	375,762	475,965	934,555

Fonte: Autora

Tabela 7 - Resultados obtidos pelo método da fatia para $\mu = 0,2$

Situação 3: $\mu = 0,2$

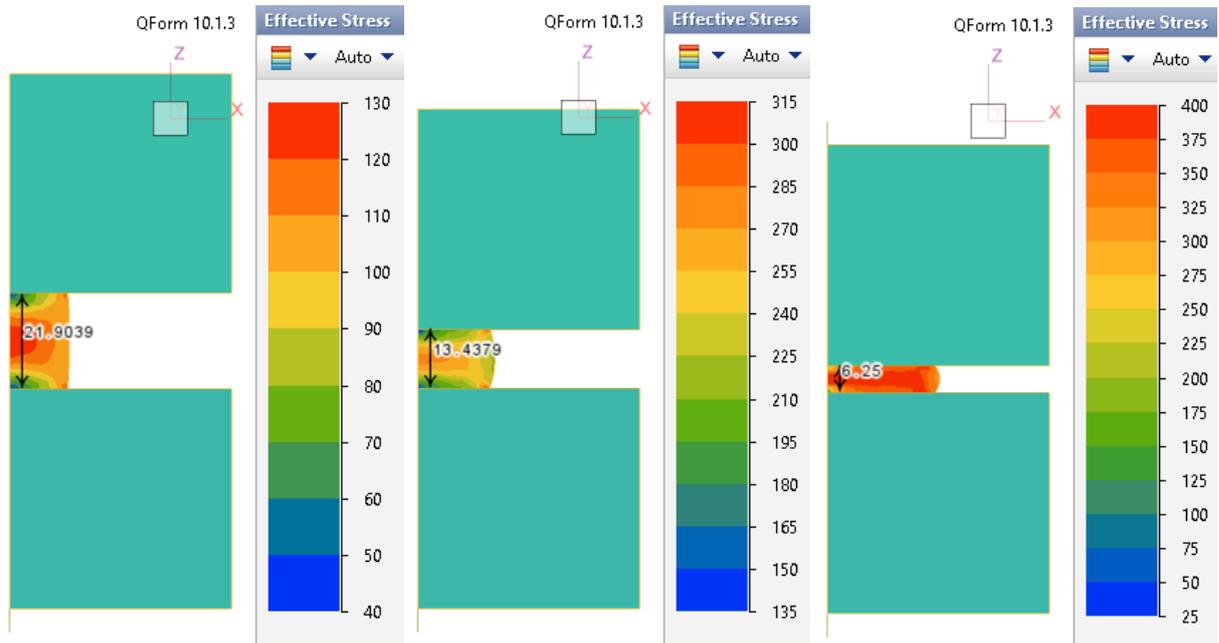
Redução	h [mm]	A [mm ²]	R [mm]	ϵ	σ [MPa]	P [MPa]	Fanali [kN]
0%	25	490,8739	12,5	0	0	0	0
15%	21,250	577,499	13,558	0,163	118,086	128,132	73,996
30%	17,500	701,248	14,940	0,357	180,525	201,075	141,003
45%	13,750	892,498	16,855	0,598	238,597	277,594	247,752
60%	10,000	1227,185	19,764	0,916	300,475	379,657	465,910
75%	6,250	1963,495	25,000	1,386	375,762	576,168	1131,303

Fonte: Autora

Os resultados de tensão efetiva [MPa] obtidos pela simulação computacional para diferentes alturas no caso $\mu = 0,2$ estão demonstrados na Figura 34.

Para o caso sem atrito, foi considerado uma aproximação de $\mu=0,0001$ pois a inexistência de atrito é uma situação ideal e o software não consegue atingir resultados representativos.

