

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

Sistema Especialista para o Forjamento a Quente de Precisão

Autor: Angelo Caporalli Filho

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Tonini Button

Curso: Engenharia Mecânica

Área de Materiais e Processos de Fabricação

Tese de doutorado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2003
S.P. – Brasil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

Sistema Especialista para o Forjamento a Quente de Precisão

Autor: **Angelo Caporalli Filho**
Orientador: **Prof. Dr. Sérgio Tonini Button**

Campinas 2003
S.P. – Brasil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS**

TESE DE DOUTORADO

Sistema Especialista para Forjamento a Quente de Precisão

Autor: Angelo Caporalli Filho
Orientador: Prof. Dr. Sérgio Tonini Button

Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz
DEF – FEM - UNICAMP

Prof. Dr. Célia Marina de Alvarenga Freire
DEMA – FEM - UNICAMP

Prof. Dr. Jonas de Carvalho
DEM – EESC - USP

Prof. Dr. Ricardo Cury Ibrahim
PMR - EPUSP

Prof. Dr. Sérgio Tonini Button, Presidente
DEMA – FEM - UNICAMP

Campinas, 17 de março de 2003

Dedicatória:

Dedico este trabalho à minha esposa Cristina, a minha filha Isabella e aos meus pais, que sempre me apoiaram e incentivaram desde o início desta jornada.

Agradecimentos

Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto minha homenagem:

Ao meu orientador, que me mostrou os caminhos a serem seguidos, que apoiou e incentivou nos momentos de dificuldades.

A todos os professores e colegas do departamento materiais da Unicamp, que ajudaram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho. Em especial aos técnicos: Sr. Laerte, José Luis e Fábio.

Aos colegas do Departamento de Materiais e Tecnologia da Unesp, campus de Guaratinguetá pelo apoio, em especial ao Prof. Dr. Luis Rogério de Oliveira Hein.

À empresa EATON Divisão Transmissões Ltda., em especial aos Srs. Eng. Dr. Íris Bento da Silva e Eng. Marco Antonio Cândido pela atenção e informações cedidas e pela amizade demonstrada.

Ao Eng. Luciano Antonio Gileno, pela dedicação no início dos desenvolvimentos do trabalho apresentado.

À CAPES pela concessão de bolsa possibilitando o desenvolvimento do trabalho.

À FAPESP pelo apoio financeiro.

Sabemos que é preciso superar tudo aquilo que nos corrói por dentro, como por exemplo, a saudade, uma palavra que se torna, a cada dia, mais difícil de deixarmos de pronunciá-la. No entanto, a cada vez que lembro e leio o fragmento que segue, tenho a absoluta certeza que superaremos quaisquer obstáculos que, porventura, surgirem. Eis a mensagem: "É graça divina começar bem. Graça maior, persistir no caminho certo. Mas, a graça das graças é não desistir".

Resumo

Caporalli F., Angelo, *Sistema Especialista para o Forjamento a Quente de Precisão*, Campinas, : Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2003. 124 p. Tese (Doutorado)

A necessidade de se aplicar técnicas de produção mais refinadas para garantir a qualidade dos produtos forjados e para reduzir o tempo necessário para as diversas etapas do planejamento do processo faz com que deva-se substituir os procedimentos atuais, que são praticamente baseados na experiência, criatividade e intuição de projetistas e processistas. O desenvolvimento de sistemas especialistas para o forjamento a quente deve-se aos importantes avanços verificados nesse processo que influíram na modificação da geometria das ferramentas e na qualidade dimensional e geométrica dos forjados. Assim, desenvolveram-se diversos processos de forjamento a quente de precisão denominados comumente de *near-net shape*, que no seus planejamentos exigem que a dependência atual do conhecimento, da criatividade, da intuição e da experiência industrial dos projetistas seja organizada por um conjunto de operações automáticas e semi-automáticas que reduzam o tempo de planejamento do processo. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema especialista para o forjamento a quente de precisão (APFFQ) de engrenagens modeladas pelo software *SolidEdge* v. 3.5, com interface gráfica programada por rotinas do *Visual Basic* v. 5.0. O uso deste sistema demonstrou que o tempo total necessário para o desenvolvimento de um novo processo é reduzido significativamente se comparado ao tempo observado na atual prática industrial.

Palavras-chave:

Forjamento de precisão, Sistemas especialistas, Forjamento a quente de engrenagens, Projeto de ferramentas.

Abstract

Caporalli F., Angelo, *Expert System for Precision Hot Forging*, Campinas, School of Mechanical Engineering, State University of Campinas, 2003. 124 p. Thesis (Doctorate).

In recent years, hot forging has shown continuous technological changes, mainly in the geometry of the dies and in the dimensional accuracy of forgings. Since hot forging has to be competitive even for small lot sizes, forgings weight and machining allowances are being reduced and therefore subsequent machining is being reduced with lower costs and investments. With hot precision forging and the concept of near-net-shape-manufacturing (NNS), costs with machining are drastically reduced. Therefore forging operations (and their planning) became an important part of the final cost. Planning hot forging processes is a time-consuming activity with high costs involved because of the trial-and-error iterative methods. Some processes demand many months to produce forged parts with controlled shapes, dimensions and microstructure. This work shows how expert systems can help engineers to reduce the time needed to design precision forged parts. The software ADHFD interfacing MS Visual Basic v.5.0 and SolidEdge v.3.5 was used to design flashless hot forged gears, chosen from families of gears. Results shown that design time with this system was significantly reduced when compared to the common industrial practice.

Key Words:

Precision forging; Expert systems; Hot forging; Die design.

Sumário

Lista de Figuras	i
Lista de Tabelas	v
Lista de Quadros	vi
Nomenclatura	vii
Letras Latinas	vii
Letras Gregas	viii
Abreviações	viii
Breve Descrição dos Capítulos	ix
Trabalhos apresentados e publicados a partir do desenvolvimento desta tese	x
Capítulo 1	1
Introdução	1
1.1 Objetivos	3
1.2 Justificativas	3
Capítulo 2	7
Forjamento a Quente	7
2.1 Análise dos Processos de Conformação como Sistemas	8
2.1.1 Variáveis Independentes	8
2.1.2 Variáveis Dependentes	9
2.1.3 Relações entre as Variáveis Independentes e Dependentes	10
2.2 Ferramentas de Forjamento a Quente	11
2.3 Materiais para Ferramentas de Forjamento a Quente	17
2.4 Equipamentos para o Forjamento a Quente	18

2.4.1 Prensas Hidráulicas	19
2.4.2 Prensas Mecânicas	19
2.4.3 Martelos	20
2.4.4 Prensas de fuso ou de fricção	20
2.4.5 Equipamentos Auxiliares	21
2.5 Produtos Forjados a Quente	22
Capítulo 3	23
Sistemas Especialistas	23
3.1 Revisão Histórica	23
3.2 Estrutura de um Sistema Especialista	32
Capítulo 4	39
Crítérios de Projeto e Força de Forjamento	39
4.1 Sobremetal	40
4.2 Ângulos de Saída	42
4.3 Raios	44
4.4 Espelho	47
4.5 Estimativa da Força de Forjamento	49
Capítulo 5	51
Sistema Especialista para o Forjamento a Quente de Precisão	51
5.1 Introdução	51
5.2 <i>Breve Descrição dos Softwares Utilizados e Considerações Iniciais</i>	53
5.2.1 <i>O Solid Edge®</i>	53
5.2.2 <i>O Visual Basic®</i>	53
5.2.3 A Necessidade da Interface para o Sistema Especialista	54
5.2.4 Nomenclatura Utilizada para Caracterização da Geometria da Peça a ser Forjada	54
5.2.5 A Interface	55
5.2.6 Cálculo da Força de Forjamento pelo APFFQ	89
5.2.7 Cálculo da Força de Forjamento pelo <i>MSC SuperForge 2002®</i>	90
5.2.8 Avaliação do APFFQ para um Caso Industrial	100
Capítulo 6	103

Conclusões e Propostas para Trabalhos Futuros	103
6.1 Conclusões	103
6.2 Propostas para Trabalhos Futuros	104
Referências Bibliográficas	106
Anexos	114
Anexo I	114
Métodos Empregados para o Cálculo da Força de Forjamento	114
Anexo II	121
Inter-relação entre os softwares <i>Solid Edge</i> ® e <i>Visual Basic</i> ®	121

Lista de Figuras

Figura 2. 1 – Localização de falhas típicas que podem ocorrer em matrizes de forjamento a quente 1 – Desgaste abrasivo, 2 – Fadiga térmica, 3 – Fadiga mecânica, 4 – Deformação plástica, (extraída e adaptada de Altan, 1999).....	14
Figura 2. 2 - Ferramental para forjamento convencional.....	16
Figura 2. 3 - Ferramental para forjamento de precisão.....	16
Figura 2. 4 - Desvio de concentricidade entre matrizes superior e inferior.....	17
Figura 2. 5 - Peças forjadas a quente em prensas excêntricas (Button, 1998).....	22
Figura 3. 1 - Forjado do tipo “alma-nervura” adaptado de Vemuri, 1989.....	28
Figura 3. 2 - Exemplo de seqüência para forjamento a frio (Sevenler, 1987).....	30
Figura 3. 3 - Estrutura de um sistema especialista para planejamento do processo (Osakada, 1990), (Osakada, 1991).....	33
Figura 3. 4 - Representação do produto por um modelo de seções (Osakada, 1991) e Yang, 1993).....	34
Figura 3. 5 - Estrutura do sistema FORMEX, adaptado (Sevenler, 1987).....	36
Figura 4. 1 - Geometrias de engrenagens mais representativas na indústria automobilística..	40
Figura 4. 2 - Esquema de montagem com inserto mostrando as regiões onde a ferramenta não afeta a geometria final do forjado.....	45
Figura 4. 3 - “r ₁ ” e “r ₂ ”, raios de canto e de filete, respectivamente.....	46
Figura 4. 4 - Método utilizado para determinação dos raios, máximo e mínimo em função do sobremetal.....	46
Figura 4. 5 - Limitações para alteração da geometria do furo.....	48
Figura 5. 1 - Diagrama da seqüência de informações para planejamento do processo.....	52
Figura 5. 2 - Nomenclatura das partes da engrenagem.....	55

Figura 5. 3 – Janela de abertura do APFFQ.....	56
Figura 5. 4 - Janela de abertura do APFFQ, intitulada "Esboços", com as quatro famílias.....	56
Figura 5. 5 - Janela “Dimensões – Escalonada”, perfil pré-definido.....	58
Figura 5. 6 - Janela “Dimensões – Cubo Mono-Lateral”, perfil pré-definido.....	58
Figura 5. 7 - Janela “Dimensões – Cubo Bi-Lateral”, perfil pré-definido.....	59
Figura 5. 8 - Janela “Dimensões – Paralela”, perfil pré-definido.....	59
Figura 5. 9 - Sistema de cotas utilizado.....	60
Figura 5. 10 - Janela "Menu de Valores".....	61
Figura 5. 11 - Janela "Verificação do Sobremetal".....	62
Figura 5. 12 - Janela "Sobremetal".....	63
Figura 5. 13 - Janela de “Verificação do Sobremetal”, porém atualizado pelo projetista.....	64
Figura 5. 14 - Janela “Menu de Valores” com a opção “Ângulos de Saída” ativada.....	64
Figura 5. 15- Janela "Ângulos de Saída", família "Escalonada".....	65
Figura 5. 16- Janela "Ângulos de Saída", família "Cubo Mono_Lateral".....	65
Figura 5. 17 - Janela "Ângulos de Saída", família "Cubo Bi-Lateral".....	65
Figura 5. 18 - Janela "Ângulos de Saída", família "Paralela".....	65
Figura 5. 19 - Janela “Menu de Valores”, opção para verificação dos raios.....	66
Figura 5. 20 - Janela “Verificação do Raio”.....	66
Figura 5. 21 - Janela “Raios adotados”, para alteração dos mesmos, se necessário.....	67
Figura 5. 22 - Janela “Verificação do Raio”, já atualizada com o novo valor adotado.....	68
Figura 5. 23 - Janela “Raios”, para a família “Cubo Bi-Lateral”.....	69
Figura 5. 24 - Janela “Raios”, para a família “Cubo Mono-Lateral”.....	69
Figura 5. 25 - Janela “Raios”, para a família “Escalonada”.....	70
Figura 5. 26 - Janela “Raios”, para a família “Paralela”.....	70
Figura 5. 27 - Janela “Dimensão do Espelho”, família "Escalonada".....	71
Figura 5. 28 - Janela "Dimensão do Espelho", família "Cubo Mono Lateral".....	71
Figura 5. 29 - Janela "Dimensão do Espelho", família "Cubo Bi-Lateral".....	72
Figura 5. 30 - Janela "Dimensão do Espelho", família "Paralela".....	72
Figura 5. 31 - Janela de mensagem sugerindo a eliminação do espelho.....	75
Figura 5. 32 - Janela informando ao projetista a condição da relação diâmetro/profundidade do furo.....	76

Figura 5. 33 - Janela "Dimensões do Espelho", família "Escalonada".....	78
Figura 5. 34 - Janela "Dimensões do Espelho", família "Cubo Mono-Lateral".....	78
Figura 5. 35 - Janela "Dimensões do Espelho", família "Cubo Bi-Lateral".....	78
Figura 5. 36 - Janela "Dimensões do Espelho", família "Paralela".....	78
Figura 5. 37 - Tela gráfica do Solid Edge® mostrando a geometria primitiva para a família "Cubo Bi-Lateral".....	79
Figura 5. 38 – Janela “Atualizações” que permite atualizar dimensões da geometria primitiva.....	80
Figura 5. 39 - Janela “Salvar Forjado”.....	81
Figura 5. 40 - Tela gráfica apresentando o novo arquivo do sólido já com as dimensões atualizadas segundo os valores atribuídos na figura mostrada na janela "Dimensões Cubo Bi-Lateral".....	82
Figura 5. 41 - Área gráfica do Solid Edge® apresentando o novo sólido já com todos os critérios de projeto adotados.....	83
Figura 5. 42 - Janela "Bitolas Padrão".....	84
Figura 5. 43 - Janela "Bitolas Padrão", apresentando mensagem de irregularidade na bitola selecionada.....	85
Figura 5. 44 - Janela "Bitolas Padrão" com uma dimensão selecionada maior que a calculada.....	86
Figura 5. 45 - Área gráfica com o forjado gerado e com o tarugo inicial.....	86
Figura 5. 46 - Tela do Solid Edge® com janela “Força de Forjamento” sobreposta.....	88
Figura 5. 47 - Janela com a mensagem de irregularidade na temperatura de forjamento selecionada.....	88
Figura 5. 48 - Janela com a força de forjamento calculada e o equipamento selecionado.....	89
Figura 5. 49 - Desenho esquemático da pré-forma “canao simples”.....	91
Figura 5. 50 – Gráfico Força de forjamento versus Deslocamento.....	92
Figura 5. 51 - Simulação apresentando 98,92% do deslocamento.....	93
Figura 5. 52 - Tela gráfica final com o ferramental desenvolvido para o novo forjado.....	95
Figura 5. 53 - Tela gráfica do Solid Edge-Draft.....	95
Figura 5. 54 - Janela "Novo Link" procedimento para atualização.....	96
Figura 5. 55 - Comando “Link” no menu Pull Down.....	97

Figura 5. 56 - Janela "Links" com o arquivo tipo Part a ser conectado.....	97
Figura 5. 57 - Janela "Change Source".....	98
Figura 5. 58 - Janela "Link" pronta para ser fechada e consolidada a conexão entre os arquivos.....	98
Figura 5. 59 - Prancha mostrando as bordas em cada uma das vistas.....	99
Figura 5. 60 - Formulário final com informações sobre o processo desenvolvido.....	100
Figura 5. 61 - Figura obtida através do planejamento do processo na indústria utilizando-se o software AutoCAD, criado manualmente, (cortesia EATON Divisão Transmissões).....	101
Figura 5. 62 - Figura obtida no APFFQ gerada automaticamente pelo Solid Edge Draft®.....	102
Figura A.I. 1 - Diagrama segundo Mäkelt para o cálculo da força de forjamento.....	115
Figura A.I. 2 - Condições de forjamento.....	116
Figura A.I. 3 - Diagrama segundo H. Meyer para cálculo da força de forjamento.....	118
Figura A.II. 1 – Rotina de transferência de valores de variáveis referente à família “Cubo Bi-Lateral”.....	122
Figura A.II. 2 - Janela “Dimensões Cubo Bi-Lateral” mostrando o vínculo de cada caixa de texto com sua respectiva variável.....	122
Figura A.II. 3 - Área gráfica do Solid Edge® mostrando a tabela de variáveis criadas para posterior alteração do perfil a ser rotacionado.....	123
Figura A.II. 4 - Destaque da cota 61 mm no perfil referente ao forjado primitivo da família Cubo Bi-Lateral.....	124

Lista de Tabelas

Tabela 2. 1 - Velocidades características dos vários tipos de equipamentos para forjar, Grüning 1973.....	21
Tabela 4. 1 - Sobremetal indicado para o forjamento em matriz fechada.....	41
Tabela 4. 2 - Ângulos recomendados para ferramentas de pré-forjar, segundo Vemuri et al (1987) e (Kim, 2000).....	43
Tabela 4. 3 - Ângulos em função do equipamento.....	43
Tabela 4. 4 - Determinação dos raios do forjado, adaptada, Rossi 1971 (Dimensões em mm).....	45
Tabela 4. 5 - Determinação dos raios do forjado em função do sobremetal (Dimensões em mm).....	47
Tabela 4. 6 - Determinação do raio entre espelho e parede do forjado, adaptada de Grüning 1973.....	49
Tabela 5. 1 - Dados utilizados no cálculo da força de forjamento.....	90
Tabela A.I. 1 - Valores de a e b em função do rendimento do processo.....	117

Lista de Quadros

Quadro 2. 1 - Inter-relação entre as variáveis Independentes e Dependentes, (DeGarmo, 1997).....	11
Quadro 3. 1 - Exemplo apresentado por Glynn et al. (1995).....	25
Quadro 3. 2 - Biblioteca de elementos geométricos, (Sitaraman, 1991).....	37
Quadro 3. 3 - Representação esquemática de segmentos de linhas e áreas, (Kim, 1995).....	38
Quadro A.I. 1 - Expressões para o cálculo de k_{fs} , k_{fd} , k_r	117
Quadro A.I. 2 - Expressões para o cálculo dos parâmetros do método de H.Meyer.....	120

Nomenclatura

Letras Latinas

a	Sobremetal
D	Diâmetro do forjado
d	Diâmetro do furo
dm	Deslocamento da matriz superior
h	Profundidade do furo
h₀	Altura inicial do tarugo
h₁	Altura do cubo posterior
h₂	Profundidade posterior
IGES	Inicial Graphics Exchange Specification
k_{ci}	Resistência ideal dinâmica à deformação para utilização do ábaco de Meyer
k_{cf}	Resistência à conformação
k_{fd}	Resistência ideal dinâmica à deformação
k_{fs}	Resistência estática à deformação
k_r	Resistência real à deformação
L	Altura do forjado
r	Raio no fundo do furo
r₁	Raio de canto
r₂	Raio de filete
S	Espessura do espelho

v	Velocidade da máquina
w_m	Velocidade media
w₀	Velocidade inicial de conformação

Letras Gregas

α	Ângulos de saída
σ_B	Limite de resistência
μ	Coefficiente de atrito constante

Abreviações

AI	Artificial Intelligence
APFFQ	Automatização do Projeto de Ferramentas para o Forjamento a Quente
A_{proj}	Área Projetada
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CAPP	Computer Aided Processes Planning
CBF	Centro Brasileiro de Forjarias
d_m	Dimensão Máxima
ES	Expert Systems
F	Força de Forjamento
FEM	Finite Element Method
IA	Inteligência Artificial
LISP	Lis(t) p(rocessing)
NNS	Near Net Shap
OOP	Programação Orientada por Objeto do inglês Object Oriented Program
PC's	Personal Computers
PORLOG	Pro(gramming in) log(ic)
SE	Sistema Especialista

Breve Descrição dos Capítulos

Capítulo 1

Neste capítulo apresenta-se uma breve introdução à tecnologia do forjamento a quente, bem como os objetivos e justificativas que levaram ao desenvolvimento deste trabalho.

Capítulo 2

No capítulo dois são apresentadas algumas variáveis dependentes e independentes do processo de conformação, e a inter-relação dessas variáveis, proporcionando uma análise do processo de conformação como um sistema. Também se apresentam algumas características do forjamento a quente no que se refere a produtos, ferramentas e equipamentos.

Capítulo 3

Nesse capítulo apresenta-se uma revisão histórica sobre os sistemas especialistas, destacando-se algumas linguagens utilizadas e alguns exemplos de sistemas especialistas desenvolvidos para processos de manufatura.

Capítulo 4

O capítulo quatro apresenta os critérios de projeto relacionados à geometria do forjado e alguns métodos para o cálculo estimado da força de forjamento.

Capítulo 5

No capítulo cinco apresenta-se o sistema especialista para o forjamento a quente de precisão desenvolvido nesse trabalho. Apresenta-se também uma breve descrição dos softwares utilizados, bem como descreve-se a interface desenvolvida.

Deve-se destacar que neste trabalho optou-se por apresentar e analisar nesse mesmo capítulo, os resultados obtidos com o desenvolvimento do sistema especialista. Essa decisão foi tomada por considerar-se ser a maneira mais adequada para a leitura e compreensão do trabalho.

Capítulo 6

Nesse capítulo estão apresentadas as conclusões e propostas para trabalhos futuros.

Trabalhos apresentados e publicados a partir do desenvolvimento desta tese:

Caporalli Filho, A., Button, S.T., “Sistema Especialista para o Forjamento a Quente de Precisão”, 1o. COBEF - Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, anais em CD-ROM, Curitiba, PR, 2001.

Caporalli, Filho A., Gileno L. A. & Button S. T., “Expert System for Hot Forging Design”, Journal of Materials Processing Technology, vol. 80-81, pp. 131-135, 1.998.

Caporalli, Fo. A., Gileno, L.A. e Button, S.T., “Sistema Especialista para o Forjamento a Quente”, XIV Congr. Bras. de Eng. Mecânica, ABCM, CD-ROM, 1.997.

Capítulo 1

Introdução

Forjamento é o processo de fabricação no qual um tarugo de metal é deformado nas mais variadas formas geométricas e com grandes deformações plásticas. Este processo de fabricação está dividido em três grandes grupos: forjamento a frio, a quente e morno. Esta classificação é dependente da temperatura na qual as operações de forjamento ocorrem. (Yang ,1993).

Os processos de forjamento a quente e forjamento morno distinguem-se pela faixa de temperatura na qual são realizados, isto é, faixas de temperatura em que ocorrem os mecanismos de recuperação e recristalização, para o forjamento a quente as temperaturas estão entre 1100 e 1280°C para aços (Doege, 2000). Já o processo de forjamento a frio caracteriza-se pelo fato de ocorrer à temperatura ambiente. Além disso, este processo possibilita a obtenção de produtos do tipo *net-shape* ou *near-net-shape* (Im, 1999), (Drozda, 1983), além de outras vantagens como, propriedades mecânicas melhoradas, superfície final com baixa rugosidade, tolerâncias dimensionais mais estreitas, e ainda, economia de matéria-prima já que a variação do peso inicial do tarugo para esse processo de conformação é bem menor quando comparado a outros processos de conformação, como por exemplo o forjamento a quente (Altan, 1990), (Kudo, 1990), (Mamalis, 1996).

Aproximadamente metade do custo de um forjado se faz em função do custo da matéria prima. Com o processo de forjamento de precisão pode-se alcançar uma economia de 15% dessa matéria prima, e então o custo do forjado ser reduzido em 7,5%. Como exemplo, o autor cita uma

peça forjada de precisão com massa de aproximadamente 8 lb \cong 3,6 kg resultou em uma redução no custo de usinagem de US\$ 1.00 quando comparado com o custo de usinagem de um forjado convencional do mesmo produto Douglas (2000).

Entretanto, o processo de forjamento a frio, como qualquer outro processo de manufatura, também tem suas desvantagens, como a pressão de forjamento que é extremamente alta já que o processo é realizado sem aquecimento dos tarugos. Essa condição de processo acaba gerando tensões extremamente altas, podendo ocorrer fraturas nas ferramentas, defeitos nos produtos ou aderência entre o tarugo e as ferramentas. Além disso, esse processo geralmente necessita de várias operações intermediárias para transformar um simples tarugo em uma peça com geometria mais complexa e sem defeitos internos ou superficiais (Yang, 1993).

Devido a todas essas características descritas, os processos de manufatura por forjamento são encarados mais como uma arte e não como uma ciência, pois envolvem criatividade, intuição e principalmente a experiência dos engenheiros que atuam na área. Atualmente, os engenheiros planejam processos utilizando manuais, ábacos obtidos empiricamente e principalmente as experiências por eles acumuladas (Glynn, 1995), (Viecelli, 1995). Por estes motivos esses processos são realizados pelo método da “tentativa-e-erro” aumentando, consideravelmente, o custo do processo que é um item crítico do ciclo produtivo (Yang, 1993), (Song, 1999).

Com o desenvolvimento da informática e a introdução dos sistemas CAD, CAM e CAPP entre outros, aplicados como ferramentas de auxílio no planejamento de processos de forjamento, associados aos métodos de “tentativa-e-erro” bem como aos métodos baseados na experiência adquirida pelos profissionais, projetistas e engenheiros da área, puderam auxiliar consideravelmente a automação dos diversos procedimentos, atuando como fonte de informações e organização de dados para o planejamento de novos processos.

O primeiro relato na literatura relacionada com a aplicação inicial de computadores para planejamento de processos e projeto de ferramentas para forjamento a frio, refere-se ao início dos anos 70. Desde então, muitos pesquisadores têm aplicado computadores no planejamento de processos de forjamento a frio, principalmente (Yang, 1993).

