

UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA
FACULDADE DE ENGENHARIA ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**ENGENHARIA BASEADA EM CONHECIMENTO (*KBE*) APLICADA
A AUTOMAÇÃO DE PROJETOS PARA FORJAMENTO A QUENTE**

IVÃ TIBANO CHIORATO

ORIENTADOR: PROF. DR. ANDRÉ LUÍS HELENO

Santa Bárbara d'Oeste

2016

UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA
FACULDADE DE ENGENHARIA ARQUITETURA E URBANISMO
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**ENGENHARIA BASEADA EM CONHECIMENTO (*KBE*) APLICADA
A AUTOMAÇÃO DE PROJETOS PARA FORJAMENTO A QUENTE**

IVÃ TIBANO CHIORATO

ORIENTADOR: PROF. DR. ANDRÉ LUÍS HELENO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Faculdade de Engenharia Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Produção.

Santa Bárbara d'Oeste

2016

“Se não nos ajudarmos mutuamente, com toda a certeza seremos prejudicados individualmente”.

Benjamim Franklin

Dedico este trabalho a minha querida esposa e aos meus filhos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por Ele nunca ter desistido de mim, e à minha esposa Derci que tem sido a minha fonte de inspiração e animo para continuar lutando.

De maneira muito especial agradeço aos meus amigos, Dr. Luiz Maurício Gonçalves Neto e Me. Ricardo Rozo Vaz Perez, que tanto incentivaram-me e ajudaram-me no meu retorno aos estudos.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. André Luís Helleno pela paciência, dedicação e confiança.

Ao Franklin Francisco da Silva pelas trocas constantes de informações durante o desenvolvimento deste trabalho. À minha querida sobrinha Letícia Chiorato de Lima pelo auxílio dado durante o desenvolvimento deste trabalho. Ao meu irmão Itamar José Chiorato pela ajuda prestada no momento exato.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de estudos de Mestrado.

Por fim agradeço ao meu amigo e Pr. Luís Sérgio Nascimento portador do maior título, embaixador de Deus na Terra.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS..... | I |
| LISTA DE FIGURAS | II |
| RESUMO..... | IV |
| ABSTRACT..... | V |
| 1 Introdução..... | 1 |
| 1.1 Justificativa Do trabalho..... | 3 |
| 1.2 Método de Pesquisa..... | 4 |
| 1.3 Estrutura Da Dissertação..... | 4 |
| 2 Revisão Da Literatura..... | 6 |
| 2.1 Engenharia Baseada no Conhecimento – <i>KBE</i> | 6 |
| 2.2 Tipos de forjamento..... | 18 |
| 3 Método de Pesquisa..... | 22 |
| 4 Resultados e Discussões..... | 25 |
| 4.1 Definição do Ferramental e do Processo a ser Estudado..... | 25 |
| 4.2 Determinação do Método Convencional para o Desenvolvimento do Sistema <i>KBE</i> | 25 |
| 4.3 Desenvolvimento do Sistema <i>KBE</i> | 26 |
| 4.4 Coleta dos Dados Considerando Ambos Métodos de Desenvolvimento do Ferramental..... | 39 |
| 4.5 Discussão..... | 40 |
| 5 Conclusão..... | 43 |
| 5.1 Recomendações de Trabalhos Futuros..... | 45 |
| Referências Bibliográficas..... | 45 |
| Apêndice..... | 51 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APIs: Application Program Interface

AS: comprimento da medida

CAD: Computer Aided Design

KBE: Engenharia Baseada no Conhecimento

IA: Inteligência Artificial

OBC: Organização Baseada no Conhecimento

POO: Programação Orientada a Objetos

TI: Tecnologia da Informação

VBP: Volume Bucha do Pilão

VC: Volume complementar

VCCPM: Volume correspondente a ponta macho

VDPM: Volume Deslocado pela Ponta do Macho

VT: volume total

VT: volume total

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-----------|--|----|
| Figura 1 | Engenharia Baseada em Conhecimento..... | 7 |
| Figura 2 | Espiral do Conhecimento..... | 8 |
| Figura 3 | Efeito da aplicação do <i>KBE</i> | 12 |
| Figura 4 | Processo generativo da <i>KBE</i> | 12 |
| Figura 5 | Representação de um processo de forjamento..... | 18 |
| Figura 6 | Matriz aberta..... | 19 |
| Figura 7 | Matriz semi-aberta..... | 19 |
| Figura 8 | Matriz fechada..... | 20 |
| Figura 9 | Prensa mecânica horizontal..... | 20 |
| Figura 10 | Etapas no desenvolvimento do estudo de caso..... | 22 |
| Figura 11 | Prensa horizontal LKH 800..... | 23 |
| Figura 12 | Ferramentas para forjamento de anéis internos de rolamentos..... | 24 |
| Figura 13 | Método convencional para o desenvolvimento do ferramental do anel interno..... | 26 |
| Figura 14 | Fluxo de cálculo do anel interno para o diâmetro da boca de recalque igual ao diâmetro do estampo de recalque ($S=T$)..... | 29 |
| Figura 15 | Fluxo de cálculo do anel interno para $S>T$ | 30 |
| Figura 16 | Fluxo de cálculo do anel interno para $S<T-2$ | 31 |
| Figura 17 | Fluxo do desenvolvimento de projeto pelo método <i>KBE</i> | 32 |
| Figura 18 | Resultado da Interface planilha e <i>CAD</i> | 33 |
| Figura 19 | Parametrização – anel interno de rolamentos cônicos..... | 34 |
| Figura 20 | Desenho do anel forjado em <i>2D</i> | 35 |
| Figura 21 | Desenho do estampo de recalque em <i>3D</i> e <i>2D</i> | 35 |
| Figura 22 | Desenho da bucha do pilão em <i>3D</i> e <i>2D</i> | 36 |
| Figura 23 | Desenho do pilão em <i>3D</i> e <i>2D</i> | 36 |

| | | |
|-----------|---|----|
| Figura 24 | Desenho do macho (ou punção) em 3D e 2D..... | 37 |
| Figura 25 | Desenho da faca em 3D e 2D..... | 37 |
| Figura 26 | Desenho da matriz do furo em 3D e 2D..... | 38 |
| Figura 27 | Ferramental para forjamento de anel de rolamento..... | 38 |
| Figura 28 | Anel interno forjado a quente..... | 39 |

CHIORATO, Ivã Tibano. **Engenharia Baseada Em Conhecimento (KBE) Aplicada A Automação de Projetos Para Forjamento a Quente**. 2016. 82f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Faculdade de engenharia e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d’Oeste (SP).

RESUMO

A redução do ciclo de vida dos produtos tem intensificado a necessidade de reduzir o custo e o tempo no desenvolvimento do produto. No ambiente da indústria automobilística esta necessidade se estende aos componentes da indústria de autopeças, aumentando as exigências nas etapas de projeto e de desenvolvimento. Com isso, o uso de métodos que auxiliam no desenvolvimento do projeto tem se intensificado nos últimos anos. Dentre os métodos, a Engenharia Baseada em Conhecimento – *KBE (Knowledge Based Engineering)* está entre as principais metodologias voltadas para a otimização do desenvolvimento de projeto de novos produtos. A *KBE* busca estruturar as informações necessárias para o desenvolvimento do produto de modo que elas fiquem explícitas durante as etapas de elaboração de um projeto. Neste cenário, este estudo tem como objetivo desenvolver uma metodologia *KBE* em um sistema *CAD (Computer Aided Design)* aplicado à automação de projetos de ferramentas para forjamento a quente aplicado na indústria de autopeças. Quanto ao método de pesquisa, foi realizado uma modelagem matemática e paramétrica considerando as variáveis do projeto do ferramental do processo de forjamento. Esta modelagem foi integrada em sistema *CAD* por meio de planilhas eletrônicas e, posteriormente aplicada em um caso real de uma indústria de autopeças. Por fim foi realizada uma comparação entre o método tradicional (sem a metodologia *KBE*) e o método desenvolvido baseado na integração *KBE-CAD*. Foi possível criar uma plataforma gráfica para calcular e definir as variáveis do projeto e conceber de forma automática, o desenho final do projeto das ferramentas para forjar anéis para rolamentos cônicos. A validação dos cálculos gerados pelas planilhas e dos desenhos foi obtida por meio da confecção das ferramentas e da análise geométrica de peças forjadas a quente utilizando as ferramentas confeccionadas. O projeto evidenciou a redução do tempo para elaboração de projetos de ferramentas para o forjamento, parametrizando e tornando as etapas de elaboração do projeto informatizadas, e conseqüentemente, a redução do custo na elaboração do projeto de ferramentas para o forjamento a quente de anéis para rolamentos cônicos.

PALAVRAS-CHAVE: Engenharia baseada em conhecimento, Projeto assistido por computador, Parametrização, Ferramenta para forjar a quente, Automação de projetos.

CHIORATO, Ivã Tibano. **Engenharia Baseada Em Conhecimento (KBE) Aplicada A Automação de Projetos Para Forjamento a Quente**. 2016. 82f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Faculdade de engenharia e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d’Oeste (SP).

ABSTRACT

The need to reduce product development lead time in today’s automotive industry environment has also intensified the demand to shorten tooling design lead time and cost for the auto parts companies. Among several existing methodologies developed to achieve these demands the *Knowledge Based Engineering (KBE)*, has higher significance due the fact that it creates a data structure by collecting the necessary information in a way that to make possible to centralize and offer to the engineers all technical support across the creation phase. The main target of this work was to develop a *KBE* methodology combined with *Computer Aided Design (CAD)* system creating two platforms, the first based on electronic spreadsheets that centralized all necessary data and the second a graphic one that transforms these data into tooling drawings that were used to produce dies that manufacture hot forged parts. Based on a detailed literature analysis about hot forging theory and by collecting engineers’ historical knowledge in an auto parts company it was possible to create several parametric equations that took in account all technical variables. Collected knowledge data were loaded into the design environment by using an electronic spreadsheet. An assessment between the traditional tooling design method used and new *KBE-CAD* method was performed in an auto parts company by comparing geometrical results of the main dimensions of the final product, total lead time of drawings development and cost. Results showed that the *KBE-CAD* method reduced the tooling design lead time due the automatized design steps resulting in cost reduction and keeping the product overall quality.

Key-words: Knowledge Based Engineering, Computer Aided Design, Project Parametrization, Hot Forged Tooling.

1. INTRODUÇÃO

Constitui-se tema desta pesquisa uma análise da Engenharia Baseada em Conhecimento (*Knowledge Based Engineering - KBE*), aplicada à automação de projetos de ferramentas para forjamento de anéis de rolamento a quente na indústria de autopeças.

Atualmente, o uso de sistemas de projeto assistidos por computador (*Computer Aided Design*) tem se intensificado em práticas no desenvolvimento de produtos. É desejável ter uma aplicação que suporta todo o ciclo de vida do produto, desde o projeto inicial, os detalhes do projeto e a fabricação.

O sistema convencional de produção em série não atende às demandas de mercado, que mudam rapidamente. Para adequar o sistema de produção às necessidades do mercado, o setor de manufatura tem mudado da produção em série para a customização. Considerando a etapa de desenvolvimento do produto, isso é feito por intermédio de uma base de conhecimento necessária para projetar as ferramentas de um projeto.

Desse modo, quando a ferramenta é semelhante geometricamente, a técnica de modelagem paramétrica pode ser empregada em modelos geométricos durante o processo de concepção. Como no caso de ferramentas para forjamento de anéis de rolamento, que consiste em seis componentes: bucha de pilão, pilão, estampo de recalque, macho, matriz do furo e a faca. O produto é semelhante e a geometria é diferente para cada produto.

Recentemente, o sistema de projeto auxiliado por computador (*CAD*) tem buscado evoluir para conceito *KBE*. Os sistemas *KBE* foram implementados com sucesso em diferentes campos, com o intuito de ampliar o conhecimento organizacional, por meio da automatização de tarefas repetitivas, não-criativas.

O *KBE* é uma tecnologia com potencial para aplicações no projeto de engenharia. Contudo, em âmbito nacional, a literatura sobre o assunto ainda é

pouca utilizada, o que dificulta a difusão desse conceito em aplicações práticas e acadêmicas.

A pergunta norteadora desta pesquisa é a seguinte: quais as vantagens do *KBE* na automação de projetos de ferramentas para o processo de forjamento a quente?

Com a utilização do *KBE* para o desenvolvimento de ferramentas, o tempo de um projeto é reduzido, pois permite inserir, de forma rápida, os dados de um sistema parametrizado e obter o projeto detalhado de uma ferramenta específica. O *KBE* aplicado ao projeto do produto também permite a visualização e análise do processo de desenho por intermédio de simulações. Essa metodologia é empregada para a customização em massa, sendo citada na literatura como uma das melhores tecnologias disponíveis para otimizar projetos (YANG *et al.*, 2012; ROCCA, 2012).

A parametrização de um processo, geralmente é baseada no julgamento e experiência humana. Mas, realizar as mesmas tarefas todas as vezes, implica em retrabalho e desperdício de recursos humanos, financeiros, tecnológicos (JONG *et al.*, 2014).

A parametrização empregada por intermédio do *KBE* fornece as condições de existência da ferramenta desejada, ou seja, que corresponde a todo o conhecimento prático que o projetista de ferramenta possui. Isso possibilita que um usuário pode alimentar os dados do sistema e obter o projeto da ferramenta desejada de forma automática.

Segundo Yao *et al.* (2011), o objetivo do *KBE* é orientar o projetista, que carece de experiência, para o projeto, evitando assim a realização de tarefas repetitivas e promovendo a otimização e automação de projetos. A aplicação do *KBE* constitui uma solução eficiente no desenvolvimento de produtos (YAO *et al.*, 2011; YANG *et al.*, 2012; ROCCA, 2012; JONG *et al.*, 2014).

Atualmente, a literatura disponível sobre *KBE* tem origem em diferentes perspectivas. Contudo, uma visão consolidada dessa tecnologia empregada no

processo de forjamento a quente ainda carece de maior literatura, sobretudo em âmbito nacional, para a sua compreensão crítica. A proposta deste trabalho é avaliar a aplicação da metodologia *KBE* na automação de projetos mediante a modelagem matemática de ferramentas para o processo de forjamento a quente.

1.1. JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

O dinamismo do mercado faz com que as empresas almejem soluções rápidas para manterem-se competitivas no cenário global. De forma indireta, as empresas direcionam o investimento na modernização e no aprimoramento dos processos de manufatura, com fins de atingir os níveis máximos de produtividade.

O *KBE* consiste no uso de técnicas avançadas de *software* para capturar e reutilizar o conhecimento do processo de produção de forma integrada. Trata-se de um método de engenharia que representa uma fusão da programação orientada a objetos, técnicas de inteligência artificial e projeto assistidos por computador e *CAD* para fornecer soluções de automação de projetos de ferramentas.

A realização deste estudo se justifica no âmbito acadêmico no sentido de aumentar a literatura nacional sobre o tema. Desse modo, o estudo poderá servir como fonte de consulta bibliográfica para trabalhos futuros, ou ainda, como fonte de leitura para as pessoas que se interessarem pelo assunto.

No âmbito socioeconômico e no ambiente de negócios, a realização deste estudo se justifica por apresentar um sistema pouco empregado no Brasil, que automatiza projetos de ferramentas, reduzindo as horas trabalhadas de profissionais de engenharia, permitindo que estes dediquem mais horas às tarefas inovativas, poupando tempo em tarefas repetitivas e rotineiras. A otimização e automação de projetos de ferramentas implica na redução de horas trabalhadas (menos custos de recursos humanos), menos tempo de horas de

máquinas (menos custos de recursos físicos), evita retrabalho e desperdício, pois possibilita que sejam realizadas simulações antes do produto final (menos custos financeiros).

A elaboração deste estudo se justifica no fato de que o pesquisador atua profissionalmente na área e pode acompanhar de perto os benefícios da implementação do sistema *KBE* na automatização de projetos de ferramentas a quente na indústria de autopeças, podendo contar sua experiência pessoal e profissional na disseminação desse conhecimento.

1.2. MÉTODO DE PESQUISA

Quanto à metodologia, trata-se de uma pesquisa descritiva, de natureza mista – qualitativa e quantitativa, na qual foi desenvolvido uma modelagem matemática para a parametrização de projeto de ferramentas do processo de forjamento a quente, aplicados a indústria de autopeças. O método empregado para a realização do projeto será apresentado no capítulo 3 desta dissertação.

1.3. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Para a compreensão deste tema, este trabalho foi dividido em quatro capítulos principais.

Capítulo 1 – Introdução: Neste capítulo é apresentado o conteúdo deste estudo, como a apresentação do tema, do problema de pesquisa, da justificativa, objetivos, método e estrutura do texto.

Capítulo 2 – Revisão da literatura: Este capítulo aborda o conceito de *KBE*, suas vantagens e o processo de automatização de projetos de ferramentas para forjamento a quente.

Capítulo 3 – Método de Pesquisa: Apresenta a pesquisa realizada na indústria de autopeças, que consiste na análise da automação de projetos de ferramentas de conformação a quente de rolamentos cônicos para aplicações de autopeças, utilizando o sistema *KBE*.

Capítulo 4 – Resultados e Discussões: Este capítulo abrange os resultados obtidos no estudo de caso e a discussão dos resultados a partir da experiência prática e da interpretação da revisão de literatura.

Capítulo 5 – Conclusões e Sugestões de Trabalhos Futuros: Este capítulo contém as considerações finais, com as conclusões relacionadas ao tema e aos resultados do estudo de caso e, também, com as recomendações para os trabalhos futuros.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo foi dividido em dois tópicos. O primeiro apresenta o conceito de *KBE*, com ênfase em metodologias e modelagem paramétrica.

O segundo tópico trata-se do desenvolvimento de uma modelagem matemática aplicada ao projeto de ferramentas para o processo de forjamento a quente.

2.1. ENGENHARIA BASEADA NO CONHECIMENTO – *KBE*

O conhecimento é um componente vital no desenvolvimento de produto e processo. Para Yang *et al.* (2012), os conteúdos de uma base de conhecimento podem ser empregados das seguintes formas:

- Para disseminar o conhecimento para outras pessoas;
- A reutilização do conhecimento de diferentes formas para diferentes fins;
- Utilizar o conhecimento para desenvolver sistemas inteligentes que podem executar tarefas complexas de projetos.

A falta de conhecimento especializado pode implicar em problemas severos em uma fase tardia da concepção de um produto, na produção ou no processo. O conhecimento é uma forma altamente estruturada de informações necessárias para executar tarefas complexas, todas essas formas são úteis para pensar o conhecimento. Trata-se, portanto, do elemento-chave do *KBE*.

O *KBE* é importante porque o conhecimento especializado é de difícil aquisição em funções dos seguintes fatores, (YANG *et al.*, 2012):

- Especialistas enfatizam o conhecimento tácito;
- Especialistas têm diferentes experiências e opiniões;
- Especialistas desenvolvem conceitos particulares e atalhos mentais que não são fáceis de comunicar;

- Especialistas usam jargões e assumem que a maioria das outras pessoas entendem a terminologia utilizada;
- Os problemas associados com o armazenamento e representação do conhecimento.

A Figura 1 ilustra a definição da engenharia de conhecimento apresentada por Barroso *et al.*, (2009).



Figura 1 - Engenharia Baseada em Conhecimento, (BARROSO *et al.*, 2009).

A gestão do conhecimento é essencial a todo e qualquer tipo de organização, pois possibilita mudar e melhorar as práticas organizacionais (BOIRAL, 2002).

O conhecimento é compreendido como a capacidade do homem de dominar a natureza, transformá-la e adaptá-la às suas necessidades, representando a síntese do todo existente até dada época, contextualizado, historiado e catalogado. Bombassaro (1982) abordou o conhecimento, definindo-o por meio do processo pelo qual o homem compreende o mundo, sendo formado por conjuntos de enunciados formais ou não, produzidos pelo homem, dos quais prescinde não apenas para sua sobrevivência, mas também para sua comunicação, interação e vínculo com o coletivo.

2.1.1. ESPIRAL DO CONHECIMENTO: DEFINIÇÃO E RELAÇÃO COM O *KBE*

Nonaka (1991) apresentou alguns requisitos para se criar, armazenar e disseminar o conhecimento organizacional. O conhecimento organizacional é criado por meio da interação entre duas formas de conhecimento, o conhecimento tácito e o explícito. Essa interação, chamada de conversão do conhecimento, é um processo social entre indivíduos e ocorre de forma interativa e na forma de espiral. Há quatro formas de conversão que geram quatro formas de conhecimento, conforme mostrado na Figura 2, (NONAKA; TAKEUCHI, 1997).



Figura 2 - Espiral do Conhecimento (NONAKA; TAKEUCHI, 1997)

As quatro formas da conversão do conhecimento são:

a) A socialização do conhecimento: de acordo com Nonaka e Takeuchi (2008) é o processo no qual as experiências intelectuais e pessoais são compartilhadas de pessoa para pessoa, no meio organizacional, a socialização ocorre por meio de atividades, treinamentos, palestras, interações com clientes, reuniões, entre outros, é a criação do conhecimento por meio de experiências diretas. Para Stewart (2002) o

conhecimento é socializado quando alguém o compartilha com outro de maneira tácita (“observe o que eu faço e veja se consegue repetir”).

b) A externalização: conversão do conhecimento tácito em conhecimento explícito, através de ações que possam ser entendidas por outros. É um processo de criação do conhecimento perfeito, por meio do diálogo, da reflexão coletiva e do uso de metáforas de analogias, os quais irão gerar conhecimento conceitual;

c) A combinação: conversão do conhecimento explícito em conhecimento explícito, que é um processo de sistematização de conceitos em sistema de conhecimento. Os conceitos são formados pelas equipes, por meio da combinação, da edição e do processamento, a fim de formar um novo conhecimento. É a sistematização do conhecimento, gerando conhecimento sistêmico;

d) A interação: conversão do conhecimento explícito em conhecimento tácito, que é o processo de incorporação do conhecimento explícito sob a forma de conhecimento tácito, internalizando o novo conhecimento explícito compartilhado na organização pelos indivíduos. Ocorre por meio do “aprender fazendo”, da verbalização, dos modelos mentais e da diagramação, gerando conhecimento operacional.