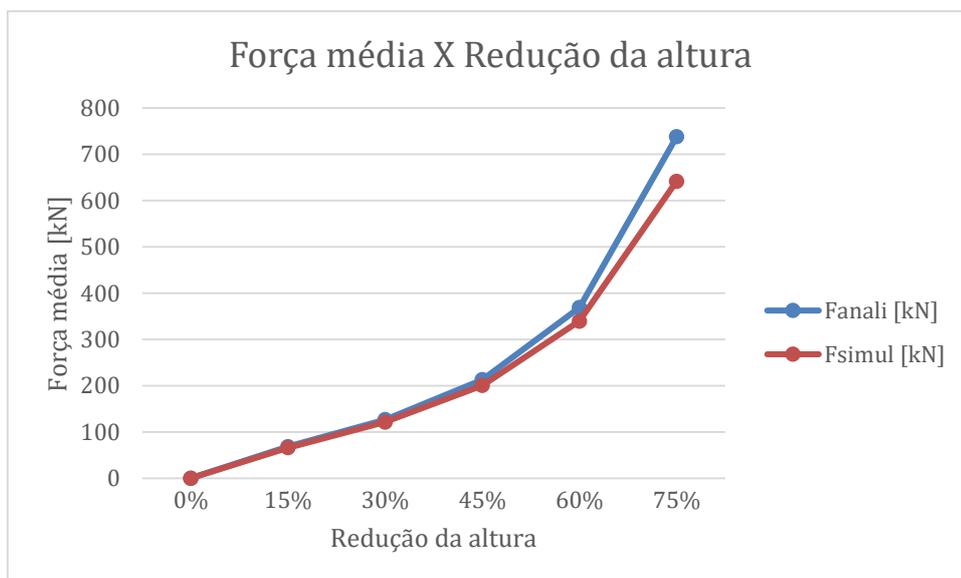
Figura 34 - Resultados de tensão efetiva [MPa] para diferentes alturas no caso $\mu=0,2$



Fonte: Autora

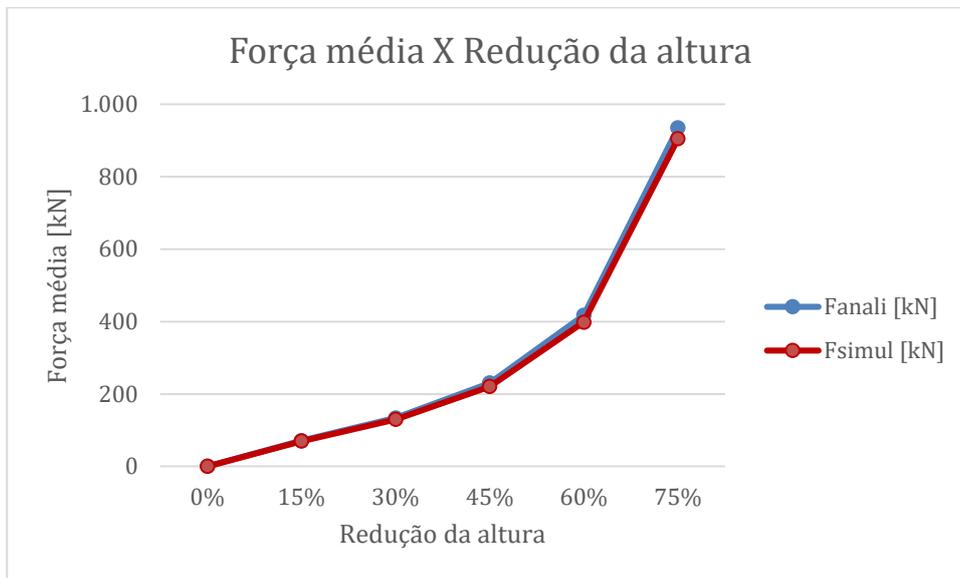
Para facilitar a comparação dos resultados obtidos, utilizando o recurso de plotagem e exportação de dados do software, os resultados foram plotados em módulo nos Gráfico 1, Gráfico 2 e Gráfico 3 respectivamente para os casos sem atrito, $\mu = 0,1$ e $\mu = 0,2$.