Nos anos 80, as pesquisas no desenvolvimento de sistemas especialistas foram intensificadas. Entretanto, apesar deste progresso, os sistemas especialistas para forjamento a frio ainda não alcançaram níveis desejados de desenvolvimento, principalmente pela dificuldade de se elaborar bases de conhecimento para previsão de defeitos, determinação da vida das ferramentas, dos valores de custo, entre outros (Yang, 1993), (Song, 1999).

1.1 Objetivos

Este trabalho foi motivado pela importância de se desenvolver um sistema para automatizar o planejamento do processo de forjamento a quente em suas diversas fases, com o objetivo de reduzir os tempos e custos envolvidos, bem como de evitar possíveis erros presentes nos procedimentos atuais.

Assim, o objetivo principal deste trabalho foi desenvolver um sistema especialista semi-automático para o forjamento a quente de peças com geometria axissimétrica, cuja relação altura do forjado pelo seu diâmetro é bem menor que um, ($L/D \ll 1$). Desta forma este trabalho foi desenvolvido utilizando-se como base engrenagens cilíndricas. Porém, nada impede que seja aplicado a outras peças que respeitem a relação acima.

O sistema proposto deveria apresentar uma interface amigável com o usuário que poderia, a qualquer momento, interferir nas informações. Ao final de um ciclo de desenvolvimento de um novo forjado, deve ser emitido um relatório apresentando os dados utilizados, como temperatura de forjamento, material e dimensões da peça, entre outros. Também serão emitidos o desenho do forjado com as dimensões adequadas ao processo e também os desenhos das ferramentas de forjamento.

1.2 Justificativas

Atualmente, as indústrias de forjados demandam um tempo elevado com desenvolvimento e planejamento de processos. Isto ocorre porque, como já citado, esses processos envolvem criatividade, intuição e principalmente a experiência de engenheiros e técnicos.

Esses processos apresentam algumas limitações impostas por dificuldades inerentes a sua natureza tais como, cargas de forjamento excessivas, desgaste e fratura das matrizes, possíveis defeitos de escoamento do material nas cavidades das matrizes (Kim, 2000). Além disso, observa-se a falta de um maior número de profissionais especializados na área, de modo que esses processos acabam sendo definidos por “tentativas e erros”, gerando um alto custo nessa fase de planejamento do processo.

Devido ao alto custo e demora na definição de processos, verificou-se a necessidade de se desenvolver métodos que possibilitem uma redução acentuada nos tempos gastos com planejamento e projeto. Essa busca na racionalização de tempos também ocorre em diversos processos produtivos como o forjamento a frio, morno ou a quente, e ainda em processos de usinagem, cada um deles com características próprias quanto à qualidade dimensional, acabamento superficial e propriedades mecânicas dos produtos.

Assim, torna-se difícil reunir todas as informações disponíveis na forma de bancos de dados, estruturados de maneira que essas informações sejam, tratadas de forma rápida e organizada visando-se reduzir os tempos gastos com o planejamento de novos projetos e também com alterações em projetos já existentes. A partir de informações de um profissional da área de projeto de forjados a quente, tem-se que o tempo médio, empregado no desenvolvimento de um novo projeto, que compreende desde o desenho do forjado até o desenho de seu respectivo ferramental, conforme as normas da empresa, pode chegar a 25 (vinte e cinco) horas, tempo que pode ser considerado excessivo, se analisados os custos envolvidos e a necessidade de agilidade e competitividade da empresa (informação verbal)¹.

Como descrito, com os avanços da informática essas dificuldades têm sido minimizadas, tornando-se possível o desenvolvimento de métodos que possibilitam a racionalização dos procedimentos. Um desses métodos é o “Sistema Especialista” (Kim, 2000). Na revisão bibliográfica realizada neste trabalho poucas referências foram encontradas sobre sistemas especialistas desenvolvidos para o forjamento a quente e não se encontrou nenhum produto comercial disponível para esse tipo de aplicação.

¹ Cândido M.A., Eaton Divisão Transmissões, Departamento de Engenharia de Forjados.

Na prática industrial existe toda uma rotina que deve ser cumprida até que se inicie o desenvolvimento do projeto propriamente dito, e que varia de acordo com a empresa e principalmente com o tipo de produto comercializado. No caso específico de produtos forjados e posteriormente usinados tem-se as seguintes etapas (informação verbal)².

- ✓ Análise estratégica de mercado, quando se define qual o interesse no cliente. Essa análise é feita com base em informações oriundas da área de Negócios da empresa. Outra análise feita é quanto a repercussão, em termos do aumento de horas/máquina na produção, análise de capacidade.
- ✓ Cotação, quando se analisa os desenhos, verificando-se qual a matéria prima utilizada e, a partir daí, especificar a matéria prima conforme a norma da empresa e por fim, qual será o investimento, se houver.
- ✓ Liberação para manufatura, ou seja, decide-se que o novo produto é de interesse da empresa.
- ✓ Liberação para Engenharia, quando serão elaborados desenhos conforme os padrões da empresa. Outra definição nessa fase refere-se à origem do produto: se será importado, comprado no mercado nacional ou fabricado. Caso a origem do produto seja a fabricação pela própria empresa, passa-se às fases seguintes:
 - Determinação do processo de fabricação a ser empregado, pois na área de forjamento têm-se os processos a quente de precisão (sem rebarba), a morno e também a frio para eixos extrudados.
 - Para fabricação de engrenagens, objeto de estudo deste trabalho, utiliza-se o forjamento a quente na faixa de 950°C a 1250°C para produtos com diâmetro até 230 mm, ou forjamento morno/semi-

² Cândido M.A., Eaton Divisão Transmissões, Departamento de Engenharia de Forjados.

quente, na faixa de temperatura compreendida entre 750°C a 950°C para engrenagens com diâmetro do forjado até 180 mm.

- O planejamento do processo é feito por um projetista com o apoio de *softwares* de CAD 2D para o desenho do forjado e das ferramentas. Esse planejamento pode ser considerado como manual pois não envolve o uso intensivo de *softwares* para o seu desenvolvimento.

O procedimento manual é desenvolvido pela utilização de um *software* de CAD em que não se aplica a ferramenta 3D, isto é, elaboram-se apenas os desenhos de fabricação 2D.

Do ponto de vista dos desenhos de projeto, os benefícios oferecidos por um *software* de CAD ou outro 3D parametrizado, são suficientes para a fabricação, pois o importante para o projetista são as informações que o desenho de fabricação apresenta, independentemente de como tenha sido gerado.

Entretanto, para se definir o volume do produto forjado para posterior definição do comprimento de corte do tarugo inicial, deve-se calcular separadamente e isso acarreta maior tempo de projeto.

Os desenhos das ferramentas, matrizes e insertos, superior e inferior, punção e pino extrator devem ser desenvolvidos separadamente dificultando uma visão geral do projeto. Os tempos envolvidos no planejamento são elevados pois representam uma série de tarefas manuais que envolvem a tomada de decisões e revisão pormenorizada do projeto por parte de um projetista especialista que é responsável diretamente pelo sucesso do projeto.

Capítulo 2

Forjamento a Quente

Neste capítulo serão apresentados alguns conceitos relacionados à análise dos processos de conformação como sistemas, com o objetivo de destacar a importância das variáveis do processo e de sua inter-relação e relacioná-las com o sistema especialista que será desenvolvido.

Também apresenta-se alguns aspectos do processo de forjamento a quente por se tratar do processo adotado para o sistema especialista. Como há uma grande quantidade de informações sobre esse processo e como apenas algumas dessas informações são tratadas neste texto, recomenda-se a consulta a textos clássicos como (Rossi, 1971), (ASM, 1974) e (ASM, 1988).

Os processos de conformação têm como característica explorar uma propriedade notável dos materiais de engenharia, a plasticidade que é a capacidade do material sólido escoar sem a deterioração de suas propriedades. Esses processos podem ser representados por sistemas complexos que consistem de variáveis dependentes, variáveis independentes e a inter-relação dessas variáveis dependentes e independentes (DeGarmo, 1988).

2.1 Análise dos Processos de Conformação como Sistemas

2.1.1 Variáveis Independentes

São aquelas sobre as quais os engenheiros têm controle direto, sendo geralmente selecionadas ou especificadas quando da preparação do processo. Algumas das variáveis independentes são apresentadas a seguir:

Material de Partida – O engenheiro, geralmente, pode especificar livremente as condições de processamento, dentro das propriedades e características do material que será deformado. Esses materiais podem ser escolhidos por facilidades na fabricação ou serem restritos pelas propriedades finais desejadas para o produto.

Geometria inicial da peça – Esta pode ser ditada pelo processamento prévio ou ser definida pelo engenheiro a partir de uma variedade de peças disponíveis. Aspectos econômicos freqüentemente influenciam na decisão.

Geometria da Ferramenta ou da Matriz – Esta é uma das variáveis mais significativas na elaboração do processo e apresenta muitos aspectos de primordial importância, tais como o diâmetro dos cilindros na laminação, o raio de dobra numa operação de estampagem, o ângulo de uma fiação em trefilação ou o ângulo da ferramenta de extrusão e, detalhes da cavidade, raios de canto e raios de filete, ângulo de saída em matrizes de forjamento. O sucesso ou falha no processo é, geralmente, dependente da geometria da ferramenta.

Lubrificação – O atrito é uma parcela importante no aumento da potência requerida para um processo de conformação e que pode ser minimizado pelo uso de lubrificantes que também atuam como refrigerantes, barreira térmica e inibem a corrosão. Sua seleção é de suma importância, e inclui o tipo de lubrificante e o método de aplicação.

Temperatura inicial – É uma das variáveis que mais influencia o processo de conformação. Muitas propriedades dos materiais variam com a temperatura. Assim sendo, sua especificação e controle podem determinar o sucesso ou não de uma operação. Além da temperatura da peça pode-se também especificar a temperatura das ferramentas.

Velocidade da operação – Muitos equipamentos utilizados em processos de conformação permitem a variação da velocidade. Entretanto, essa possibilidade afeta diretamente o processo em execução, pois a velocidade pode afetar a eficiência da lubrificação, e conseqüentemente as

forças necessárias à deformação. Também é afetado o tempo disponível para a transferência de calor entre ferramentas e peça, e por conseqüência, a plasticidade do material trabalhado, o que evidencia a importância da correta seleção do equipamento.

Quantidade de deformação – Enquanto em alguns processos, como a laminação, essa variável é controlada pelos engenheiros de projeto pela variação da espessura laminada, no forjamento, essa variável é determinada pelo projeto das matrizes que permite a correta distribuição das deformações no produto forjado.

2.1.2 Variáveis Dependentes

Após a especificação das variáveis independentes pelos engenheiros, a própria natureza do processo de conformação determina valores para as variáveis dependentes que são em suma, conseqüência das variáveis independentes;

Força ou potência necessária – Para que uma peça inicial seja transformada em uma peça final é necessária uma determinada força ou potência que é função das variáveis independentes, tais como a lubrificação, a geometria das ferramentas, a velocidade, e a temperatura inicial.

A variação de um ou mais desses itens causa uma mudança na força ou potência requerida. Os projetistas não podem especificar a força ou potência, e é nesse momento que sua experiência entra em ação, pois há a necessidade de selecionar o equipamento e as ferramentas apropriadas para a otimização do processo.

Propriedades do material do produto – Os engenheiros e projetistas podem especificar as propriedades do material inicial, porém a combinação dos efeitos da temperatura e do grau de deformação ocorrido durante o processo podem alterá-las. Assim, os engenheiros e projetistas se concentram nas propriedades finais requeridas pelo produto, de tal forma, que seu conhecimento adquirido em experiências anteriores os habilitem a prever qual o material ideal e como ele responderá ao processo empregado, em função das condições estabelecidas para o processo.

Temperatura final – Processos de deformação também geram calor. Se o processo é feito a quente existe perda de calor para as ferramentas e nessas condições o lubrificante pode falhar ou se decompor e pode eventualmente alterar as propriedades do material trabalhado, de modo que o controle da temperatura ao longo do processo é de fundamental importância.

Superfície final e precisão dimensional – Essas características são totalmente dependentes do processo selecionado para obtenção do produto desejado.

Escoamento do material – Esse comportamento é dependente da especificação do material e do processo. É necessário saber o histórico do material, quanto ao processo prévio de obtenção. Além disso, o perfeito escoamento com o preenchimento adequado das cavidades das ferramentas nos processos de forjamento, está diretamente ligado à geometria das ferramentas e permite que o produto a ser entregue ao cliente esteja com as propriedades desejadas e sem quaisquer defeitos, sejam superficiais ou internos.

2.1.3 Relações entre as Variáveis Independentes e Dependentes

A Tabela 2.1 apresenta o sistema de conformação dos metais mostrando as variáveis independentes e dependentes, anteriormente apresentadas. À esquerda estão as variáveis independentes, ou seja, as variáveis do processo para as quais o controle é direto e imediato e à direita as variáveis dependentes, as quais deseja-se controlar, mas são dependentes do processo, isto é, são consequência da seleção das variáveis independentes. Se deseja-se alterar uma variável dependente, então deve-se verificar qual ou quais variáveis independentes devem ser alteradas, de que maneira e/ou o quanto alterá-la. Assim, é importante o conhecimento acumulado e também o intuitivo para que se possa avaliar a inter-relação variáveis independentes e variáveis dependentes.

A ligação entre as variáveis independentes/dependentes é extremamente importante para os profissionais da área de conformação. Infelizmente, esses elos de ligação são difíceis de se obter, pois os processos de conformação são sistemas complexos representados por um material sendo deformado, as ferramentas determinando a deformação, a lubrificação para superfícies e interfaces e vários outros parâmetros, inerentes, a cada processo, que acabam por definir um grande número de variáveis. Além disso, os materiais se comportam diferentemente quando submetidos a um mesmo processo, mesmo quando há pequenas variações nas condições de processamento.

A capacidade de prever e controlar as variáveis dependentes pode ser obtida por três maneiras a saber:

Experiência, conhecimento – Isso requer muito tempo de trabalho na área, porém, limita-se à especificação de materiais, equipamentos e produtos desenvolvidos no passado, e representa a experiência anterior acumulada.

Experimentos, testes práticos – Podem ser executados em laboratórios. Entretanto, isso leva ao método de “tentativa e erro” acarretando um elevado custo no desenvolvimento. Normalmente, quando se desenvolve ensaios em laboratório, a escala é reduzida o que acaba por alterar a velocidade de deformação, o desempenho de lubrificantes e a transferência de calor resultando em efeitos alterados no processo. Assim, é necessário um cuidado ao se extrapolar os resultados obtidos em laboratório para uma escala real de trabalho.

Modelamento do processo – Aqui uma aproximação do processo pode ser obtida através da utilização da informática, com computadores de alta velocidade e utilização de um ou mais modelos matemáticos que representam o processo, o que exige a aplicação de formulações complexas da teoria da plasticidade e também que se assumam algumas condições simplificadoras, que também levam a uma definição incorreta das condições do processo.

Quadro 2. 1- Inter-relação entre as variáveis Independentes e Dependentes, (DeGarmo, 1997).

<u>Variáveis Independentes</u>		<u>Variáveis Dependentes</u>
Material Inicial Geometria Inicial Geometria da Ferramenta Lubrificação Temperatura Inicial Velocidade de Deformação Quantidade de Deformação	Experiência (conhecimento) Experimentos (testes práticos) Modelamento do Processo	Força ou Potência Requerida Propriedades do Produto Temperatura Final Rugosidade Superficial Final Precisão Dimensional Escoamento do Material

2.2 Ferramentas de Forjamento a Quente

O forjamento é um processo de fabricação de produtos metálicos, no qual um conjunto de matrizes, superior e inferior, deformam um tarugo metálico segundo uma geometria desejada, utilizando para isso altas forças e energias (Yang, 1993), (Fugikawa, 1995), (Marcicano, 1995) .

Esse processo tem sido utilizado para a produção de peças do tipo *near-net-shape* ou *net shape*. Os tipos bem como a qualidade das peças obtidas por processos de forjamento distinguem-se pela temperatura na qual ocorre o processo:

- ✓ peças do tipo *net-shape* são obtidas por forjamento a frio, que é um processo de conformação de precisão, no qual pode-se obter peças com as dimensões finais, que são peças acabadas que não necessitam de subsequente processo de usinagem. É evidente que a obtenção de peças acabadas a partir do forjamento a frio depende das características da geometria, acabamento superficial final e propriedades mecânicas do produto final;
- ✓ já as do tipo *near-net-shape* são obtidas pelo forjamento a quente, que permite uma variação maior da geometria dos produtos por ele obtidos. Essa diversidade poderá ser vista no item 2.5 (Produtos Forjados a Quente). Entretanto, mesmo com essa ampla possibilidade de aplicação do processo de forjamento a quente, as ferramentas têm sofrido variações geométricas buscando uma maior qualidade do produto. Prova disso, é a possibilidade de obtenção de peças forjadas em matrizes sem a bacia de rebarba, que é uma melhoria considerável na qualidade e custo final do produto forjado que é conhecido como *flashless forged*, já que com essa tecnologia, o peso inicial do forjado e quantidade de material necessária em forma de sobremetal, para posterior remoção por processos de usinagem são reduzidos consideravelmente.

Algumas empresas, por iniciativa própria, têm buscado uma redução do custo final do produto forjado tentando reduzir não só o peso inicial do forjado, mas também o número de etapas de usinagem empregados na regravação das matrizes de forjamento.

Geralmente, na obtenção de engrenagens forjadas existem duas operações até a forma final da peça: o recalque do tarugo inicial, que o transforma em um disco, sendo utilizada uma matriz aberta. Essa operação é conhecida como *embolachamento* pois, o tarugo é recalcado até um diâmetro próximo do maior diâmetro do produto forjado final. Esse disco recalcado é colocado dentro da matriz com a forma final do forjado, e o número de operações posteriores de forjamento é dependente da complexidade da geometria do forjado.

Uma tentativa de redução do custo associado ao ferramental de forjamento é a utilização de ferramentas descartáveis. Após um estudo do custo da ferramenta que envolve a análise da matéria prima utilizada, o tempo demandado em usinagem e o volume do lote de peças a ser fabricado, opta-se por simplesmente descartá-las ao se atingir um lote de peças pré-determinado que representa a vida útil das matrizes.

De maneira geral, a regravação das matrizes é feita após um número determinado de peças, ou seja, um lote correspondente à vida útil das ferramentas, quando então as matrizes são desmontadas e levadas para retrabalho, normalmente utilizado em processos de forjamento convencional a quente. Isso ocorre porque as ferramentas para esse processo não utilizam inserts ou seja, são blocos maciços, como podem ser vistas na Figura 2.1.

A face da matriz com o perfil de forjamento é rebaixada, até que todo defeito presente nessa superfície seja retirado. Esse retrabalho, ou regravação, é necessário em função de mudanças dimensionais que surgem devido a fatores tais como: desgaste, deformação plástica, interrupção da lubrificação e trincas ou quebras (Altan, 1999).

O retrabalho das ferramentas, ou regravação, é uma opção utilizada para melhorar a produtividade dentro da empresa, mas também apresenta desvantagens sendo uma delas o fato de que após a usinagem sucessiva das matrizes, elas passam a ter a espessura reduzida, sendo necessária a utilização de calços para posterior montagem do jogo de ferramentas no equipamento. Além disso, ocorre um aumento no número de itens a serem observados durante a pré-montagem do ferramental, o que demanda maior tempo no gerenciamento do ferramental.

A Figura 2.1 apresenta alguns defeitos que podem estar presentes em matrizes de forjamento a quente e que estão associados à capacidade do processo, ou seja, de permitir a conformação da peça sem a ocorrência de defeitos.

Durante o processo de forjamento, o material da peça pode estar submetido a condições limites de deformação e essas condições são transferidas às ferramentas e equipamentos envolvidos no processo.

Um processo é capaz como um todo quando obtêm-se peças sem defeitos provenientes desse processo, e quando as ferramentas e equipamentos se mantêm íntegros no seu decorrer.

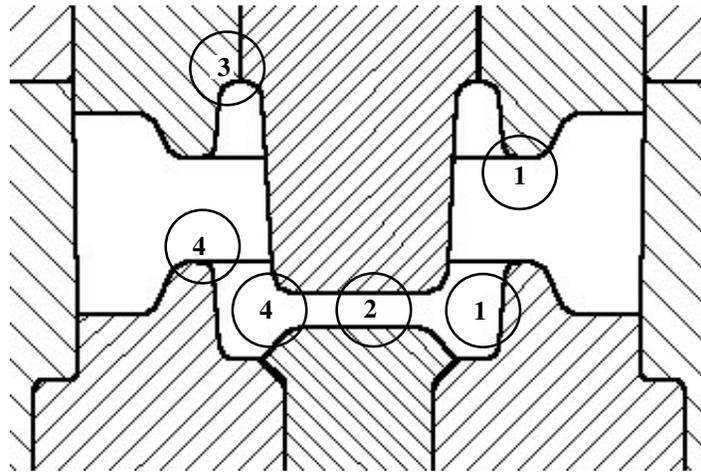


Figura 2. 1 - Localização de falhas típicas que podem ocorrer em matrizes de forjamento a quente:

1 – Desgaste abrasivo, 2 – Fadiga térmica, 3 – Fadiga mecânica, 4 – Deformação plástica, (extraída e adaptada de Altan, 1999).

Outra opção, para a redução do custo e a melhoria na qualidade do produto forjado, é o processo de forjamento de precisão, no qual as características geométricas do forjado são alteradas acentuadamente.

A primeira mudança é a eliminação da bacia de rebarba, que normalmente é a característica do forjado que é a mais facilmente notada. Entretanto, outras mudanças são mais importantes do ponto de vista tecnológico, pois esse tipo de forjamento promove alterações nos ângulos de saída, raios de canto e de filete das matrizes e exige maior rigidez dos equipamentos empregados.

Na aplicação dessa tecnologia de forjamento são necessários alguns cuidados relativos ao equipamento já que existe uma grande mudança na geometria do produto ou seja, como os ângulos de saída são minimizados existe o risco de travamento do forjado dentro da ferramenta e para que isso não ocorra utilizam-se equipamentos que possuam um sistema de extração.

Outro item importante a ser observado é a operação de corte dos tarugos. Como não existe bacia de rebarba a variação do peso inicial do tarugo deverá ser reduzida para que não ocorram

defeitos de preenchimento ou uma sobrecarga nas ferramentas e no equipamento e conseqüentemente, riscos de fratura dos componentes das ferramentas ou até dos equipamentos.

Normalmente, para se ter uma melhor produtividade, a operação de corte dos tarugos é realizada utilizando-se corte por cisalhamento, ou como é comumente conhecido corte por tesoura. Entretanto, se as ferramentas de corte não estiverem adequadas ou o equipamento usado não apresentar uma rigidez ideal os tarugos poderão ter a face de corte inclinada, e quando o tarugo for colocado na matriz de recalque para obtenção do disco, ou “bolacha”, não será obtida uma peça circular e sim elíptica, podendo gerar um desbalanceamento de esforços na matriz final de forjamento.

As Figuras 2.2 e 2.3 apresentam duas ferramentas de forjamento: a primeira mostra o ferramental para forjamento a quente convencional, ou seja, blocos maciços com bacia de rebarba para acomodação do excesso de material, previamente previsto devido à menor precisão exigida pelo processo, e conseqüentemente uma menor precisão no corte do tarugo.

Além da baixa qualidade dimensional deste produto em função do sobremetal deixado para usinagem posterior, existem outros fatores que comprometem a qualidade final do forjado. Um desses fatores é a possibilidade de erro de concentricidade entre as ferramentas superior e inferior, que pode causar um desvio entre as partes superior e inferior do forjado.

Nesse processo, a matriz superior não é guiada na matriz inferior e dessa forma qualquer problema na rigidez do equipamento será absorvido pelas ferramentas ocasionando um desvio no produto, conforme mostrado na Figura 2.4, na qual pode-se verificar que o perfil da peça gerado pela matriz superior tem uma linha de centro enquanto que o perfil da peça gerado pela matriz inferior apresenta outra linha de centro, daí a necessidade de se aumentar o sobremetal deixado para posterior remoção por usinagem para que esse desvio não cause falhas na geometria final do produto.

O equipamento utilizado no processo de forjamento convencional é mais simples quando comparado com o utilizado no forjamento de precisão pois o primeiro não necessita de extratores

e é em função dessa característica do equipamento que os ângulos de saída são maiores para os produtos obtidos por este processo, justamente para facilitar a extração.

Na Figura 2.3, pode-se verificar a inexistência da bacia de rebarba, o que torna necessário um melhor controle na operação de corte dos tarugos já que qualquer variação excessiva pode causar falhas nos produtos, ferramentas ou equipamentos. Pode-se notar também que as duas ferramentas superior e inferior são auto-guiadas reduzindo acentuadamente o risco de desvio entre as gravuras. Nesse conceito de ferramenta verifica-se a utilização de “insertos” que diferem do conceito anterior, pois nesse caso a ferramenta é composta de itens como capa ou carcaça superior e inferior, matrizes superior e inferior, além do extrator e punção.

Nesse processo o equipamento deve dispor de um sistema de extração em função dos menores ângulos de saída e deve ser mais rígido para garantir dimensões mais precisas.



Figura 2. 2 - Ferramental para forjamento convencional.

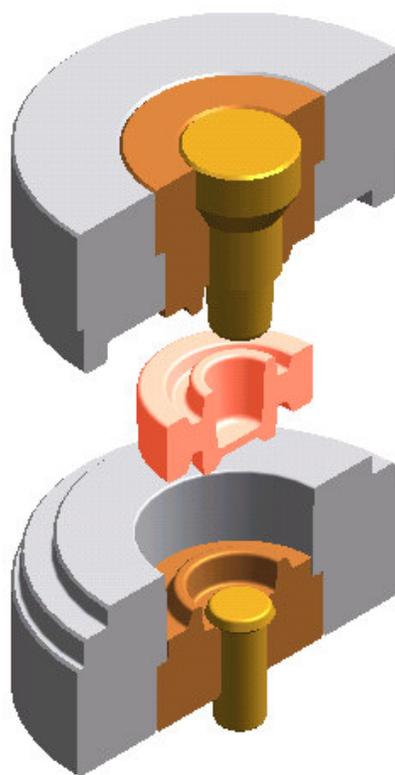


Figura 2. 3 - Ferramental para forjamento de precisão.