Conforme Schons e Costa (2008) a “espiral do conhecimento” é construída a partir da fluidez do conhecimento entre os quatro modos de conversão. Seu início ocorre por meio da socialização, pois o conhecimento só é criado pelas pessoas e deve, portanto, ser compartilhado. Contudo, somente com a externalização é que o conhecimento compartilhado pode ser alavancado de forma expressiva organizacionalmente. Essa etapa é fundamental para a inovação pois quanto mais fácil a interação entre o conhecimento tácito e explícito, mais conhecimento poderá ser convertido coletivamente, visto que o conhecimento explícito é melhor difundido.

2.1.2. KBE x ENGENHARIA DO PRODUTO E PROCESSO

O *KBE* pode ser definido como uma tecnologia baseada no uso de ferramentas de *software* dedicados, que são capazes de capturar e reutilizar de forma sistemática o

conhecimento do produto e engenharia de processos. O objetivo final é reduzir o tempo e os custos de desenvolvimento do produto por meio de automação de tarefas de projetos repetitivos e não criativas (ROCCA, 2012).

Sandberg *et al.* (2008) afirmaram que o *KBE* é um método para melhorar o projeto de engenharia, criando ferramentas de apoio ao projeto com base em um sistema *CAD*. O *KBE* captura e formaliza conhecimentos e regras, exigindo um trabalho de rotina e tempo que pode ser automatizado.

Com a automatização das atividades de desenvolvimento do produto, o *KBE* representa uma forma de capturar os processos de projeto, sendo uma estrutura orientada a objetos, onde a geometria é criada e avaliada em termos de classes contendo regras armazenadas, baseadas em parâmetros geométricos. O estudo realizado por Sandberg (2003) confirmou a importância do *KBE* na formalização de regras e conhecimentos de engenharia.

O *KBE* consiste em uma metodologia de engenharia em que o conhecimento sobre um produto, por exemplo, as técnicas empregadas para projetar, analisar e fabricar um produto, são armazenadas em um modelo geométrico do produto. O *KBE* também pode usar informações adicionais ao modelo do produto, como bancos de dados e programas de outras empresas (PERRY; KODJA, 2010).

A abordagem de modelagem do *KBE* estrutura o conhecimento de engenharia. Esse processo de estruturação compreende a configuração dos objetos que modelam o ambiente de projeto de engenharia e as regras que controlam o comportamento dos objetos.

Os sistemas atuais de *KBE* são baseados em uma combinação das regras de produção e representação do conhecimento orientado a objetos. Ambos os elementos, oferecem uma maneira automatizada de introduzir exigências e restrições de projeto, e fornecem uma descrição do produto (PERRY; KODJA, 2010).

De acordo com Verhagen *et al.* (2012), o *KBE* possui as seguintes características:

- Consiste em um ambiente computacional para capturar, armazenar, gerenciar, executar e disseminar as regras de um projeto;

- Ferramenta orientada a objeto;
- Regras e informações do produto armazenadas em banco de dados;
- Interfaces abertas – bancos de dados; projeto auxiliado por computador; aplicações domésticas;
- Diversas interfaces com os usuários;
- Modelo generativo que integra: geometria e regras.

A aplicação *KBE* no desenvolvimento de produto e processo tem como base o acúmulo de informações existentes em relação a um projeto de um produto, tornando-o disponível para reutilização (CURRAN *et al.*, 2010; REDDY *et al.*, 2015).

Nesse sentido, o *KBE* provou a sua eficácia na construção de modelos *CAD*, nos quais as informações e o projeto do produto são acessíveis para o projetista (SANDBERG *et al.*, 2005).

Isso somente é possível pois o *KBE* integra tecnologias orientadas a objeto baseadas nos sistemas *CAD* e outras ferramentas de *software* de engenharia tradicionais. Por outro lado, existe uma tendência em utilizar os modelos *CAD* para gerir a capacidade do *KBE* ultrapassar seus limites atuais. A partir dessa perspectiva, o *KBE* absorve um conjunto mais amplo de habilidade da modelagem à programação e inteligência artificial (NIKHIL; SHAKIR, 2011).

O *KBE* tem como principais características: rapidez, interface de usuário amigável, inovação, entre outros. Todos esses recursos são vitais para o processo de produção ser mais competitivo no mercado atual. Além disso, o *KBE* tem a capacidade de melhorar o projeto colaborativo por meio da gestão do conhecimento e, como resultado de automação, possibilita a reutilização do conhecimento (CURRAN *et al.*, 2010; REDDY *et al.*, 2015).

A Figura 3 ilustra o efeito da utilização do *KBE* em relação ao método tradicional na área de desenvolvimento de produto e processo. Pode-se observar que a redução das atividades de rotina em função das mesmas já estarem inseridas e automatizadas no sistema.

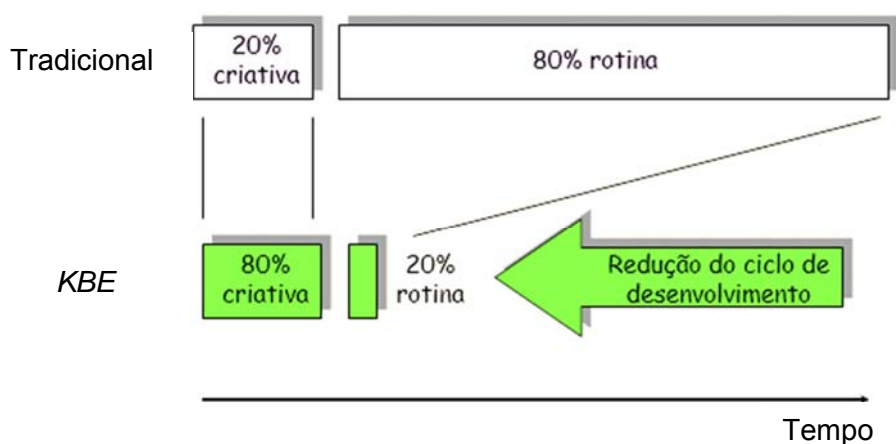


Figura 3 - Efeito da aplicação do *KBE*, (VERHAGEN *et al.*, 2012)

A Figura 4 apresenta um processo generativo do *KBE* que consiste na representação genérica do produto.

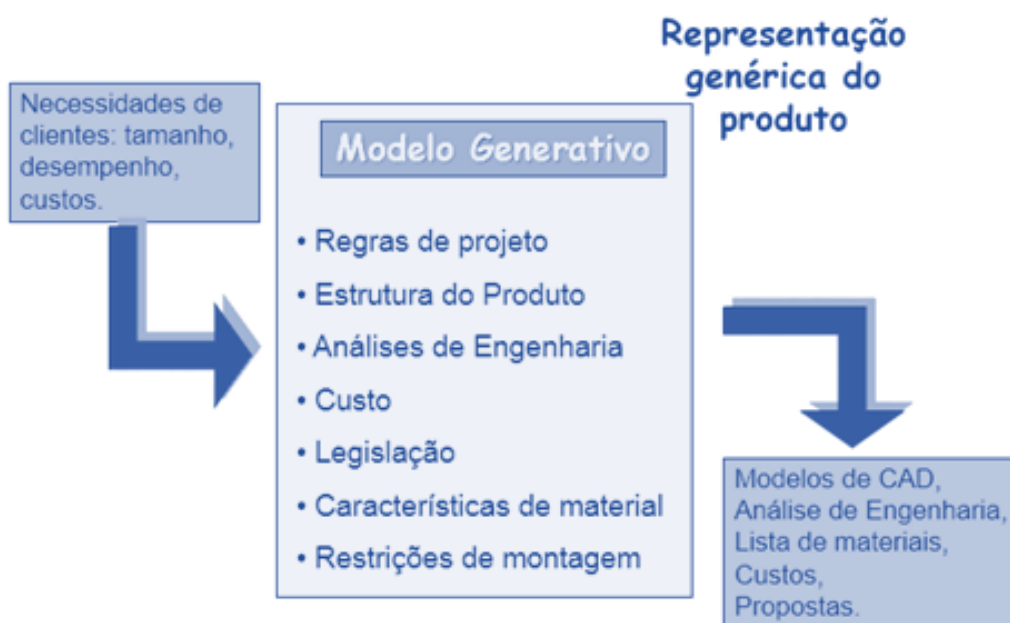


Figura 4 - Processo generativo da *KBE*, (VERHAGEN *et al.*, 2012)

Conforme pode ser observado na Figura 4, entre os dados de entrada do projeto (necessidade do cliente) e a obtenção dos dados de saída (modelo *CAD* e informações de engenharia) existem inúmeras atividades que devem ser

consideradas e que podem ser padronizadas e automatizadas (modelo generativo). Este processo irá otimizar o tempo de custo dos próximos projetos.

2.1.3. POSSÍVEIS VANTAGENS E DESVANTAGENS DO *KBE*

Segundo Reddy, *et al* (2015), os benefícios com a aplicação do *KBE* no desenvolvimento de produto e processo relaciona-se com a redução do tempo em atividades repetitivas, otimização do processo de produção e fabricação e aumento da disponibilidade de tempo para atividade de análise e inovação.

Segundo Verhagen *et al.* (2012) a aplicação do *KBE* visa:

- Permitir que as empresas/organizações capturem e disseminem o conhecimento e experiência de seus engenheiros, juntamente com as melhores práticas de fabricação, legislação, custos e outras regras.
- Permitir estruturar as atividades de projeto rotineiras, liberando os engenheiros para as atividades que agregam valor ao produto: atividades de criatividade.
- Desenvolver e manter uma base de conhecimento a respeito de seus produtos e processos.

A aplicação do *KBE* necessita de conhecimento multidisciplinares, tais como a inteligência Artificial, projeto auxiliado por computador e programação. Isto faz com que apesar das vantagens e ampla inserção na literatura, sua aplicação ainda é limitada (ELSAWY,2002; ROCCA, 2012; TOOREN, 2007)

Esta assertiva de Rocca (2012) se refere à literatura sobre *KBE* nos Estados Unidos, contudo, no Brasil os dados sobre *KBE* são ainda limitados.

Para a integração do *KBE* ao sistema *CAD* geralmente são apresentadas duas opções (REDDY *et al.*, 2015):

- Fazer com que os programadores de sistemas de desenhos assistidos por computador proporcionem as funcionalidades *KBE* como uma parte

integral do sistema, seja pelo desenvolvimento das suas próprias funções ou pela parceria dos criadores de *software*;

- Proporcionar a abertura de *APIs (Application Program Interface)*, para permitir o uso dessa interface.

O *KBE* emprega princípios e métodos de inteligência artificial para fornecer um meio para problemas difíceis. O foco do *KBE* é integrar o conhecimento profissional especializado, a escolha dos parâmetros de projetos com base em dados experimentais, dados de materiais, *software* dos usuários, e normas de concepção relevantes para o projeto.

O *KBE* compreende as seguintes conotações (YANG *et al.*, 2012):

- I. Aquisição de conhecimento: resolver problemas encontrados no desenvolvimento de fontes de conhecimento (tais como padrões de projeto, especificações de produtos, conhecimento especializado, experiência e precedentes de sucesso, etc.).
- II. Representação do conhecimento: pesquisas como declarar problemas e como armazenar o conhecimento.
- III. Raciocínio relacionado ao conhecimento: de forma a deduzir um outro passo a partir de uma situação já conhecida baseado na mesma estratégia. Os métodos de raciocínio baseado em regras incluem o raciocínio baseado em casos. Esse método é usado principalmente para parâmetros específicos baseados num sistema de trabalho para acessar o conhecimento especializado.

Nesse sentido inúmeros autores têm realizado estudos na aplicação do *KBE* no desenvolvimento de produtos e processos.

Chapman e Pinfold (1999) ao se depararem em limitações de sistema *CAD* utilizaram o *KBE* para criar ferramentas capazes de organizar o fluxo de informação entre os sistemas *CAD* e *CAE* e com isso automatizar o processo de projeto na área automobilística. Apesar da necessidade da utilização de ambos sistemas (*CAD-CAE*) no desenvolvimento de produto, os modelos de dados não eram unificados.

Calkins (2000) afirmou que a tecnologia que permite o desenvolvimento de um verdadeiro protótipo virtual de um produto é conhecida como *KBE*. Essa é a metodologia de captação e estruturação de conhecimentos sobre um processo de concepção e projeto. O *KBE* pode ser utilizado para definir os métodos e procedimentos de engenharia. No *KBE*, a topologia de um produto é dinâmica, de modo que ele oferece a verdadeira automação de *design* de engenharia incluindo o desenvolvimento de aplicações e integração de ferramentas.

Klein (2000) afirmou que o conhecimento é uma das questões-chave em todos os ambientes de negócios. O uso das tecnologias da informação e comunicação está ficando cada vez mais importante. A utilização dessas tecnologias tem dois objetivos principais: a gestão do conhecimento e a utilização de sistemas baseados no conhecimento. A complexidade do conhecimento resulta em requisitos elevados de engenharia para a estrutura do conhecimento e técnicas de recuperação de dados. Nesse contexto, o *KBE* pode ser utilizado como uma ferramenta que permite a otimização de rotinas, facilitando o processo de desenvolvimento de um produto.

No estudo realizado por Chapman *et al.* (2001), os autores descreveram o uso do *KBE* em uma indústria automotiva com o intuito de estender suas capacidades atuais de projetos de engenharia. O *KBE* permite repostas dinâmicas às mudanças dentro de um rápido período, possibilitando a avaliação dos efeitos das alterações no que se refere às restrições que lhes são impostas por outros fatores do ciclo de produção. O sistema funciona por meio da criação de uma descrição do modelo unificado que consulta regras sobre a adequação do projeto de conceito e é construído a partir do *KBE* com o objetivo de reduzir custos do projeto e facilitar a implementação do sistema. Essas assertivas são corroboradas nos seguintes estudos: Chapman; Pinfold (1999); Calkins (2000); Klein (2000); Fidan e Elsayy (2002); Kuhn (2010); Amadori *et al.* (2012); Amate *et al.* (2015).

Sandberg (2003) apresentou os benefícios e desvantagens do *KBE*. O principal benefício é a redução de tempo de espera para o desenvolvimento do produto. A redução do tempo diz respeito aos produtos que possuem as três seguintes propriedades: alto grau de semelhança com a reutilização do conhecimento; grande quantidade de configurações de projeto; e grande número de processos de *design* que podem ser automatizados. A otimização do produto também é mais fácil porque

melhores configurações podem ser encontradas dentro de um prazo mais curto. O conhecimento capturado dentro de modelos reduz os riscos relacionados à rotação de pessoal.

Como desvantagem, Sandberg (2003) apontou o tempo necessário para construir corretamente os modelos *KBE*. O valor acrescentado de recorrer ao *KBE* deve ser avaliado em relação ao tempo necessário para a sua execução. O *KBE* deve ser evitado em algumas circunstâncias, como quando o projeto é muito simples, quando as tecnologias estão mudando continuamente ou quando não é possível acessar ou isolar o conhecimento de produtos. Com relação à eficiência da transferência de conhecimentos, os usuários *KBE* ainda devem ser capazes de acessar a definição e não usar elementos *KBE* como 'caixas pretas'.

Garcia (2008) afirmou que as ferramentas do *KBE* codificam os processos de geração de dados de engenharia que utilizam linguagens especializadas para controlar a instanciação de objetos de *software* em sistemas *CAD*. O *KBE* é executado a partir de norma definidas e explícitas de engenharia que controlam a instanciação de dados. A implementação do *KBE* incentiva as seguintes práticas: possibilita a análise das atividades de engenharia; permite a identificação de áreas de conhecimento multidisciplinares necessárias para a resolução de problemas de engenharia; possibilita a documentação de melhores práticas de engenharia; torna mais eficiente o trabalho que não é totalmente suportado por sistemas de *software*. Essa assertiva é corroborada nos estudos realizados por Cooper e Rocca (2007); Sanya e Shakir (2011); Peter *et al.* (2011); Shintre; Shakir (2011); Tiwari *et al.* (2013); Overec *et al.* (2014).

Mohammed *et al.* (2008) afirmaram que o *KBE* originado a partir de uma combinação de *CAD* e os sistemas de conhecimento base, possui diversos papéis, que variam conforme o contexto em que são empregados. Atualmente a *KBE* inclui projeto, análise, simulação, otimização, fabricação e suporte, onde os sistemas *CAD* são a base para as demais etapas. O uso de *KBE* e *CAD*, em comparação com o processo tradicional, reduz o tempo de *design*. Os autores concluíram que no mercado competitivo e globalizado dos dias atuais, estão sendo desenvolvidas novas técnicas de fabricação e engenharia, sendo que o *KBE* tem ocupado um importante papel nesse processo. O *KBE* pode ser usado em combinação com o *CAD* para criar um

ambiente de *design* generativo, a partir de uma base para outros processos de engenharia. Essa assertiva é corroborada nos seguintes estudos: Lovett *et al.*, (2000); Chndrasegaran *et al.*, (2013).

Trehan *et al.*, (2015) afirmaram que o *KBE* como método de design ajuda a formular uma base de conhecimento abrangente como um protótipo virtual que inclui a intenção do projeto, requisitos, lógica e informação geométrica, que podem então serem utilizadas para representar o processo de design de um produto, e atingir a automação de um projeto complexo. Uma das lacunas identificadas no campo da automação de processos de design usando o *KBE* como uma abordagem holística é uma técnica de representação neutra adequada de um modelo de processo com a sintaxe bem definida, axiomas, e semântica para que possa ser compartilhado a partir de múltiplas plataformas e para permitir a interoperabilidade. Para atingir a automação de processo de design, dois passos são muito importantes. Em primeiro lugar, um método de modelagem deve ser capaz de capturar informalmente todos os aspectos críticos de um processo destinado a permitir a automatização. Em segundo lugar, o modelo informal deve ser capaz de ser mapeado para uma técnica de representação formal num sistema, o qual irá, em seguida, permitir a automatização por executar uma consulta por meio desta representação.

Segundo Kuhn (2010), graças ao *KBE* é possível criar modelos inteligentes em *CAD* de um modo genérico para que eles possam ser utilizados em vários contextos.

Dentro do desenvolvimento de produtos, os modelos *CAD* são facilmente configuráveis, com médias de tempo de instanciação de 3% do tempo necessário para criar o modelo. Além disso, o aumento da complexidade do produto incentiva o uso de modelos e moldes reconfiguráveis (KUHN, 2010).

O tempo gasto na concepção de um modelo reconfigurável é recuperado pela redução do tempo gasto em modelos posteriores. Um exemplo do quadro de customização em massa é um modelo que permite adequar os produtos às necessidades do cliente através da integração do cliente no processo de design. Isto é obtido a partir da utilização de modelos parametrizados. O cliente configura o modelo do produto por meio de parâmetros e o resultado é mostrado em tempo real (KUHN, 2010).

2.2. TIPOS DE FORJAMENTO

Conforme Rathi e Jakhade (2014), o forjamento é obtido a partir de um sólido geométrico por ações de forças de compressão aplicadas por meio do uso de ferramentas. O forjamento consiste num processo de deformação em que a parte é comprimida em duas matrizes, usando impacto ou pressão progressiva para formar a peça. As peças obtidas no processo de forjamento a quente são portadoras de melhores propriedades mecânicas quando comparadas a outros processos, conforme Figura 5 (ABACHI *et al.*, 2010; NUMTHONG; BUTDEE, 2012; XU *et al.*, 2014).

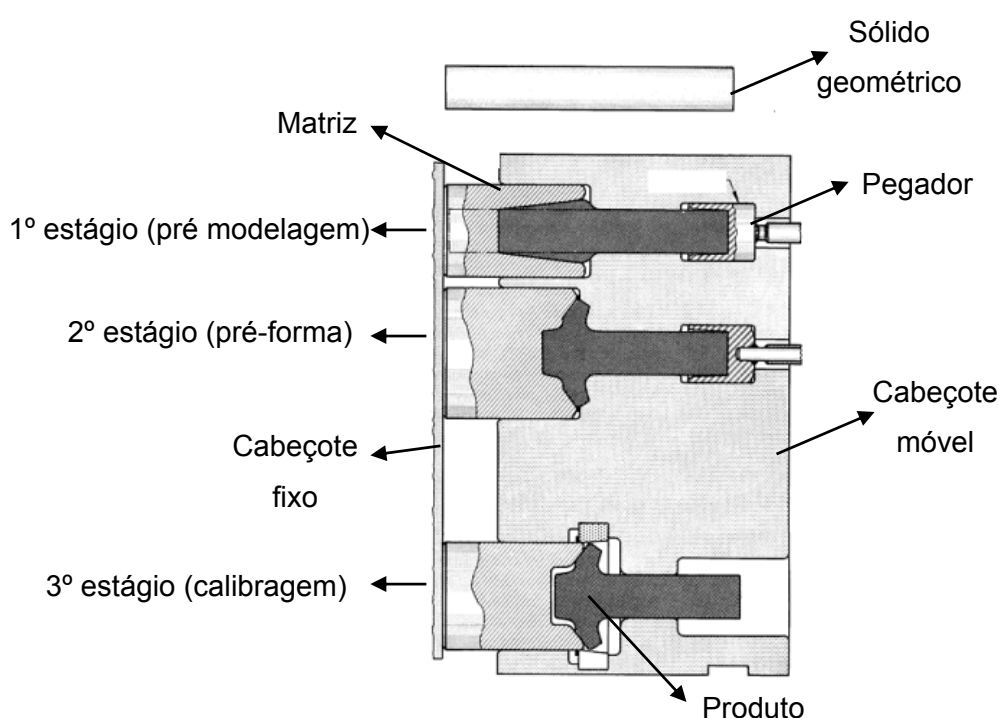


Figura 5 – Representação de um processo de forjamento, (ASM Handbook, 1988)

O processo de forjamento com base na temperatura de trabalho pode ser classificado como frio, morno ou a quente.

2.2.1. FORJAMENTO A QUENTE

O forjamento a quente de metal é um processo importante para a indústria. A produção de um objeto em metal compreende a seleção do tamanho inicial da matéria-prima, a forma e as etapas de formação, a concepção de uma geometria da matriz, entre outros (NUMTHONG; BUTDEE, 2012).

O processo de forjamento a quente de aços varia de 1050 °C a 1250 °C (RATHI e JAKHADE, 2014). Quanto ao arranjo das matrizes, pode ser classificado como: aberta, semi-aberta e fechada, conforme Figuras 6, 7 e 8, respectivamente.