Gráfico 1 - Resultado de força exercida pela ferramenta para o caso sem atrito



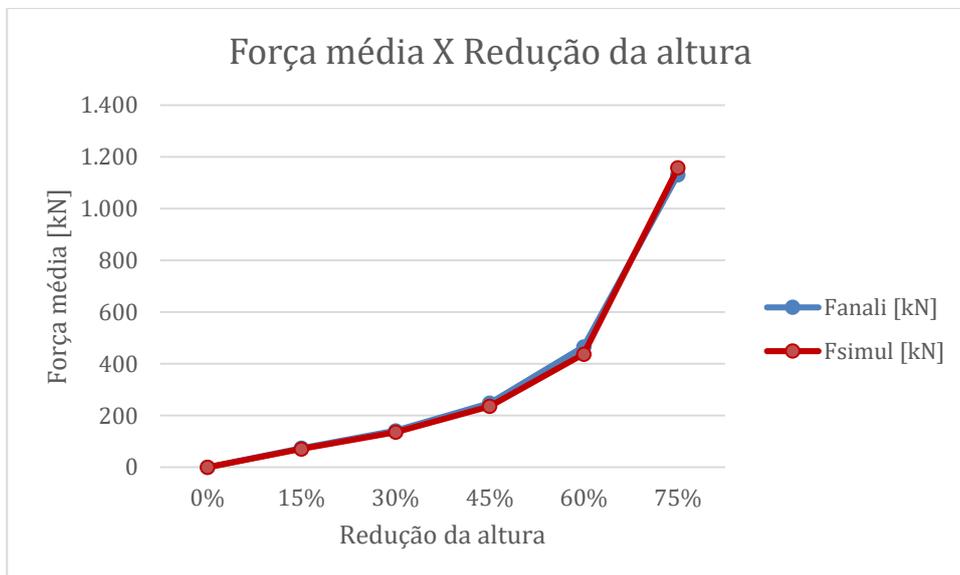
Fonte: Autora

Gráfico 2 - Resultados de força exercida pela ferramenta para o caso de coeficiente de atrito 0,1



Fonte: Autora

Gráfico 3 - Resultados de força exercida pela ferramenta para o caso de coeficiente de atrito 0,2



Fonte: Autora

Para os 3 casos, nota-se que a força média necessária para que o recalque aconteça aumenta de maneira exponencial com a diminuição da altura, conforme já era de se esperar, uma vez que o material que sofre deformação plástica encrua, tornando-se mais resistente à deformação.

Outro fator que se destaca é que para o primeiro caso (sem atrito), as forças obtidas analítica e computacionalmente apresentam distanciamento de aproximadamente 100 kN ao final da conformação. Isto pode ser explicado pois o coeficiente de atrito adotado no software não foi zero, já que ele não consegue simular esta situação ideal. Ainda, o software tem maior quantidade de parâmetros de entrada que o método da fatia elementar, ou seja, neste último, mais simplificações são adotadas, a exemplo da especificação do tipo de equipamento utilizado no processo.

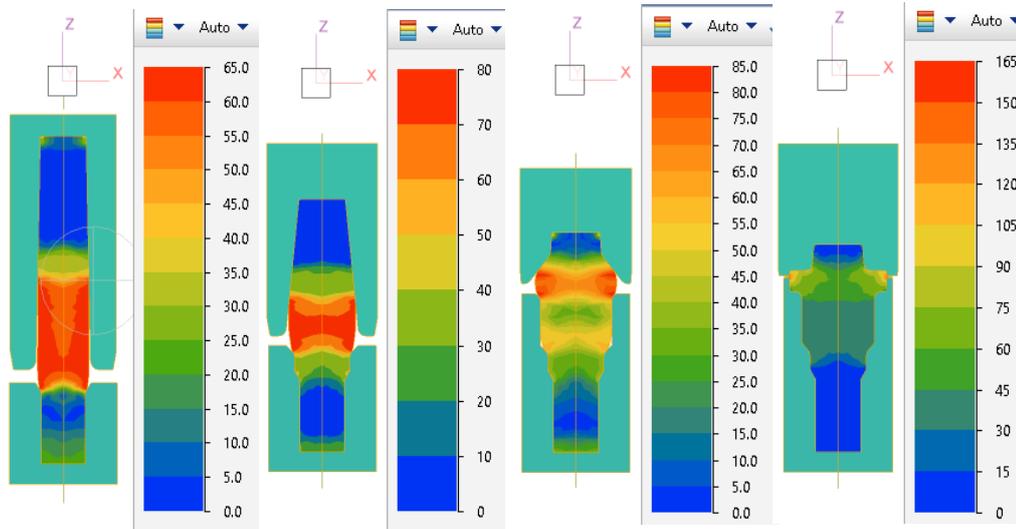
Já para os casos em que há atrito, os resultados se mostram bastante próximos.