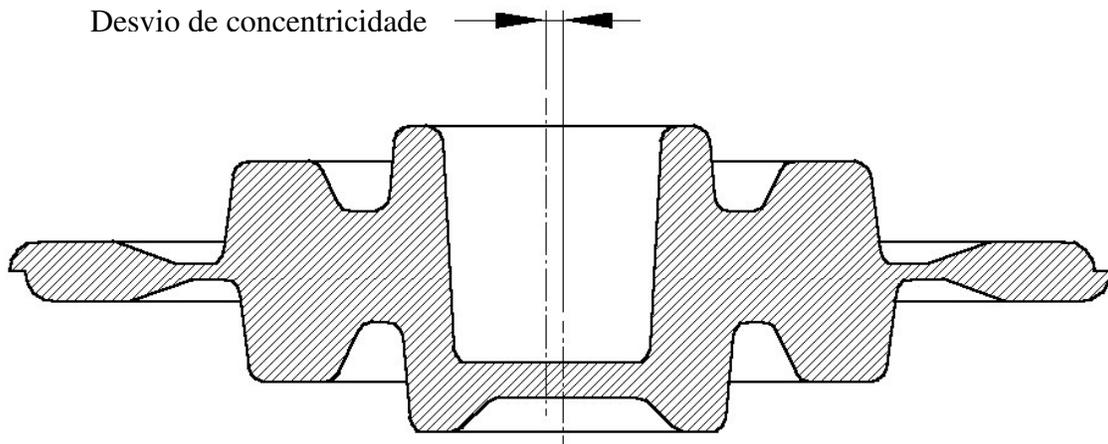


Figura 2. 4 - Desvio de concentricidade entre matrizes superior e inferior.

2.3 Materiais para Ferramentas de Forjamento a Quente

Em todo processo de fabricação existe uma parcela do custo total do processo associada às ferramentas. Assim, o custo final do processo poderá ser minimizado se a vida útil das ferramentas for maximizada, a partir da análise de algumas condições sob as quais as ferramentas estão sujeitas.

Durante o forjamento as matrizes estão sujeitas a altos impactos. Por esse motivo, no forjamento a quente convencional as matrizes apresentam uma área de choque para absorver o impacto no fechamento, ou seja, as “tensões compressivas de impacto”, que alcançam valores de 1000 MPa até 2000 MPa, e podem provocar danos em regiões das ferramentas, causando deformações permanentes e conseqüentemente variações dimensionais que afetam a precisão do produto (Grüning, 1973). Em matrizes para forjamento com gravações profundas surgem, além das tensões compressivas, tensões radiais e para compensá-las utilizam-se anéis de pressão ou anéis de encarcamento. Outros danos nas ferramentas são devidos ao escorregamento do material nas superfícies de contato que causam desgastes que também podem provocar variações dimensionais no produto final.

Ainda no forjamento a quente, as matrizes estão sujeitas a solicitações térmicas devidas as altas temperaturas durante o processo, que podem atingir valores em torno de 550 °C. Essas

condições associadas às tensões compressivas e radiais provocam pequenas fissuras nas superfícies das matrizes, que podem levá-las a falhar.

Em função dessas solicitações a que estão expostas as ferramentas de forjamento estabelecem-se os seguintes requisitos para o material adequado à fabricação de matrizes:

- ✓ alta dureza, tenacidade e resistência à fadiga;
- ✓ alto limite de escoamento e alongamento;
- ✓ alta resistência a quente;
- ✓ insensibilidade a oscilações térmicas de curta duração e
- ✓ alta resistência ao desgaste.

Assim, os materiais mais indicados e atualmente utilizados são os aços ligados ao Cr, Mo, V, W e Ni para o trabalho como os aços ASTM H10, H11, H12 e H13, DIN 50NiCr13 e 56NiCrMoV7 (ASM, 1974, pp.28-29).

2.4 Equipamentos para o Forjamento a Quente

A seleção do equipamento de forjamento depende de alguns fatores, dentre eles o tamanho e complexidade do forjado, a resistência à deformação do material e sua sensibilidade à taxa de deformação (Kalpakjian, 1991).

Para o forjamento a quente empregam-se comumente as prensas e os martelos. Existem basicamente três tipos de prensas: as hidráulicas, as mecânicas e as de fuso ou fricção. Esses três tipos de prensas são freqüentemente utilizadas em processos de forjamento a quente e a frio, em processos de extrusão também a quente e a frio e ainda na conformação de chapas, estampagem ou cunhagem. Já os martelos são mais empregados em processos de forjamento a quente, especialmente na obtenção de peças de grande porte, como virabrequins ou eixos dianteiros para caminhões e ônibus.

2.4.1 Prensas Hidráulicas

A seguir, faz-se uma breve descrição de alguns dos equipamentos mais empregados no forjamento a quente destacando-se aspectos relacionados principalmente com a taxa de deformação. Para um maior detalhamento sobre esses equipamentos recomenda-se a leitura de ASM, 1974, ASM,1988 e Altan, 1999.

São raramente usadas para produção de peças forjadas de pequeno porte. Para forjados de precisão, categoria em que se incluem os forjados a frio, dependendo da geometria e características superficiais do produto, as prensas hidráulicas possibilitam que os forjados possam ser obtidos próximos da sua forma final, caracterizados como forjados *net-shape*. As prensas hidráulicas são também usadas para produzir pré-formas para subsequente forjamento em matriz fechada.

As taxas de deformação nesses equipamentos, por serem mais lentas, proporcionam ao forjado gradientes mais uniformes de deformação e de temperatura em relação a equipamentos com taxas de deformação maiores. Contudo, o forjamento convencional em prensa hidráulica é problemático, devido ao longo tempo associado à deformação e ao elevado tempo de contato do tarugo aquecido com as matrizes mais frias. (Kuhlman, 1988).

2.4.2 Prensas Mecânicas

São amplamente usadas em processos de forjamento a quente de diversas ligas metálicas, para peças de tamanho pequeno até médio. A taxa de deformação relativamente alta desse tipo de equipamento é eficientemente empregada para se obter peças com perfis complexos e que apresentam tolerâncias apertadas. Porém, tal como os martelos, essa taxa alta de deformação pode gerar gradientes não uniformes de deformação. Entretanto, controlando-se a temperatura do metal e as condições de deformação, podem-se obter forjados com microestruturas uniformes.

Essas prensas são geralmente utilizadas para processos em que o peso do produto varia de 9 kg até no máximo 45 kg (Kuhlman, 1988). No Brasil tem-se aplicação desse equipamento para forjamento de peças a partir de 3 kg (informação verbal)³.

2.4.3 Martelos

Os martelos de queda simples e de potência assistida são extensivamente usados para o forjamento convencional, de peças de geometrias complexas e grandes dimensões em matrizes abertas e fechadas, devido ao seu custo relativamente baixo de produção e sua capacidade de conferir deformação progressiva à peça forjada. Outro fator de extrema importância associado aos martelos, é o intervalo de tempo relativamente pequeno que a peça fica em contato com as matrizes durante a deformação, devido a alta taxa de deformação que caracteriza esse equipamento.

Por outro lado, as taxas de deformação elevadas podem causar efeitos adversos à microestrutura final do produto forjado. Contudo, com um controle adequado do processo de forjamento, o aumento da temperatura de forjamento devido ao processo, pode ser eficientemente usado como complemento no processo para aumentar o tempo de deformação, antes do resfriamento da liga abaixo da temperatura de forjamento recomendada (Kuhlman, 1988).

2.4.4 Prensas de fuso ou de fricção

As prensas de fricção são um dos equipamentos mais antigos e conhecidos no mundo da forjaria e nem por isso, deixam de ser interessantes em muitas aplicações. Esse equipamento apresenta ausência de ponto morto geométrico inferior, de um limitador de torque, de relação entre força e energia, e simplicidade na operação, características que permitem flexibilidade e precisão na produção para peças de diversas geometrias e pesos (Viglieno, 1989).

As prensas de fuso ou de fricção como são conhecidas, utilizam um sistema composto por embreagem, engrenagens, acionamento elétrico ou hidráulico, empregado para acelerar um

³ Silva I.B., Eaton Divisão Transmissões, Departamento de Engenharia de Forjados.

volante montado num fuso que converte energia cinética angular em movimento linear de um cabeçote. Seu funcionamento consiste de discos de acionamento, que ficam girando continuamente e iniciam um golpe quando um dos discos é pressionado contra o volante por um servomotor. Este volante aciona o fuso onde está o cabeçote com a matriz superior (Altan, 1999). A Tabela 2.2 apresenta as velocidades características de alguns equipamentos de forjamento.

Tabela 2. 1 – Velocidades dos vários tipos de equipamentos para forjar, Grüning 1973.

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

* prensas de manivela e excêntricas,

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

2.4.5 Equipamentos Auxiliares

Algumas peças forjadas a quente podem passar por operações que antecedem as de forjamento final. Essas operações têm como objetivo distribuir melhor o material para garantir o total preenchimento da cavidade das ferramentas e são realizadas em equipamentos auxiliares tais como forjadoras rotativas e marteletes.

Como exemplo de utilização desses equipamentos tem-se a confecção de pontas de eixo, que passa inicialmente pela forjadora rotativa, posteriormente por martelos de queda e finalmente por recaladoras horizontais.

2.5 Produtos Forjados a Quente

Os produtos obtidos por processos de conformação apresentam as mais variadas formas geométricas, que em sua maioria, só podem ser obtidas através do processo de forjamento a quente. Como exemplos, são mostrados na Figura 2.5 virabrequins, mangas de eixo entre outros produtos forjados a quente.

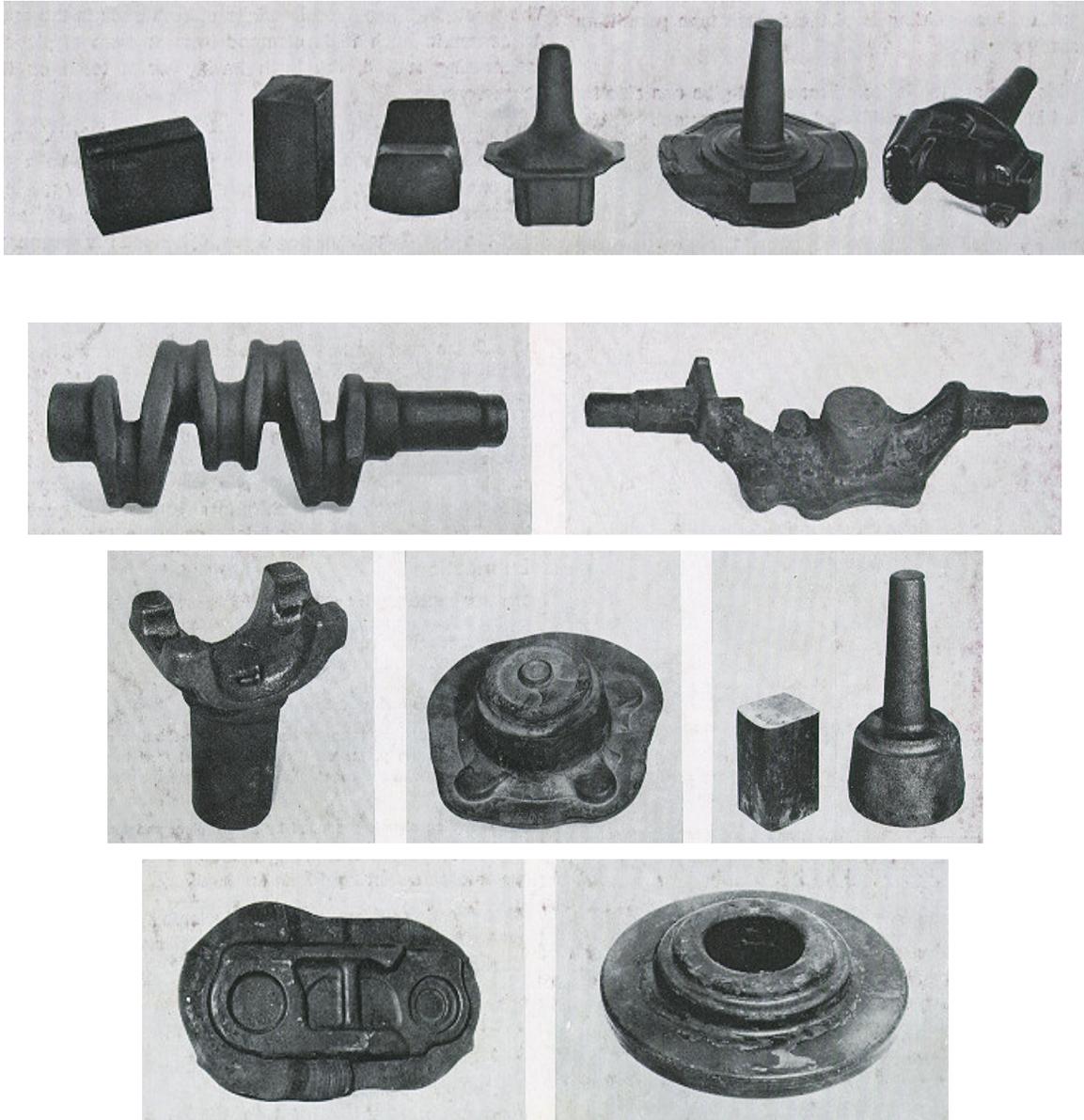


Figura 2. 5 - Peças forjadas a quente em prensas excêntricas (Button, 1998).

Capítulo 3

Sistemas Especialistas

3.1 Revisão Histórica

O termo Sistemas Especialistas (SE), *Expert Systems* e Inteligência Artificial (IA), *Artificial Intelligence* são relíquias de pesquisas realizadas nos anos 60 e 70 do século XX, cujo propósito era criar máquinas capazes de decidir. Apesar da tecnologia nunca ter sido suficientemente avançada para atingir este objetivo os termos são de uso popular para sistemas de inferência e de ciência cognitiva como alternativas realísticas (King, 1994). Ainda nos anos 60, Feigenbaum e associados sugeriram que as técnicas de Inteligência Artificial poderiam ser mais eficientes se acrescidas do conhecimento adquirido por especialistas. Esse conceito levou ao desenvolvimento de Sistemas Especialistas (Aberšek, 2000)

Como definição genérica, Sistemas Especialistas são formas de inteligência artificial que permitem que o conhecimento de especialistas possam ser concentrados e/ou agrupados e, posteriormente, acessados inteligentemente. Essa tecnologia foi aplicada com sucesso em diversas áreas tais como, financeira, química e médica, e recentemente, tem-se visto um aumento no número de sistemas especialistas introduzidos no cenário da indústria de manufatura (King, 1994), (Song, 1999), (Kim, 2000).

Além disso, conforme Martin (1996), tornou-se parte do planejamento das empresas investir de 15 a 20 % de seu orçamento, destinado à tecnologia, na aplicação de Sistemas Especialistas para a manufatura.

Entre os vários benefícios esperados pela aplicação de Sistemas Especialistas destacam-se os seguintes:

1. Melhoria na produtividade;
2. Preservação do conhecimento,;
3. Benefícios econômicos;
4. Facilidade de treinamento e
5. Aperfeiçoamento do trabalho.

Muitos SE em operação, aproximadamente 80%, são para utilização em PC's e desenvolvidos sobre *softwares* comerciais. Outros podem ser escritos em uma linguagem de Inteligência Artificial, como *PROLOG* ou *LISP*.

Um SE tem três componentes básicos, que são: base de conhecimento *knowledge base*, máquina de inferência *inference engine* e uma interface com usuário *user interface* (King, 1994), (Glyn, 1995), (Dobrzański, 1996), (Sitaraman, 1991).

Base de conhecimento: como uma base de dados, armazena informações sobre o processo, critérios de produção, isto é, pares “condição-ação” permitindo a manipulação/interpretação desses dados. Esses critérios podem ser na forma de afirmações factuais, estruturais, critérios ou procedimentos. A sintaxe desses critérios pode ser representada por:

“If < condição >”
“Then < ação >”

O Quadro 3.1 apresenta um exemplo de uma série de condições que levam a uma ação.

Quadro 3. 1 – Exemplo apresentado por Glynn et al. (1995).

IF, material é Iconel 718	(condição 1)
AND, lubrificante é Silicato B	(condição 2)
AND, volume inicial do tarugo < 9 in ³	(condição 3)
THEN, use Prensa C	(ação)

Máquina de Inferência: a função desta estrutura é executar uma estratégia lógica no controle dos dados na base de conhecimentos, que é concluída pela rotina seguinte, verificando fatos e critérios armazenados no banco de dados, o que leva a uma conclusão direta em função de informações fornecidas pelo usuário.

Interface com Usuário: São os meios de comunicação do usuário com o sistema, pelos quais são introduzidas as informações necessárias. Atualmente, a interface gráfica é a mais empregada e pode ser orientada por objetos, ter controles por “mouse” ou apresentada em janelas.

As pesquisas que objetivaram a utilização de computadores no planejamento e projeto de ferramentas para processos de forjamento tiveram início com os pesquisadores Niebel e Barker, com seus colaboradores nos anos 60 (Kim, 1995) (Yang, 1993).

O sistema de Niebel permite definir-se um “esqueleto” de processos básicos e secundários ideais a partir de uma base de dados obtida da tecnologia de grupo pela análise multidisciplinar (multiprocessual) do produto a ser obtido (Niebel, 1966) e (Barker, et al. 1968).

Barker et al. relataram em seu trabalho que o tempo necessário para o projeto básico e para o projeto detalhado de ferramentas de conformação de metais foram reduzidos de um período de semanas, para algumas horas com a utilização de gráficos computacionais (Yang, 1993).

Nos anos 70 do século XX, pesquisadores continuaram o desenvolvimento desses trabalhos, agora focando os sistemas de planejamento do processo auxiliado por computador “CAPP-Computer-Aided Process Planning” para o forjamento a quente. Esses sistemas foram desenvolvidos na tentativa de integrar os vários estágios do planejamento de processos com o

projeto e fabricação de matrizes e promover um uso mais efetivo de procedimentos computacionais apropriados utilizando a experiência dos projetistas. Posteriormente, Biswas e Knight, apresentaram um trabalho que tinha como objetivo o projeto de matrizes para o forjamento a quente de peças axissimétricas (Yang, 1993). O projeto proposto pelos autores tinha como procedimento inicial usar a peça usinada, que teria alteradas as seguintes características, (Biswas, 1974), (Biswas, 1976):

1. Seleção da linha de rebarba;
2. Definição dos limites para usinagem em várias superfícies da peça;
3. Seleção dos ângulos de saída;
4. Adição de raios de canto e filete e,
5. Definição de tolerâncias dimensionais.

Inicialmente, no desenvolvimento de sistemas especialistas para planejamento de processos de forjamento a quente, os pesquisadores reconheceram que o uso de sistemas CAD, CAM e CAPP seria a melhor solução para o planejamento do processo de uma grande variedade de componentes produzidos por forjamento a quente. Assim, a aplicação de princípios da tecnologia de grupo foi enfatizada no planejamento de processos de forjamento, e a grande variedade de produtos foi classificada dentro de famílias em função da similaridade geométrica e dos processos de fabricação (Eversheim, 1974).

No início de seu desenvolvimento os sistemas especialistas para forjamento a quente incluíam diversas funções segundo as referências citadas a seguir, (Biswas, 1974), (Akgerman, 1972), (Akgerman, 1976), (Biswas, 1975), (Biswas, 1976) , (Chan, 1980), (Knight, 1982), (Subramanian, 1978), (Choi, 1984) e (Choi, 1984):

- ✓ Programas para componentes axissimétricos;
- ✓ Projeto de matrizes para pré-forjamento e acabamento;
- ✓ Estimativa de custos e cargas de forjamento;
- ✓ Projeto para produtos forjados e matrizes compostas,
- ✓ Processos específicos para palhetas de turbinas;
- ✓ Forjamento isotérmico de precisão;

- ✓ Projeto de matrizes para forjamento rotativo e
- ✓ Projeto de matrizes para martelos de queda.

Noack relatou a primeira tentativa em escrever programas de computador para determinação de custos das operações de processos e de produção para fabricação de peças, em aço, com similaridade geométrica.

Nos anos 70 do século XX, Lengyel propôs um método de otimização auxiliado por computador para processos de forjamento a frio. Entretanto, poucos trabalhos em planejamento de processos para o forjamento a frio foram desenvolvidos devido à falta de conhecimento tecnológico desses processos (Yang, 1993).

É importante salientar que as referências apresentadas neste capítulo, com raras exceções, são referentes ao processo de forjamento a frio, pois, uma ampla maioria de peças obtidas por esse processo são peças axissimétricas de revolução, que facilita sobremaneira a interpretação das peças que podem ser representadas bidimensionalmente.

Com o advento da “Inteligência Artificial” (IA), os critérios de projeto e outras orientações foram incluídos em sistemas posteriormente desenvolvidos. Nas duas últimas décadas, a Inteligência Artificial e, em particular, os Sistemas Especialistas têm registrado uma notável evolução expondo novas perspectivas para a utilização de computadores, o que possibilita uma grande variedade de opções de aplicação, representando um novo caminho para solução de problemas complexos, não solucionados pelos métodos convencionais de programação (Im, 1999), (Di Lorenzo, 2002) .

O desenvolvimento de sistemas especialistas usando a tecnologia da “IA” e o aumento na utilização de simulações computacionais, naturalmente permitiram uma série de projetos de pesquisas para o planejamento de processos e projeto de ferramentas para forjamento a quente e a frio.

No início dos anos 80 do século XX, como uma extensão dos conhecimentos existentes em Tecnologia de Grupo, Golker et al., propuseram um método para representação e classificação de

formas de produtos forjados utilizando um código de quatro dígitos, dos quais o primeiro descreve o material e os três últimos, descrevem alguns elementos volumétricos (Knight, 1981).

Posteriormente, esses métodos foram aplicados para o forjamento de peças por recalçamento em recalçadoras, máquinas horizontais de forjamento (Knight, 1982) e (Gokler, 1983). Além disso, foram estabelecidos alguns critérios que definiam os limites de deformação, que posteriormente foram utilizados para o planejamento de processos. Essas pesquisas permitiram, posteriormente, o desenvolvimento de sistemas baseados no conhecimento, *knowledge-based systems* para planejamento de ambos os processos de forjamento a quente e a frio.

Em meados dos anos 80 do século XX, os sistemas CAD/CAM estavam disponíveis nas indústrias de matrizes e coquilhas (Altan, 1987). Esse sucesso encorajou pesquisadores interessados no desenvolvimento de sistemas especialistas baseados no conhecimento *knowledge-based expert systems*, para aplicação em processos de forjamento. Yu e Dean, estabeleceram alguns critérios para projeto das cavidades da matriz (Yu, 1985).

Segundo Yang, 1993, a primeira aplicação de sistemas especialistas em forjamento foi executada em forjamento do tipo “alma-nervura” (*rib-web*) como a peça mostrada na Figura 3.1.

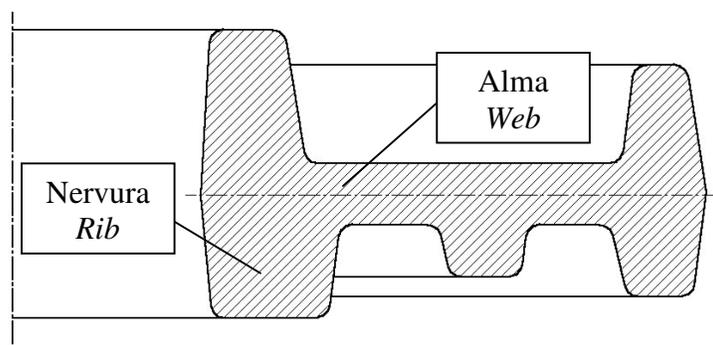


Figura 3. 1 – Forjado do tipo “alma-nervura” adaptado de Vemuri, 1989.

Tang, et al. desenvolveram um sistema especialista chamado *Automatic Forging Design-AFD*, que tinha como função automatizar o projeto de forjados com geometria do tipo alma-nervura (Yang, 1993).

Vemuri, et al. (1989) desenvolveram um protótipo de um sistema especialista chamado de *Blocker Initial Design-BID*, que também modificava valores geométricos de secções transversais de forjados do tipo alma-nervura com critérios armazenados a partir de um projeto inicial de bloqueador ou do projeto da pré-forma para o projeto das matrizes de pré-forma ou do bloqueador para forjados com rebarba (Yang, 1993).

Com o contínuo aprimoramento das ferramentas de simulação por computador, aumentaram os esforços nas pesquisas tentando incorporar as simulações dentro dos sistemas especialistas baseados no conhecimento. Por exemplo, um estudo piloto na integração do projeto de matrizes para forjamento e simulação por Método dos Elementos Finitos, dentro de sistemas inteligentes baseados no conhecimento, foi iniciado por grupos de pesquisas da Universidade de Birmingham (Rowe, 1987) e (Hartley, 1987). Algumas atividades similares utilizando simulações por FEM estavam sob desenvolvimento da Shultz Steel Company (Hoang-Vu, 1987). Além disso, foi realizado por Bramley, et al., um estudo de exequibilidade em sistema de modelamento integrado usando o “Método do Limite Superior de Energia - UBET” (Bramley, 1987) e (Bramley, 1990).

Em 1986, Eshel, et al. completam seu estudo no desenvolvimento de um sistema especialista para estabelecimento do processo de conformação de produtos axissimétricos obtidos a partir de chapas de metal pelo processo de embutimento profundo. Esse sistema parece ser o protótipo, baseado em critérios, mais avançado disponível até então, para o desenvolvimento de produtos cilíndricos pelo embutimento profundo, o que estimulou mais pesquisas no desenvolvimento de sistemas especialistas para forjamento a frio.

Ainda em meados dos anos 80 do século XX, Badawy et al., do “Battelle Columbus Laboratories” desenvolveram um sistema auxiliado por computador, o **FORMNG**, que era capaz de reconhecer automaticamente as características geométricas de um produto sólido simétrico rotacionado e estabelecer as operações de conformação necessárias, tanto para produtos obtidos por conformação a frio ou morno.