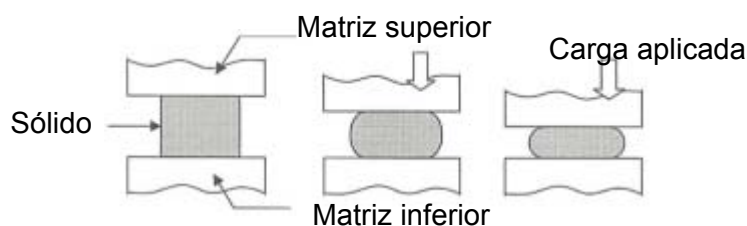


Figura 6- Matriz aberta, (RATHI e JAKHADE, 2014)

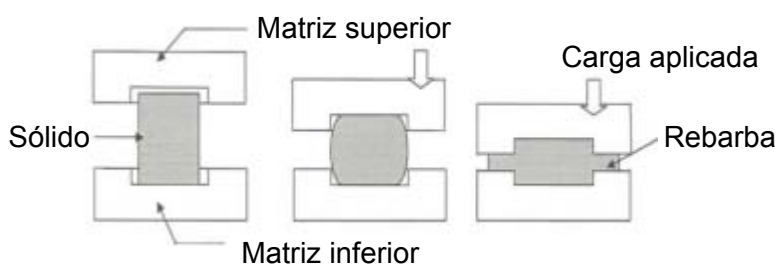


Figura 7 - Matriz semi-aberta, (RATHI e JAKHADE, 2014)

Está representado na Figura 8 uma matriz fechada. A grande vantagem deste processo com matriz fechada é que não gera o desperdício de material (rebarba) como

no processo com matriz semi-aberta e geralmente o produto é obtido na medida final (acabado).

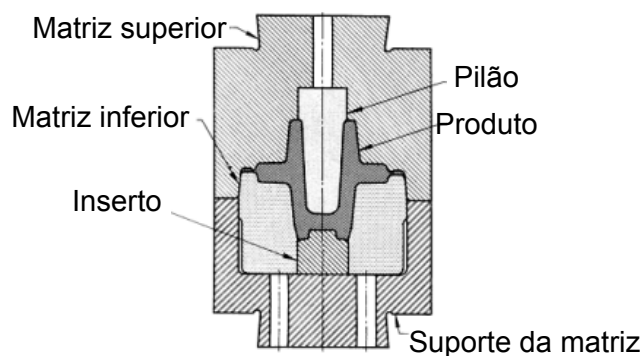


Figura 8 – Matriz fechada, (ASM Handbook, 1988)

Os acionamentos das máquinas para forjamento podem ser tanto por sistema pneumático, hidráulico ou mecânicos (RATHI e JAKHADE, 2014). Está representado na Figura 9 os principais componentes de uma prensa mecânica horizontal.

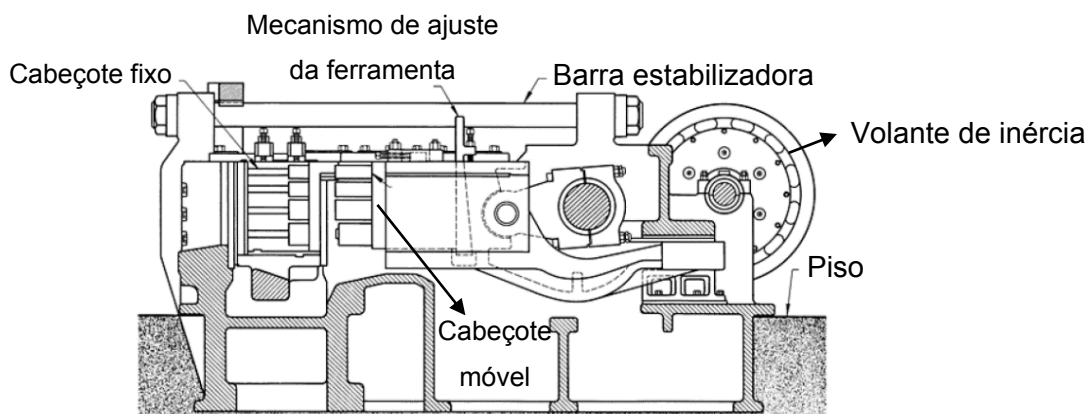


Figura 9 – Prensa mecânica horizontal, (ASM Handbook, 1988)

Ravi *et al.* (2007) afirmaram que em todo o processo de tratamento de metais a granel, o projeto do processo de forjamento é fortemente dependente da experiência humana, intuição e criatividade, sendo considerado um processo interativo que envolve tempo

extenso e demorado trabalho experimental. A utilização de sistemas *KBE* facilita o processo de projeto de um produto que será forjado a quente, pois além de auxiliar o processo de forjamento, o sistema também funciona como um banco de dados de materiais e serve para a análise de defeitos, caso eles venham a ocorrer.

Equbal *et al.* (2013) afirmaram que a otimização do processo de forjamento é necessária para reduzir o custo de produção da matriz, bem como a peça de encaixe, e também para aumentar a precisão do molde e a parte forjada. Em processo de forjamento de metal o desempenho da matriz e a qualidade do produto dependem de vários parâmetros específicos.

Segundo Biglari e Zamani (2008), em processos de forjamento a quente de metal, o tempo de vida útil da matriz tem um papel importante na produtividade e qualidade dos produtos acabados.

Stahlberg e Halltrom (1999) afirmaram que mais de 70% das substituições de ferramentas são devido ao desgaste prematuro. Outros 25% devido a fadiga mecânica, e os 5% restantes são devido à deformação plástica e a fadiga mecânica térmica.

Portanto, o desgaste da matriz é o fator dominante na falha da ferramenta para a substituição dela durante o processo de forjamento a quente na produção em massa (STAHLBERG; HALLTROM, 1999; BIGLARI; ZAMANI, 2008).

Kulon *et al.* (2006) descreveram o desenvolvimento de um sistema de engenharia baseado em *KBE* para o projeto de forjamento a quente usando a tecnologia do estado da arte e a internet. O objetivo do sistema *KBE* proposto foi integrar o processo da concepção de ferramentas para o processo de forjamento a quente de anéis internos de rolamentos cônico, no qual foi desenvolvido uma modelagem matemática, inserida em um “aplicativo” para a geração da geometria das ferramentas. A aplicação do *KBE* orienta o engenheiro de *design* por meio de diferentes fases do processo de *design* e permite a geração de geometria de ferramentas para o forjamento, levando em consideração o tipo de equipamento, o material e o forjamento, bem como dados específicos do produto a ser forjado.

3. MÉTODO DE PESQUISA

Para o desenvolvimento desta dissertação foi realizado uma modelagem matemática para o desenvolvimento de um ferramental para o processo de forjamento a quente de anéis de rolamentos em uma empresa de autopeças.

A modelagem matemática envolve a comparação de um método tradicional (sem *KBE*) e um método desenvolvido baseado em um sistema *KBE*. A Figura 10 ilustra as etapas utilizadas no desenvolvimento da modelagem matemática para a concepção de ferramentas para o forjamento de anéis.

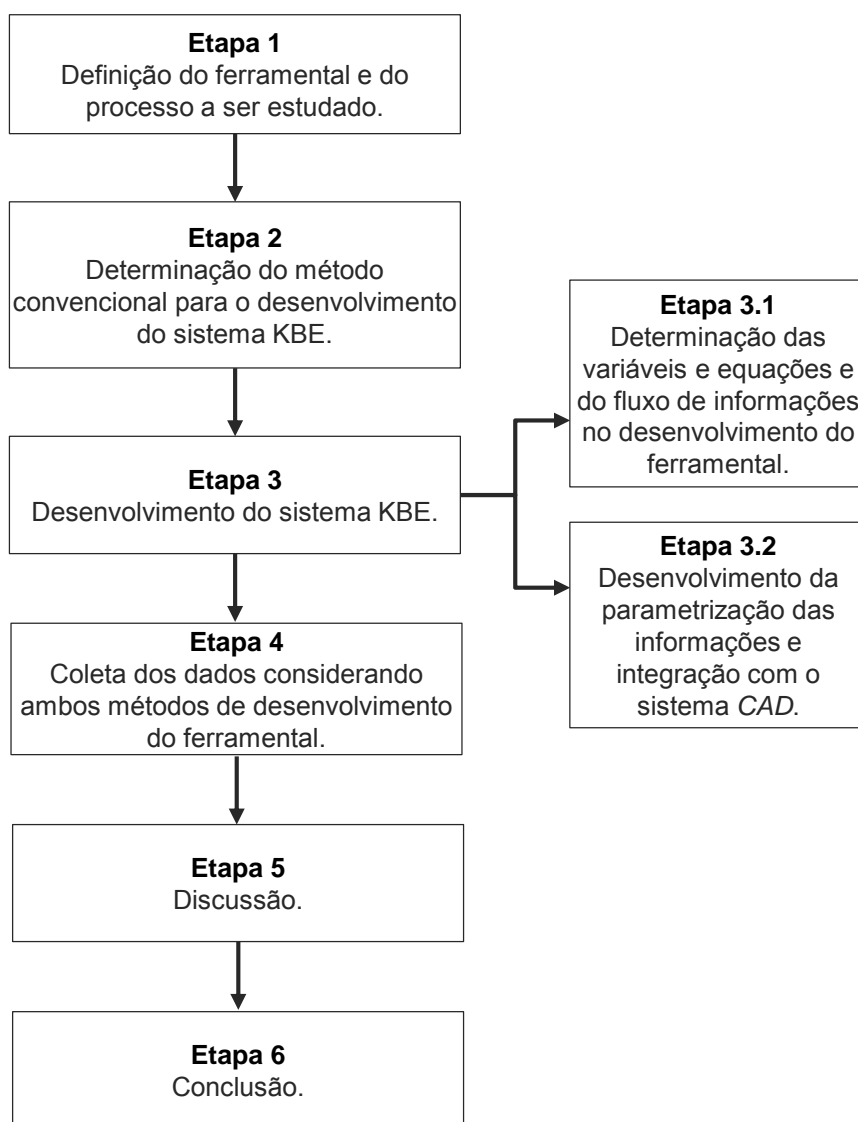


Figura 10 – Etapas no desenvolvimento da modelagem matemática.

Essas etapas consistem em estabelecer padrões e métodos mediante o desenvolvimento automático de fórmulas e variáveis com o uso de uma planilha eletrônica integrada ao sistema *CAD*. Este recurso permite a redução do tempo para a elaboração e revisão de ferramentas para forjamento a quente, além de menor erro de projeto.

O processo de forjamento a quente utilizado neste estudo caso é composto por uma prensa horizontal de duplo estágio modelo LKH 800, capacidade de 800 kN e 35 golpes por minuto, conforme Figura 11.

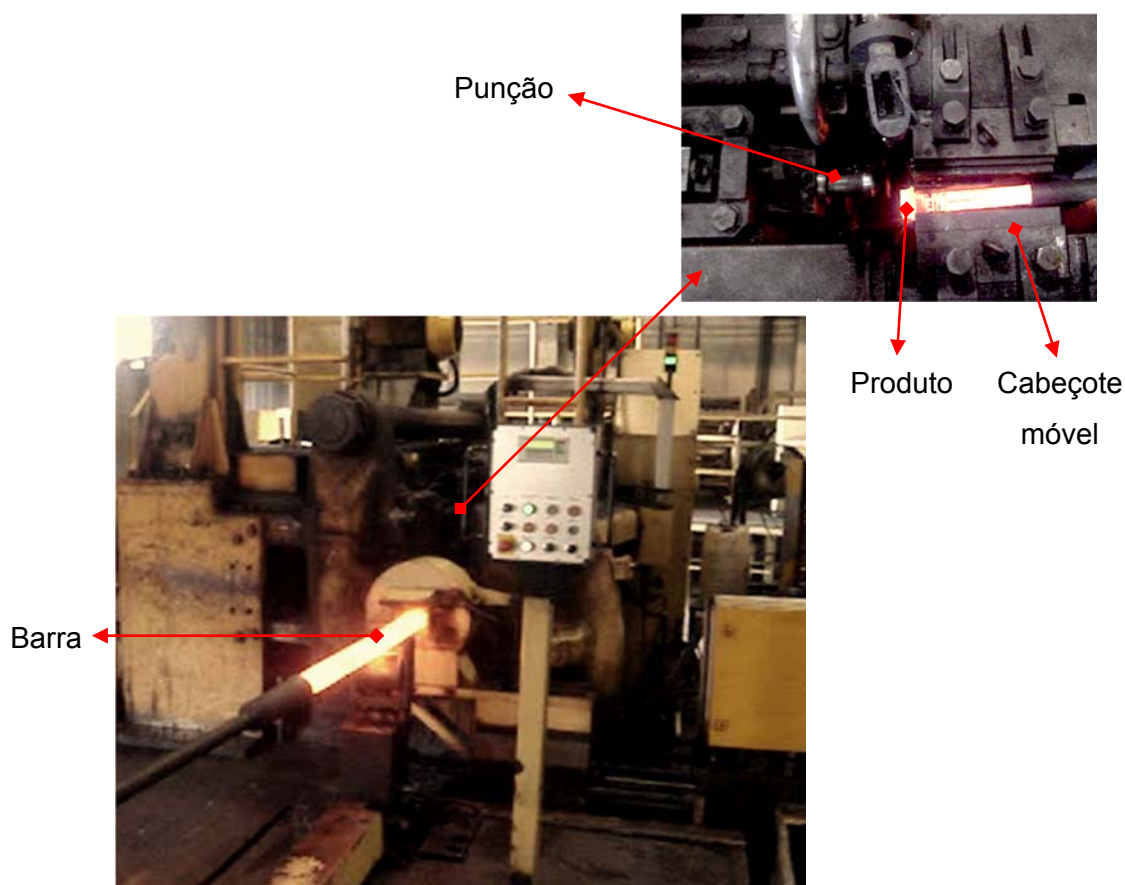


Figura 11 – Prensa horizontal LKH 800

As ferramentas para o forjamento dos anéis foram desenvolvidas utilizando o sistema CAD integrado com as planilhas eletrônicas que contém o conhecimento para o desenvolvimento do ferramental, Figuras 12 (a) e (b).

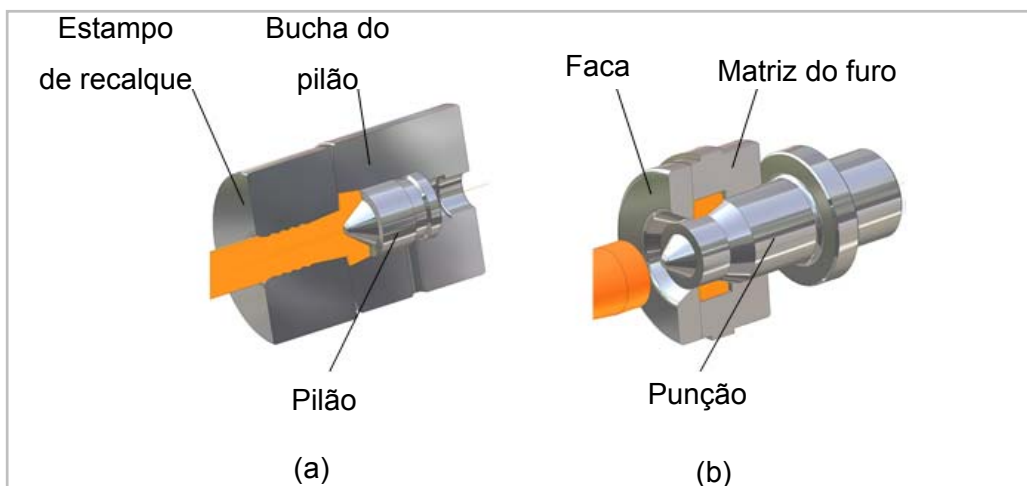


Figura 12 – Ferramentas para forjamento de anéis internos de rolamentos

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados obtidos são apresentados a seguir conforme etapas de pesquisa apresentados na Figura 10.

4.1. Definição do ferramental e do processo a ser estudado

O estudo de caso foi realizado em uma empresa de autopeças em que foi realizada a implementação do *KBE* aliado ao sistema *CAD* para automação de projetos dos componentes do ferramental para o forjamento a quente de anéis de rolamentos de SAE 52100.

Os anéis forjados são de aço SAE 52100 com composição química conforme apresentada na Tabela III é um material para uso em diversas aplicações industriais, comumente utilizado para fabricação de componentes, os quais necessitam de elevada dureza (CHANDLER *et al*, 1995).

O projeto para o desenvolvimento de ferramental para forjamento a quente de anéis de rolamentos de forma convencional, consiste na elaboração manual das variáveis e equações envolvidas para cada componente do ferramental no sistema, o que resulta em maior tempo de mão de obra tanto na elaboração como na revisão do projeto.

4.2. Determinação do método convencional para o desenvolvimento do sistema *KBE*

A fase inicial do dimensionamento do ferramental pelo método convencional consiste na definição e confecção dos desenhos técnicos com as dimensões geométricas do anel torneado e forjado, baseado nas características finais do anel. Em seguida, na segunda fase o ferramental é dimensionado em função das características geométrica do anel forjado. Nessa fase, o dimensionamento é realizado para cada componente do ferramental (bucha do pilão, pilão, estampo de recalque, macho, faca e matriz do furo), sendo os cálculos realizados manualmente. A terceira fase consiste em

alimentar o *software CAD* com as dimensões de cada componente, de forma manual. Uma vez definido as cotas geram-se os desenhos para revisão (quarta fase) e em caso aprovado, liberados para a confecção do ferramental.

Esse método tradicional torna-se dispendioso para as indústrias uma vez que necessita de uma maior quantidade de pessoas envolvida no projeto e um maior tempo de desenvolvimento.

A Figura 13 ilustra as fases de desenvolvimento do ferramental utilizado para o forjamento a quente de anéis interno de rolamento cônicos, por meio do método convencional.

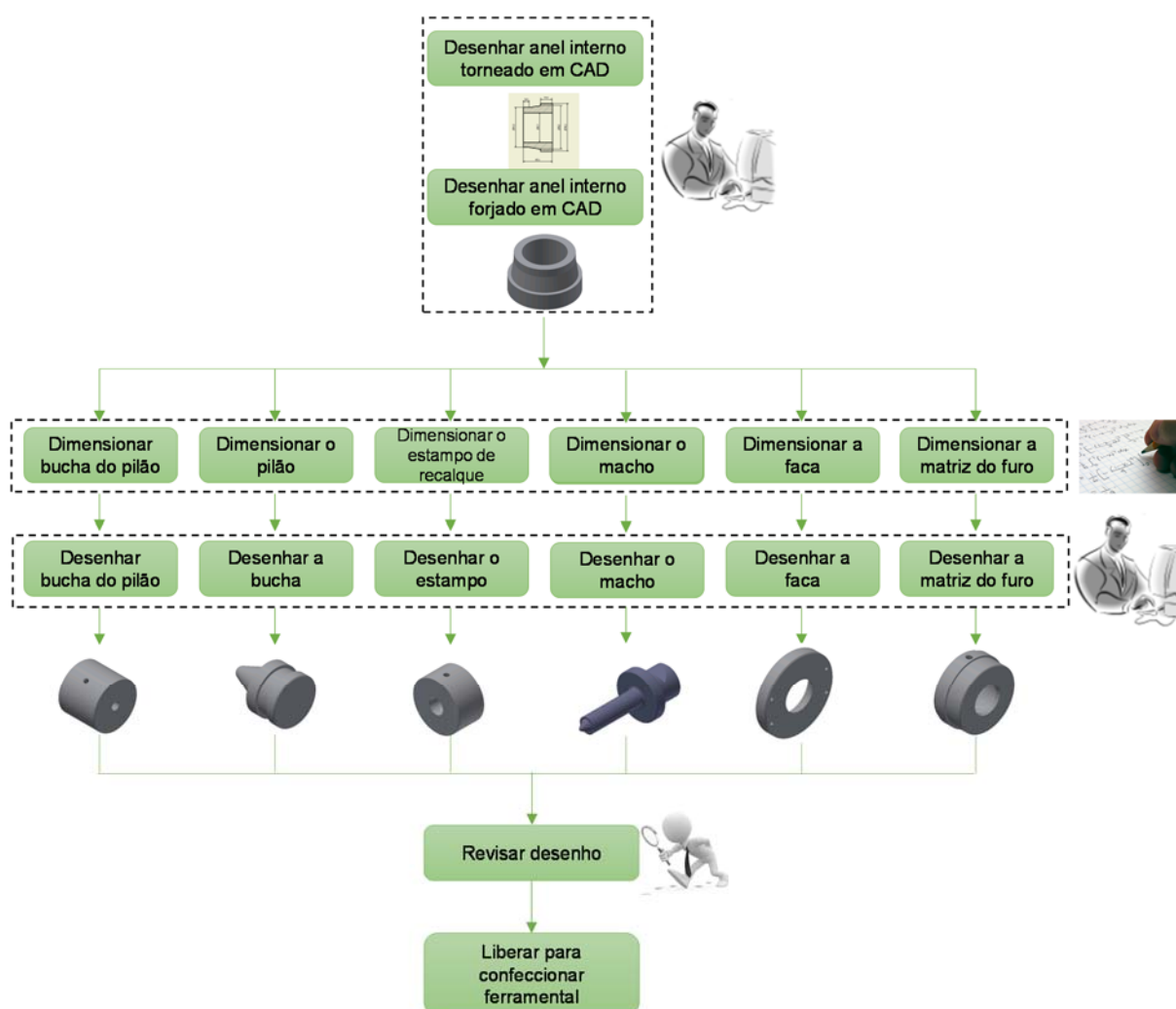


Figura 13 - Método convencional para o desenvolvimento do ferramental do anel interno

4.3. Desenvolvimento do sistema *KBE*

Esta etapa consiste em estabelecer padrões e métodos mediante o desenvolvimento automático de fórmulas e variáveis com o uso de planilha eletrônica integrada no sistema *CAD*. Este recurso permite a redução do tempo para a elaboração e revisão de ferramentas, além de menor erro de projeto. A metodologia *KBE* sugere inicialmente uma captação do conhecimento tácito a ser armazenado em um sistema baseado no conhecimento. Para tanto, foi utilizado o modelo “espiral de conhecimento” apresentados por Nonaka e Takeuchi para elaboração de uma proposta que proporcione a inserção de todos o conhecimento tácito para o dimensionamento do ferramental em planilha eletrônica, apresentado no Quadro 1.