Comparando as 3 situações, nota-se que é necessária maior aplicação de força para obter a mesma deformação quando se aumenta o coeficiente de atrito. Este comportamento era esperado, uma vez que, quando se aumenta o coeficiente de atrito, aumenta-se também a força de atrito, que é adicionada à força de resistência à deformação do material, isto é, para que haja deformação, a força aplicada pela prensa deve superar, a soma das forças.

5.2 ESTUDO DE CASO – EIXO ESCALONADO

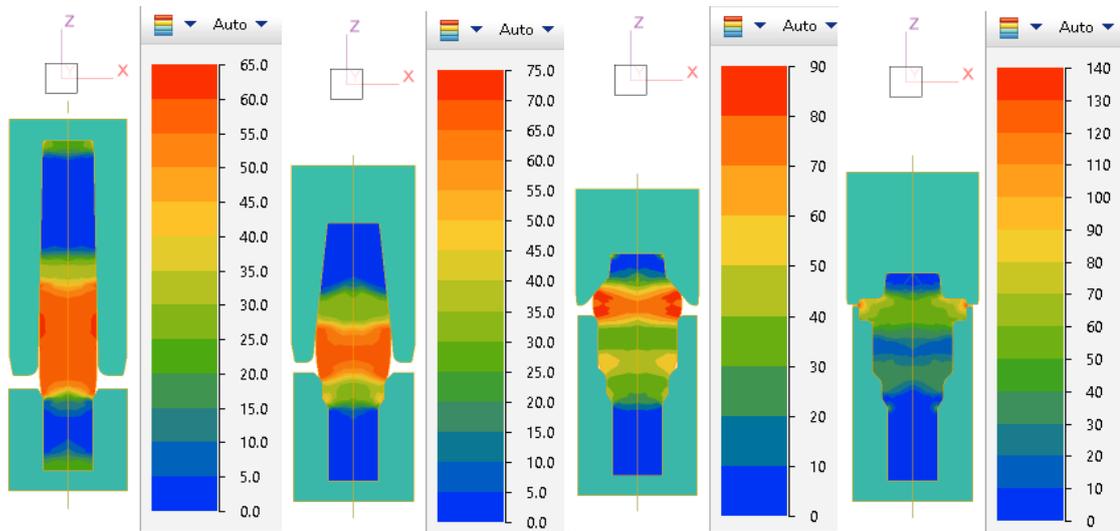
Para o eixo escalonado, foram considerados 3 casos diferentes, forjamento sem lubrificação ($\mu = 0,8$ e coeficiente de transferência de calor (U) de $50 \text{ kW}/\text{m}^2\text{K}$), forjamento com lubrificação de grafite e água ($\mu = 0,4$ e $U = 30 \text{ kW}/\text{m}^2\text{K}$) e forjamento com lubrificação de solução salina ($\mu = 0,7$ e $U = 45 \text{ kW}/\text{m}^2\text{K}$). Os resultados de tensão efetiva obtidos destas simulações estão apresentados nas Figura 35, Figura 36 e Figura 37.