Com a introdução de técnicas de Inteligência Artificial, este trabalho foi posteriormente estendido por Sevenler, et al., propondo soluções para problemas de processos de forjamento a

frio. Um sistema chamado “**FORMEX**”, desenvolvido por Altan e seus co-autores, na *Ohio State University* e implementado em *PROLOG*, permitia projetar automaticamente processos de conformação para produtos com geometrias relativamente simples obtidas por forjamento a frio em multi-estágios, como também para produtos obtidos por operações de recalque e extrusão direta. (Sevenler, 1987), (Sitaraman, 1991), (Kim, 1992), (Tisza, 1995).

Um exemplo de seqüência de operações de forjamento a frio por extrusão e recalque é apresentado na Figura 3.2.

No trabalho apresentado por Kim et al, relata-se que foram incluídas à biblioteca do **FORMEX** mais 48 (quarenta e oito) seqüências de processo coletadas da literatura e de indústrias. Algumas das seqüências apresentadas nesse trabalho foram projetadas para forjamento a frio combinado com forjamento morno (Kim, 1996).

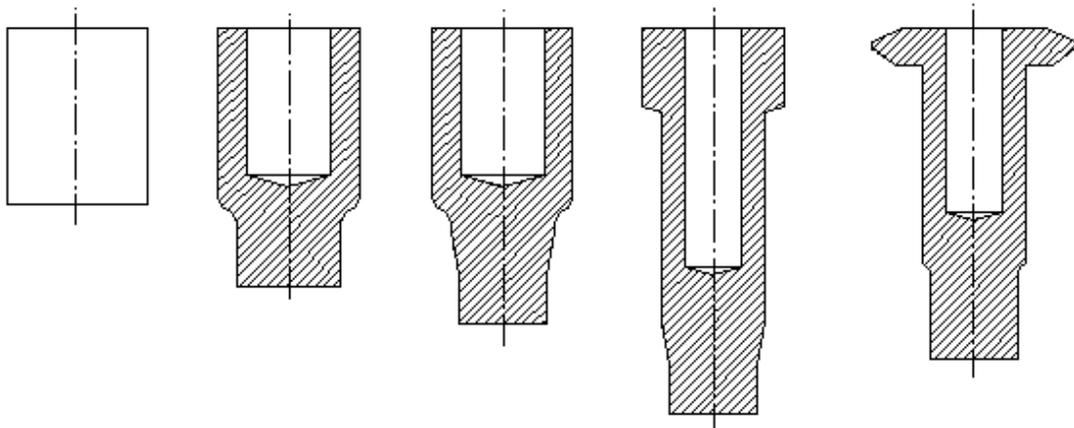


Figura 3. 2 - Exemplo de seqüência para forjamento a frio (Sevenler, 1987).

O sistema apresentado por Kim et al., chamado **NEXPERT**, utilizava três componentes (Kim, 1992):

1. O sistema **FORMEX**, apresentado anteriormente;
2. Um sistema de CAD comercial e
3. Um *software* comercial de Elementos Finitos, o **DEFORM**.

Tisza (1995), apresenta um sistema chamado **METEX – Metal Forming Expert System**, que utilizava pacotes de CAD comerciais como o AutoCAD devido à sua linguagem de programação ser o AutoLISP, derivada da linguagem *LISP* já bastante empregada para a elaboração de sistemas especialistas.

Bariani e Knight et al. completaram um plano de pesquisa para o projeto de processos para forjamento a frio multi-estágios auxiliado por computador. O sistema desenvolvido incluía funções para geração e análise de processos baseado na estratégia “gerar, analisar e retificar” (Bariani, 1985), (Bariani, 1987) e (Bariani, 1988). Até o presente, o sistema continua eficiente gerando processos executáveis para o forjamento a frio de produtos simétricos, sólidos e vazados, de revolução e também permite analisar-se o processo, a partir da distribuição da carga máxima nos diferentes estágios da conformação e a tensão efetiva acumulada na peça sob deformação e no produto acabado.

Danno et al. da “Toyota Central Research and Development Laboratories” apresentaram um sistema chamado “FOREST-D”, para geração de processos multi-estágios de forjamento a frio (Yang 1993). Já Azushima et al. apresentaram um estudo para o desenvolvimento de um sistema especialista com o auxílio de PCs (Azushima, 1990).

Recentemente, um grande número de projetos de pesquisa com aplicações práticas e industriais tem sido desenvolvido, como por exemplo, pesquisas visando a aplicação comercial de sistemas CAD/CAM para projeto de ferramentas multi-estágios para forjamento a frio. Também destacam-se atividades de pesquisas com o objetivo de integrar sistemas especialistas e simulações utilizando o Método dos Elementos Finitos (FEM), para o planejamento de processos de forjamento a frio (Alberti, 1991).

Kim apresentou um sistema especialista para forjamento a quente com rebarba, denominado convencional, de peças axissimétricas em que obtêm as geometrias da pré-forma e final do forjado bem como as matrizes correspondentes, o volume do tarugo e também a carga necessária de forjamento. Este sistema foi escrito utilizando-se FORTRAN e AutoLISP e integrado ao ambiente AutoCAD (Kim, 2000).

3.2 Estrutura de um Sistema Especialista

Song (1999) apresenta um sistema especialista para o projeto da seqüência do processo de conformação para a obtenção do produto conhecido como pino bola. Os autores utilizaram um computador pessoal para desenvolver este sistema em ambiente *Windows* e um sistema de CAD disponível no mercado, o *software* AutoCAD. Após o desenvolvimento da geometria final os dados gerados são salvos em arquivos com extensão “.dxf” para posterior transferência para o sistema de CAD comercial. Este sistema apresenta a seguinte estrutura que pode ser generalizada para outros sistemas especialistas desenvolvidos para o forjamento a quente:

1. Módulo de entrada: Introdução de informações sobre a geometria final da peça, tipo de material e diâmetro inicial do tarugo.
2. Módulo da base de dados: Pesquisa na base de dados para re-utilização de projetos de matrizes já existentes.
3. Módulo de projeto inicial do processo: Seleção do processo pela comparação entre o tarugo inicial e a peça final, e definição do projeto da seqüência a partir de uma seqüência padrão de processo.
4. Módulo de re-projeto: Procedimento de re-projeto considerando as limitações do número de operações e limitações de carga do equipamento selecionado.
5. Módulo de saída: Representação gráfica e criação do arquivo “.dxf”.

Esse sistema era composto de um sistema especialista principal, um sistema de base de dados e um sistema de projeto auxiliado por computador “CAD”. O sistema especialista era modularizado através da tecnologia de programação orientada por objeto, “OOP”, e gerava uma seqüência inicial de processo sugerida por critérios padrões de projeto e posteriormente modificada em função de característica da máquina, isto é pelo limite do número de operações e limitações de carga. Além disso, o sistema checava a possibilidade de reutilização de ferramentas existentes de produtos anteriormente desenvolvidos.

O sistema apresentado por Osakada, (1990) e Osakada, (1991) apresenta uma outra estrutura mostrada na Figura 3.3. Nessa proposta, o modelo do produto é obtido conforme mostrado na Figura 3.4 em que esse modelo representa a configuração, bem como as dimensões do produto axissimétrico a partir de uma lista de formas compostas por várias seções, sendo cada seção composta, posteriormente, de primitivas fundamentais internas e externas, as quais são definidas pela análise das características do produto forjado.

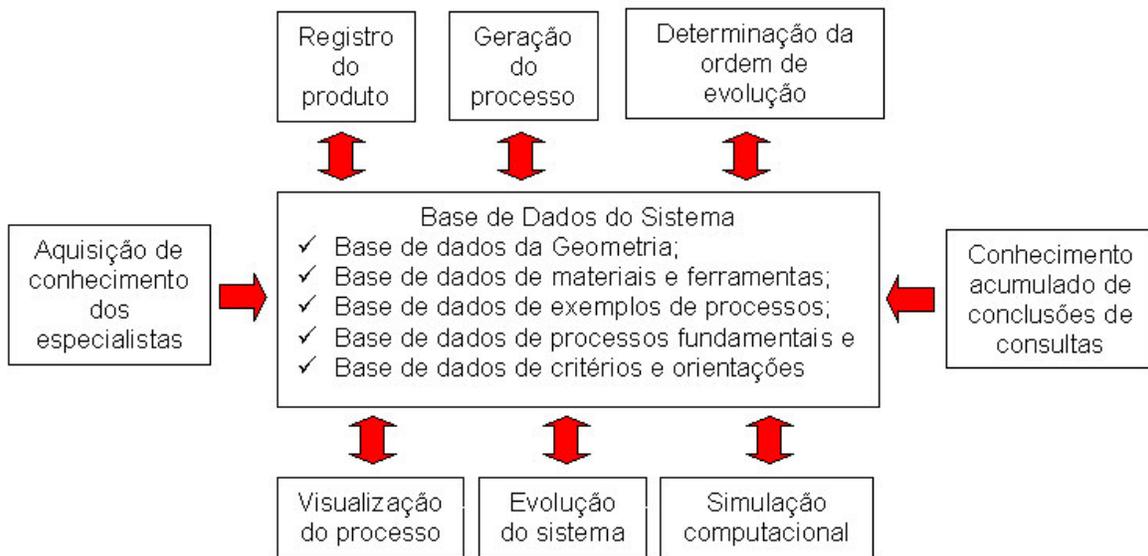


Figura 3. 3 - Estrutura de um sistema especialista para planejamento do processo (Osakada, 1990), (Osakada, 1991).

O processo de forjamento é considerado principalmente como uma transformação de geometria, e assim, a análise da geometria desses produtos é a chave para o sucesso do projeto. Além disso, para possibilitar o planejamento do processo de um determinado produto de maneira simples e eficiente, o modelo geométrico gerado deve não só estar disponível para visualização e análise mas deve também ser um modelo de fácil reconhecimento. Knight, Bariani, et al., e o grupo de pesquisa da Universidade de Birmingham, empreenderam esforços para encontrar outras formas de representações geométricas apropriadas de produtos para facilitar o planejamento de processos (Osakada, 1988), (Bariani, 1987) e (Bariani, 1988).

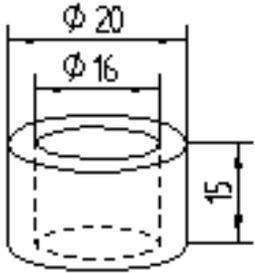
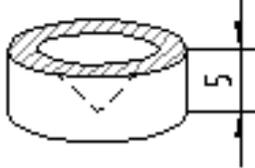
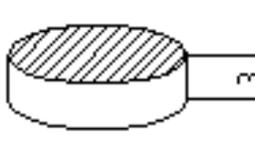
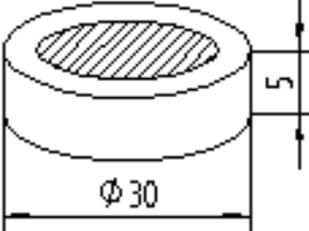
	Representação gráfica	Representação codificada
Primeira secção		(((0 0 0) ((cilindro (15 20)) (cilindro (15 16))) zero)
Segunda secção		((0 0 15) ((cilindro (5 20)) (cone (-5 16))) zero)
Terceira secção		((0 0 20) ((cilindro (3 20)) (sólido zero)) zero)
Quarta secção		((0 0 23) ((cilindro (5 30)) (sólido zero)) zero))

Figura 3. 4 - Representação do produto por um modelo de seções (Osakada, 1991) e (Yang, 1993).

Já o sistema desenvolvido por Sevenler et al., (1987), foi estruturado em uma hierarquia de subtarefas em que a seqüência de conformação é dividida em sete subtarefas que geram por elas mesmas outras subtarefas. As sete principais subtarefas são apresentadas a seguir:

Subtarefa 1 – Checa a possibilidade de conformação da peça, verificando suas características geométricas como cantos vivos, rebaxos, tolerâncias e alerta o usuário caso ocorram características que não são possíveis de se obter por conformação a frio.

Subtarefa 2 – Reconhece (classifica) a forma geométrica e consulta o arquivo de critérios específicos. Tenta adequar a peça a ser desenvolvida dentro de uma das famílias de peças, conforme figura 3.4.

Subtarefa 3 – Converte a geometria de entrada para representação digital. A forma geométrica de entrada para o programa é fornecida em coordenadas (x,y) de pontos que representam a seção transversal da peça.

Subtarefa 4 – Escolhe o diâmetro e comprimento de corte do tarugo. Essa escolha é realizada sob critérios para que o diâmetro determinado seja ideal, de tal forma que minimize a deformação total necessária para as operações de recalque e extrusão direta.

Subtarefa 5 – Encontra a seqüência de recalque, para isso analisa alguns critérios como por exemplo a relação entre diâmetro e comprimento a ser recalcado.

Subtarefa 6 – Encontra a seqüência de extrusão direta. Para determinar essa seqüência utiliza ambos os critérios, de extrusão direta livre e extrusão direta confinada em que comprimento a ser extrudado totalmente envolvido pela matriz.

Subtarefa 7 – Combina as etapas de recalque com as de extrusão direta. Nessa tarefa as características da máquina e o número de estágios de conformação são determinantes na definição da seqüência final do processo.

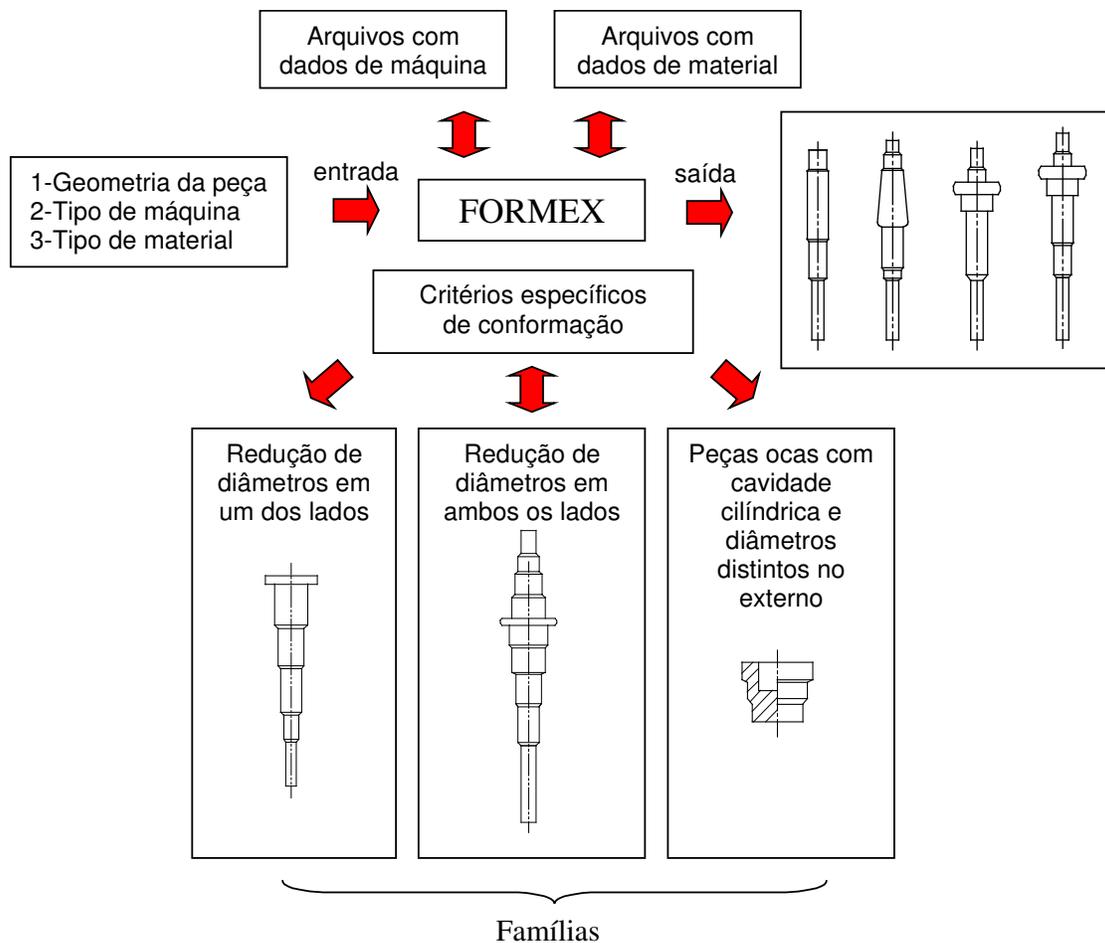


Figura 3. 5 - Estrutura do sistema **FORMEX**, adaptado (Sevenler, 1987).

O trabalho proposto por Sitaraman et al, (1991), no qual o sistema baseado no conhecimento tinha como objetivo projetar a seqüência do processo para peças axissimétricas produzidas por estampagem, apresenta alguns métodos para a aquisição dos dados geométricos pelo sistema.

O primeiro método diz respeito à entrada de dados baseada na mudança de especificações gráficas iniciais, em que a geometria inicial pode ser gerada por qualquer sistema CAD comercial disponível, sendo para isso necessário utilizar um formato IGES que pode ser lido pelo módulo de entrada do sistema proposto. Conseqüentemente, os dados de saída também deverão estar no mesmo formato. Esse procedimento é utilizado com sucesso, particularmente, para objetos geométricos complexos para os quais outras técnicas simplificadoras não podem ser empregadas.

Outro método consiste em se decompor seções transversais em superfícies ou elementos de volumes, denominados primitivas geométricas. O usuário pode escolher itens de um “menu” contendo tais primitivas, definir os atributos de cada primitiva, aumentando-as, rotacionando-as e/ou estendendo-as para obter a geometria final desejada.

O terceiro método é baseado em primitivas gráficas bi-dimensionais, ou seja, elementos bi-dimensionais tais como, linhas e arcos, que também podem ser usados para definir o objeto geométrico de entrada.

O quarto e último método é o alfanumérico que proporciona muito mais informações iniciais para entrada no sistema em relação aos métodos de entrada que utilizam gráficos bi-dimensionais. Esse método identifica a orientação de segmentos de linha horizontais, verticais e inclinadas, e também de arcos convexos, côncavos, convexos reduzidos ou côncavos reduzidos, além de características representadas pelas informações anteriores tais como flanges ou bordas, fundos ou paredes. Os Quadros 3.2 e 3.3 apresentam uma biblioteca desses elementos geométricos e segmentos de linhas e áreas empregados nos métodos de entrada da geometria (Sitaraman, 1991), (Kim, 1995).

Quadro 3. 2 - Biblioteca de elementos geométricos, (Sitaraman, 1991).

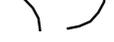
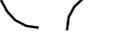
Elemento Geométrico	Nome Convencional	Tipo do Elemento
—	Horizontal**	h1
	Vertical**	v1
/	Cônica**	a1
\	Cônico-reduzido*	a2
⌋	Convexo**	r1
⌋	Convexo-reduzido*	r2
⌈	Côncavo*	c1
⌈	Côncavo-reduzido*	c2

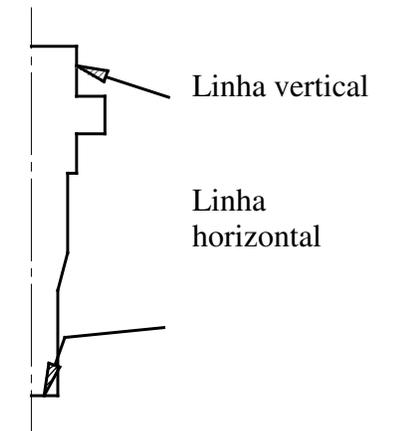
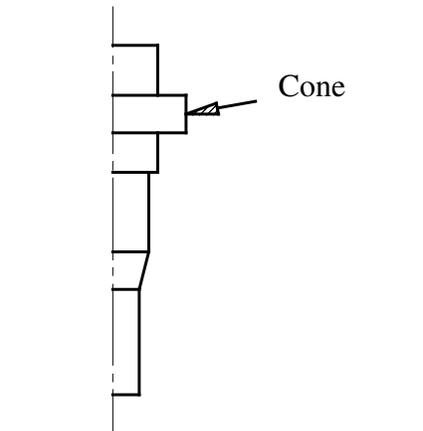
Ainda com referência ao Quadro 3.2, verifica-se a existência de (*) em alguns elementos nele apresentados, que são discriminados abaixo:

* Elementos que necessitam de operações complementares.

** Elementos que são formados por operações como estiramento, embutimento (objeto de estudo do trabalho apresentado por Sitaraman, 1991).

Quadro 3.3 - Representação esquemática de segmentos de linhas e áreas, (Kim, 1995).

Tipo	Geometria	Tipo	Geometria
Linha horizontal	—	Cone	
Linha vertical		Convexo	
Linha inclinada	/ \	Côncavo	
Arco convexo		Cabeça sextavada	
Arco côncavo		Rosca	

	
---	--

Capítulo 4

Critérios de Projeto e Força de Forjamento

O desenvolvimento do sistema especialista proposto neste trabalho aplica-se ao processo de forjamento à quente, de peças de aço, em que as temperaturas de trabalho podem variar entre 1000 °C e 1200 °C, para obtenção de forjados que se assemelham a sólidos de revolução, mais especificamente engrenagens. Como a variedade de geometrias e dimensões possíveis para esse tipo de peça forjada é muito grande, em função de sua aplicação, foram selecionadas algumas geometrias, mostradas na Figura 4.1 e que foram consideradas as mais representativas desse produto da indústria automobilística.

Neste capítulo serão apresentados os métodos de determinação dos critérios de projeto de forjados a quente, tais como ângulos de saída, raios de canto e de filete e a existência ou não de alma central ou espelho.

A seqüência de apresentação desses métodos será a mesma utilizada no desenvolvimento do sistema especialista, que também é a mesma utilizada por empresas de forjaria, definindo-se sucessivamente:

- ✓ Sobremetal;
- ✓ Ângulos de Saída;
- ✓ Raios e
- ✓ Espelho ou Alma central.

Além disso, serão apresentados alguns métodos de estimativa da força de forjamento, com o objetivo de orientar a escolha do equipamento de forjamento adequado em função de sua capacidade.

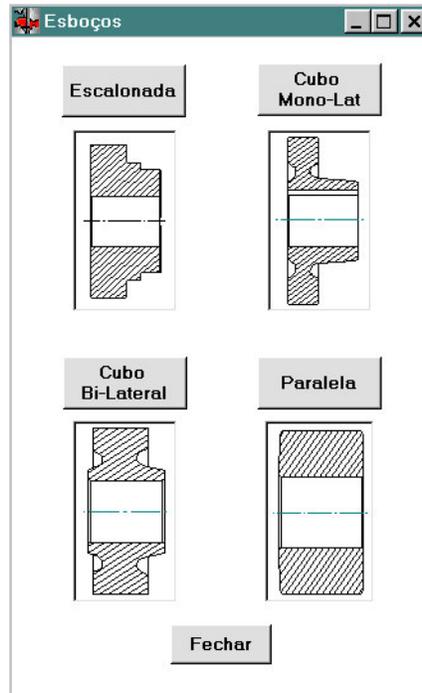


Figura 4. 1 – Geometrias de engrenagens mais representativas na indústria automobilística.

4.1 Sobremetal

Por se tratarem de informações diretamente relacionadas com a tecnologia desenvolvida pelas empresas, poucas são as referências bibliográficas disponíveis sobre os critérios para dimensionamento de forjados, destacando-se (Rossi, 1971) e (ASM, 1972).

O sobremetal é um excesso de material, propositadamente deixado no produto final forjado, que tem como função principal permitir a obtenção da peça final usinada conforme as dimensões determinadas pelo cliente sem qualquer falha por falta de material.

O sobremetal varia de processo para processo de forjamento; por exemplo, em processos de conformação a frio, considerados de precisão, o sobremetal deixado é mínimo pois nesse caso é

possível obter-se peças com dimensões acabadas sem qualquer operação subsequente de usinagem, como ocorre na fabricação de arruelas de válvulas.

A possibilidade de redução ou mesmo de eliminação do sobremetal é totalmente dependente da geometria, tolerâncias da peça, e da rigidez do equipamento utilizado, associados à capacidade tecnológica do fabricante. Caso seja necessário, o sobremetal pode ser apenas o suficiente para remoção por retificação, como é o caso de algumas pequenas cruzetas.

Em se tratando de forjamento a quente que ocorre acima da temperatura de recristalização, a redução do sobremetal é dificultada pois há uma perda de massa decorrente da oxidação do tarugo inicial durante o aquecimento. Além disso, outro fator que pode acarretar falhas no forjado é a qualidade dimensional das ferramentas e a precisão em sua montagem, que pode comprometer a concentricidade entre as matrizes superior e inferior. A Tabela 4.1 apresenta o sobremetal recomendado para forjamento em matriz fechada segundo Rossi, (1971) p. 110.

Tabela 4. 1 - Sobremetal indicado para o forjamento em matriz fechada.

Maior dimensão do corpo (mm)	sobremetal (mm)
até 20	0,5 a 1,0
20 a 80	1,0 a 1,5
80 a 150	1,5 a 2,0
Acima de 150	2,0 a 3,0

A seleção do sobremetal a ser aplicado é feita baseando-se na maior dimensão do forjado, que no caso de engrenagens é representada na maioria das vezes pelo diâmetro externo do forjado. Para se efetivar a seleção do sobremetal pode-se utilizar uma rotina do tipo “if” e “then” comparando-se a dimensão do diâmetro externo da peça usinada com os limites estipulados pela tabela.

4.2 Ângulos de Saída

A aplicação de ângulos de saída é necessária para facilitar o escoamento do material dentro das cavidades e também para facilitar a remoção da peça das matrizes. Se os ângulos das matrizes são aumentados sem um critério definido, então tanto a perda de material (aumento do sobremetal) quanto o custo de fabricação das matrizes também são aumentados (Vemuri, 1987) e (Kim, 2000).

Os ângulos de saída são basicamente dependentes de dois fatores:

- ✓ Relação altura/largura da nervura em que são aplicados os ângulos;
- ✓ Se são ou não usados pinos ejetores,.