Quadro 1- Aplicação da Espiral do Conhecimento

| Espiral do Conhecimento | Situação atual | Situação Proposta |
|--------------------------------|--|---|
| Socialização | - Conhecimento tácito concentrado somente em um projetista da equipe. Dos 3 integrantes, 1 é responsável pelo cálculo e 2 são responsáveis pela revisão de projetos, confecção e teste do ferramental. | - Padronização e documentação de dados para elaboração de projetos de ferramentas. - Criação de banco de dados com variáveis para elaboração de projetos utilizando uma planilha eletrônica. |
| Externalização | - Ocupação 100% do projetista na elaboração de projeto não tendo disponibilidade para formar novos projetista, pois todo o memorial de cálculo era realizado de forma manual. | - Integração da planilha com a plataforma <i>CAD</i> . - Treinamentos e formação de novos projetistas |

| | | |
|-----------------------|---|---|
| Combinação | Falta da padronização e documentação com dados para cálculo de projetos de ferramentas. | utilizando o memorial de cálculo gerado pela planilha eletrônica e plataforma de desenho <i>CAD</i> . |
| Internalização | Falta de treinamento e compartilhamento de informações pelos membros da equipe de projetos. | - Cronograma de reuniões para discussão de novos projetos e otimização das variáveis para o projeto de ferramentas. |

Com base nas informações coletadas de todo o corpo técnico envolvido no dimensionamento do ferramental, foi elaborado um fluxograma envolvendo todas as condições e os fatores antes da elaboração da planilha.

As Figuras (14, 15 e 16) demonstram o fluxo de cálculos realizados para a implementação do *KBE* na indústria de autopeças.

Estas figuras representam a rotina operacional completa empregada para a realização dos projetos dos componentes das ferramentas para forjamento a quente de anéis internos de rolamentos, a sequência dos cálculos foi:

- Fluxo de cálculo dos componentes do ferramental para o diâmetro da boca de recalque igual ao diâmetro do estampo de recalque ($S=T$) – vide figura 14;
- Fluxo de cálculo dos componentes do ferramental para $S>T$ – vide figura 15;
- Fluxo de cálculo dos componentes do ferramental para $S<T-2$ – vide figura 16.

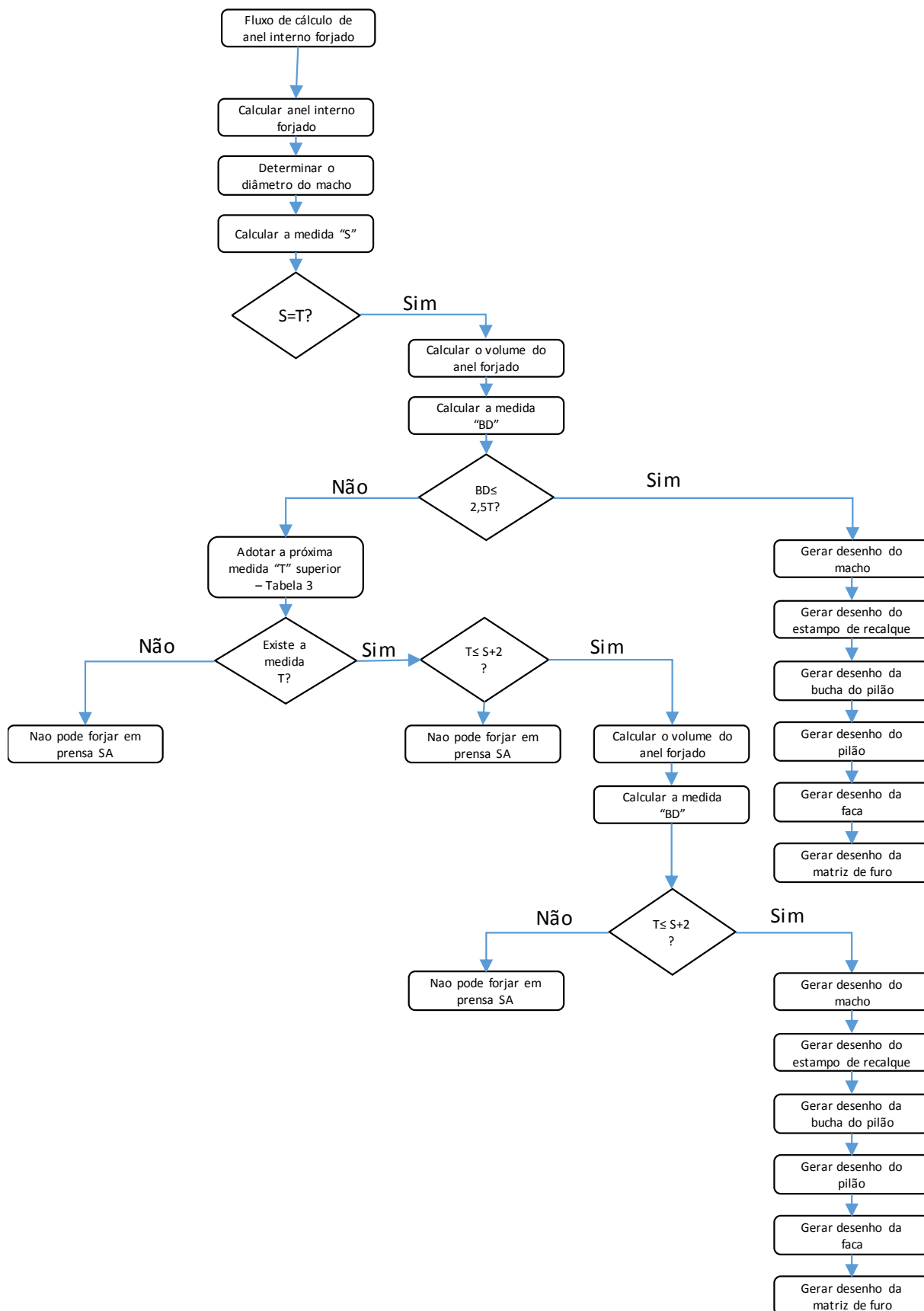


Figura 14- Fluxo de cálculo do anel interno para o diâmetro da boca de recalque igual ao diâmetro do estampo de recalque ($S=T$)

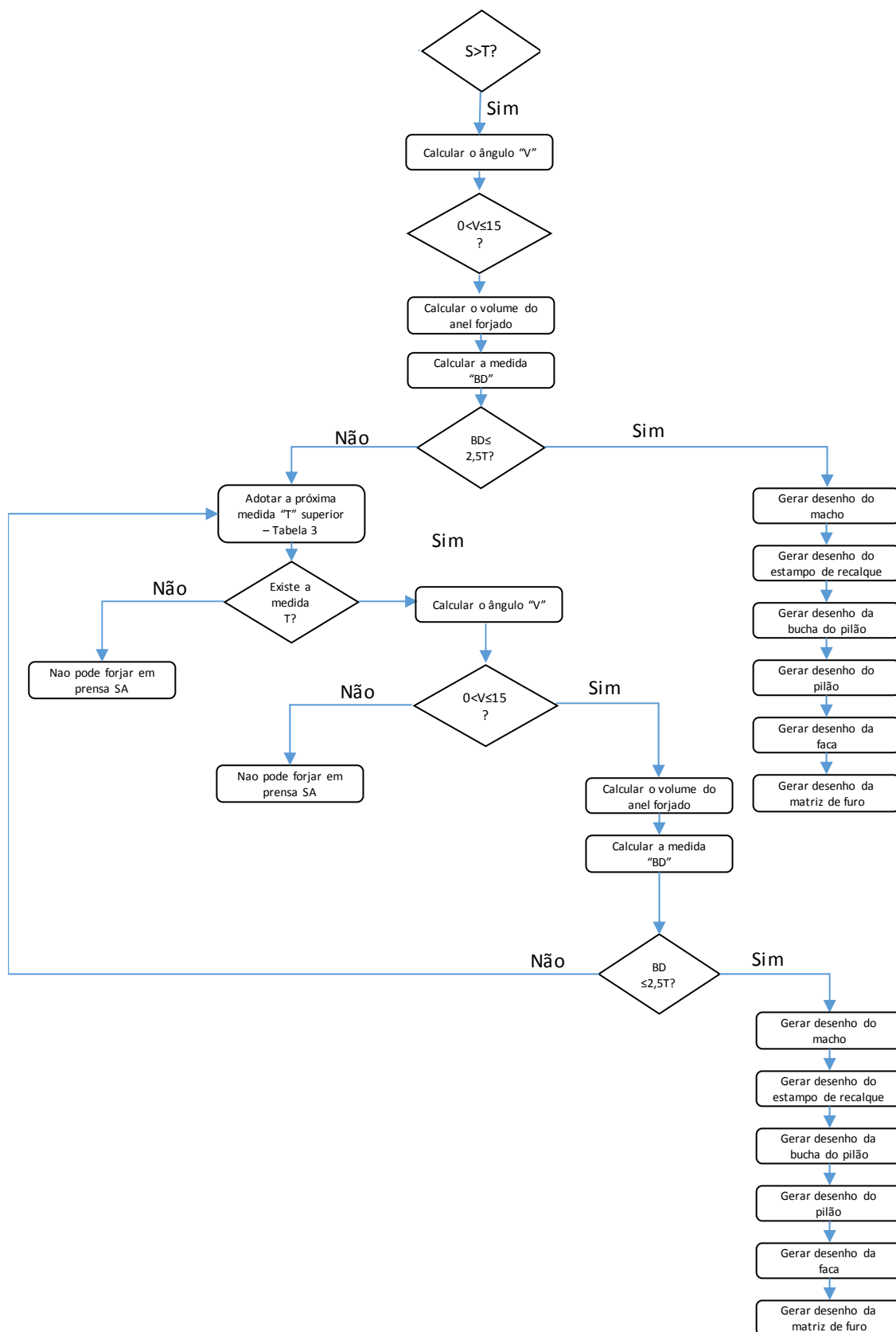


Figura 15 - Fluxo de cálculo do anel interno para $S > T$

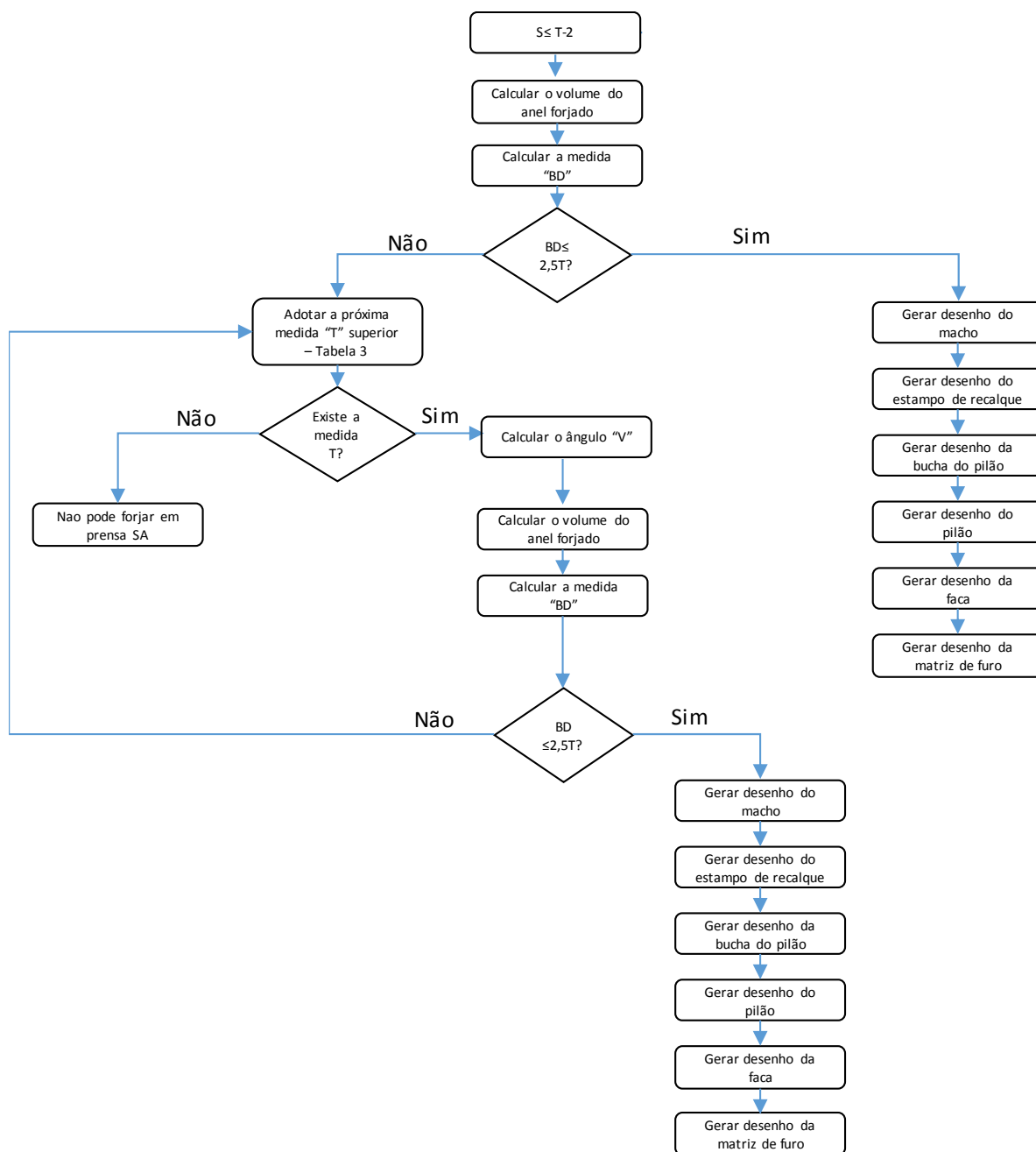


Figura 16 - Fluxo de cálculo do anel interno para $S < T-2$

Nesta etapa são realizados estudos baseado nos métodos de projetos convencionais, adaptando-os numa forma escrita simplificada e padronizada. Na Figura 17 está representado o fluxo da rotina completa implementada para o desenvolvimento do projeto de cada componente do ferramental para forjamento a quente.

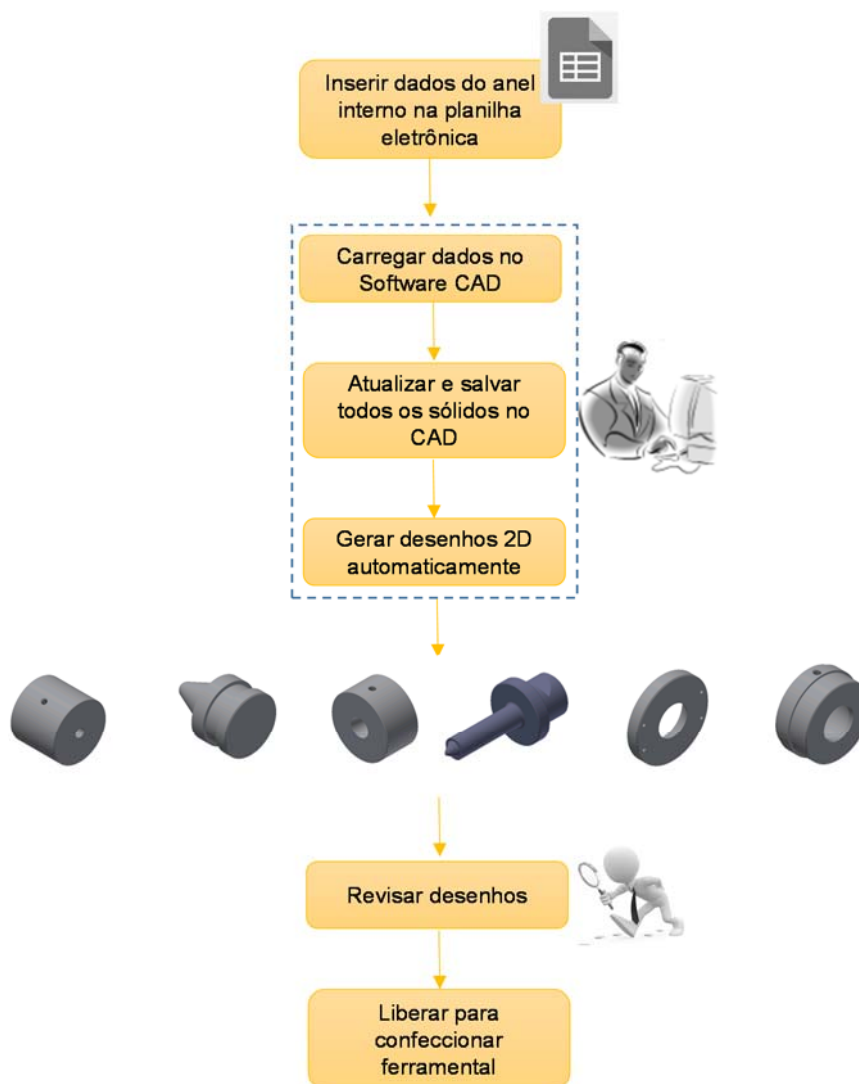


Figura 17 – Fluxo do desenvolvimento de projeto pelo método *KBE*

O desenvolvimento das ferramentas para o forjamento de anéis de rolamento de forma convencional demanda tempo e especialista específicos em projeto de ferramentas.

A metodologia *KBE* otimiza o processo de desenvolvimento das ferramentas, possibilitando que os dados sejam inseridos em uma planilha eletrônica (*Excel*) com interface a um *software CAD*.

O desenvolvimento das ferramentas para forjar anéis inicia-se inserido na planilha eletrônica todas as dimensões de acordo com o desenho do anel torneado fornecido pelo cliente e os padrões de dilatação dos anéis. Os valores dos padrões de dilatação são os adotados pelos fabricantes de anéis forjado a quente, definidos de forma

experimental. As dimensões das variáveis de entrada na planilha em ângulo devem ser inseridas em graus e as demais dimensões de construção do anel em mm.

O resultado é uma interface amigável, na qual o usuário insere em uma planilha eletrônica os valores da geometria (Figura 18) do anel interno torneado conforme especificação do cliente e de maneira automática. A planilha gera uma tabela com a dimensão de todos os componentes do ferramental que são enviados para o *software CAD* que gera os desenhos em 3D e em 2D, conforme está representado na Figura 18.

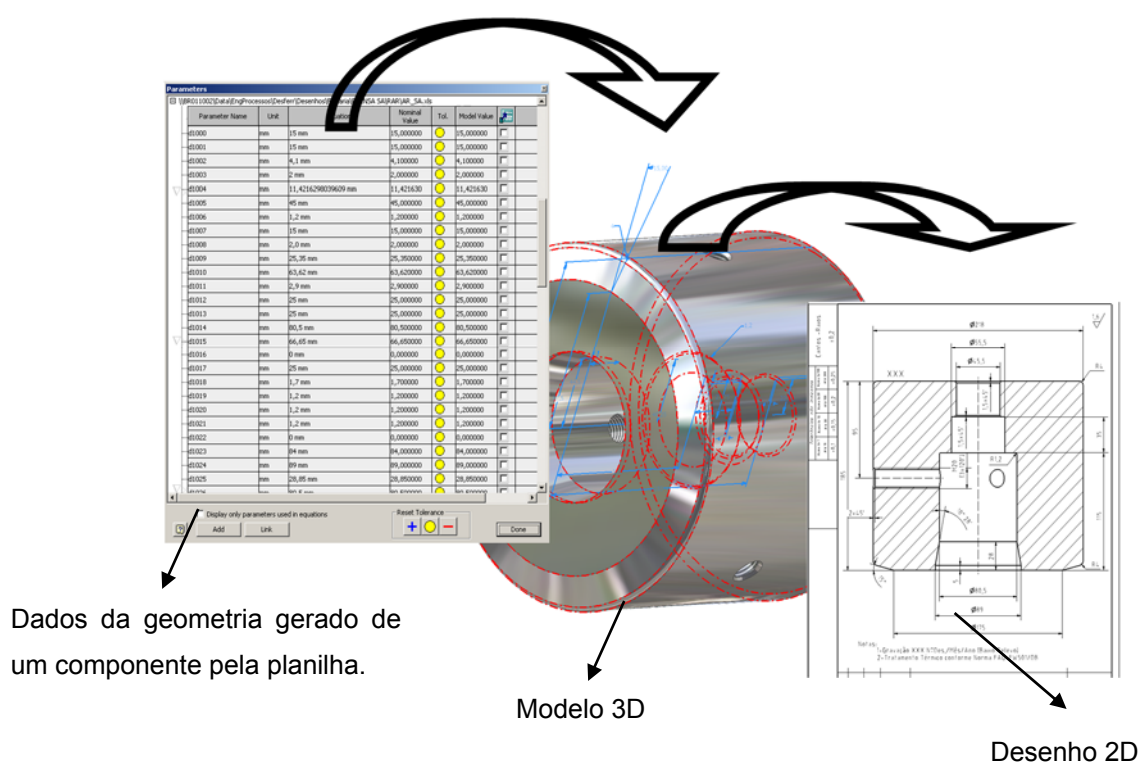


Figura 18 – Resultado da Interface planilha e CAD

Para utilizar a metodologia *KBE* aplicada ao desenvolvimento de ferramentas de forjamento de anéis de rolamentos o usuário deve instalar no computador os seguintes *softwares*: *Auto Desk Inventor Professional 2015* e *Excel 2013*. Os procedimentos utilizados para o projeto de ferramentas para forjamento de anéis internos devem ser executados inserindo os valores de cada cota do desenho do anel torneado na planilha eletrônica, conforme Figura 19.