Figura 35 – Resultados de tensão efetiva [MPa] obtidos em cada um dos estágios para a situação sem lubrificação



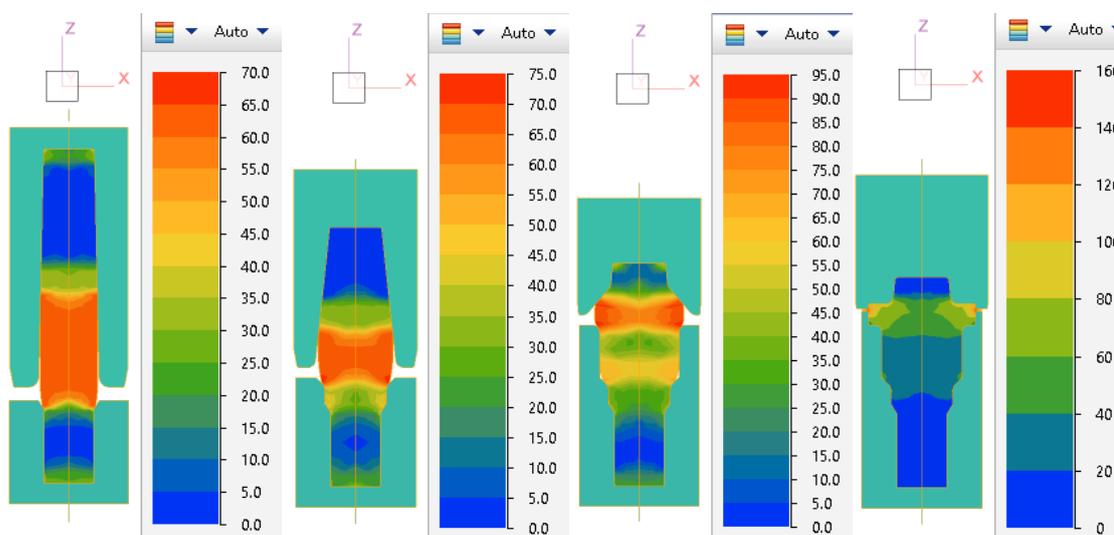
Fonte: Autora

Figura 36 – Resultados de tensão efetiva [MPa] obtidos em cada um dos estágios para a situação com lubrificação de grafite e água



Fonte: Autora

Figura 37 - Resultados de tensão efetiva [MPa] obtidos em cada um dos estágios para a situação com lubrificação de solução salina



Fonte: Autora

Em todos os casos, nota-se que as maiores tensões ocorrem na região de encontro entre as ferramentas, que são as últimas regiões a serem deformadas e não são completamente preenchidas mesmo no fim do estágio.