A aplicação ou não dos pinos ejetores é determinada pelo equipamento que será utilizado no processo de fabricação pois nem todos os equipamentos suportam este dispositivo.

As peças forjadas empregadas no desenvolvimento deste trabalho são forjados de precisão, de modo que, o equipamento utilizado para obtenção desse tipo de forjado apresenta ejetores, o que possibilita a aplicação de ângulos de saída menores.

Conforme Vemuri et al (1987), os ângulos de saída podem variar entre as ferramentas de pré-formar e a de formar final. Na prática, é comum, utilizar-se ângulos de saída 1° a 2° maiores nas ferramentas de pré-formar em relação às de formar final. Entretanto, quando há forças excessivas de atrito os ângulos na ferramenta de formar final podem ser os mesmos da ferramenta de pré-formar. Os ângulos geralmente aplicados são iguais a 1°, 3°, 5°, 7°, 10°.

Se os ângulos já definidos no projeto forem iguais ou maiores que 10°, não devem ser aumentados (Vemuri et al, 1987), (Kim, 2000). Os ângulos recomendados para as ferramentas de pré-formar são apresentados nas Tabelas 4.2 e 4.3.

Tabela 4. 2 - Ângulos recomendados para ferramentas de pré-forjar, segundo Vemuri et al (1987) e (Kim, 2000).

Aço Altura da nervura (mm)	Prensas		Martelos	
	Externo	Interno	Externo	Interno
< 30	5°	7°	7°	10°
> 30	7°	10°	10°	10°

Os ângulos recomendados por Rossi (1971) pp. 111, estão apresentados abaixo:

internos (α) = 5° a 7°

externos (α_1) = 7° a 8°

Para as ferramentas de formar final os ângulos de saída respeitam a norma DIN 7523 parte 2, que é aplicada tanto na utilização ou não de extratores ou ejetores, segundo Vemuri et al (1987).

Tabela 4. 3 - Ângulos em função do equipamento.

	Ângulos Internos			Ângulos Externos		
	Martelos/Prensas		Recalcadoras	Martelos/Prensas		Recalcadoras
	S/extrator	C/extrator		S/extrator	C/extrator	
Faixa	3° - 9°	1,5° - 6°	0,5° - 6°	2° - 6°	0,5° - 3°	0,5° - 3°
Nominal	6°	3°	3°	4,5°	2°	2°

Para ferramentas de pré-formar os ângulos externos devem ser acrescidos de 1° a 2° e de 2° a 3° nos ângulos internos, apenas se for necessário. Entretanto, devido às pressões exercidas por empresas responsáveis pela usinagem final desses produtos e buscando uma redução no tempo de usinagem e no peso inicial do tarugo busca-se uma diminuição nos valores dos ângulos de saída e com isso há uma tendência de se utilizar os mesmos ângulos, tanto para a ferramenta de pré-formar quanto para a de formar final.

No processo de forjamento de precisão em que geralmente utiliza-se pino extrator, os ângulos de saída são 1° a 2° menores em relação ao processo de forjamento convencional, para reduzir o custo de usinagem das ferramentas (Kim, 2000).

4.3 Raios

Deve-se aplicar os maiores raios de canto possíveis, pois raios menores dificultam o preenchimento da ferramenta comprometendo, conseqüentemente, a qualidade final do produto. Além disso, a aplicação de raios pequenos pode facilitar o aparecimento de trincas nas matrizes. Quando são necessários raios pequenos o não preenchimento do forjado pode ocorrer devido ao aprisionamento de gases ou acúmulo de material lubrificante, de modo que o lubrificante não deve ser aplicado em excesso ao ferramental.

Uma possibilidade de se eliminar possíveis falhas da ferramenta nas regiões de pequenos raios, e para melhorar o seu preenchimento, é a utilização de insertos nas ferramentas no ponto de interseção do raio. Essa técnica apresenta algumas vantagens significativas no processo de forjamento:

- ✓ Propicia um maior volume de material na zona do raio,
- ✓ Com uma tolerância adequadamente aplicada, em torno de 0,15 a 0,25 mm, o inserto atua como um facilitador para escape de gases e
- ✓ Permite a substituição do inserto em caso de desgaste excessivo sem a perda de toda a matriz.

A Figura 4.2 apresenta um esquema de montagem utilizando insertos, tecnologia de montagem de ferramental na qual alguns pontos da ferramenta proporcionam a formação de raios menores ou maiores que os definidos no desenho do produto forjado e que são dependentes do escoamento do material. Assim, a opção de alterar os raios individualmente torna-se viável. As regiões delimitadas por circunferências indicam regiões onde os raios, que são formados no produto forjado, podem ser maiores ou menores que aqueles definidos no projeto. O projetista com a opção de alterar os raios individualmente, poderá especificar raios máximos e mínimos em cada uma dessas regiões se necessário, para garantia de material na usinagem posterior.

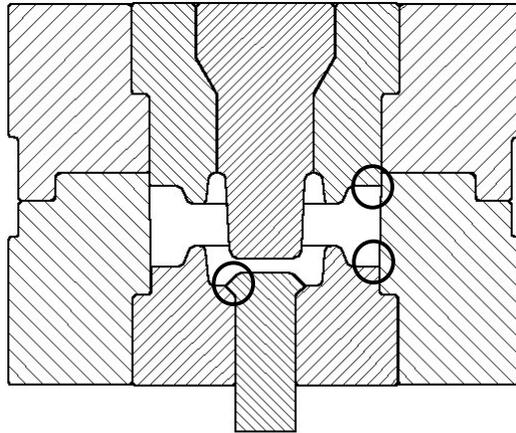


Figura 4. 2 - Esquema de montagem com inserto mostrando as regiões onde a ferramenta não afeta a geometria final do forjado.

Os raios de canto e de filete aplicados aos forjados, são determinados a partir do sobremetal definido conforme a Tabela 4.1 que foi elaborada determinando-se o maior raio possível, aplicável quando a menor espessura de sobremetal fosse utilizada e posteriormente determinado o maior raio possível para a maior espessura de sobremetal esses valores podem ser visto na Tabela 4.5. A Tabela 4.4 apresenta os valores para os raios de canto e de filete em função das dimensões “h”, “h₁”, “h₂” e “d”. Entretanto, isso não impede que os raios sejam alterados, inclusive utilizando-se raios menores que os especificados.

Tabela 4. 4 - Determinação dos raios do forjado, adaptada, Rossi 1971 (Dimensões em mm).

Medida "h", "h ₁ ", "h ₂ " e também "d"		Raio de canto "r ₁ "	Raio de filete "r ₂ "
Acima de	Até		
–	25	0,5	1
25	40	1	1,5
40	63	1,5	2
63	100	1,5	2,5
100	160	2	3
160	250	2,5	3,5

A Figura 4.3 mostra um exemplo de determinação da faixa de raios, (Tabela 4.4) possíveis. No exemplo foi utilizada como base uma peça cujo diâmetro externo é maior que 150 mm. Conforme a Tabela 4.1, para diâmetros acima de 150 mm, a espessura do sobremetal “ a ”, é de 2 a 3 mm. O método consiste de se aplicar à peça usinada, a maior e a menor espessura de sobremetal e após isso determinar quais são os maiores raios possíveis para cada espessura sem que a dimensão final da peça usinada seja prejudicada (Tabela 4.5).

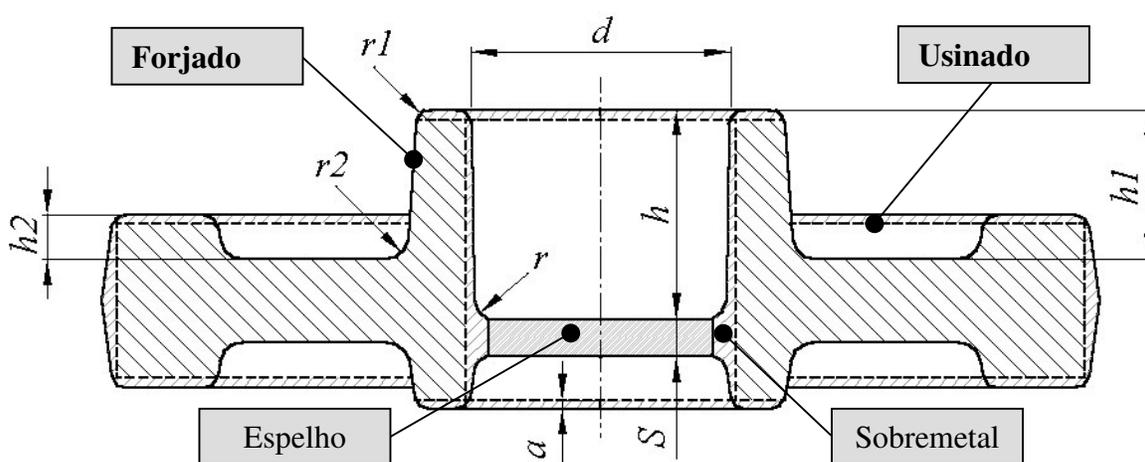


Figura 4. 3 - “ $r1$ ” e “ $r2$ ”, raios de canto e de filete, respectivamente.

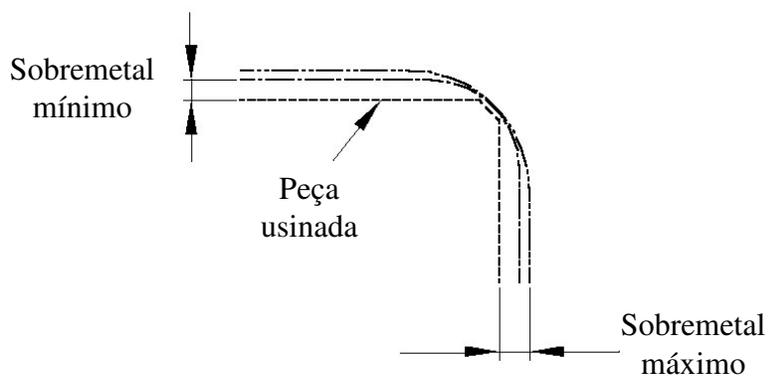


Figura 4. 4 - Método utilizado para determinação dos raios, máximo e mínimo em função do sobremetal.

Tabela 4. 5 - Determinação dos raios do forjado em função do sobremetal (Dimensões em mm).

Raios de Canto e de Filete recomendados em função do sobremetal		
Maior dimensão	Faixa de Raios	Raio Adotado
até 20	1,5 a 3,5	2,5
20 a 80	3,5 a 5,0	4,25
80 a 150	5,0 a 6,5	5,75
Acima de 150	6,5 a 10	8,25

4.4 Espelho

A maioria das engrenagens forjadas apresentam rebaixos em ambas as faces superior e inferior que diminuem o peso inicial do tarugo e facilitam a usinagem do furo central dessas engrenagens. O material que fica entre esses rebaixos é chamado de espelho (Figura 4.3).

As profundidades dos rebaixos podem ser diferentes em função do processo de forjamento em forjados convencionais as profundidades podem ser iguais ou coincidentes com a linha da rebarba. Já em forjados de precisão, o rebaixo na face superior tem uma profundidade maior que o da face inferior devido à quase completa contenção do forjado na matriz inferior.

Para que não haja uma demasiada sobrecarga nas matrizes, deve-se garantir que o espelho não apresente uma espessura muito reduzida. A espessura do espelho pode ser calculada conforme a Equação 4.1 apresentada por Viecelli, (1995):

$$S = 0,45\sqrt{d - 0,25 \cdot h - 5} + 0,6\sqrt{h} \quad [\text{mm}] \quad (4.1)$$

onde:

- d*** - Diâmetro do furo [mm]
- h*** - Profundidade do furo [mm]
- S*** - Espessura do espelho [mm]

Dependendo das dimensões da peça, diâmetro do furo e altura total da peça, o rebaixo na face superior da peça pode ser eliminado. Assim, caso o diâmetro seja pequeno e a altura seja

relativamente muito grande deve-se eliminar esse furo para que o inserto não seja sobrecarregado o que poderia causar seu desgaste prematuro ou mesmo sua ruptura.

Na Equação 4.1, se o diâmetro do furo for menor que um quarto da altura mais cinco milímetros sugere-se que o furo seja eliminado e a peça ficaria sem espelho.

Por outro lado, segundo CBF (1990), a profundidade máxima para o furo, “*h*”, deverá ser menor ou igual a 1,5 vezes o diâmetro do furo “*d*” conforme a Figura 4.5 (a). Caso contrário, deve-se adotar uma geometria diferente para o inserto que deverá apresentar uma forma esférica em sua extremidade conforme a Figura 4.5 (b).

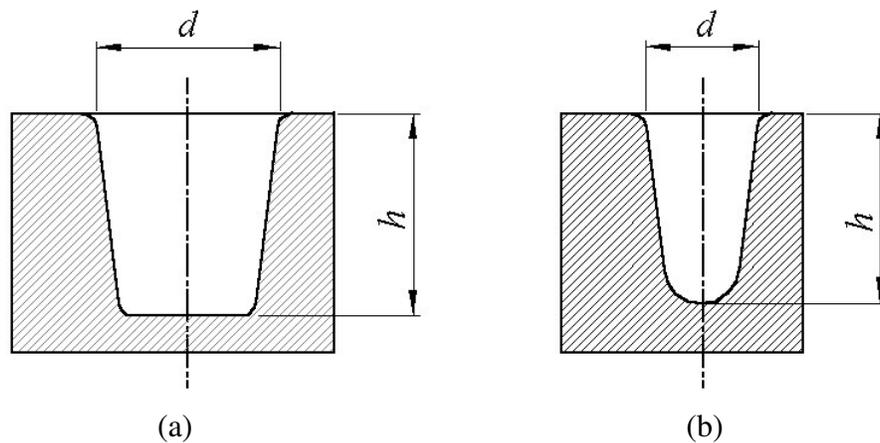


Figura 4. 5 - Limitações para alteração da geometria do furo.

Para geração do punção com a geometria descrita é necessário o cálculo de um valor máximo para o raio devido ao fato que o *software Solid Edge*® opera com detalhes geométricos (*features*) e caso o raio de filete seja maior que metade do diâmetro no fundo do furo, não será possível a geração deste raio durante a atualização do modelo sólido. Para isso calcula-se o raio conforme a Equação 4.2:

$$r = \frac{d}{2} - h \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad [\text{mm}] \quad (4.2)$$

onde:

- r - Raio de filete entre espelho e parede [mm]
- d - Diâmetro do furo [mm]
- h - Profundidade do furo [mm]
- α - Ângulo de saída do furo [graus]

A Tabela 4.6 apresenta os valores para os raios de filete aplicados entre a parede do furo e o espelho. Essa tabela será utilizada pelo sistema especialista quando a profundidade do furo não ultrapassar 1,5 vezes o seu diâmetro.

Tabela 4. 6 - Determinação do raio entre espelho e parede do forjado, adaptada de Grüning 1973.

Diâmetro do furo (mm)		Raios para peças forjadas em prensas / forjados de precisão				
		Para uma profundidade “h” do furo (mm)				
Acima de	Até	De	10	16	25	40
		Até	16	25	40	63
-	25	2	2,5	3	4	-
25	40	2,5	3	4	5	6
40	63	3	4	5	6	8
63	100	4	5	6	8	10
100	160	5	6	8	12	16
160	250	6	8	12	16	20

4.5 Estimativa da Força de Forjamento

Neste trabalho, o cálculo da força de forjamento tem como objetivo estimar a força necessária apenas para determinação da capacidade do equipamento a ser empregado. Basicamente, o cálculo da força de forjamento consiste em se calcular a área projetada do forjado e multiplicá-la pela tensão de resistência à deformação. Com base na literatura foram aplicados dois métodos de determinação da força de forjamento, sendo o primeiro apresentado por Mäkelt (Billigmann, 1979) e o segundo apresentado por H. Meyer, (Grüning, 1973) e (Gallardo, 1986).

Esses cálculos são baseados em ábacos que foram obtidos experimentalmente em laboratórios onde vários materiais foram ensaiados sob temperaturas variadas dentro de uma faixa de velocidades de deformação e para as geometrias mais comuns encontradas para produtos forjados a quente.

O Anexo 1 descreve os métodos empregados neste trabalho para o cálculo da força de forjamento.

Capítulo 5

Sistema Especialista para o Forjamento a Quente de Precisão

5.1 Introdução

Neste capítulo apresenta-se o sistema especialista desenvolvido e para tanto, descrevem-se brevemente os *softwares* empregados, bem como são feitas algumas considerações iniciais.

Deve-se destacar alguns aspectos que nortearam o desenvolvimento do sistema na forma como foi realizado e está apresentado neste capítulo:

1. Buscou-se o uso de *softwares* comerciais bastante conhecidos, de fácil acesso, disponíveis no sistema operacional *Windows*® e que são a princípio de fácil utilização.
2. Buscou-se agregar características interessantes de outros sistemas especialistas, destacados no Capítulo 2, e também propor algumas inovações que são descritas ao longo deste capítulo.
3. Optou-se por desenvolver um sistema semi-automático no qual o projetista usuário pode interferir durante o uso do sistema, adaptando-o às condições

específicas de sua empresa, especialmente no que se refere aos valores escolhidos para os diversos critérios de projeto do forjado.

O diagrama da Figura 5.1 mostra a seqüência em que as informações são acessadas e trabalhadas ao longo do desenvolvimento de um novo forjado.

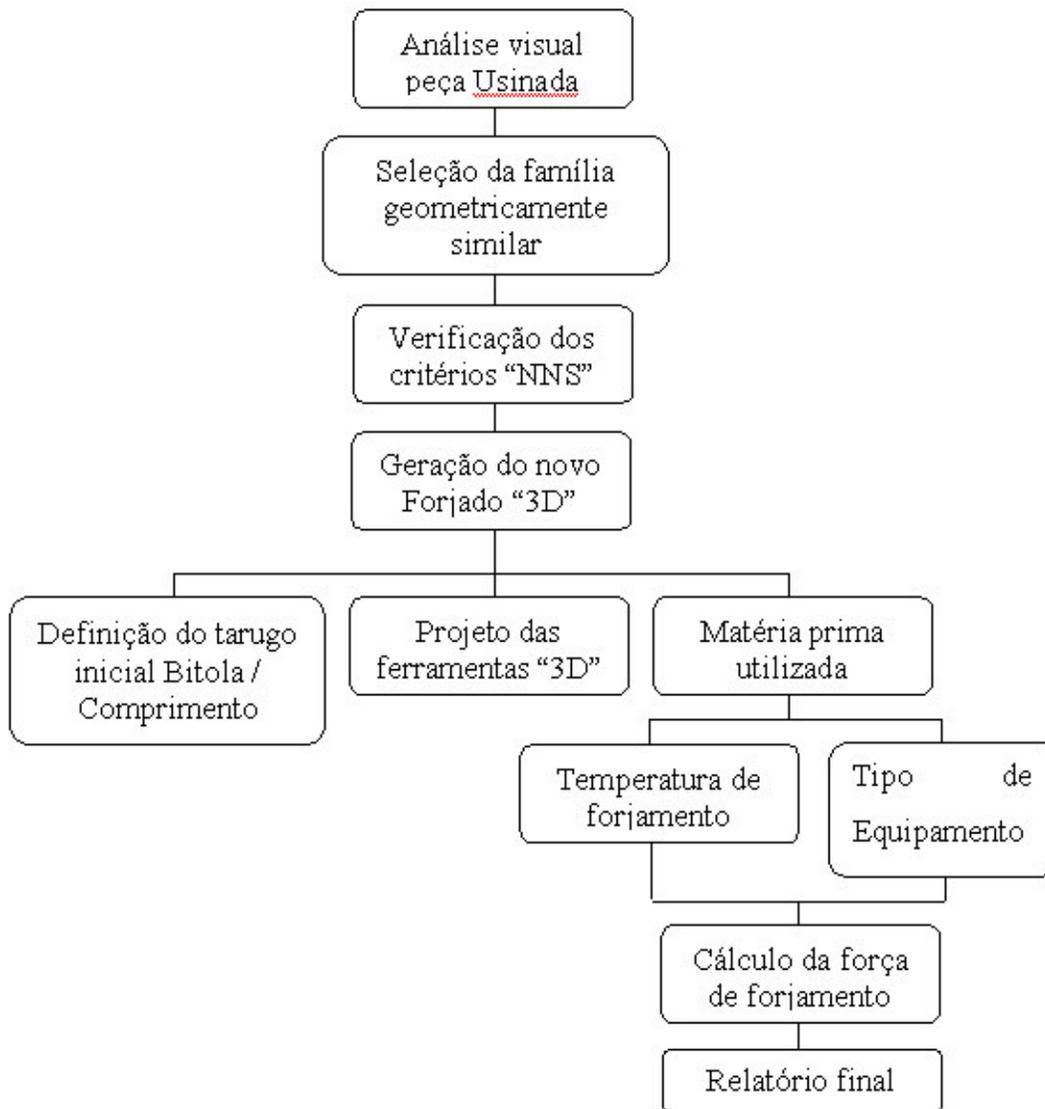


Figura 5. 1 – Diagrama da seqüência de informações para planejamento do processo.

Deve-se destacar também a dificuldade em redigir este capítulo, e de lê-lo por conseqüência, visto tratar-se basicamente da descrição intensiva da elaboração e do uso de um programa computacional.

5.2 Breve Descrição dos Softwares Utilizados e Considerações Iniciais

5.2.1 O Solid Edge®

O Solid Edge® (Solid Edge,2002) é um programa de CAD, para modelagem de sólidos de utilização extremamente fácil já que esse *software* apresenta um manual de operação dentro de seu *help* associado a um tutorial que facilita o aprendizado. Além disso, ele apresenta uma lista denominada *Feature PathFinder* que permite acompanhar a seqüência utilizada no desenvolvimento de um sólido.

O Solid Edge® permite a geração de sólidos possibilitando assim a visualização da peça no espaço, além de permitir que a partir do sólido, o desenho de projeto seja gerado rapidamente, o que é para o desenvolvimento do SE um facilitador, pois como o Solid Edge® permite a parametrização do desenho, qualquer alteração efetuada no sólido original é automaticamente atualizado.

É importante destacar que o Solid Edge® possui em seu *help* a opção *Programming with Solid Edge*, que apresenta algumas rotinas escritas na linguagem *Basic* que podem ser atualizadas para aplicação direta dentro da estrutura desenvolvida para o sistema especialista.

5.2.2 O Visual Basic®

O Visual Basic® (Microsoft, 2002) é um ambiente de programação baseado na linguagem *Basic*, utilizado para o desenvolvimento de programas com interface gráfica, sendo bastante versátil e de fácil manipulação. É um dos meios mais rápidos e fáceis de se criar aplicações para o sistema operacional *Windows*®. As aplicações que a linguagem permite criar diferenciam-se pela qualidade gráfica da interface com o usuário. Essa interface consiste basicamente de objetos, como botões de comandos, botões de opções entre outros objetos, aos quais associam-se

propriedades, tais como títulos, nomes, cores, tamanho da janela, disponibilidade de acesso, disponibilidade de visualização, entre outras.

Depois de criada a disposição gráfica dos vários objetos (caixas de diálogo, botões de comando, caixas de texto etc.) escreve-se o código que dá ação à interface conforme os eventos ocorram. Com o *Visual Basic*® é possível criar aplicações poderosas, fazendo ligações dinâmicas entre vários outros produtos padrão *Windows*®. Foi por isto, a linguagem escolhida para fazer a interface neste trabalho.

5.2.3 A Necessidade da Interface para o Sistema Especialista

A necessidade básica que motivou a criação de uma boa interface para o usuário foi a possibilidade de que um profissional, que não estivesse diretamente ligado ao projeto da peça forjada, pudesse fazê-lo utilizando as subrotinas sem conhecer sua programação. Isto foi conseguido pelo uso de janelas gráficas que continham informações gráficas e textuais, bem como campos a serem preenchidos pelo projetista, de um modo similar ao que ocorre com a maioria dos utilitários do sistema *Windows*®.

O Anexo 2 apresenta a inter-relação dos *softwares Solid Edge*® e o *Visual Basic*® que permitiu sua programação e a elaboração deste sistema.

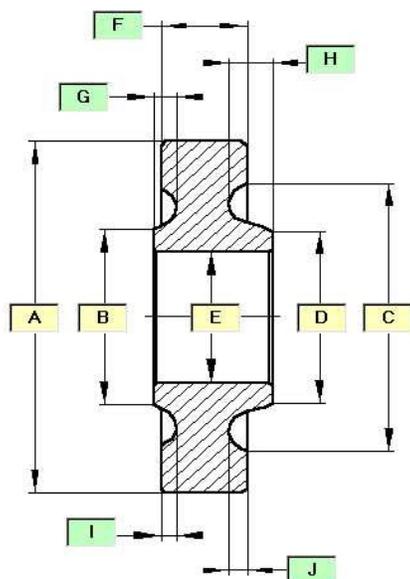
5.2.4 Nomenclatura Utilizada para Caracterização da Geometria da Peça a ser Forjada.

Como já mencionado, as geometrias utilizadas no desenvolvimento deste trabalho, são de engrenagens forjadas, obtidas a partir de sólidos de revolução, e denominadas peças axissimétricas.

Assim, é necessário apresentar a nomenclatura das partes que compõem cada engrenagem já que esta informação será de suma importância no decorrer do trabalho, pois será em função dessa nomenclatura que algumas decisões fundamentais serão tomadas pelo usuário.

A Figura 5.2, apresenta uma engrenagem com a nomenclatura utilizada e representa a forma mais complexa dentre as estudadas no desenvolvimento deste trabalho. Essa nomenclatura

também é utilizada para as demais geometrias de engrenagens, desde que apresentem semelhanças geométricas, como furo, cubo e alma.



Legenda

- A - Diâmetro Externo
- B - Diâmetro do Cubo Anterior
- C - Diâmetro Externo da Alma
- D - Diâmetro do Cubo Posterior
- E - Diâmetro Interno - (Furo)
- F - Comprimento do Dente
- G - Altura do Cubo Anterior
- H - Altura do Cubo Posterior
- I - Profundidade Anterior
- J - Profundidade Posterior

Figura 5. 2 - Nomenclatura das partes da engrenagem.