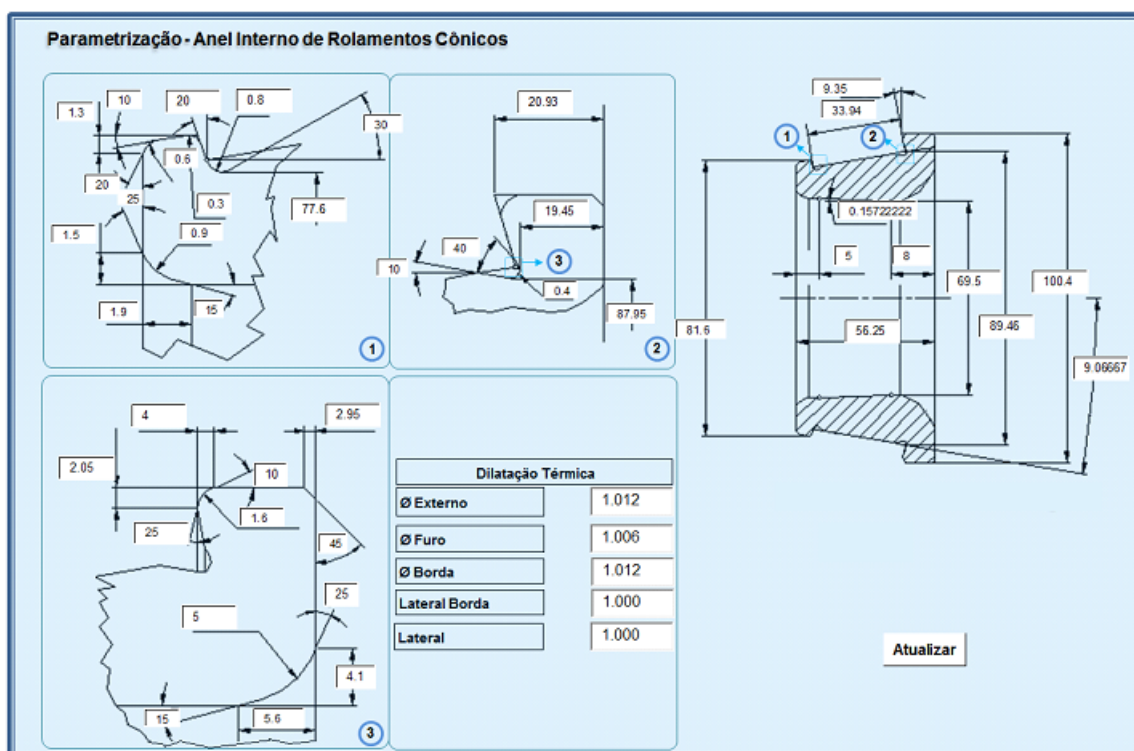


Figura 19 - Parametrização – anel interno de rolamentos cônicos

Vale ressaltar que as dimensões de ângulo devem ser inseridas em número decimal e utilizar ponto (.) ao invés de vírgula (,).

Os valores de “Dilatações térmicas” devem ser mantidos, pois já foram pré-selecionados conforme cada dimensão de anel.

Após inserir todas as dimensões do desenho os dados lançados, serão atualizados na planilha que está integrada com o sistema *CAD*. Os desenhos de cada componente do ferramental ((bucha do pilão, pilão, estampo de recalque, macho, faca e matriz do furo) serão regenerados automaticamente, gerando os modelos e os desenhos *2D* para cada componente.

As Figuras (20 - 26) demonstram os resultados obtidos no *software CAD* a cada etapa do processo para projeto das ferramentas para forjamento a quente de anéis.

Na Figura 20 está representado o desenho final do anel forjado já com as suas respectivas cotas, gerados a partir do software CAD.

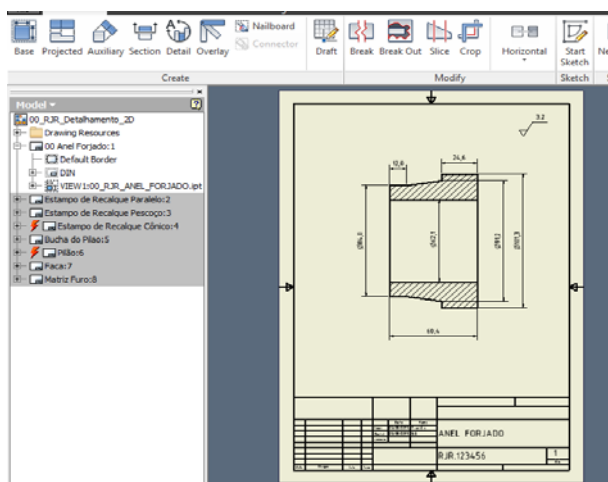


Figura 20 - Desenho do anel forjado em 2D

Na Figura 21 está representado o modelo do estampo e os desenhos 2D com as suas respectivas cotas, gerados a partir do software CAD, integrado à planilha eletrônica.

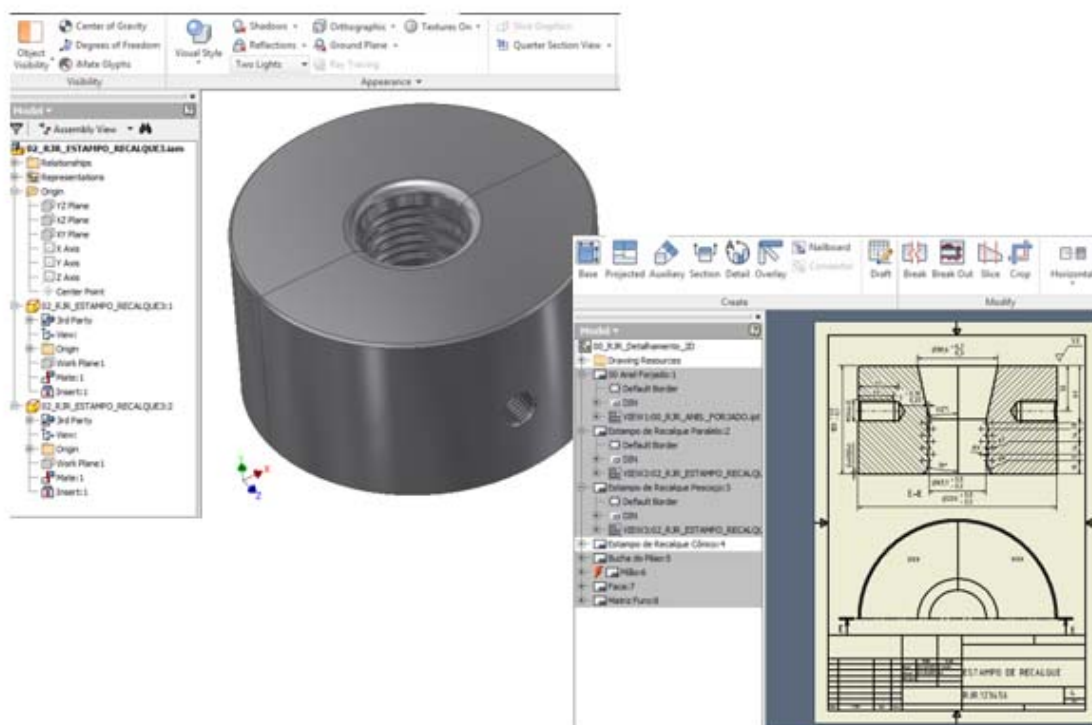


Figura 21 - Desenho do estampo de recalque em 3D e 2D

Na Figura 22 está representado o modelo da bucha do pilão e o desenho 2D com as suas respectivas cotas, gerados a partir do *software* CAD, integrado à planilha eletrônica.

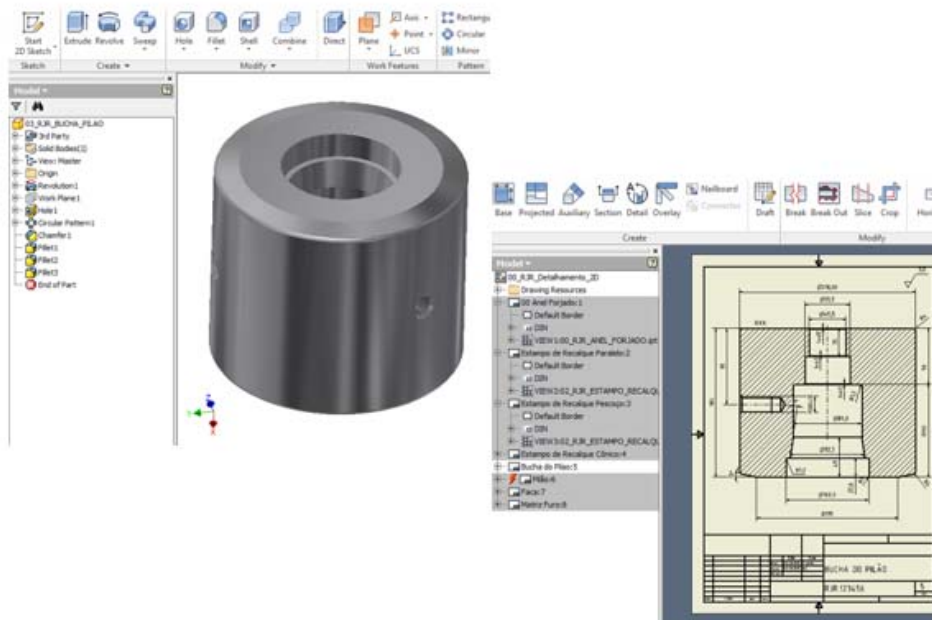


Figura 22 - Desenho da bucha do pilão em 3D e 2D

Na Figura 23 está representado o modelo do pilão e o desenho 2D com as suas respectivas cotas, gerados a partir do *software* CAD, integrado à planilha eletrônica

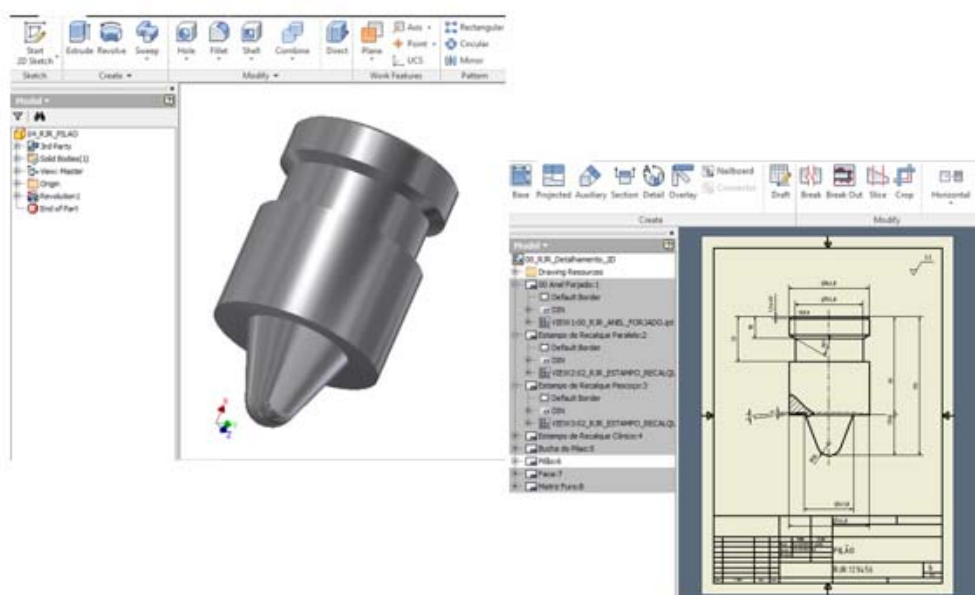


Figura 23 - Desenho do pilão em 3D e 2D

Na Figura 24 está representado o modelo do macho e o desenho 2D com as suas respectivas cotas, gerados a partir do *software* CAD, integrado à planilha eletrônica

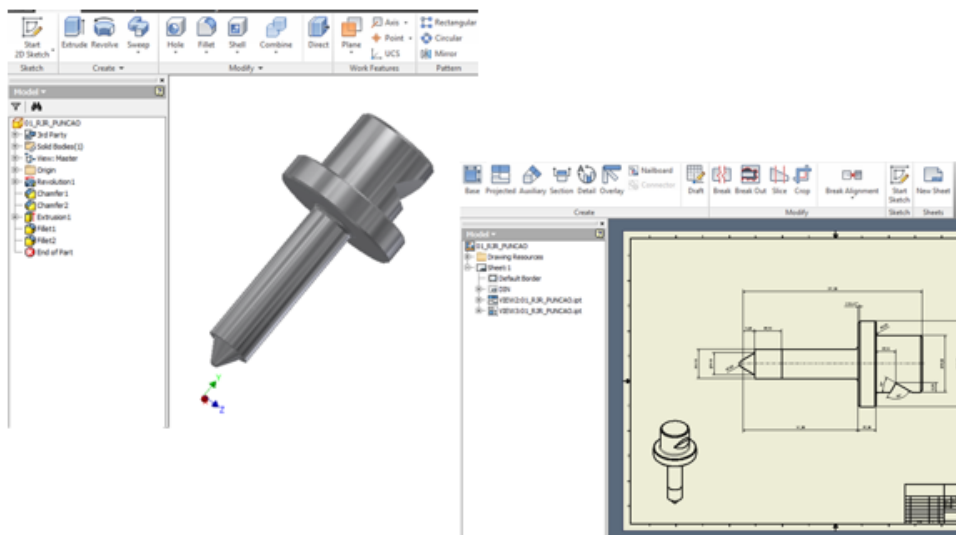


Figura 24 - Desenho do macho (ou punção) em 3D e 2D

Na Figura 25 está representado o modelo da faca e o desenho 2D com as suas respectivas cotas, gerados a partir do *software* CAD, integrado à planilha eletrônica

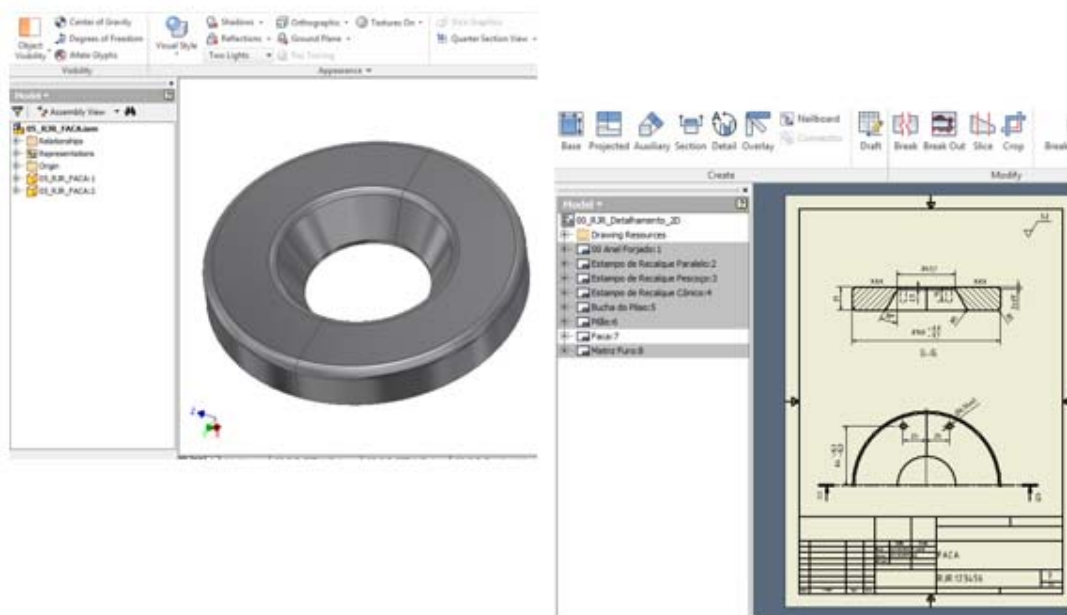


Figura 25 - Desenho da faca em 3D e 2D

Na Figura 26 está representado o modelo da matriz do furo e o desenho 2D com as suas respectivas cotas, gerados a partir do *software CAD*, integrado à planilha eletrônica

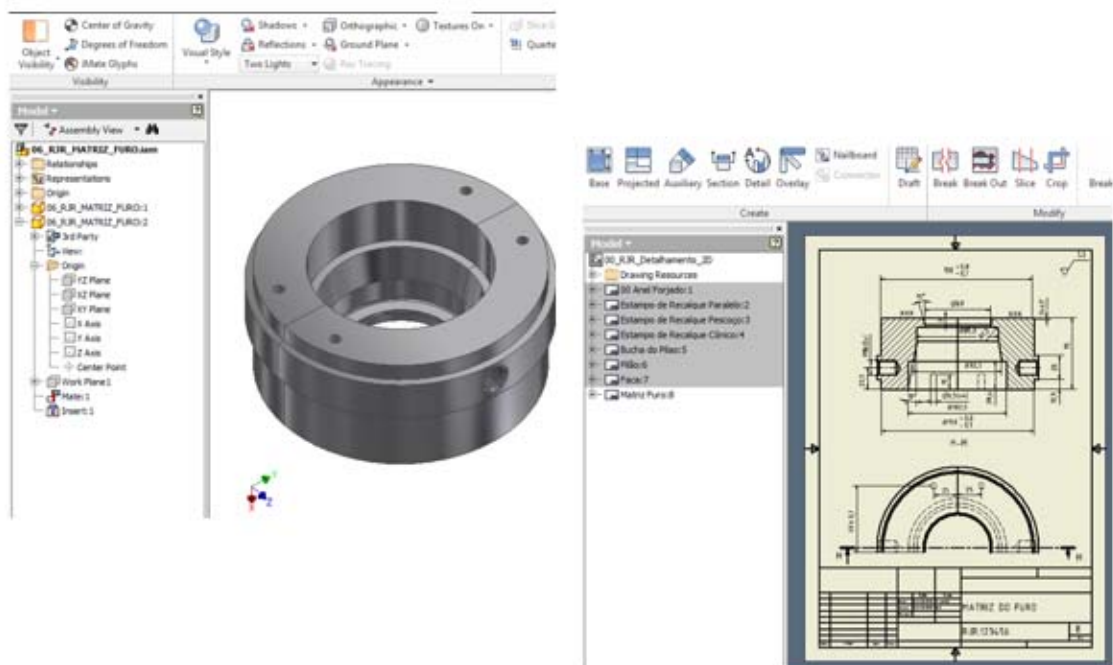


Figura 26 - Desenho da matriz do furo em 3D e 2D

A Figura 27 mostra o conjunto de ferramental (Estampo de recalque, matriz do furo, faca, bucha do pilão, pilão e macho). O resultado do forjamento utilizando estes componentes é o anel interno de rolamento conforme Figura 28.



Figura 27 – Ferramental para forjamento de anel de rolamento



Figura 28 – Anel interno forjado a quente

4.4. Coleta dos dados considerando ambos métodos de desenvolvimento do ferramental

Conforme pode ser observado na Tabela 2 os resultados obtidos com a utilização do sistema *KBE em relação ao sistema convencional*, apresentaram uma redução significativa no tempo para o desenvolvimento de ferramental para forjamento a quente, e na quantidade de mão de obra.

Tabela 2 – Variáveis de comparação para o *KBE* e o método convencional

| Variáveis de Comparação | | Método | |
|-------------------------|--------------------------------------|--------------|------------|
| | | Convencional | <i>KBE</i> |
| Tempo | Cálculo das variáveis. | 60 min | 0 min |
| | Desenho dos componentes em <i>2D</i> | 150 min | 60 min |
| | Verificação e aprovação dos desenhos | 30 min | 0 min |
| Mão de obra | Projetista (memorial de cálculo) | 1 | 0 |
| | Desenhista | 1 | 1 |
| | Revisor de desenhos técnicos | 1 | 0 |

De modo semelhante aos resultados obtidos no estudo realizado por Verhagen *et al.*, (2012), em relação ao método convencional, o método *KBE* aplicado ao desenvolvimento de ferramental de forjamento de anéis a quente possibilitou uma

redução de 75% do tempo de projeto. Além disso, foi possível também reduzir a mão de obra envolvida no desenvolvimento de projeto de ferramentas para forjamento a quente de 3 para 1 pessoa.

4.5. DISCUSSÃO

No trabalho apresentado, o conceito do *KBE* compreendeu a automação do projeto de ferramentas para o forjamento a quente de anéis para rolamentos cônicos utilizados na indústria de autopeças. A implementação do *KBE* teve como objetivo a redução do custo e do tempo para a elaboração do projeto de ferramentas para forjar anéis.

Os resultados da modelagem matemática demonstraram que o *KBE* promove uma otimização do processo, reduzindo os custos e o tempo de trabalho, possibilitando que o conhecimento especializado seja aplicado à criação de novos produtos e não em trabalhos repetitivos.

No presente trabalho, o desenvolvimento inicial compreendeu a inserção de todas as informações de conhecimento de alguns engenheiros e técnicos especializados, além de consulta à literatura técnica e equações sobre o projeto do processo de forjamento a quente (vide apêndice I), todas essas informações foram armazenadas e estruturadas em um sistema *CAD*. Esse processo possibilitou a criação de uma plataforma gráfica (planilha eletrônica – *Excel*) para calcular e definir todas as variáveis do projeto e conceber automaticamente o desenho final do projeto do ferramental para forjar anéis para rolamentos cônicos.

Os resultados obtidos com a utilização do *KBE* devem ser complementados com a análise geométrica. O *KBE* constitui uma evolução da aplicação de sistemas *CAD*, contribuindo para a redução de custos e tempo relacionados ao processo de desenvolvimento. Esses dados corroboram as afirmativas de diversos estudos consultados na revisão de literatura (SANDBERG, 2003; SANDBERG *et al*, 2005; SANDBERG *et al.*, 2008; PERRY; KODJA, 2010; NIKHIL; SHAKIR, 2011; ROCCA, 2012; VERHAGEN *et al.*, 2012)

No presente estudo, a validação dos cálculos gerados pela planilha eletrônica e os desenhos obtidos a partir das informações alimentadas na planilha foram obtidas por meio da confecção de ferramentas e da análise geométrica de peças forjadas a quente utilizando as ferramentas confeccionadas.

O *KBE* retém o conhecimento técnico sobre um produto de modo que esse conhecimento seja empregado para projetar, analisar e fabricar um produto.

Os resultados deste trabalho demonstraram uma eficácia do *KBE* na construção de modelos assistidos por computador, de modo semelhante às assertivas realizadas em estudos pesquisados (YANG *et al.*, 2012; VERHAGEN *et al.*, 2012; AHLERS; MEHRPOOR, 2014; JONG *et al.*, 2014; REDDY *et al.*, 2015).

No que se refere a aplicação do *KBE* na automatização de projetos de ferramentas para forjamento a quente, constatou-se que a otimização desse processo é necessária para redução do custo e para melhoria da qualidade da peça.

O principal objetivo de projetar modelos utilizando o *KBE* é armazenar e reutilizar o conhecimento técnico e especializado. Um fator importante para o sucesso é identificar e capturar o conhecimento relevante.

O *KBE* representa uma integração de programação orientada a objetos, inteligência artificial e *CAD*. Os sistemas *KBE* objetivam a captação de informações sobre um produto e seu processo para permitir a modelagem de processos de engenharia, e, posteriormente, usar o modelo para automatizar todo o processo ou parte do processo de desenvolvimento do produto.

O projeto realizado neste estudo de caso evidenciou a redução do tempo de elaboração de projetos de ferramentas para o forjamento, parametrizando e tornando as etapas de elaboração do projeto informatizadas, e conseqüentemente, a redução do custo e tempo para a elaboração do projeto de ferramentas para o forjamento a quente de anéis para rolamentos cônicos.

5. CONCLUSÃO

Baseado nos resultados obtidos, conclui-se que mediante a utilização do *KBE* é possível reduzir o tempo de engenharia empregado na rotina de desenvolvimento de produtos com diferentes dimensões, mas com as mesmas características geométrica, permitindo desta forma, que o engenheiro ou técnico especializado tenha mais tempo para as atividades criativas.