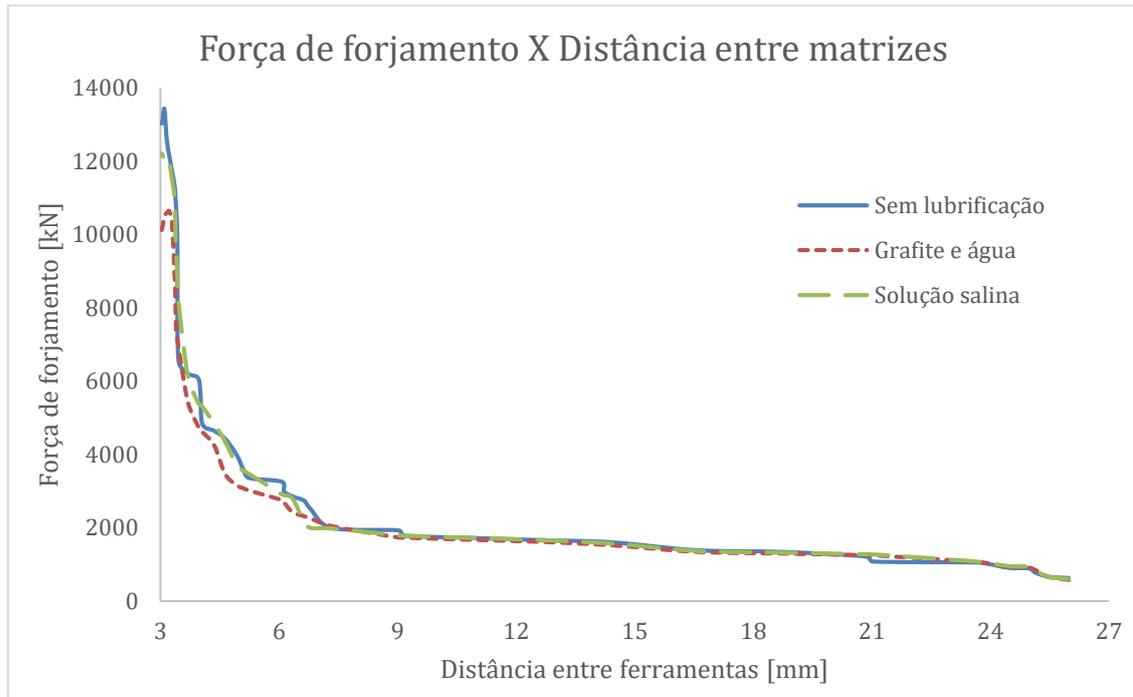
Além disso, a tensão máxima aumenta com a passagem de estágios. Sendo o último o mais crítico, o que já era de se esperar, já que o material além de resfriar, encrua com a sequência de forjamento. Com isso, para fazer a comparação entre os casos, considerou-se somente as forças no último estágio, os resultados estão plotados no Gráfico 4 - Forças [kN] obtidas para cada situação de lubrificação em função da distância entre ferramentas Gráfico 4.

Pode-se notar que as curvas têm padrões bastante similares, assumindo valores extremamente próximos até em torno dos 9 mm entre ferramentas, região em que a força de atrito começa a ser mais significativa, já que o material está bastante confinado, e, para sofrer deformação, deve ser arrastado pela superfície da ferramenta.

Apesar da semelhança, nota-se que as curvas têm pontos máximos diferentes, sendo o caso sem lubrificação o mais crítico, atingindo mais de 13 MN. A utilização da solução salina não se mostra muito eficiente, atingindo 12,2 MN, o que podia ser previsto pelas semelhanças em suas características com o caso sem lubrificação. Já a situação que considera a mistura de grafite e água, mostra-se bastante vantajosa, reduzindo a força necessária para 10 MN por apresentar menores

coeficientes de atrito e transferência de calor, reduzindo a força de atrito e a perda de temperatura.

Gráfico 4 - Forças [kN] obtidas para cada situação de lubrificação em função da distância entre ferramentas



Fonte: Autora

Destes resultados nota-se que a utilização de uma mistura de grafite e água como lubrificante no processo de forjamento permite a redução de esforços da prensa, possibilitando o forjamento em uma máquina de menor capacidade.

6 CONCLUSÕES

Esta monografia apresentou algumas características do processo de forjamento e utilizou-se de 2 métodos diferentes para obtenção da força de forjamento necessária. Além disso, realizou-se um estudo de caso para verificar a força necessária para o forjamento de um eixo escalonado.

O objetivo principal foi atingido, verificando-se o impacto da utilização de lubrificantes no processo de forjamento. Os objetivos específicos também puderam ser concluídos, através da revisão bibliográfica e resultados apresentados.

Como citado anteriormente, o mercado do setor de forjaria, apesar de antigo, ainda está em desenvolvimento nos dias atuais. Alinhado a evoluções nas pesquisas com novos materiais e processos pós-processamento, o forjamento pode ser aplicado a cada vez mais áreas apresentando características mecânicas e geometrias adequadas.

Neste trabalho pôde-se identificar a importância do desenvolvimento dos estudos utilizando a simulação por elementos finitos, que podem simplificar o desenvolvimento de novos processos, reduzindo o tempo e custo do processo. Os testes físicos não podem ser eliminados, já que nota-se algumas simplificação tanto no processo analítico quanto utilizando o software (apesar do software considerar as características do equipamento, este é adotado em condições ideais), porém reduzidos.