5.2.5 A Interface

O programa do sistema especialista executável em ambiente *Windows*® é chamado pela abreviação do objetivo principal deste trabalho: Automatização do Projeto de Ferramentas para o Forjamento a Quente - APFFQ.

Quando o APFFQ é inicializado, a primeira janela (Figura 5.3) a ser apresentada ao usuário contém o título do sistema, sua autoria, bem como recomendações para o uso. Em seguida, é apresentada a janela denominada “Esboços” mostrada na Figura 5.4 e que contém quatro famílias de engrenagens agrupadas em função de detalhes geométricos semelhantes.



Figura 5. 3 – Janela de abertura do APFFQ.

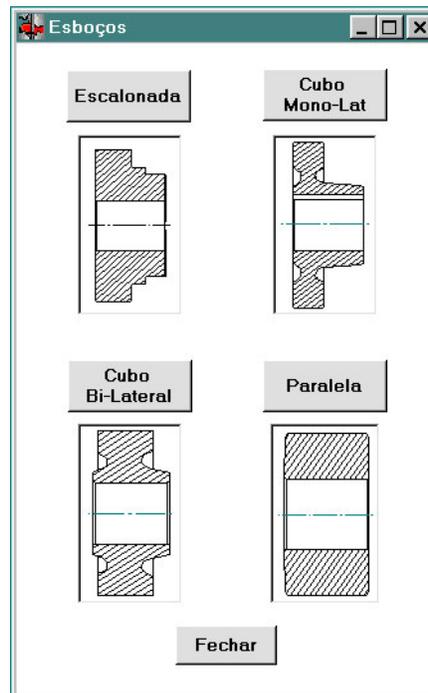


Figura 5. 4 - Janela de abertura do APFFQ, intitulada "Esboços", com as quatro famílias.

Neste trabalho são apresentados quatro tipos de peças, que diferem entre si pelo aspecto geométrico. Esse número de tipos poderia ser maior ou menor em função da variedade de peças em produção em uma determinada empresa.

Após a apresentação dessa janela, o usuário deve clicar sobre uma das opções de família disponíveis para dar seqüência ao desenvolvimento do projeto do forjado. O botão “Fechar” encerra o aplicativo.

Os esboços dos perfis propostos para as engrenagens foram escolhidos para representar as geometrias que caracterizam a grande maioria de engrenagens forjadas nas indústrias, e que podem ser classificadas como segue:

- ✓ uma família de engrenagens caracterizadas por apresentarem vários diâmetros, ao longo do perfil, que caracteriza o grupo denominado de “Escalonada”; Figura 5.5;
- ✓ uma família de engrenagens que apresentam o “Cubo” saliente em apenas um dos lados, representando o grupo denominado “Cubo Mono-Lateral”; Figura 5.6;
- ✓ uma família de engrenagens com “Cubo” em ambos os lados da peça, que representa o grupo denominado “Cubo Bi-Lateral”; Figura 5.7 e
- ✓ e o quarto grupo formado por engrenagens do tipo “Paralela”, ou seja sem escalonamento de diâmetros; Figura 5.8.

Como todo sistema de planejamento ou projeto de processos de fabricação é dependente da experiência e criatividade do projetista envolvido no desenvolvimento de um novo produto forjado, buscou-se um sistema com razoável interação com o usuário e para isso no início do planejamento o projetista deverá ter em mãos o desenho do produto final, que é o desenho da peça acabada após todas as operações subseqüentes de usinagem. Será sobre as dimensões desse desenho que o sistema acrescentará o sobremetal, ângulos de saída, raios de canto e de filete, enfim, todos os detalhes necessários para a geração do produto forjado, como descrito no Capítulo 4.

De posse do desenho do produto usinado, o projetista seleciona uma das famílias apresentadas na Figura 5.4 tendo como critério a simples semelhança geométrica. Feita a seleção do perfil acessa-se outra janela. Por exemplo, clicando-se sobre o botão intitulado “Cubo Bi-Lateral” a nova janela disponibilizada é a “Dimensões – Cubo Bi-Lateral”, mostrada na Figura 5.7. Para os demais botões, acessam-se as janelas correspondentes mostradas nas Figuras 5.5, 5.6 e 5.8.

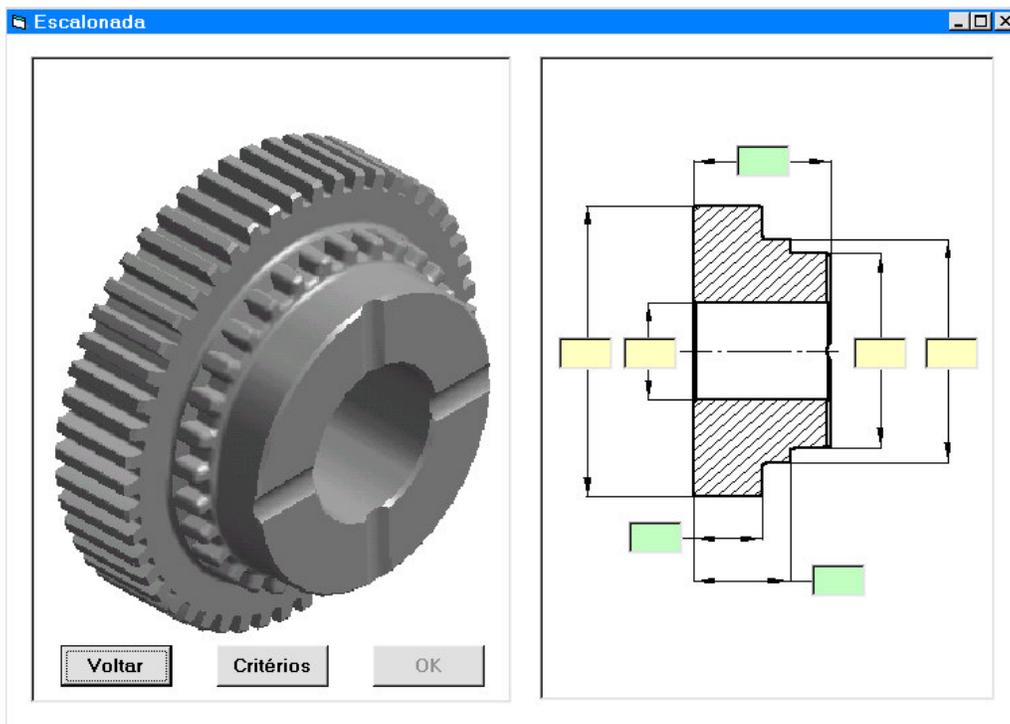


Figura 5. 5 - Janela “Dimensões – Escalonada”, perfil pré-definido.

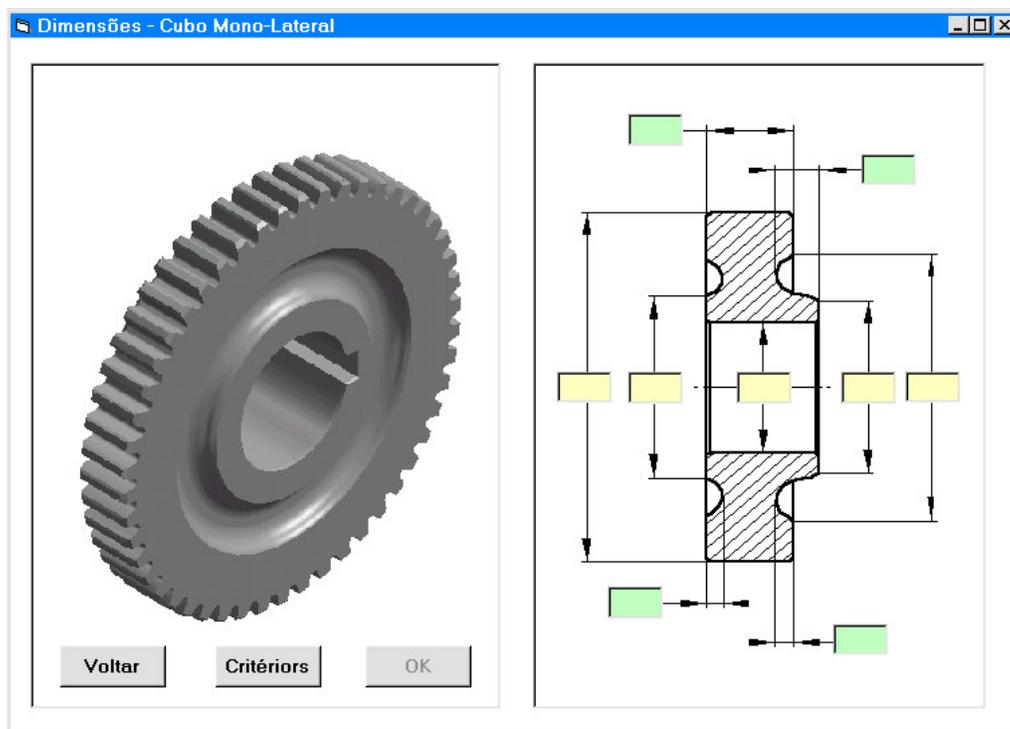


Figura 5. 6 - Janela “Dimensões – Cubo Mono-Lateral”, perfil pré-definido.

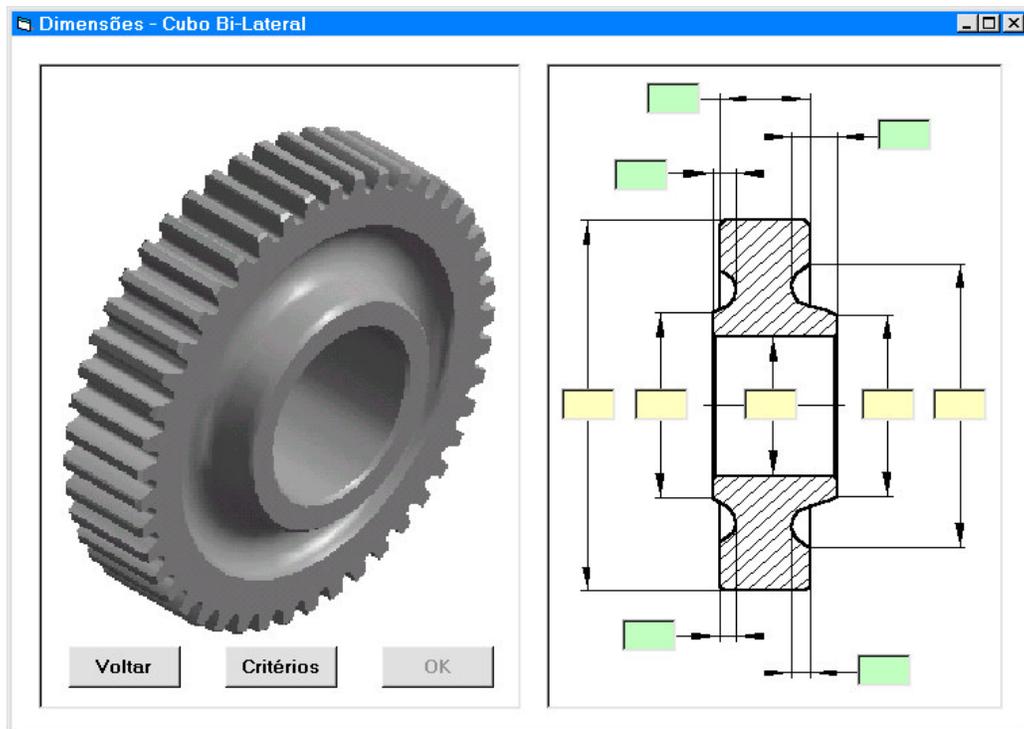


Figura 5. 7 - Janela “Dimensões – Cubo Bi-Lateral”, perfil pré-definido.

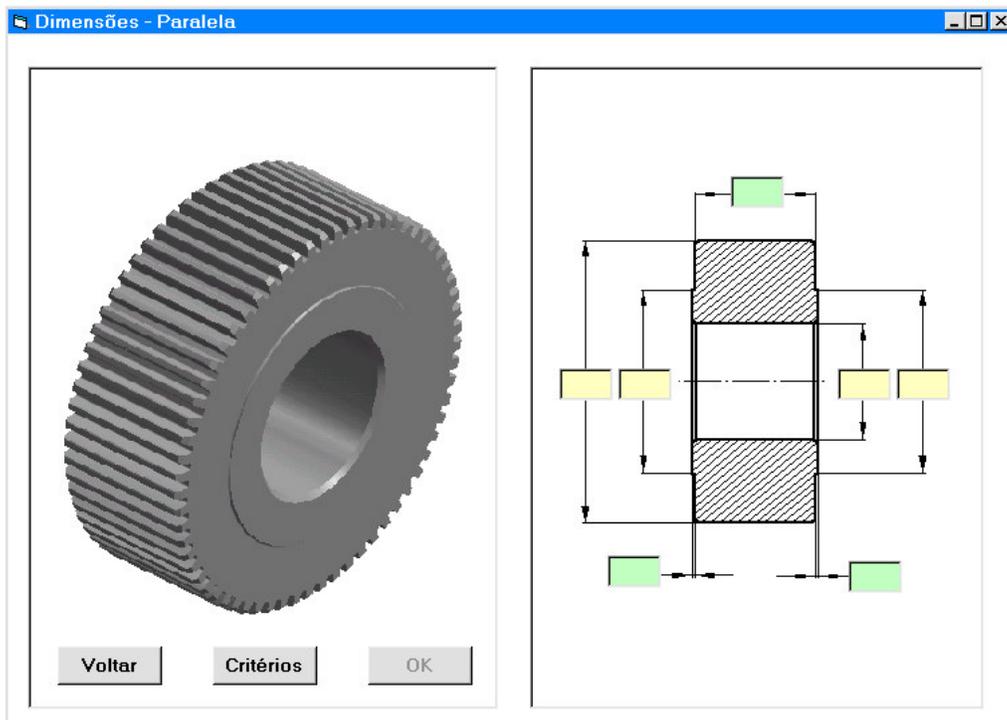


Figura 5. 8 - Janela “Dimensões – Paralela”, perfil pré-definido.

Assim, quando o projetista for atribuir os valores dimensionais em cada um dos campos disponíveis, deverá necessariamente especificar a dimensão da espessura da alma, em função da variação já previamente conhecida do processo de corte do tarugo.

Após a entrada desses dados deve-se executar o dimensionamento do forjado segundo critérios de projeto previamente adotados, e expostos no Capítulo 4, para a definição de sobremetals, ângulos de saída, raios de canto e de filete e dimensão do espelho. A janela intitulada “Dimensões – Cubo Bi-Lateral” (Figura 5.7) possui três botões na região inferior sob a figura tridimensional de uma engrenagem. O primeiro botão, “Voltar”, permite que o usuário, caso tenha cometido um engano ao selecionar o perfil da peça, possa reiniciar o planejamento do processo.

O segundo botão, “Critérios”, possibilita a verificação dos valores de sobremetal, raios, ângulos e espelho, adotados para aquelas dimensões que foram atribuídas aos campos nessa janela. O terceiro botão, “Ok”, somente será habilitado após a verificação dos valores segundo os critérios de projeto próprios da empresa.

Ao clicar-se o segundo botão, tem-se acesso à janela intitulada “Menu de Valores”, a partir da qual serão verificados os valores adotados para sobremetal, ângulos de saída, espelho e raios (Figura 5.10).

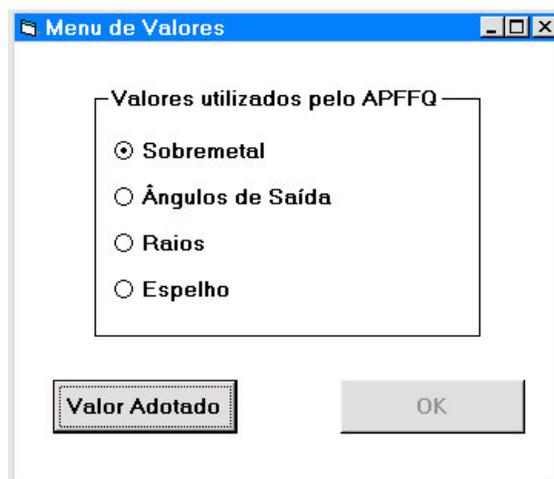


Figura 5. 10 - Janela "Menu de Valores".

Esta janela apresenta a variável sobremetal como opção padrão para verificação dos valores adotados. A ordem dos itens verificados é a mesma utilizada nas indústrias de forjados. Para proceder a verificação deve-se clicar sobre o botão intitulado “Valor Adotado”, que dá acesso a uma nova janela mostrada na Figura 5.11.

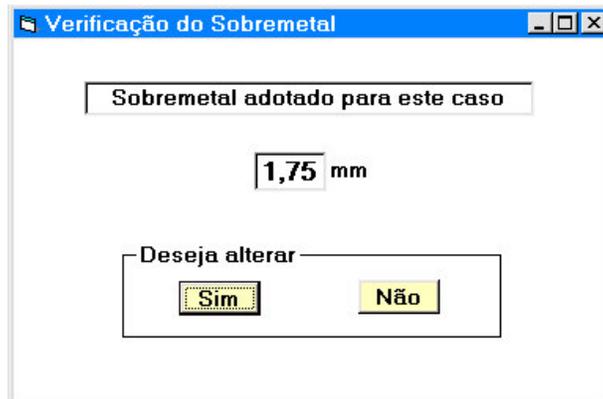


Figura 5. 11 - Janela "Verificação do Sobremetal".

Nessa janela verifica-se a existência de uma outra pergunta ao usuário, “Deseja alterar”, para a qual a resposta pode ser “Sim” ou “Não”.

Como já foi mencionado, anteriormente o APFFQ é um sistema com grande interação com o usuário e assim essa pergunta mostra a importância da experiência dos projetistas usuários do APFFQ, pois se o projetista, por experiência adquirida em outros planejamentos de processos de forjamento, ou pela melhor condição tecnológica da empresa, julgar possível ou necessária a alteração do valor de sobremetal adotado, ele poderá alterar o valor previamente selecionado, clicando “Sim” quando uma nova janela lhe será apresentada, como mostrada na Figura 5.12.

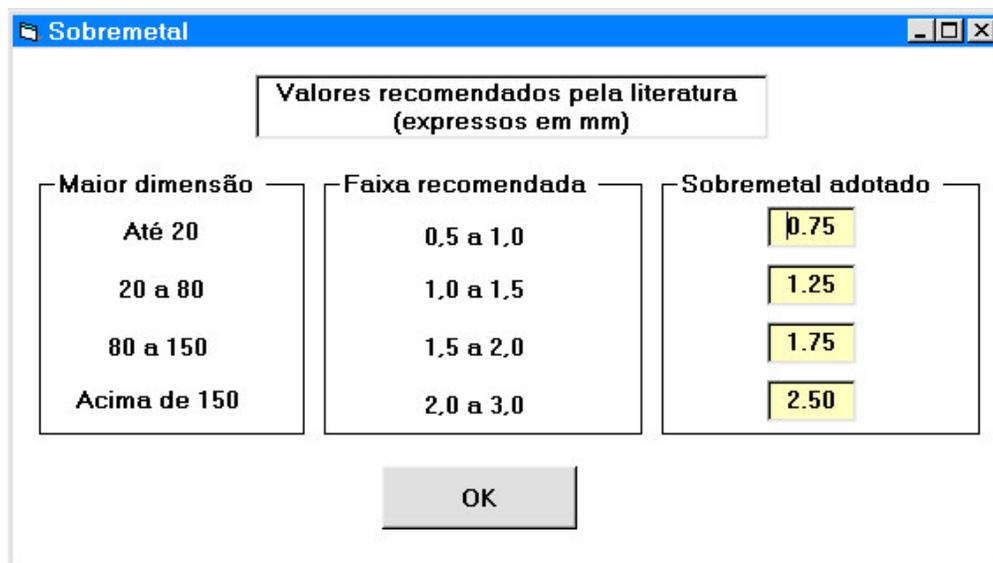


Figura 5. 12 - Janela "Sobremetal".

Essa janela apresenta três campos distintos: o primeiro denominado “Maior dimensão”, o segundo, “Faixa recomendada” e o terceiro, “Sobremetal adotado”.

Para cada uma das faixas da maior dimensão, existe uma faixa de sobremetal recomendado, que poderá ser alterado se necessário.

A alteração do sobremetal se dá pela simples variação do valor correspondente ao sobremetal adotado para a faixa da maior dimensão a qual a peça em projeto pertence.

Feita a alteração do valor do sobremetal adotado deve-se clicar sobre o botão “OK” para que o sistema reconheça esse novo valor e o utilize quando necessário. Ao se clicar este botão o APFFQ retorna à janela intitulada “Verificação do Sobremetal”, porém, agora com o valor do sobremetal já alterado (Figura 5.13). Ao clicar-se sobre o botão com a opção “Não”, o APFFQ retornará à janela inicial de verificação dos valores adotados, janela “Menu de Valores”, para promover a verificação de outro critério de projeto, com a opção seguinte a ser verificada já ativada. Nesse caso, a próxima opção a ser verificada será a dos “Ângulos de Saída”, mostrada na Figura 5.14.

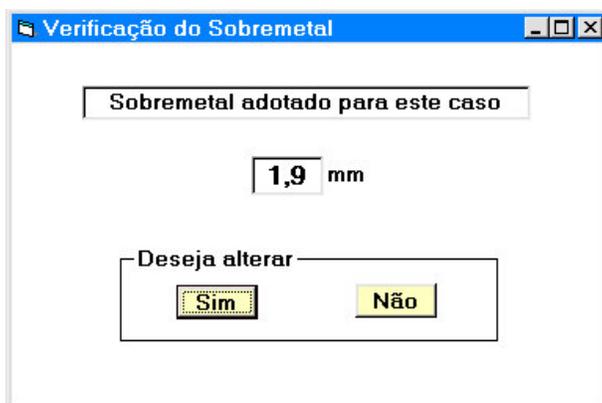


Figura 5. 13 - Janela de “Verificação do Sobremetal”, porém atualizado pelo projetista.

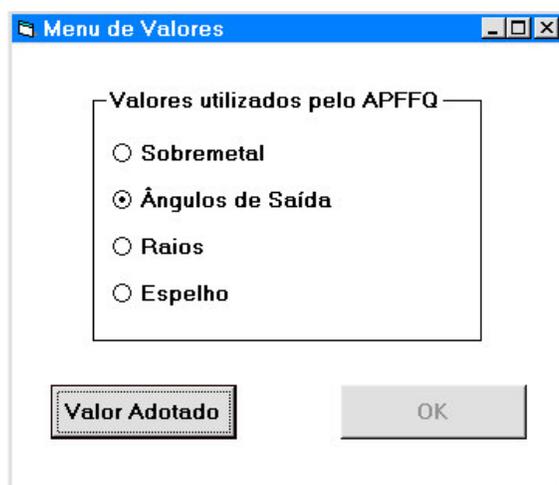


Figura 5. 14 - Janela “Menu de Valores” com a opção “Ângulos de Saída” ativada.

De forma similar ao descrito para o “Sobremetal”, clicando-se o botão intitulado “Valor Adotado”, será apresentada a janela de “Ângulos de Saída”, correspondente à geometria selecionada na janela “Esboços”. Como existem quatro famílias geometricamente distintas, para a verificação dos ângulos de saída foi criada uma janela para cada uma dessas famílias, com um esboço associado, conforme mostrado nas Figuras 5.15, 5.16, 5.17 e 5.18.

Os campos para atribuição dos ângulos de saída são “caixas de texto”, uma opção de programação do *software Visual Basic®* que permite a entrada manual de dados. Entretanto, durante o desenvolvimento do planejamento do processo esses campos já estarão preenchidos com valores obtidos da literatura, e apresentados no item 4.2. Se o projetista achar necessário e for viável tecnologicamente, ele poderá alterá-los individualmente.

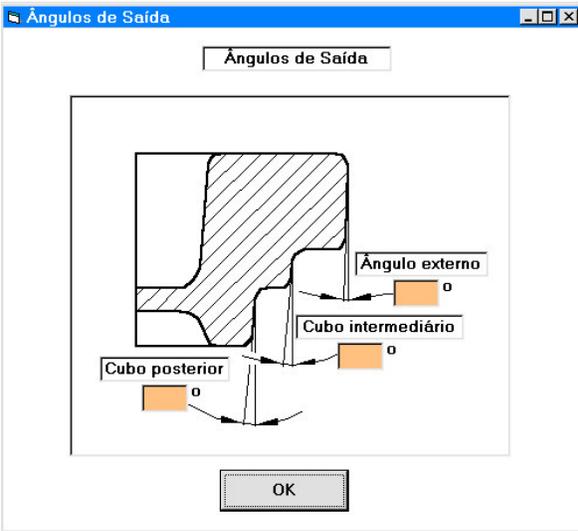


Figura 5. 15- Janela "Ângulos de Saída", família "Escalonada".

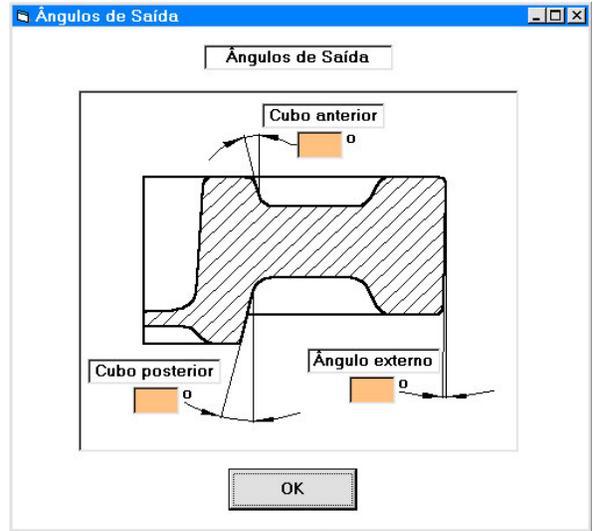


Figura 5. 16- Janela "Ângulos de Saída", família "Cubo Mono_Lateral".