A utilização da ferramenta *KBE* empregada ao projeto de ferramentas para forjamento a quente de anéis, permitiu uma redução de 75% do tempo dispendido no projeto de ferramentas para forjamento a quente de anéis, passando de 240 min (convencional) para 60 min (*KBE*). Sendo que os ganhos mais representativos com a utilização do *KBE* para a modelagem matemática de ferramentas foram nos cálculos das variáveis, reduzindo em 100% (60 minutos para zero) e na geração dos desenhos *2D* que eram realizados pelo método convencional de forma manual, passando de 150 minutos para 60 minutos.

Além disso, foi possível também reduzir o número de pessoas envolvidas no desenvolvimento de projeto de ferramentas, passando de 3 para somente uma 1 pessoa necessária em toda concepção do projeto.

A utilização do *KBE* em modelo de produto representa a intenção de engenharia por trás da concepção do produto, a partir do armazenamento de dados e conhecimentos técnicos do produto. É uma representação do computador em relação ao processo de concepção de um produto e pode conter as informações sobre o produto e os processos que são utilizados para criar uma peça.

Um modelo *KBE* também pode usar informações além de seu ambiente, a partir da análise física, bancos de dados, planilhas, entre outros.

A utilização do *KBE* no processo de desenvolvimento de ferramentas para o forjamento a quente na indústria de autopeças demonstrou-se viável, de fácil implementação e adaptação às necessidades da empresa.

Em síntese conclusiva, é possível afirmar que o *KBE* permite que as empresas retenham conhecimentos importantes de design de engenharia, facilitando o processo de desenvolvimento e reduzindo o tempo empregado em atividades de rotina. O conhecimento técnico de engenharia pode ser empregado para automatizar o processo de *design*, permitindo que o engenheiro empenhe a maior parte do seu tempo em processos criativos.

5.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Deste modo, os dados apresentados na modelagem matemática podem servir como base para a implementação do *KBE* no processo de desenvolvimento de produtos, automatizando as rotinas e eliminando o tempo gasto em atividades repetitivas, permitindo que mais tempo seja dispensado ao processo de criação.

Para trabalhos futuros sugere-se a integração (*CAD-CAM*) entre o software Inventor e um centro de Usinagem para evitar a impressão de desenho, além disso evitar o tempo gasto com a programação do equipamento, uma vez que o sistema permite a geração automática.

Sugere-se também a integração entre o *software Inventor* e o *software Deform* que permite aos projetistas analisar a conformação sem *try-out*.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABACHI, S.; AKKOK, M.; GOKLER, M.I. Wear analysis of hot forging dies. **Tribology International**, v. 43, p. 467-473, 2010.

AHLERS, D.; MEHRPOOR, M. Semantic social recommendations in knowledge-based engineering. **NTNU**, v. 1210, set-2014.

AL-HATMI, A.; HALES, K. Strategic alignment and it projects in public sector organization: hallenges and solutions. European and Mediterranean **Conference on Information Systems**, 2010.

AMADORI, K.; TARKIAN, M.; OLVANDER, J.; KRUS, P. Flexible and robust CAD models for design automation. **Advanced Engineering Informatics**, v.26, n. 2, p. 180-195, 2012.

AMATE, S.Q.; GARCIA, P.B.; TIWARI, A. Transforming expertise into Knowledge-based engineering tools: a survey of Knowledge sourcing in the context of engineering design. **Knowledge-Based Systems**, v. 84, p.89-97, 2015.

ASM HANDBOOK, Forming and Forging, volume 14, 1988.

BOMBASSARO, L. C. **As fronteiras da epistemologia: como se produz o conhecimento**. Petrópolis, RJ: Vozes, 1982.

BARROSO, C.A.S.; SCHUTZER, K; HELLENO, A.L. Aplicação da engenharia baseada em conhecimento no desenvolvimento integrado do produto através da utilização de funções parametrizadas em sistemas CAx. **ABCM – 5º COBEF** – Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, 14 a 17 de abril de 2009.

BIGLARI, F.R.; ZAMANI, M. Die wear profile investigation in hot forging. **WCE**, v. 2, 2008.

BOIRAL, J. C. **Gestão ambiental empresarial: conceitos, modelos e instrumentos**. São Paulo, Saraiva, 2007.

BROADBENT, M.; WEILL, P. Improving business and information strategy alignment: Learning from the banking industry. **IBM Systems Journal**, v.32, n. 1, p. 162-179, 1993.

CALKINS, D.E. Knowledge-based engineering (*KBE*) Design methodology at the undergraduate and graduate levels. **Int J. E. E.**, v. 16, n. 1, p. 21-38, 2000.

CASTRO, H.; FERNÁNDEZ-VICENTE, A.; CID, J. **Influence of the nitriding in the wear behaviour of on AISI H13 steel during a crankshaft forging process.** Materials and Manufacturing Process Area, Wear 2007.

CHANDLER, H.; FLINT, V.; DAVIDSON, G. M.; BORING, R. L.; POWERS, C. L. Heat Treater's Guide – ASM International - **Practices and Procedures for Irons and Steels.** 1995.

CHAPMAN, C.B.; PINFOLD, M. Design engineering – a need to rethink the solution using knowledge based engineering. **Knowledge-Based Systems**, n. 12, p. 257-267, 1999.

CHAPMAN, C.B.; PINFOLD, M. The application of a knowledge based engineering approach to the rapid design and analysis of an automotive structure. **Advances in Engineering Software**, n.32, p. 903-912, 2001.

CHANDRASEGARAN, S.K.; RAMANI, K.; SRIRAM, R.D.; HORVÁTH, I.; BERNARD, A.; HARIK, R.F.; GAO, W. The evolution, challenges, and future of Knowledge representation in product design systems. **Computer-Aided Design**, n.45, p. 204-228, 2013.

COOPER, D.; ROCCA, G. Knowledge-based techniques for developing engineering applications in the 21st Century. **American Institute of Aeronautics and Astronautics**, p.1-22, 2007.

CURRAN, R.; VERHAGEN, W.J.C.; TOOREN, M.J.L.; LAAN, T.H. A multidisciplinary implementation methodology for knowledge based engineering: KNOMAD. **Expert Systems with Applications**, v. 37, n. 11, p. 7336-7350, 2010.

EQUBAL, M.I.; TALUKDAR, P.; OHDAR, R.K. Application of optimization techniques in metal forging – a review and reflection. **International Journal of Scientific & Engineering Research**, v. 4, n.8, 2013.

FIDAN, I.; ELSAWY, A. The development of a knowledge-based engineering tool for CNC Machining. **Int J. E.E.**, v.18, n. 6, p. 732-735, 2002.

GARCIA, P.B. Practitioner requirements for integrated knowledge based engineering in PLM. **International Journal of Product Lifecycle Management**, v. 3, n. 1, p. 3-20, 2008.

GARTLAN, J.; SHANKS, G. The alignment of business and information technology strategy in Australia. **Australasian Journal of Information Systems**, 14(2):113-139, june, 2007.

HENDERSON, J.C.; VENKATRAMAN, N. Strategic alignment: leveraging information technology for transforming organization. **IBM Systems Journal**, 32(1): 4-16, 1993.

JONG, W.R.; TING, Y.H.; LI, T.C. Application of knowledge-based engineering for automated slide design. **Int J Adv Manuf Technol**, n. 74, p. 637-651, 2014.

KLEIN, R. Towards an integration of engineering knowledge management and knowledge based engineering. **Moka 1**. 2000.

KUHN, O. Methodology for knowledge-based engineering template update: focus on decision support and instances update. **Computers and Society**. Université Claude Bernard – Lyon I, 2010.

KULON, J.; BROOMHEAD, P.; MYNORS, D.J. Applying knowledge-based engineering to traditional manufacturing design. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 30, n. 9, p. 945-951, 2006.

LIGHT, R.; GROSSARD, D. Modification of geometric models through variational geometryII. **Computer-Aided Design**, n. 14, p. 209-214, 1982.

LOVETT, P.J.; INGRAM, A.; BANCROFT, C.N. Knowledge-based engineering for SMESs –a methodology. **Journal of Material Processing Technology**, v. 107, p. 384-389, 2000.

MOHAMMED, J.; MAY, J.; ALAVI, A. Application of computer aided design (CAD) in knowledge based engineering. **ENG 103**, paper 83, 2008.

MOLINARO, L.F.R.; RAMOS, K.H.C. **Gestão de tecnologia da informação: governança de TI – arquitetura e alinhamento entre sistemas de informação e o negócio**. São Paulo: LTC, 2011.

NONAKA, I; TAKEUCHI, H. **Criação de conhecimento na empresa**. Rio de Janeiro: Campus, 1997.

NONAKA, I. **The Knowledge-creating company**. Harvard Busine Review, New York, v6, n.4, 1991.

NONAKA, I; TAKEUCHI, H. **Gestão do Conhecimento**. Porto Alegre: Bookman, 2008.

NUMTHONG, C.; BUTDEE, S. The knowledge based system for forging process design based on case-based reasoning and finite element method. **AIJSTPME**, v. 5, n. 2, p. 45-54, 2012.

ORAVEC, J.A. Expert systems and knowledge-based engineering (1984-1991): implications for instructional systems research. **International Journal of designs for learning**, v. 5, n. 2, p. 66-75, 2014.

PERRY, N. KHODJA, S.A. A Knowledge Engineering Method for New Product Development. **Journal of Decision Systems**, v. 19, n. 1, p. 117-133, 2010.

PETTER, A.; OLA, I.; TOBIAS, L. A case study of how knowledge base engineering tools support experience re-use. **ICORD'11 International Conference**, 2011.

RAVI, R.; SARMA, V.V.S.; PRASAD, Y.V.R.K. A hybrid intelligent systems approach for hot forging process design. **Journal of the CSI**, v. 37, n. 2, p. 32-39, 2007.

RATHI, M.G e JAKHADE, N.A. "An Overview of Forging Processes with their effects", International Journal of scientific and Research Publications, Vol.4 N°6, 2014.

REDDY, E.J.; SRIDHAR, C.N.V.; RANGADU, V.P. Knowledge based engineering: notion, approaches and future trends. **American Journal of Intelligent Systems**, v. 5, n. 1, p. 1-17, 2015.

ROCCA, G. Knowledge based engineering: between AI and CAD. Review of a language based technology to support engineering design. **Advanced Engineering Informatics**, n. 26, p. 159-179, 2012.

ROCCA, G.; TOOREN, M.J.L. A knowledge based engineering approach to support automatic generation of FE Models in Aircraft Design. **Delft University of Technology**, 2007.

ROCKART, J.F.; EARL, M.J; ROSS, J.W. The new it organization: eight imperatives. **Sloan Management Review**, 31(1):43-55, 1996.

SCHONS, C. H. e COSTA, M. D. **Portais corporativos no apoio de conhecimento organizacional: um abordagem teórica**. Revista de Ciência da Informação – v.9 n.3, 2008.

SANDBERG, M. Knowledge based engineering – in product development. **Technical report**, 2003.

SANDBERG, M.; BOART, P.; LARSSON, T. Functional product life-cycle simulation model for cost estimation in conceptual design of jet engine components. **Concurrent Engineering: Research and Applications**, v. 13, p. 331-342, 2005.

SANDBERG, M.; JOHNSON, H.; LARSSON, T. Knowledge-based engineering in construction: the prefabricated timber housing case. **ITcon**, v.13, p. 408-420, 2008.

SANYA, I.O.; SHEHAB, E.M. An ontology framework for developing platform-independent knowledge-based engineering systems in the aerospace industry. **International Journal of Production Research**, 2014.

SHINTRE, N.; SHAKIR, A. Knowledge Based Engineering across Product Realization. **Geometric White Paper**, Version 1.0, June 2011.

SMITH, H.A.; MCKEEN, J.D.; SINGH, S. Developing information technology strategy for business value. **Journal of Information Technology Management**, v.3, n.1, p.49-58, 2007.

STAHLBERG, U.; HALLSTROM, J. A comparison between two wear models. **J. Materials Processing Technology**, v. 87, p. 223-229, 1999.

STEWART, T.A. **A Riqueza do Conhecimento: O capital intelectual e a organização do século XXI**. Rio de Janeiro: Campus, 2002.

TIWARI, V.; JAIN, P.K.; TANDON, P. Design process automation support through knowledge based engineering. **WCE**, v. 2, 2013.

TREHAN, V.; CHAPMAN, C.; RAJU, P. Informal and formal modelling of engineering processes for design automation using knowledge based engineering. **Journal of Zhejiang University Science**, v. 16, n. 9, p. 706-723, 2015.

VERHAGEN, W.J.C.; GARCIA, P.B.; DIJK, R.E.C.; CURRAN, R. A critical Review of Knowledge-based engineering: an identification of research challenges. **Advanced Engineering Informatics**, v. 26, n. 1, p. 5-15, jan, 2012.

XU, W.; LI, W.; WANG, Y. Experimental and theoretical analysis of wear mechanism in hot-forging die and optimal design of die geometry. **Wear**, n. 318, p. 78-88, 2014.

YANG, H.Z.; CHEN, J.F.; WANG, D.Y. Implementation of knowledge-based engineering methodology in ship structural design. **Computer-Aided Design**, n. 44, p. 196-202, 2012.

YAO, D; CHANG, Z.; ZHAO, J.; DOU, Y. Study on key techniques of parametric design system based solid Works and KBEII. **Applied mechanics and materials**, v. 71-78, p. 3861-3867, 2011.

APÊNDICE I

EQUAÇÕES PARA GERAR OS DESENHOS DAS FERRAMENTAS PARA O FORJADO DE ANÉIS INTERNOS PARA ROLAMENTOS CÔNICOS.

1- Nas Tabelas 1 e 2 estão as equações das variáveis para o modelamento do anel forjado, conforme Figura I.

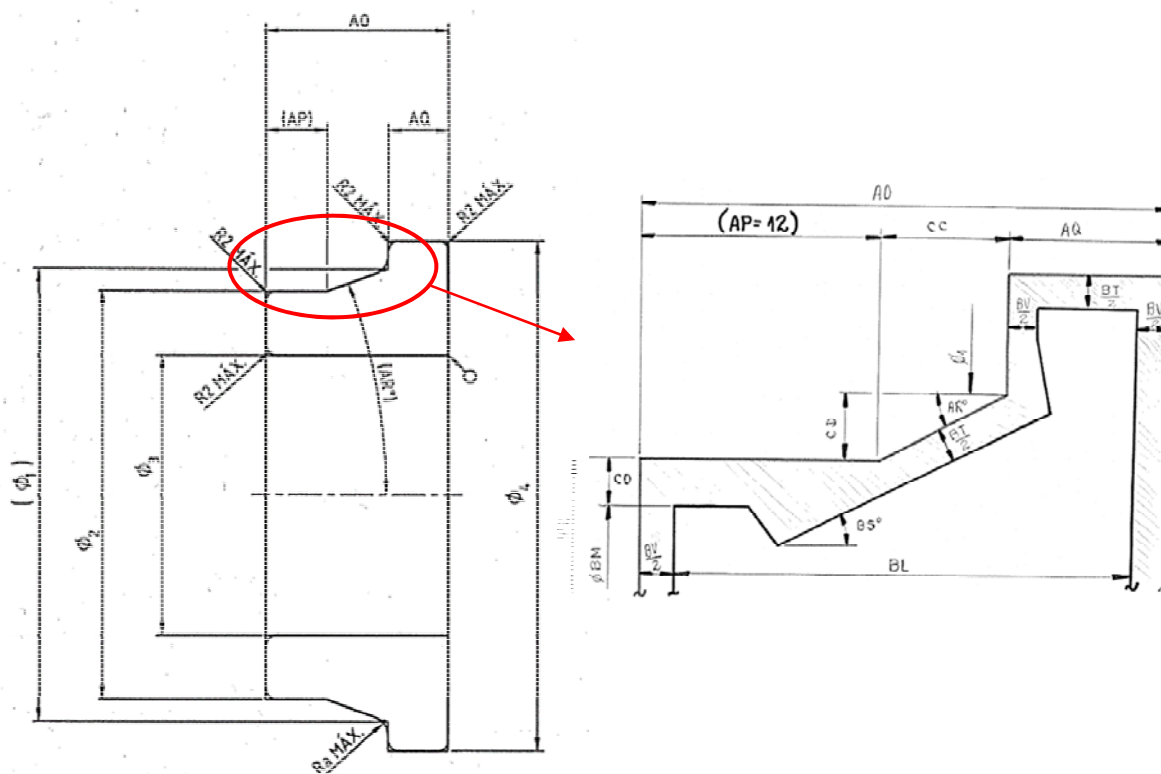


Figura I – Anel Forjado

Tabela 1 – Equações para anel forjado

| Diametro Externo Máximo Torneado | BT | BU | BV | R máx. nos Cantos |
|----------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| $C \leq 80$ | 5,0 (+1,5 / -0,5) | 3,5 (+1,0 / -0,5) | 4,7 (+1,0 / -0,5) | 2 |
| $80 < C \leq 120$ | 5,0 (+1,5 / -0,5) | 4,0 (-1,2 / +0,5) | 4,7 (+1,2 / -0,5) | 2 |
| $120 < C \leq 150$ | 5,5 (+2,0 / -0,5) | 4,5 (-1,5 / -0,5) | 4,7 (+1,5 / -0,5) | 2 |

Tabela 2 - Equações para anel forjado

| | |
|--|--|
| $AO = BL + BV$ e $AO - AQ \geq 16$ | $BY = AQ \cdot \operatorname{tg}BS^\circ$ e $BS^\circ = AR^\circ$ |
| $AQ = BK + BV$ | $AQ = BV + BK$ |
| $AR^\circ = BS^\circ$ | $Ra = [(\phi_4 - \phi_1)/2] - 2$ e $Ra > 4$ |
| $\phi_4 = BN + BT$ | $CM = \frac{(BM - CH)}{2}$ |
| $\phi_3 = BQ - BU$ | $CK = \frac{BV}{2} + CG$ |
| $\phi_1 = CB - 2BY$ | $AP = CL - CI$ e $AP \geq 12$ |
| $\phi_{CB} = \phi_{CA} + 2BZ$ | $CL = \frac{BV}{2} + CG + CJ$ |
| $\phi_{CA} = \phi_{BP} + 2BW$ | $\operatorname{tg}BS^\circ = \frac{CM}{CJ}$ |
| $BZ = \frac{0,5BT}{\operatorname{COS} BS^\circ}$ | $CI = \frac{BT}{2} \cdot \operatorname{tg}\left(\frac{BS^\circ}{2}\right)$ |
| $BW = \operatorname{tg}BS^\circ \cdot 0,5BV$ | $\phi_2 = BM + BT$ e $AP \geq 12$ |
| $BZ = \frac{0,5BT}{\operatorname{cos}BS^\circ}$ | $AO = AP + CC + AQ$ |

2- Bucha do Pilão

Está representado na Figura II a bucha do pilão com suas respectivas variáveis.

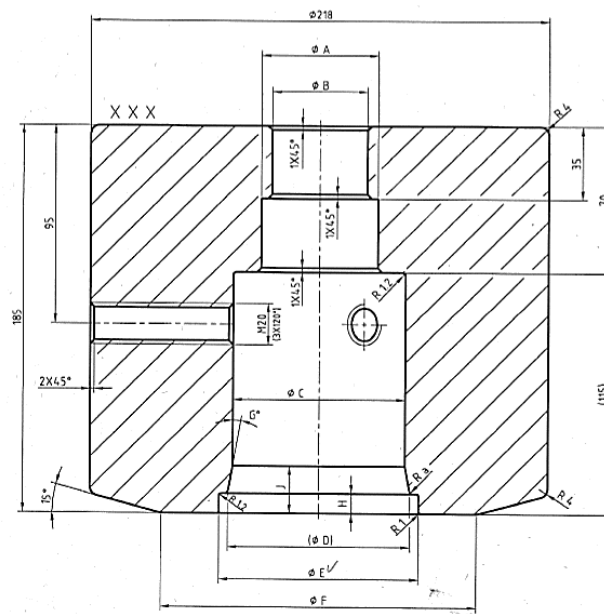


Figura II - Bucha do pilão

Na Tabela 3 estão representadas as equações das variáveis para o modelamento da bucha do pilão.

Tabela 3 - Equações para a bucha do pilão

| ØB (mm) | | | |
|-------------|-------------|--------------|---------|
| Ø30,5 | Ø35,5 | Ø45,5 | Ø55,5 |
| 50 ≤ C ≤ 60 | 60 < C ≤ 80 | 80 < C ≤ 100 | C > 100 |

| |
|---|
| $\psi = 1,012$ |
| $\varnothing E = \psi \cdot \varnothing_4$ |
| $\varnothing E + 50 \leq 175$ |
| $\varnothing D = \varnothing_1 \cdot \psi$ |
| $\varnothing C = \varnothing_2 \cdot \psi$ |
| $H = A Q - 1$ |
| $J = [(A O - A P - A Q) + H]$ |
| $\varnothing A = \varnothing C + 10$ |
| $\text{Arctg} G^\circ = \frac{\varnothing D - \varnothing C}{2 \cdot (J - H)}$ |
| $Ra = \left[\frac{\varnothing E - \varnothing D}{2} \right]$ se $Ra > 4$, considerar $Ra = 4$ |

3- Pilão

Está representado na Figura III o pilão com suas respectivas variáveis.