Assim, como sugestão de trabalhos futuros, pode-se investigar a influência da lubrificação na vida da ferramenta ou ainda das temperaturas em diferentes estágios nas forças de forjamento. Outros tipos de conformação mecânica tais como forjamento a frio ou o forjamento de precisão também podem ser estudados a fim de comparar as forças necessárias com as de um forjamento a quente de geometria simples.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASM INTERNATIONAL. **ASM Handbook**. 9. ed. [S.I.]: ASM International, v.14, 1998.

ASM INTERNATIONAL. **Cold and Hot Forging: Fundamentals and applications**. Estados Unidos da América: ASM International, 2005.

CAI, J. DEAN, T. A. HU, Z. M. Alternative die designs in net-shape forgings of gears. **Journal of materials processing technology**, v. 150, p. 48-55, 2004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S092401360400069X>. Acesso em: 06 de nov. 2021.

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CENTRO BRASILEIRO DE FORJARIAS. **Manual da indústria de forjamento**. São Paulo: Centro Brasileiro de Forjarias, 1990. 1v.

HONG, J. J. YEH, W. C. Application of response surface methodology to establish friction model of upset forging. **SAGE**, v. 10, n. 3, p. 1-9, 2018. Disponível em: <https://journals-sagepub-com.ez31.periodicos.capes.gov.br/doi/pdf/10.1177/1687814018766744>. Acesso em: 15 de nov. 2021.

LANGE, K. **Handbook of metal forming**. 1. ed. [S.I.]: McGraw-Hill, 1985.

MALAYAPPAN, S. ESAKKIMUTHU, G. Barrelling of aluminium solid cylinders during cold upsetting with differential frictional conditions at the faces. **Academic Search Premier**, v. 29, p. 41-48, 2006. Disponível em: <https://web-s-ebscohost.ez31.periodicos.capes.gov.br/ehost/pdfviewer/pdfviewer?vid=1&sid=9c766857-df73-43c2-b5b7-6a93438359bf%40redis>. Acesso em: 15 de nov. de 2021.

MÉTODOS de cálculos de esforços no processo de conformação de metais. São Paulo: Eel Usp, Desconhecido. 25 slides, color. Disponível em: <https://sistemas.eel.usp.br/docentes/arquivos/5840793/LOM3004/Aula5CM.pdf>. Acesso em: 01 dez. 2021.

MISIRLI, C. On materials flow using different lubricants in upsetting process. **Emerald Journals**, v. 66, n. 5, p. 623-631, 2014. Disponível em: <https://www-emerald.ez31.periodicos.capes.gov.br/insight/content/doi/10.1108/ILT-01-2012-0009/full/pdf?title=on-materials-flow-using-different-lubricants-in-upsetting-process>. Acesso em: 15 de nov. 2021.

QUINTANA, M. J. et. al. Influence of strain rate and heat treatments on tensile and

creep properties of Zn-0.15Cu-0.07Ti alloys. **DYNA**, v.83, p. 77-83, 2016. Disponível em:

https://www.researchgate.net/publication/301480863_Influence_of_strain_rate_and_heat_treatments_on_tensile_and_creep_properties_of_Zn-015Cu-007Ti_alloys.

Acesso em: 06 de nov. 2021.

REIS, A. R. L. **Modelação numérica por elementos finitos de processos de conformação plástica**. 2001. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/12750>. Acesso em: 06 de novembro de 2021.

SHAEFFER, L. Importância dos processos de manufatura por conformação mecânica para o Brasil. **Revista Thema**, v. 19, n. 1, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.15536/thema.V19.2021.Editorial>. Acesso em: 06 de nov. 2021

SUAZNÁBAR, J. S. SILVA, V. P. PIERIN, I. Estudo dos domínios de deformação em seções transversais de concreto armado em situação de incêndio. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO, 56., 2014. **Anais do 56° Congresso Brasileiro do Concreto**. 2014.

TSCHAETSCH, H. **Metal forming practise**. Desden: Springer, 2005.