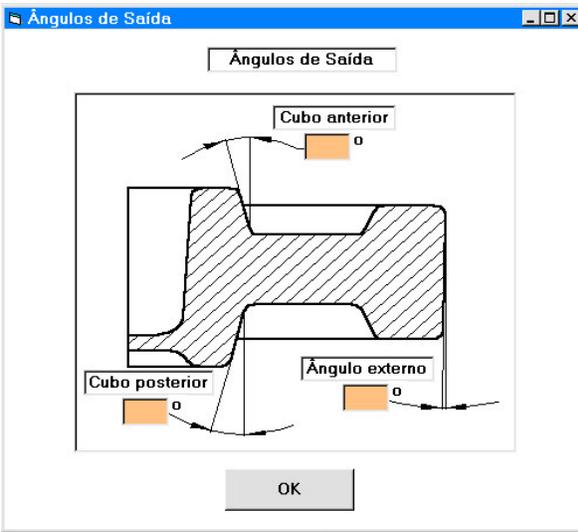


Figura 5. 17 - Janela "Ângulos de Saída", família "Cubo Bi-Lateral".

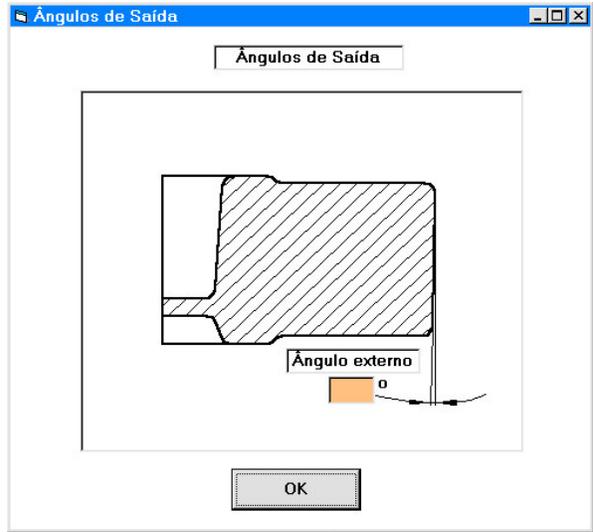


Figura 5. 18 - Janela "Ângulos de Saída", família "Paralela".

Após o reconhecimento dos ângulos apresentados em cada um dos campos da janela "Ângulos de Saída", ou atribuição de novos valores dessas dimensões, deve-se aceitá-las clicando-se sobre o botão "OK", com o que retorna-se à janela "Menu de Valores" para, na seqüência, verificar-se o próximo critério de projeto relacionado aos raios de canto e de filete a serem definidos para o produto forjado Figura 5.19.

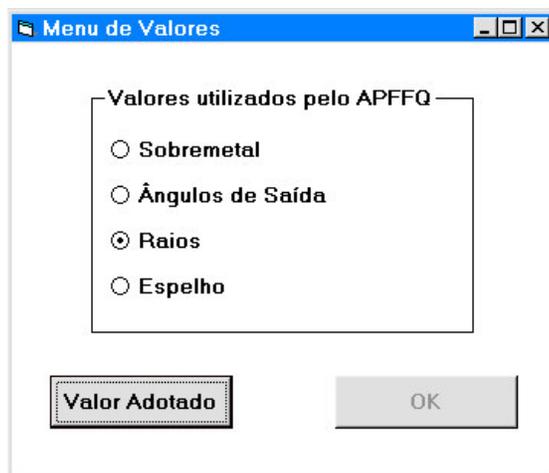


Figura 5. 19 - Janela “Menu de Valores”, opção para verificação dos raios.

A partir da apresentação da opção “Raios” na janela “Menu de Valores” e executando-se, novamente o comando atribuído ao botão intitulado “Valor Adotado”, tem-se uma nova janela intitulada “Verificação do Raio”, (Figura 5.20).

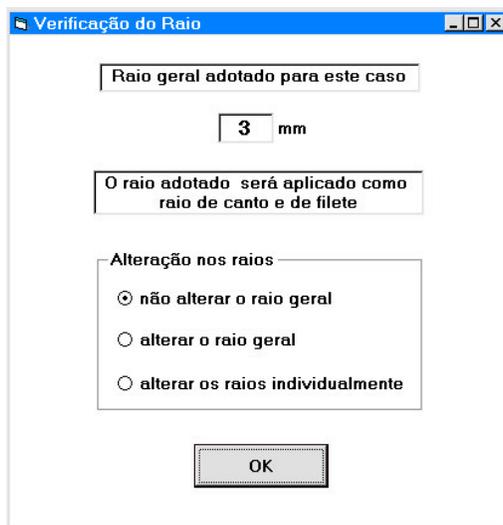


Figura 5. 20 - Janela “Verificação do Raio”.

Nessa janela a primeira das três opções é considerada como padrão do APFFQ, ou seja, ao se clicar no botão “OK”, o programa assumirá que todos os raios de canto e de filete, convexo e côncavo respectivamente, serão iguais a 3 mm. Note-se que o valor do raio adotado é o valor médio para aquela faixa de maior dimensão à qual o forjado pertence.

Entretanto, se a opção selecionada for a segunda, “alterar o raio geral”, uma nova janela será apresentada, (Figura 5. 21).

A janela "Raios adotados" apresenta o seguinte conteúdo:

Valores recomendados em função do sobremetal aplicado (expressos em mm)		
Maior dimensão	Raio recomendado	Raio adotado
Até 20	0,8 a 1,5	1.25
20 a 80	1,5 a 2,5	2.00
80 a 150	2,5 a 3,5	3.00
Acima de 150	3,5 a 5,0	4.25

Um botão "OK" está localizado na parte inferior da janela.

Figura 5. 21 - Janela “Raios adotados”, para alteração dos mesmos, se necessário.

Essa janela, como aquela mostrada na Figura 5.10, utilizada para verificação do sobremetal, também apresenta três campos distintos: o primeiro denominado “Maior dimensão” o segundo “Faixa recomendada” e o terceiro “Raio adotado”. Para cada uma das faixas da maior dimensão existe uma faixa de raios recomendados, que poderão ser alterados se necessário. A alteração do raio se dá pela simples variação do valor correspondente ao raio adotado para a faixa da maior dimensão a qual a peça pertence.

É importante salientar que, como apresentado anteriormente, o raio é adotado em função do sobremetal, o que significa que caso o sobremetal adotado anteriormente seja alterado para seu valor mínimo e, agora, o raio seja alterado para seu valor máximo para a faixa de maior dimensão, não deverá ocorrer falhas no produto usinado final, como mostrado na Figura 4.4.

Assim, ao efetuar-se uma alteração no valor do raio geral adotado, a janela “Verificação do Raio”, será atualizada assim que o botão “OK” da janela “Raios adotados” for acionado (Figura 5. 22).

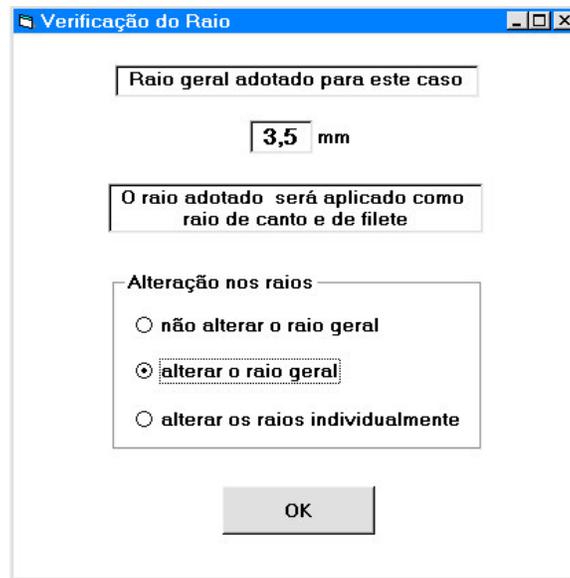


Figura 5. 22 - Janela “Verificação do Raio”, já atualizada com o novo valor adotado.

A terceira opção da janela “Verificação do Raio”, (Figura 5.22) é “alterar os raios individualmente”, que foi colocada à disposição do usuário pelo fato de que, geralmente, os desenhos de produtos forjados apresentam raios de canto e de filete variados.

Além disso, outro fator importante é a geometria da ferramenta que, normalmente, é composta de insertos ou seja, um inserto dentro de uma carcaça ou capa que irá definir o perfil inferior do produto. Essa condição de montagem do ferramental cria regiões onde, teoricamente, não existem raios, gerando a necessidade de se especificar um raio máximo.

Quando essa terceira opção é selecionada, imediatamente, é disponibilizada a janela referente à família “Cubo Bi-Lateral”. Essa opção também apresenta uma janela para cada uma das famílias anteriormente apresentadas, como representadas nas Figuras 5.23 a 5.26.

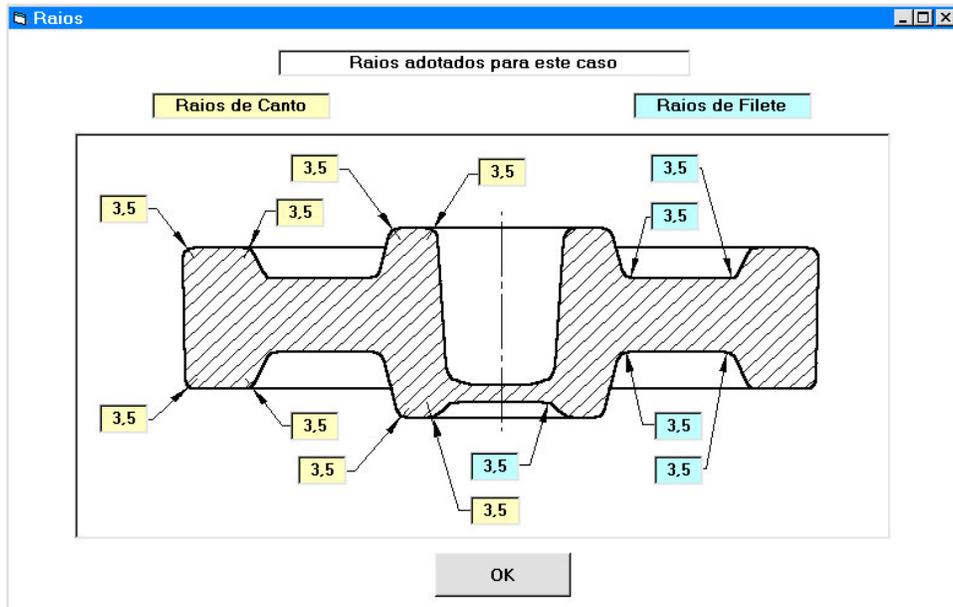


Figura 5. 23 - Janela “Raios”, para a família “Cubo Bi-Lateral”.

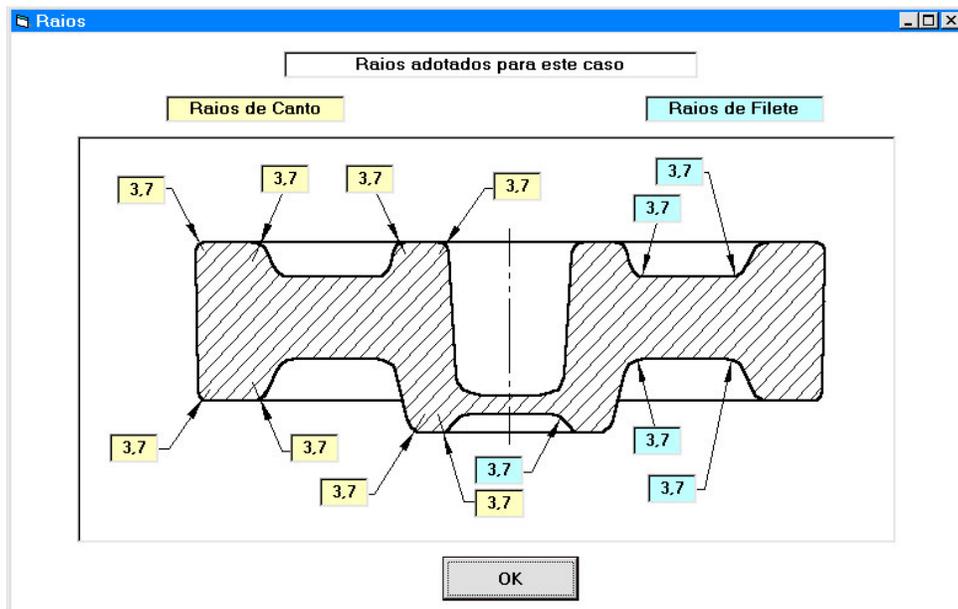


Figura 5. 24 - Janela “Raios”, para a família “Cubo Mono-Lateral”.

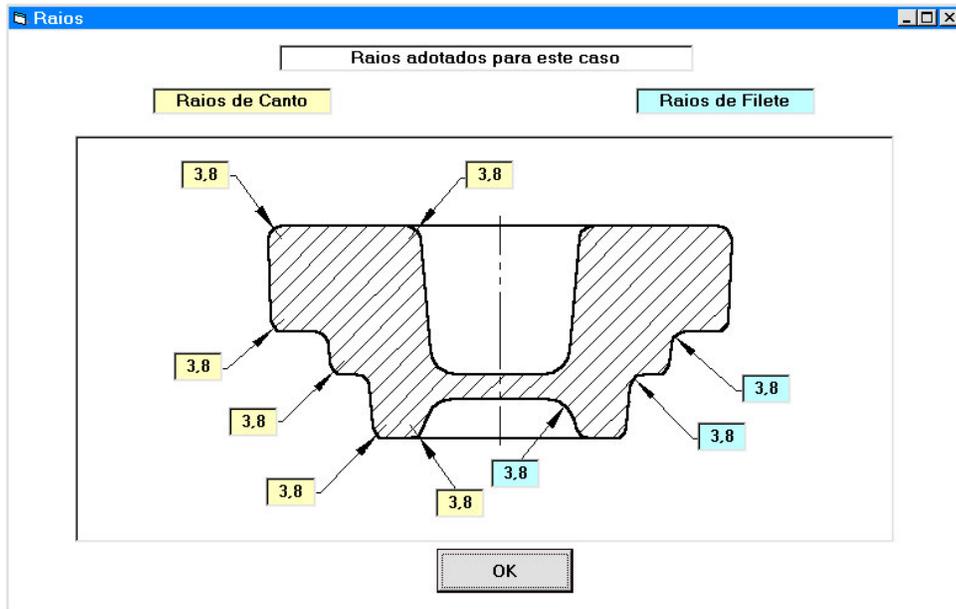


Figura 5. 25 - Janela “Raios”, para a família “Escalonada”.

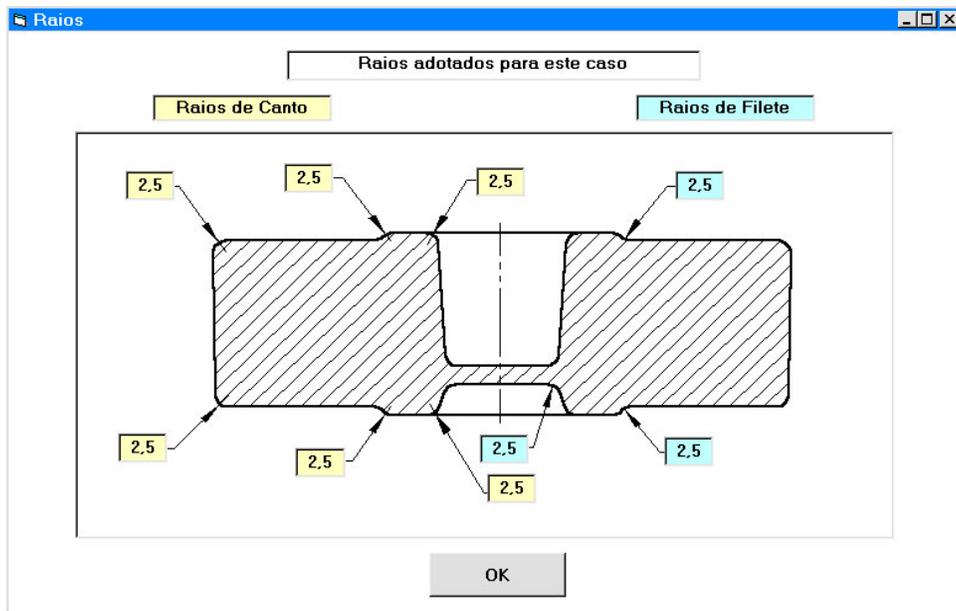


Figura 5. 26 - Janela “Raios”, para a família “Paralela”.

Pode-se verificar que o sistema assume o último valor definido pelo projetista, ao alterar o raio geral. Caso se queira alterar os raios individualmente, pode-se alterar o valor apresentado em cada um dos campos disponíveis que inicialmente aparecem preenchidos com o valor do raio geral já definido.

As janelas mostradas nas Figuras 5.23 a 5.26 são apresentadas em duas cores: os raios de canto do lado esquerdo em amarelo e os raios de filete do lado direito em azul, apenas para facilitar a visualização do usuário. A alteração dos raios se dará pela digitação do novo valor do raio desejado em seu respectivo campo, os quais foram previamente dispostos para posterior leitura e alteração do sólido que será gerado pelo *Solid Edge*®.

Da mesma forma, após efetuada a verificação e/ou a alteração necessária ou desejada, o projetista deverá clicar no botão “OK” para que o APFFQ assumira os valores atribuídos e feche a janela “Raios” e mostre, novamente, a janela “Menu de Valores” com um novo e último critério a ser verificado que é o “Espelho”.

Quando o botão “Valor Adotado” for acionado, imediatamente, uma das janelas intituladas “Dimensões do Espelho” será disponibilizada segundo a família selecionada no início do desenvolvimento, conforme mostrado nas Figuras 5. 27 a 5.30.

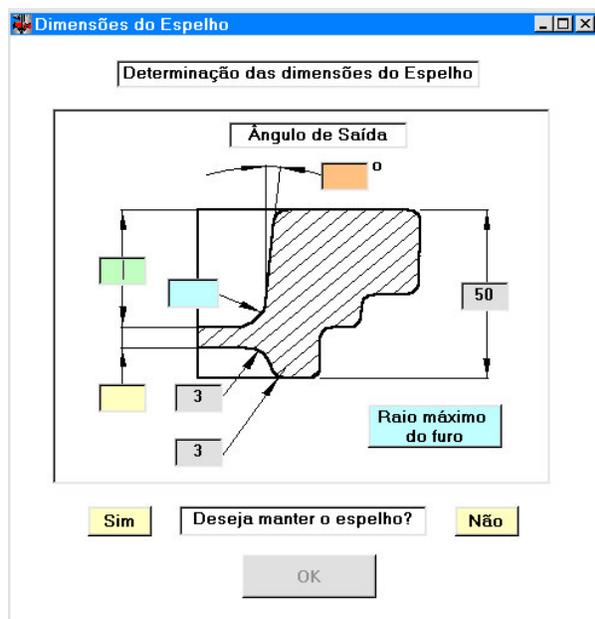


Figura 5. 27 - Janela “Dimensão do Espelho”, família "Escalonada".

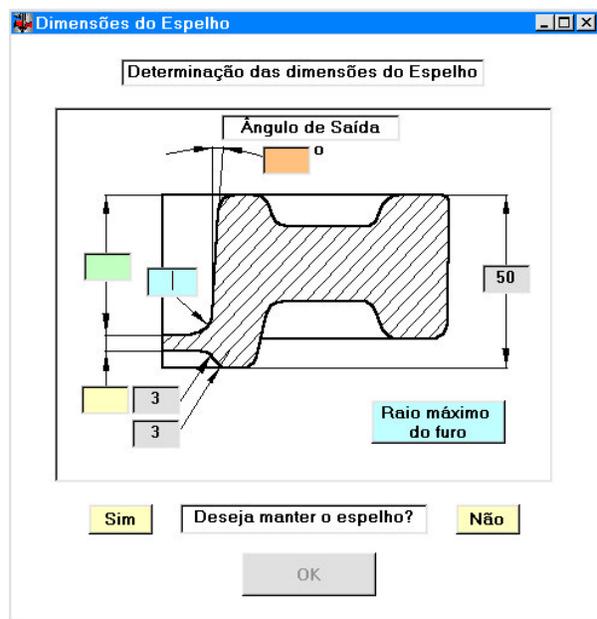


Figura 5. 28 - Janela "Dimensão do Espelho", família "Cubo Mono Lateral".

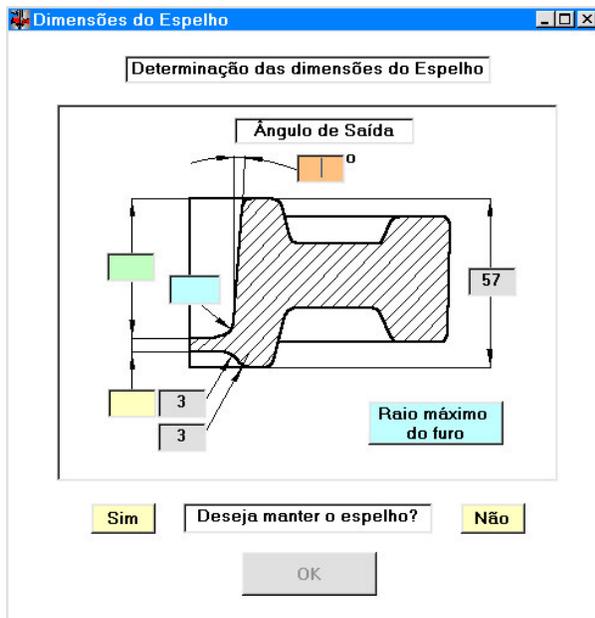


Figura 5. 29 - Janela "Dimensão do Espelho", família "Cubo Bi-Lateral"

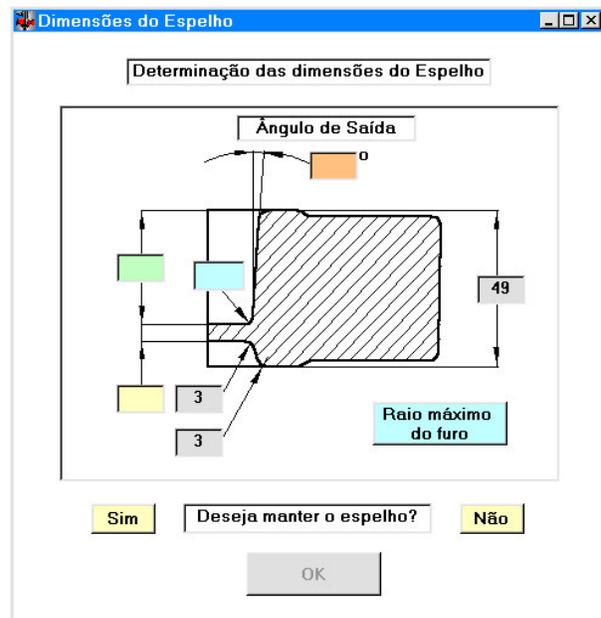


Figura 5. 30 - Janela "Dimensão do Espelho", família "Paralela"

As janelas apresentadas nessas figuras mostram quatro campos ainda vazios, conforme especificação abaixo:

- ✓ campo 1 – profundidade do furo, cor verde;
- ✓ campo 2 – ângulo de saída no furo, cor laranja;
- ✓ campo 3 – raio entre o fundo do furo, espelho, e parede do furo, cor azul e,
- ✓ campo 4 – espessura do espelho, cor amarela.

Em todas as janelas, os campos 1, 2 e 3 são caixas de texto, ou seja, esses campos deverão ser preenchidos pelo projetista com valores para cada dimensão solicitada. Entretanto, no campo 3 qualquer que seja o valor atribuído ao raio de filete, deverá ser verificado.

No campo 4 será apresentado o valor da espessura do espelho. Para promover a verificação do raio de filete no fundo do furo e o cálculo da espessura do espelho o projetista deve clicar sobre o botão “Raio máximo do furo”.

Ao clicar sobre esse botão, caso o projetista tenha atribuído um valor para o raio, esse valor é corrigido, sendo apresentado pelo sistema o valor máximo para este raio. Caso se queira um raio menor ao apresentado, basta digitá-lo no campo próprio e dar seqüência ao planejamento.

A necessidade de se apresentar um valor máximo para o raio reside no fato de que o *software Solid Edge®* trabalha com *features* e caso o raio de filete seja maior que metade do diâmetro no fundo do furo não será possível a geração deste raio durante a atualização do sólido.

Para concluir a verificação desse critério o projetista deve clicar em um dos dois botões, “Sim” ou “Não”, respondendo à pergunta: “Deseja manter o espelho?”.

No campo 1 deverá ser atribuído um valor para a profundidade do furo. Ao introduzir o valor para a profundidade do furo, o projetista estará orientando a posição do espelho, que de maneira geral em forjados convencionais, é posicionado na altura média do forjado. Já em forjados de precisão o espelho é, geralmente, posicionado abaixo da metade da altura total do forjado.

Geralmente, a altura do pino extrator apresenta dimensões padronizadas pelas empresas, de modo que a profundidade do furo será igual à altura total do forjado menos a altura do extrator, mais a espessura do espelho. Essas dimensões padronizadas do extrator poderão ser armazenadas na forma de bancos de dados para auxiliar o projetista. Entretanto, por ser uma característica particular de cada empresa, essa possibilidade não foi efetivada neste trabalho.

A geometria do extrator é de fundamental importância devido à sua função principal que é extrair a peça da matriz e também, evitar que durante a operação de cisalhamento o punção de corte do espelho, ou alma central, gere uma rebarba que poderá acarretar problemas de posicionamento e fixação da peça bruta durante a usinagem final do produto.

No campo 2 será apresentado o valor do ângulo de saída que como mencionado anteriormente, poderá ser alterado já que o campo 3 é uma caixa de texto que permite acesso ao projetista. O valor do ângulo de saída é de extrema importância pois tem como função principal facilitar a extração da peça e minimizar o desgaste da matriz superior, mais especificamente do punção.

No campo 3 será atribuído o raio de filete na união do fundo do furo com a face do espelho.

Para evitar que ocorram erros na definição do raio do punção pelo projetista, que, talvez, por sua experiência acredite ser possível a utilização de raios maiores, o sistema só disponibilizará o botão “OK” da janela após a apresentação do raio selecionado pelo sistema. O raio do fundo do furo será selecionado segundo a Tabela 4.6, adaptada de Grüning 1973.