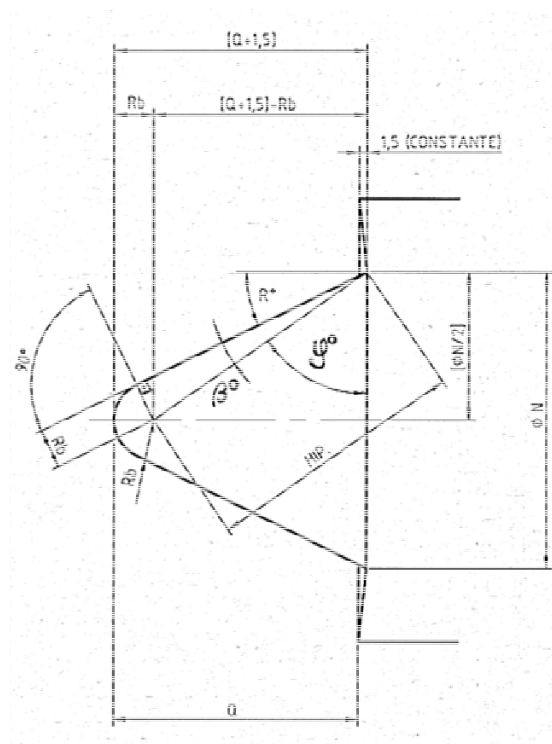
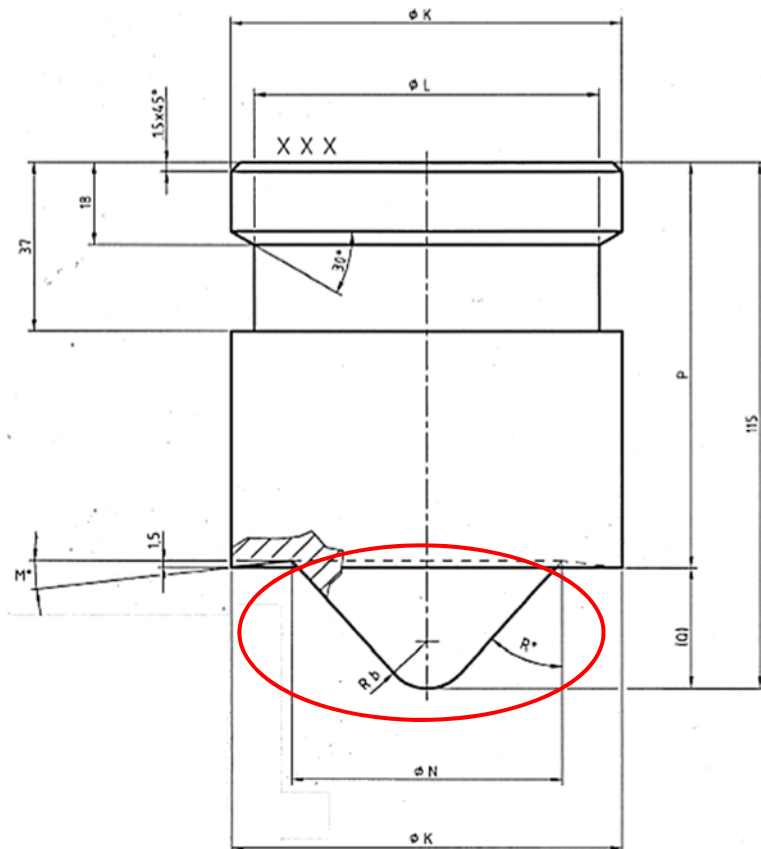


Figura III – Desenho do pilão

Na Tabela 4 estão representadas as equações das variáveis para o modelamento do pilão.

Tabela 4 – Equações para o pilão

| |
|---|
| $\varnothing K = \varnothing C - 5$ |
| $P = 115 - Q$ |
| $Q = AO - 1$ |
| $\text{Arctg } M^\circ = \frac{3}{\varnothing K - \varnothing N}$ |
| $\varnothing L = \varnothing K - 10$ |
| $\varnothing N = \varnothing Z = \varnothing_3 + 0,5$ |
| $\varnothing N \leq 60 \quad , Rb = 8$ |
| $\varnothing N > 60 \quad , Rb = 10$ |
| $R^\circ = 90^\circ - (\beta^\circ - \varphi^\circ)$ |
| $\text{Arctg } \varphi^\circ = \frac{2[(Q+1,5) - Rb]}{N}$ |
| $\text{Arcsen } \beta^\circ = \frac{Rb}{\sqrt{[(Q+1,5) - Rb]^2 + [\frac{N}{2}]^2}}$ |
| $\beta^\circ + \varphi^\circ + R^\circ = 90^\circ$ |

4- Estampo de recalque e *blanck* para T=S

Está representado na Figura IV, V e VI o *blanck* com o estampo de recalque, o estampo de recalque e a matriz fechada para T=S com suas respectivas variáveis.

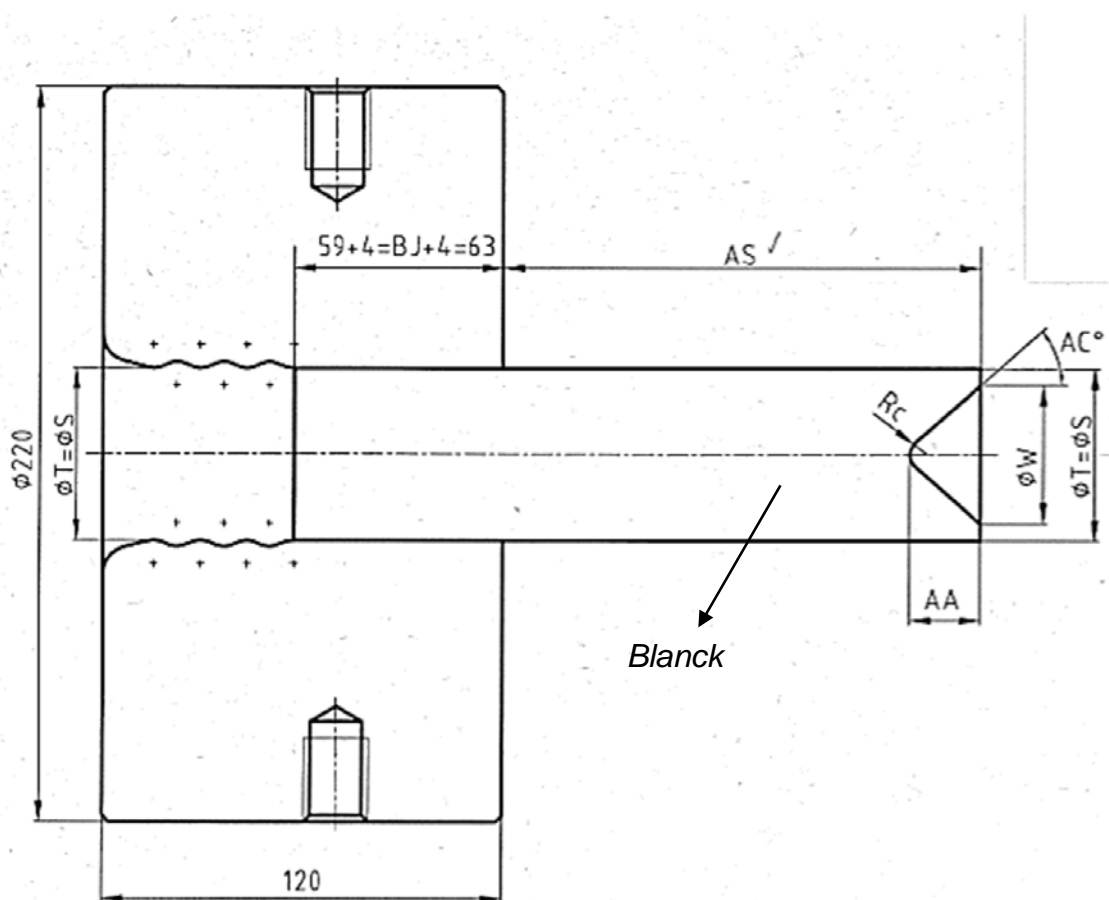


Figura IV – *Blanck* com o estampo de recalque

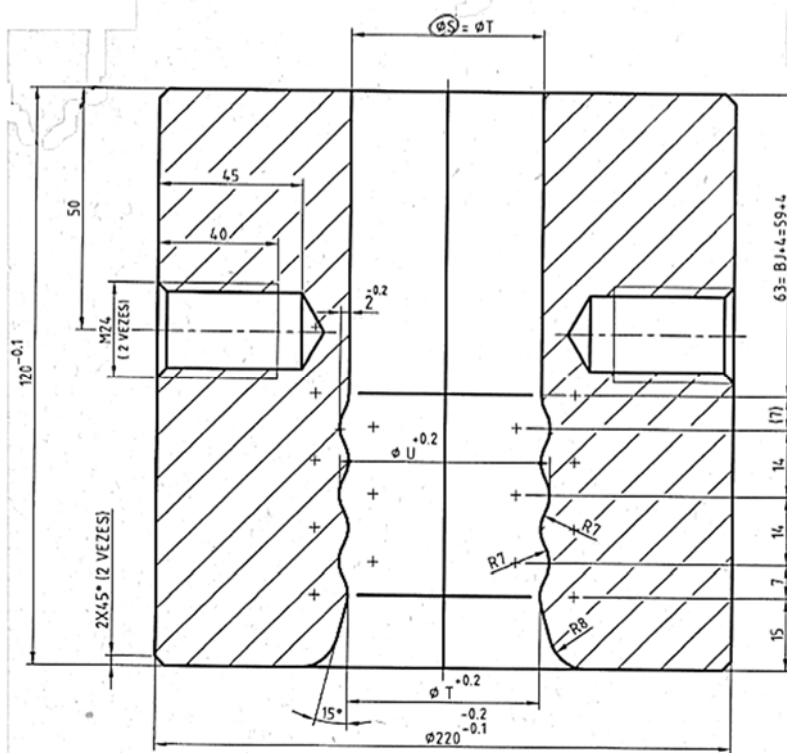


Figura V – Estampo de recalque

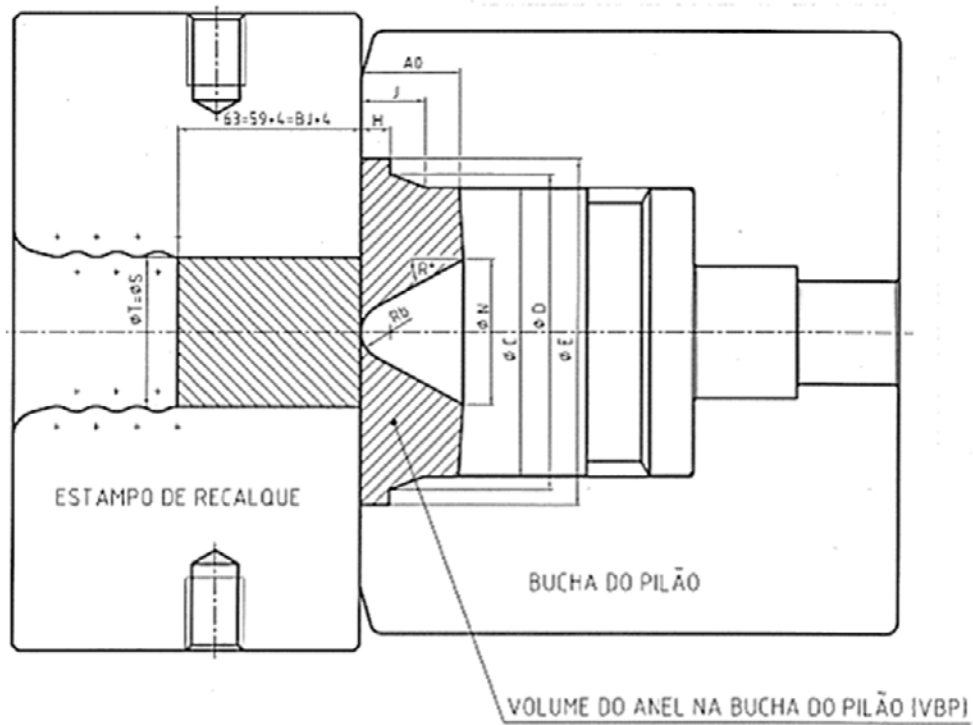


Figura VI– Conjunto fechado (Bucha pilão com o estampo de recalque)

Na Tabela 5 estão representadas as equações das variáveis para o modelamento do *blanck* e do estampo de recalque para T=S.

Tabela 5 – Equações para modelamento do *blanck* e do estampo de recalque para T=S.

| |
|--|
| $VT = VER + VBP \quad VER = 0; VT = VBP \text{ e } \emptyset T = \emptyset S$ |
| $VABPSDP = \left\{ \left(\frac{\pi \cdot H \cdot E^2}{4} \right) + \left[\frac{\pi \cdot (J-H)}{12} \cdot (D^2 + D \cdot C + C^2) \right] + \left[\frac{\pi \cdot (AO-J) \cdot C^2}{4} \right] \right\}$ |
| $VPP = \left\{ \frac{\pi}{3} \cdot [2 \cdot Rb^3 - 3 \cdot Rb^3 \cdot \text{sen}R^\circ - (-Rb \cdot \text{sen}R^\circ)^3] + \left[\frac{\pi \cdot (Q - Rb + Rb \cdot \text{sen}R^\circ)}{12} \cdot [(2 \cdot Rb \cdot \text{cos}R^\circ)^2 + N \cdot (2 \cdot Rb \cdot \text{cos}R^\circ) + N^2] \right] \right\}$ |
| $VBP = VABPSDP - VPP$ |
| $VDPM = VDPM_1 + VDPM_2$ |
| $VDPM_1 = \frac{\pi}{3} \cdot [2 \cdot RC^3 - (3 \cdot RC^3 \cdot \text{sen}AC^\circ) - (-RC \cdot \text{sen}AC^\circ)^3]$ |
| $VDPM_2 = \frac{\pi \cdot [AA - RC + RC \cdot \text{sen}AC^\circ]}{12} \cdot [(2 \cdot RC \cdot \text{cos}AC^\circ)^2 + W \cdot (2 \cdot RC \cdot \text{cos}AC^\circ) + W^2]$ |
| $VFA = [\pi \cdot (W + 1.5)^2 \cdot AA] / 4$ |
| $VDPP = VFA - VPP$ |
| $VCCPM = [(\pi \cdot AA \cdot S^2) / 4] - VDPM$ |
| $VC = VBP - VCCPM$ |
| $VC = [(\pi \cdot \emptyset T^2 \cdot BH) / 4]$ |
| $AS = BH + AA$ |
| $VT = VC + VCCPM$ |
| $AS \leq 2,5 \cdot \emptyset T$ |

5- Estampo de recalque e *blanck* para $T < S$

Está representado na Figura VII, VIII e IX o *blanck* com o estampo de recalque, o estampo de recalque e a matriz fechada para $T < S$ com suas respectivas variáveis.

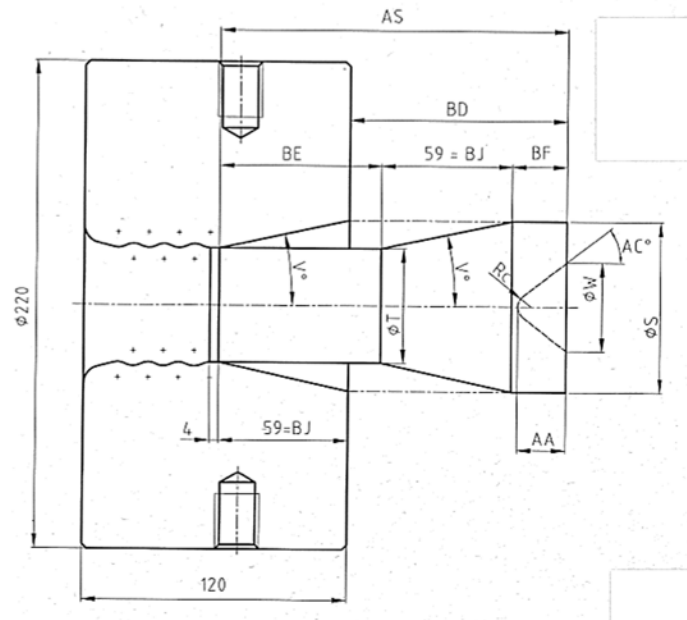


Figura VII- *Blanck* e estampo de recalque $T < S$

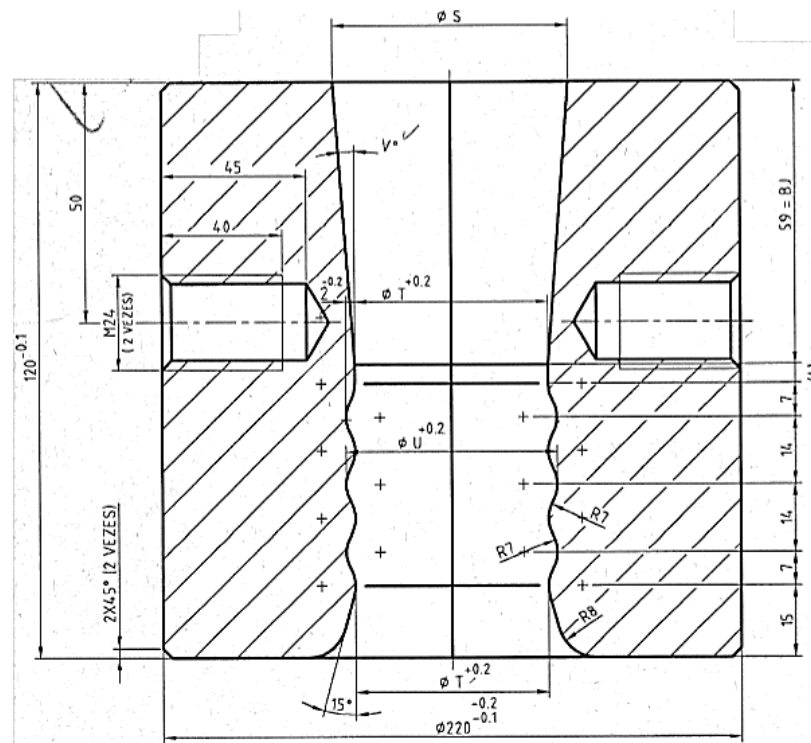


Figura VI – Estampo de recalque para $T < S$

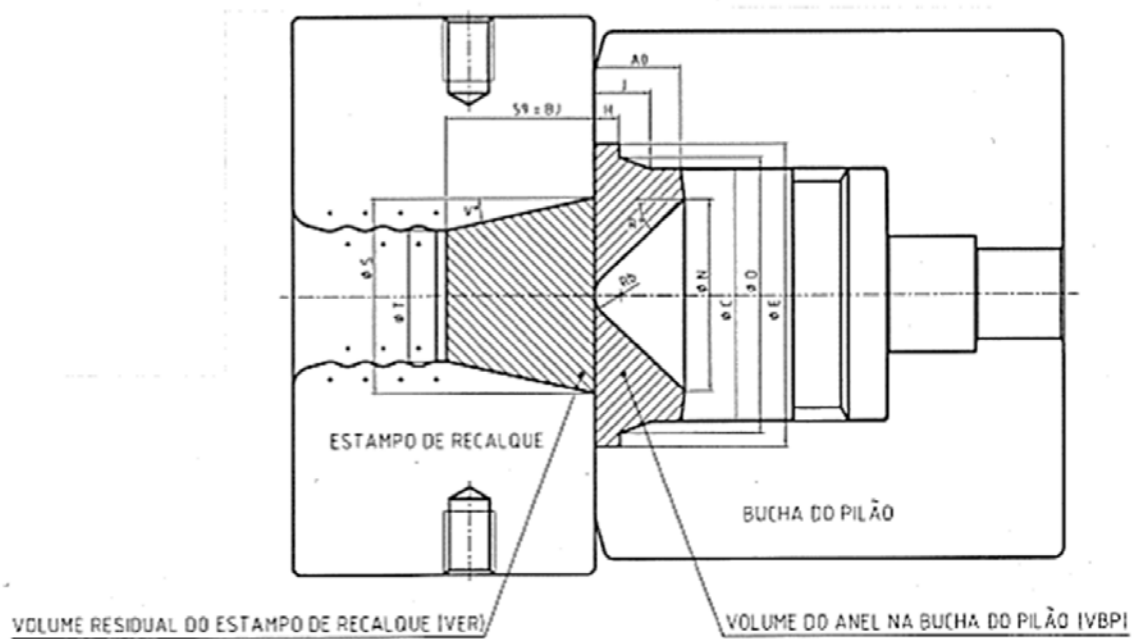


Figura IX – Conjunto fechado – Blanck e estampo de recalque

Na Tabela 6 estão representadas as equações das variáveis para o modelamento do *blanck* e do estampo de recalque para $T < S$.

| |
|--|
| VT = VBT |
| $VTB = \left\{ \left(\frac{\pi \cdot E^2 \cdot H}{4} \right) + \left[\frac{\pi \cdot (J - H)}{12} \cdot (D^2 + D \cdot C + C^2) \right] + \left[\frac{\pi \cdot C^2 \cdot AP}{4} \right] - \left[\frac{\pi}{3} \cdot [2 \cdot Rb^3 - 3Rb^3 \cdot \text{sen} R^\circ - (-Rb \cdot \text{sen} R^\circ)^3] \right] + \left[\frac{\pi \cdot (Q - Rb + Rb \cdot \text{sen} R^\circ)}{12} \cdot [(2 \cdot Rb \cdot \text{cos} R^\circ)^2 + N \cdot (2 \cdot Rb \cdot \text{cos} R^\circ) + N^2] \right] \right\}$ |
| VDPM = VDPM ₁ + VDPM ₂ |
| $VDPM_1 = \frac{\pi}{3} \cdot [2 \cdot RC^3 - 3 \cdot RC^3 \cdot \text{sen} AC^\circ - (-RC \cdot \text{sen} AC^\circ)^3]$ |
| $VDPM_2 = \frac{\pi \cdot (AA - RC + RC \cdot \text{sen} AC^\circ)}{12} \cdot [(2 \cdot RC \cdot \text{cos} AC^\circ)^2 + W \cdot (2 \cdot RC \cdot \text{cos} AC^\circ) + W^2]$ |
| VDPP = VF - VPP |
| $VC = \frac{\pi \cdot CQ^2 \cdot CT}{4}$ |
| AS = CT + CR + CP + AA |

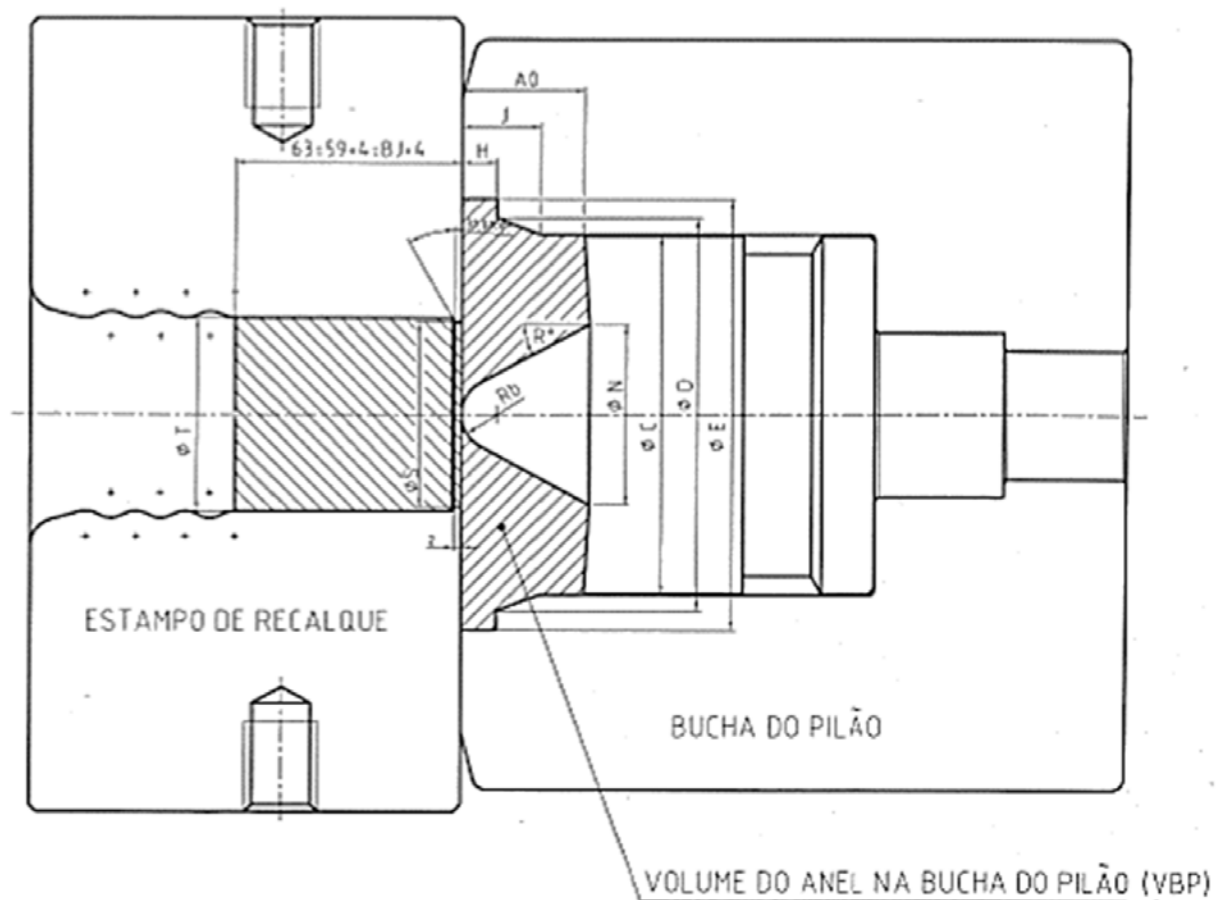


Figura XI - Conjunto fechado – Blanck e estampo de recalque T>S

Na Tabela 7 estão representadas as equações das variáveis para o modelamento do *blank* e do estampo de recalque para T>S.

Na Tabela 7 estão representadas as equações das variáveis para o modelamento do *blank* e do estampo de recalque para $T < S$.

| |
|---|
| $VBP = \left\{ \left[\frac{\pi \cdot H \cdot E^2}{4} \right] + \left[\frac{\pi \cdot (J-H)}{12} \cdot (D^2 + D \cdot C + C^2) \right] + \left[\frac{\pi \cdot C^2 \cdot (AO-j)}{4} \right] - \left\{ \frac{\pi}{3} \cdot [2 \cdot Rb^3 - 3Rb^3 \cdot \text{sen}R^\circ - (-Rb \cdot \text{sen}R^\circ)^3] + \left[\frac{\pi \cdot x \cdot (Q-Rb+Rb \cdot x \cdot \text{sen}R^\circ)}{12} \cdot [(2 \cdot Rb \cdot \text{cos}R^\circ)^2 + N \cdot (2 \cdot Rb \cdot \text{cos}R^\circ) + N^2] \right] \right\} \right\}$ |
| $VER = \frac{\pi \cdot BJ}{12} \cdot (S^2 + S \cdot T + T^2)$ |
| $VBP = VABPSDP - VPP$ |
| $S = (\emptyset N + 1,5) = (\emptyset Z + 1,5)$ |
| $VABPSDP = \left\{ \left[\frac{\pi \cdot E^2 \cdot H}{4} \right] + \left[\frac{\pi \cdot (J-H)}{12} \cdot (D^2 + D \cdot C + C^2) \right] + \left[\frac{\pi \cdot C^2 \cdot (Q-j)}{4} \right] \right\}$ |
| $VDPM = VDPM_1 + VDPM_2$ |
| $VDPM_1 = \frac{\pi}{3} \cdot [2 \cdot RC^3 - 3 \cdot RC^3 \cdot \text{sen}AC^\circ - (-RC \cdot \text{sen}AC^\circ)^3]$ |
| $VDPM_2 = \frac{\pi \cdot (AA - RC + RC \cdot \text{sen}AC^\circ)}{12} \cdot [(2 \cdot RC \cdot \text{cos}AC^\circ)^2 + W(2 \cdot RC \cdot \text{cos}AC^\circ) + W^2]$ |
| $VDPP = VFA - VPP$ |
| $VFA = \frac{\pi \cdot (W+1,5)^2 \cdot AA}{4}$ |
| $VPP = \left\{ \frac{\pi}{3} \cdot [2 \cdot Rb^3 - 3 \cdot Rb^3 \cdot \text{sen}R^\circ - (-Rb \cdot \text{sen}R^\circ)^3] + \left[\frac{\pi \cdot (Q-Rb+Rb \cdot \text{sen}R^\circ)}{12} \cdot [(2 \cdot Rb \cdot \text{cos}R^\circ)^2 + D \cdot (2 \cdot Rb \cdot \text{cos}R^\circ) + D^2] \right] \right\}$ |
| $VCCPM = \frac{\pi \cdot S^2 \cdot AA}{4} - VDPM$ |
| $VC = \frac{\pi \cdot S^2 \cdot BH}{4}$ |
| $VC = VDPP - VCCPM$ |
| $BH = \frac{4 \cdot VC}{\pi \cdot S^2}$ |
| $BF = AA + BH$ |
| $VRM = VC + VCCPM$ |
| $VR = \frac{\pi \cdot BJ}{12} \cdot (S^2 + S \cdot T + T^2)$ |
| $VP = VR + VRM$ |
| $VT = VER + VBP$ |
| $VT = VRM + VR + VRER$ |
| $VRER = \frac{\pi \cdot \emptyset T^2}{4} \cdot BE$ |
| $VT = VRER + VR + VRM$ |
| $BD \leq 2,5 \cdot \emptyset T$ |
| $0^\circ < V^\circ \leq 15^\circ$ |
| $AS = BE + BJ + BF$ |
| $BD = AS - BJ$ |

7- Punção maior e menor

Está representado na Figura XII o punção maior com suas respectivas variáveis.

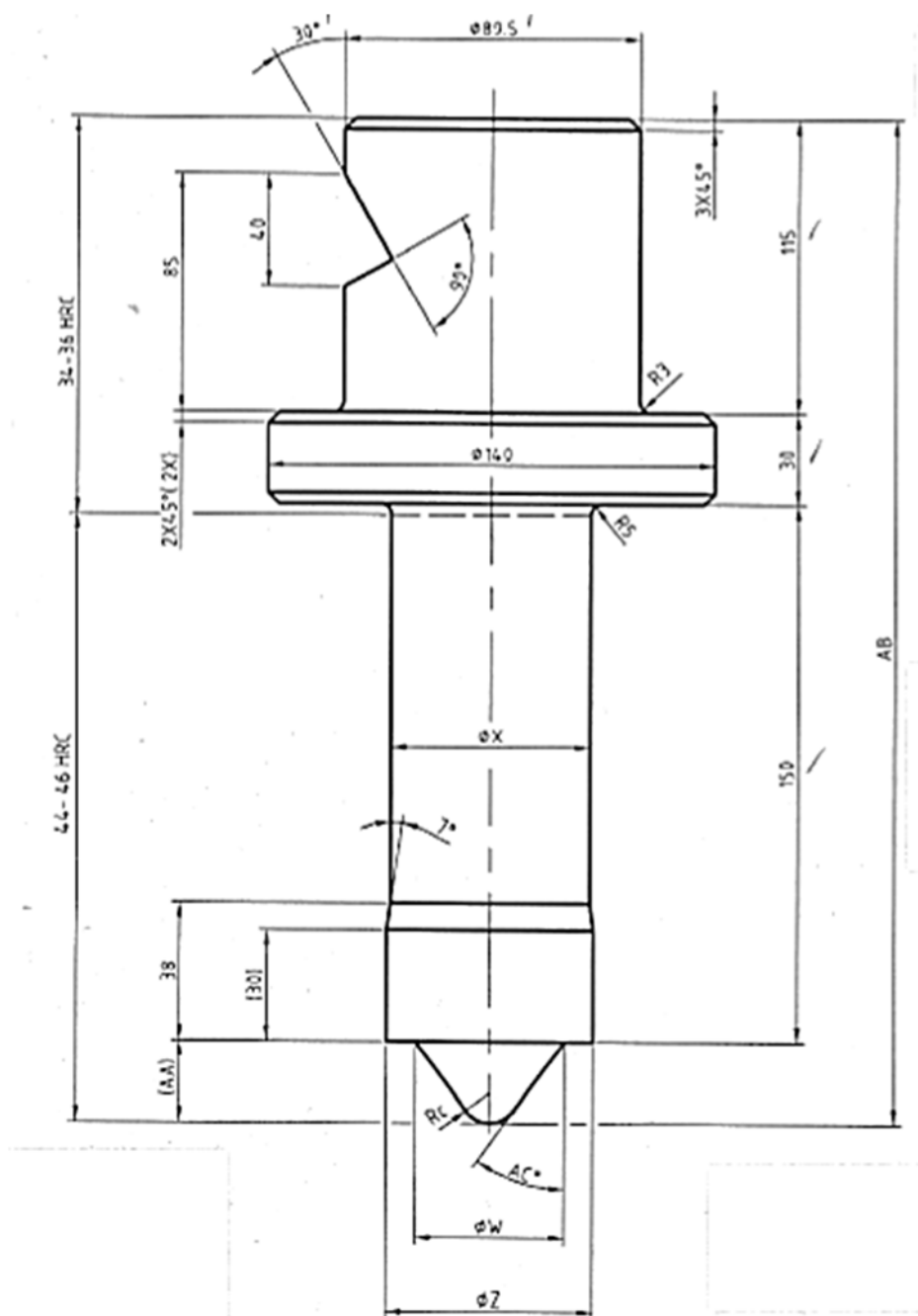


Figura XII – Punção maior

Está representado na Figura XII o punção menor com suas respectivas variáveis.

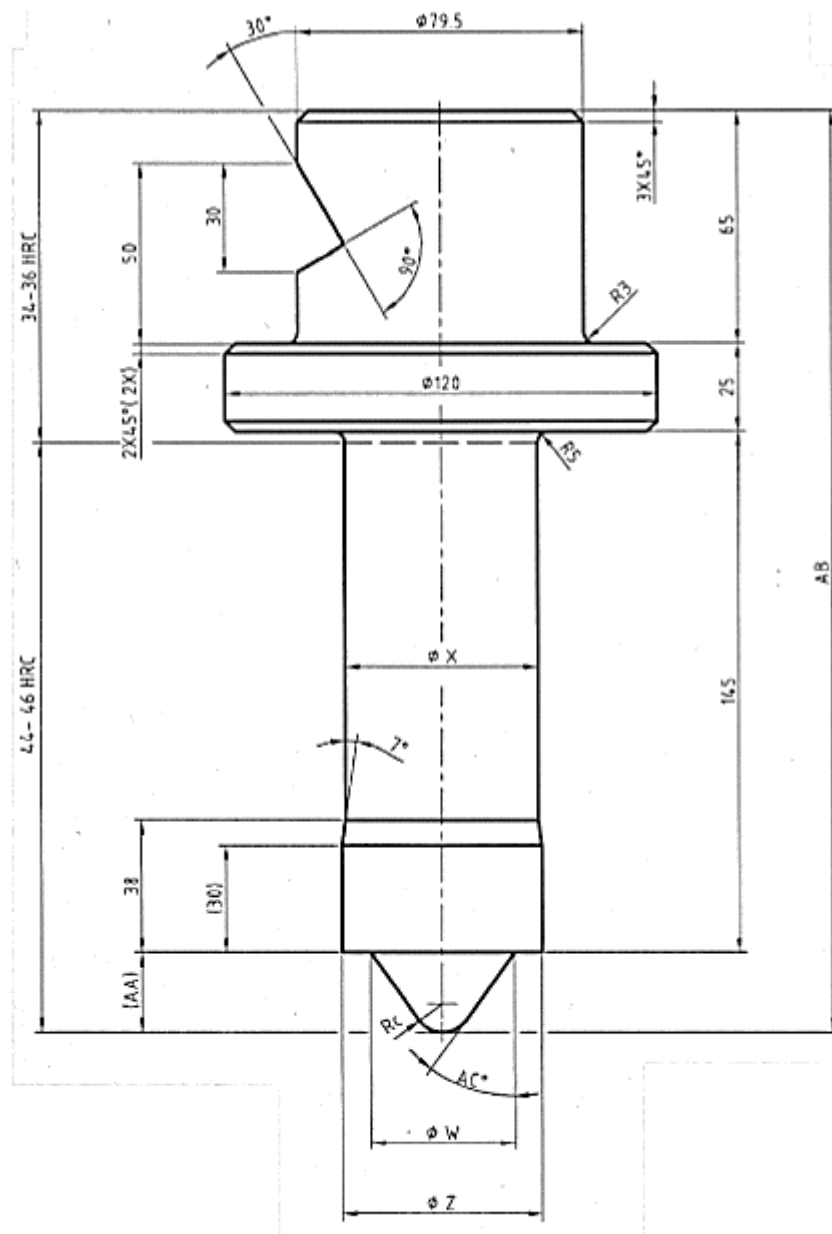


Figura XIII – Punção menor

Na Tabela 8 estão representadas as equações das variáveis para o modelamento do punção menor e maior.

Tabela 8 - estão representadas as equações das variáveis para o modelamento do *blank* e do estampo de recalque para T<S.

| |
|--|
| $85 < \emptyset_3 \leq 120$ |
| $125 < \emptyset_4 \leq 145$ |
| $50 \leq \emptyset_4 \leq 125$ |
| $30 \leq \emptyset_3 \leq 85$ |
| $AA = 0,6 \cdot A0$ |
| $\emptyset Z = \emptyset_3 + 0,5$ |
| $\text{sen}AT^\circ = \frac{RC}{\sqrt{[(AA - RC)^2 + (\frac{W}{2})^2]}}$ |
| $\emptyset X = \emptyset Z - 2$ |
| $\text{tg}AU^\circ = \frac{2 \cdot (AA - RC)}{W}$ |
| $AC^\circ = 90^\circ - (AT^\circ + AU^\circ)$ |
| $\emptyset Z > 50 ; \emptyset W = \emptyset Z - 20 \text{ e } RC = 8$ |
| $\emptyset Z \leq 50 ; \emptyset W = \emptyset Z - 10 \text{ e } RC = 5$ |

8- Matriz do furo maior e menor

Está representado na Figura XIV a matriz do furo maior com suas respectivas variáveis.

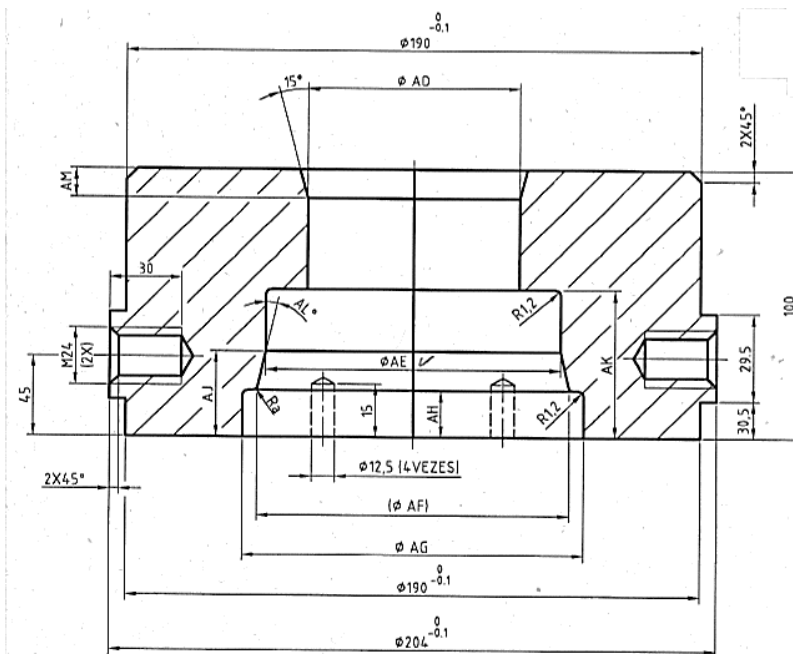


Figura XIV– Matriz do furo maior

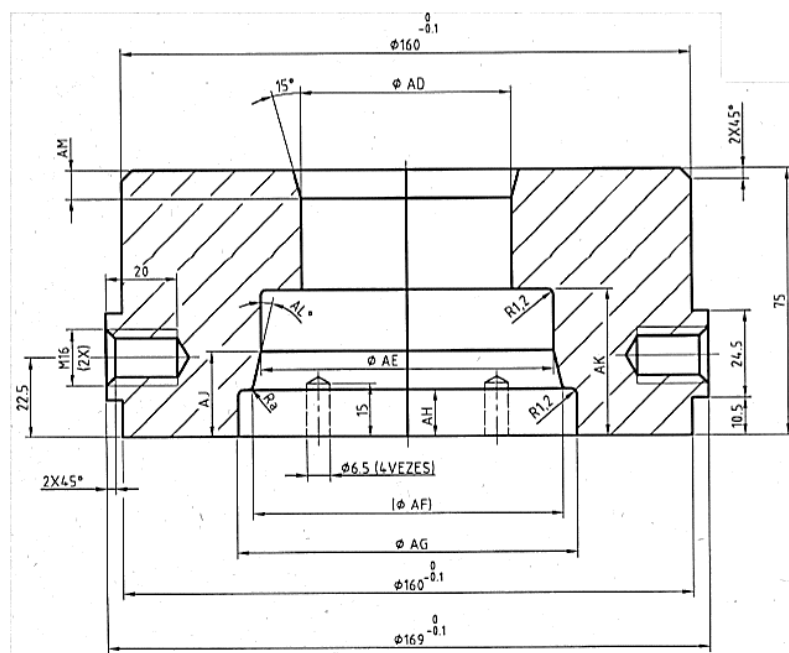


Figura XV – Matriz do furo menor

Na Tabela 9 estão representadas as equações das variáveis para o modelamento da matriz do furo menor e maior.

Tabela 9 – Equações para modelamento do furo menor e maior

| |
|--|
| $AD = \varnothing Z + 6$ |
| $\varnothing Z = \varnothing N$ |
| $\psi = 1,012$ |
| $\varnothing AE = \varnothing_2 \cdot 1,012 = \varnothing C$ |
| $AH = AQ + 5$ |
| $\varnothing AG = \varnothing_4 = \varnothing E$ |
| $AK = AO + 7$ |
| $AJ = AH + \frac{\varnothing AF - \varnothing AE}{2 \cdot \text{tg} AL^\circ}$ |
| $AL^\circ = G^\circ + 2^\circ$ |
| $AK \leq 65$ e $AM=7$ |
| $AK > 65$ e $AM=0$ |
| $\varnothing AF = \varnothing D$ |
| $\varnothing E = \varnothing_4$ |
| $\varnothing_4 \leq 125$ e $\varnothing_3 \leq 85$ |
| $\varnothing_4 > 125$ e $\varnothing_3 > 85$ |

9- Faca

Está representado na Figura XVI a faca maior com suas respectivas variáveis.

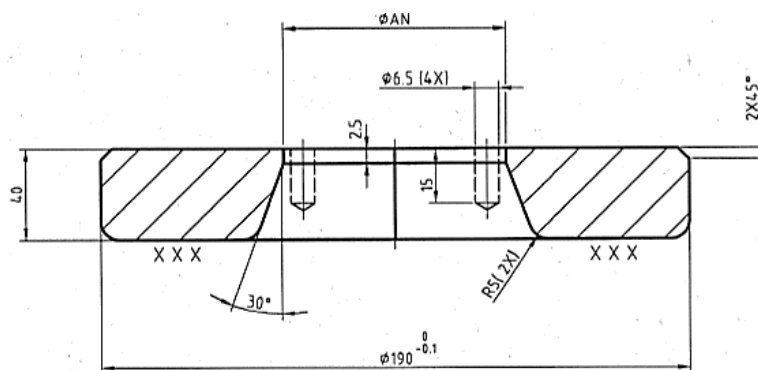


Figura XVI - Faca maior

Está representado na Figura XVII a faca menor com suas respectivas variáveis.

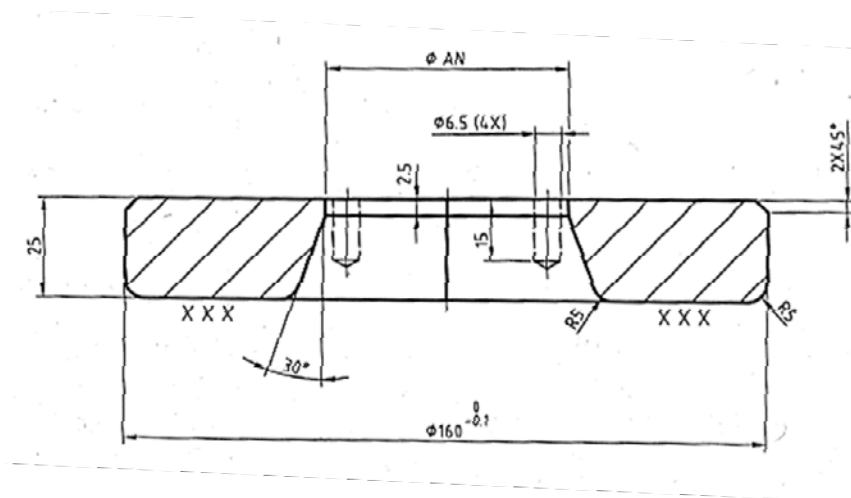


Figura XVII - Faca menor

Na Tabela 10 estão representadas as equações das variáveis para o modelamento da faca maior e menor.

Tabela 10 – Equações para modelamento da faca maior e menor

| |
|--|
| $\varnothing AN = \varnothing Z + 1,5$ |
| $\varnothing AN = \varnothing N + 1,5$ |
| $\Theta_4 \leq 125$ |
| $\varnothing_3 \leq 85$ |