Como mencionado anteriormente, o campo 4 será preenchido com o valor da espessura do espelho ou alma central, calculado pelo sistema em função das dimensões introduzidas nos campos 1 e 2, de acordo com a Equação 4.1, (Viecelli, 1995):

O cálculo da espessura do espelho é efetuado a partir do botão “Raio máximo do furo” visto nas janelas apresentadas nas Figuras 5.27 a 5.30. No momento em que o botão é acionado, a rotina abaixo é executada representando a Equação (4.1) com as variáveis especificadas no sistema.

```
If diamfuroant > 0.25*profuroant+5 Then  
espeselho=0.45*Sqr(diamfuroant -(0.25*profuroant)-5)+0.6*Sqr(profuroant)  
End If
```

Onde:

diamfuroant - dimensão do furo da engrenagem (dimensão **E** Figura 5.2).

profuroant - profundidade do furo (dimensão **h** Figura 4.3).

espeselho - espessura do espelho (dimensão **S** Figura 4.3).

Caso esta condição seja verdadeira, o sistema calcula a espessura do espelho e o apresenta no campo 5. Entretanto, se a condição apresentada na rotina a seguir, for verdadeira o sistema apresentará uma mensagem sugerindo a eliminação do espelho, conforme Figura 5.31.

```
If diamfuroant < 0.25 * profuroant + 5 Then  
MsgBox "Para essas dimensões do furo recomenda-se eliminar o espelho, portanto a resposta à pergunta deve ser Não"  
End If
```

Se essa condição é satisfeita, o sistema desabilitará o botão “Sim” mostrado nas janelas “Dimensões do Espelho” nas Figuras 5.27 a 5.30. Neste caso, o passo seguinte será clicar sobre o botão “Não” dessas janelas que ao ser acionado, permitirá a eliminação dos furos no sólido do forjado.

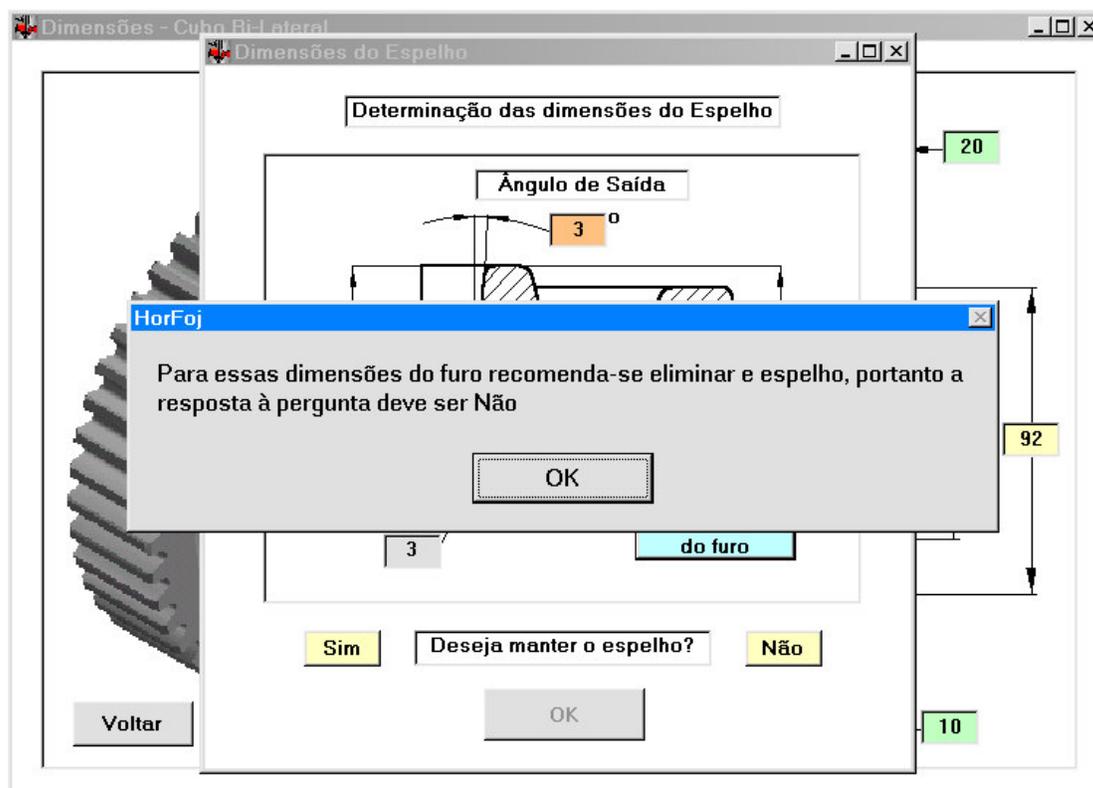


Figura 5. 31 - Janela de mensagem sugerindo a eliminação do espelho.

Ainda nas janelas apresentadas nas Figuras 5.27 a 5.30, também são mostradas outras três dimensões em campos de cor cinza, que, não podem ser alteradas pois são dimensões assumidas em critérios anteriormente verificados. O sistema apresenta em um desses campos, que está à direita da janela, a altura total do forjado segundo as dimensões atribuídas nos campos das janelas mostradas nas Figuras 5.6 a 5.9.

De todo modo, para dar seqüência ao planejamento o projetista deverá responder à pergunta: “Deseja manter o espelho ?”, “Sim” ou Não”. Essa pergunta foi introduzida para permitir, em função da experiência do projetista, a eliminação do furo central na peça forjada, que tem como objetivo minimizar o material a ser removido durante as operações subsequentes

ao forjamento até a obtenção do produto final e também minimizar o desgaste da ferramenta ao longo dos processos de usinagem.

Para a eliminação dos furos basta que a opção “Não” seja escolhida e os furos serão eliminados do forjado durante sua atualização geométrica.

Caso a resposta seja “Sim”, com a confirmação da existência de furo central na peça, o passo seguinte será confirmar tudo que foi verificado na janela “Dimensões do Espelho”, para isso clica-se no botão “OK” e o sistema fará a verificação da relação entre o diâmetro do furo e sua profundidade. Segundo CBF, (1990) a profundidade máxima para o furo poderá ser igual a no máximo 1,5 vezes seu diâmetro. Caso essa condição não seja atendida o sistema apresentará uma mensagem conforme mostra a Figura 5.32.

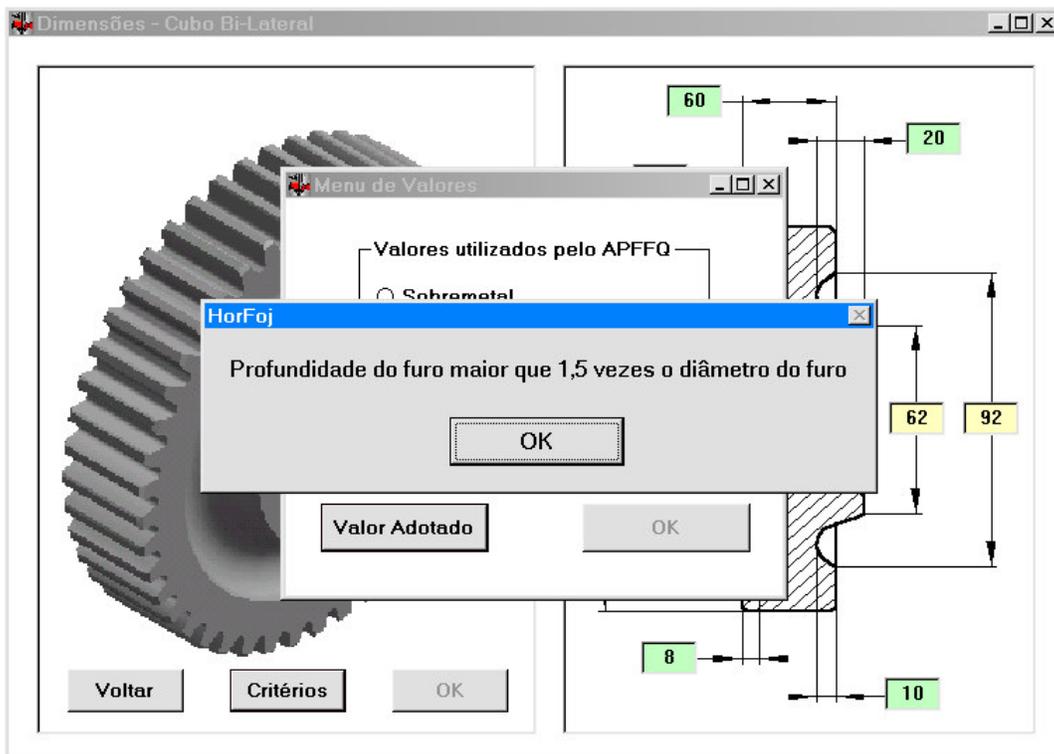


Figura 5. 32 - Janela informando ao projetista a condição da relação diâmetro/profundidade do furo.

Para esses casos, em que as dimensões não respeitam essa relação imposta, o punção deve apresentar a extremidade semi-esférica, conforme mostrado esquematicamente nas janelas apresentadas nas Figuras 5.33 e 5.36, e disponibilizadas a partir do botão “OK” da caixa de mensagem.

Podemos verificar, nas janelas das Figuras 5.33 a 5.36, que a localização do espelho/alma central não permite alteração, pois como dito anteriormente, quem determina a posição do espelho é a profundidade do furo, que foi atribuída na janela “Dimensões do Espelho”.

Essas janelas apresentam um campo onde será mostrado o valor máximo do raio r no fundo do furo. Da mesma forma que em outras janelas apresentadas, esse campo pode ser acessado pelo projetista permitindo a redução do valor do raio de filete.

Nas janelas das Figuras 5.33 a 5.36 pode-se notar em seu canto inferior direito o valor máximo calculado para esse raio esférico que foi calculado pela seguinte Equação 5.2, idêntica à expressão 4.2.

$$r = \frac{d}{2} - h \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad [\text{mm}] \quad (5.2)$$

Dessa maneira, ao clicar o botão “OK” na janela “Dimensões do Espelho”, o sistema retornará à janela “Menu de Valores”, habilitando o botão “OK” que acionado executará a conexão com o *Solid Edge*®. Quando essa conexão é efetivada, o *software Solid Edge*® está disponível para utilização. Entretanto, a tela gráfica do *Solid Edge*® ainda apresentará um sólido primitivo, previamente desenvolvido para cada uma das famílias inicialmente apresentadas e agrupadas geometricamente.

A Figura 5.37 apresenta a tela gráfica do *Solid Edge*® com a geometria primitiva referente à família “Cubo Bi-Lateral”. Do lado direito da área gráfica aparece uma outra janela de controle utilizada para a atualização dessa geometria segundo os critérios anteriormente adotados, além de outros comandos a serem utilizados durante o planejamento do processo.

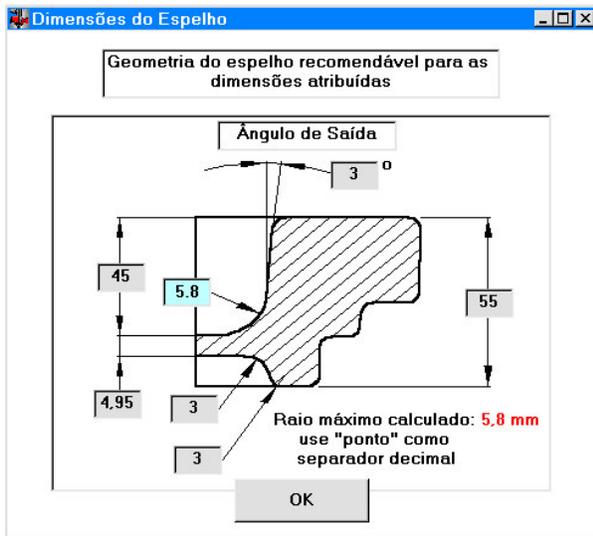


Figura 5. 33 - Janela "Dimensões do Espelho", família "Escalonada".

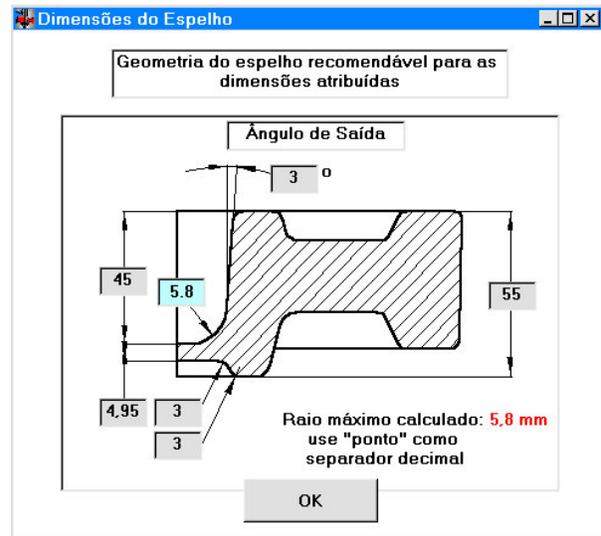


Figura 5. 34 - Janela "Dimensões do Espelho", família "Cubo Mono-Lateral".

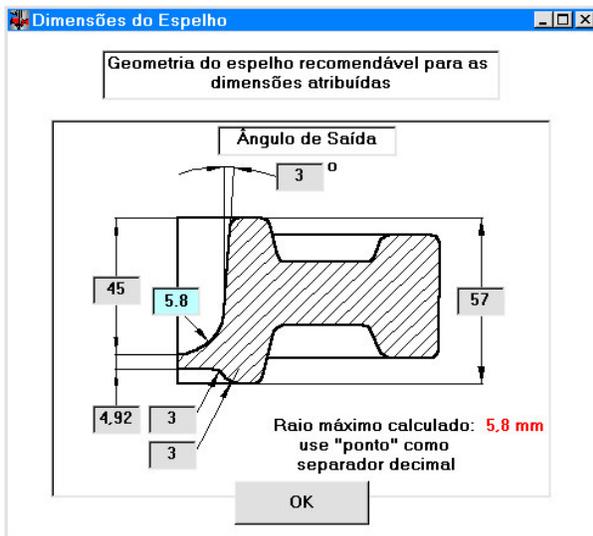


Figura 5. 35 - Janela "Dimensões do Espelho", família "Cubo Bi-Lateral".

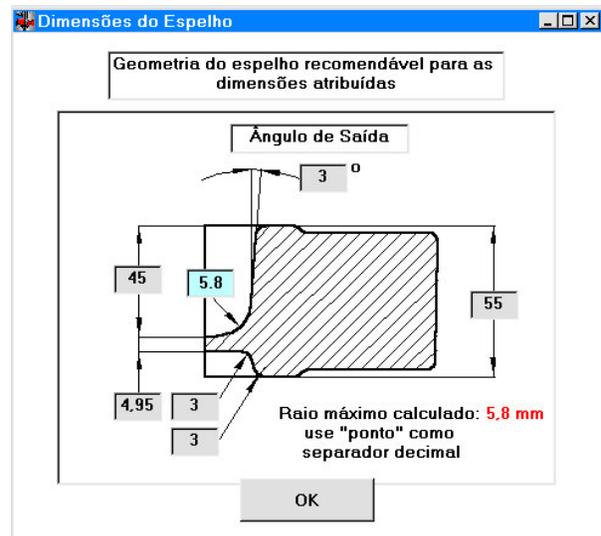


Figura 5. 36 - Janela "Dimensões do Espelho", família "Paralela".

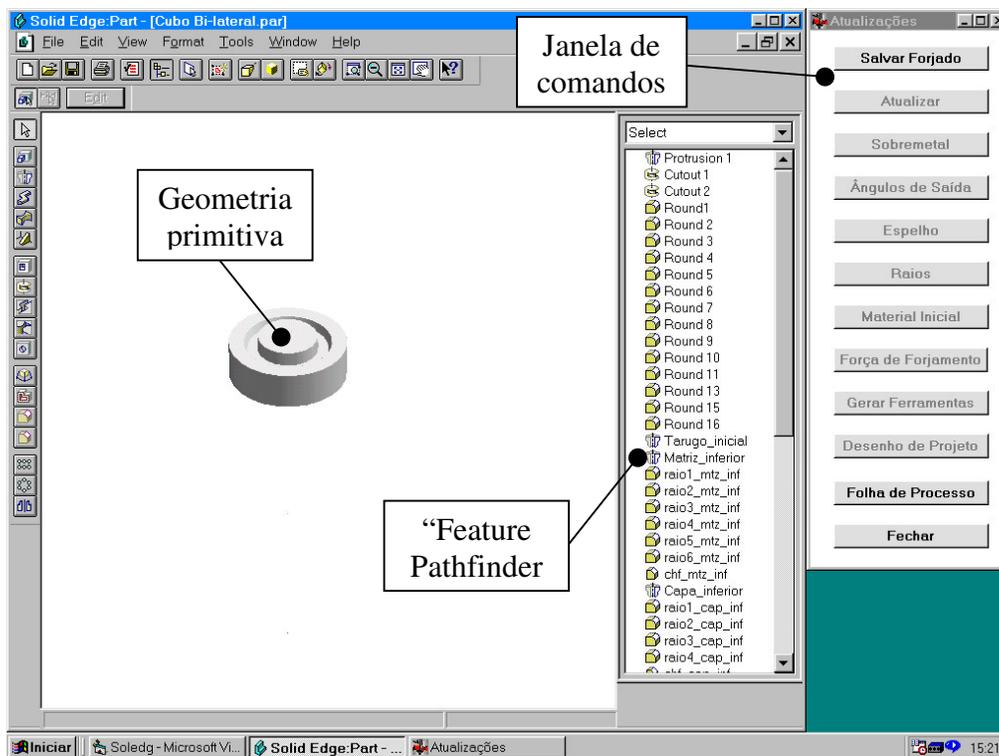


Figura 5. 37 - Tela gráfica do *Solid Edge*® mostrando a geometria primitiva para a família "Cubo Bi-Lateral".

Simultaneamente à abertura da área gráfica do *Solid Edge*®, é disponibilizada uma outra janela, intitulada “Atualizações”, que apresenta todos os comandos de controle para promover a atualização da geometria primitiva conforme as dimensões assumidas a partir do desenho do produto usinado e que foram atribuídas no início do desenvolvimento nas janelas mostradas nas Figuras 5.5 à 5.8.

Assim, quando esses comandos são acionados, ocorrem as alterações na geometria do sólido. Para cada um dos botões de comando existe uma rotina com uma função específica. É importante frisar que todos os botões de comandos apresentados na janela da Figura 5.38 poderiam ser resumidos a um único botão (Atualizar Forjado), porém escolheu-se utilizar um botão para cada comando em função da facilidade de se verificar cada passo da atualização.

O sólido apresentado na Figura 5.37, cujo nome do arquivo é “Cubo Bi-Lateral.par” foi criado com dimensões aleatórias, mesmo porque, essas dimensões serão alteradas à medida que o usuário for promovendo as alterações através dos botões da janela mostrada na Figura 5.38. Da

mesma forma, existe um arquivo para cada uma das geometrias apresentadas na Figura 5.4, que se refere às famílias geometricamente classificadas.

Para prosseguir o planejamento a primeira tarefa é criar um novo arquivo para o novo produto forjado. Nesse momento, quase todos os botões de comando da janela “Atualizações” estão desabilitados, ou seja, seu acesso está impedido e os botões somente estarão disponíveis à medida que as alterações forem sendo efetuadas.



Figura 5. 38 - Janela “Atualizações” que permite atualizar dimensões da geometria primitiva.

Os comandos deverão ser ativados na ordem descendente para continuar com o planejamento e promover as atualizações. O primeiro comando é o intitulado “Salvar Forjado”, que ao ser clicado apresenta uma janela com a mensagem que pode ser vista na Figura 5.39.

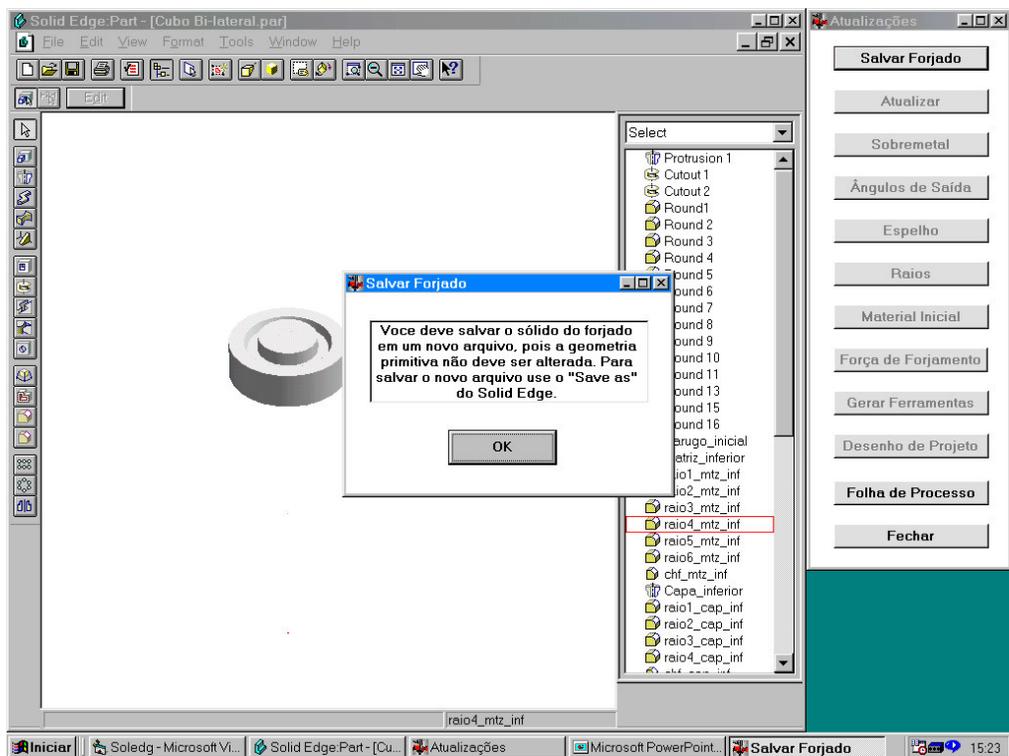


Figura 5. 39 - Janela “Salvar Forjado”.

Esta recomendação é feita no início da atualização para que não se salve as alterações sobre a geometria primitiva. Quando o botão “Ok” é ativado o botão “Salvar Forjado” é desabilitado e imediatamente o botão subsequente é habilitado, ou seja o botão “Atualizar”. Dessa forma, quando acionado o comando “Atualizar”, todos os valores dimensionais atribuídos a cada um dos campos disponíveis na janela “Dimensões – Cubo Bi-Lateral”, mostrada na Figura 5.7, serão reconhecidos e a geometria pré-definida será alterada para suas novas dimensões, como mostrado na Figura 5.40.

Para que se possa ter uma idéia real das dimensões que foram alteradas, o comando “Fit” (para ajuste da tela gráfica) do *Solid Edge*® não foi aplicado e dessa forma, o sólido apresentado na Figura 5.40 respeitou as proporções sobre a geometria pré-definida mostrada na Figura 5.37.

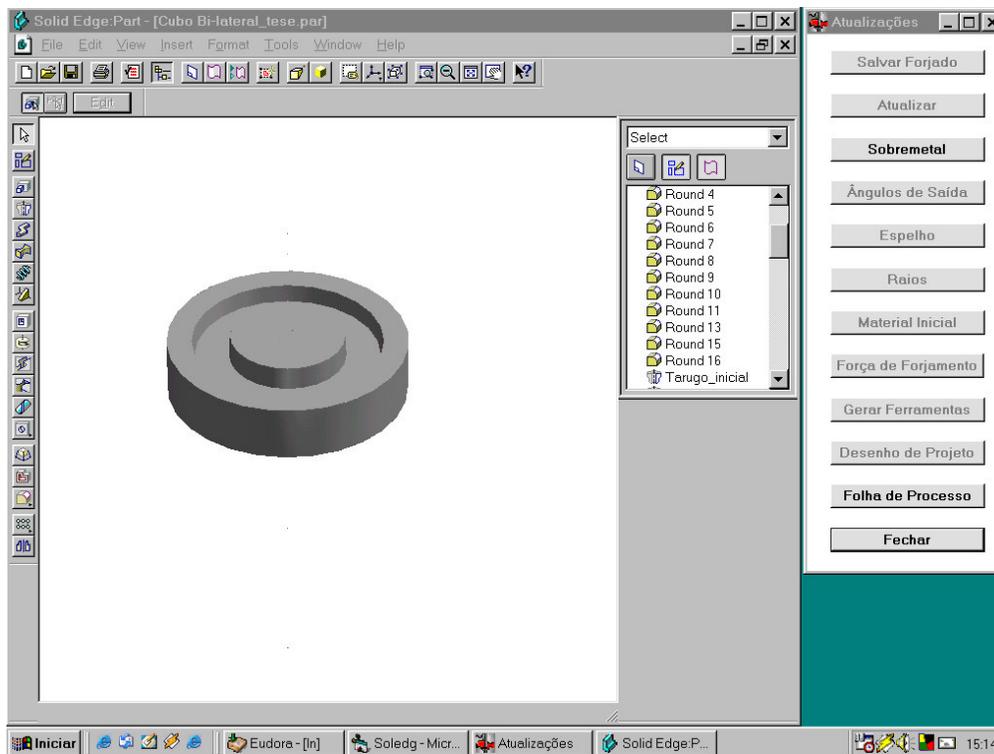


Figura 5. 40 - Tela gráfica apresentando o novo arquivo do sólido já com as dimensões atualizadas segundo os valores atribuídos na figura mostrada na janela "Dimensões Cubo Bi-Lateral".

Cada comando apresentado na janela “Atualizações” efetuará sucessivamente uma alteração nos detalhes geométricos do sólido de acordo com os critérios estabelecidos para o sobremetal, ângulo de saída, espelho e raios.

A Figura 5.41 apresenta o modelo sólido da engrenagem forjada após todas essas alterações.

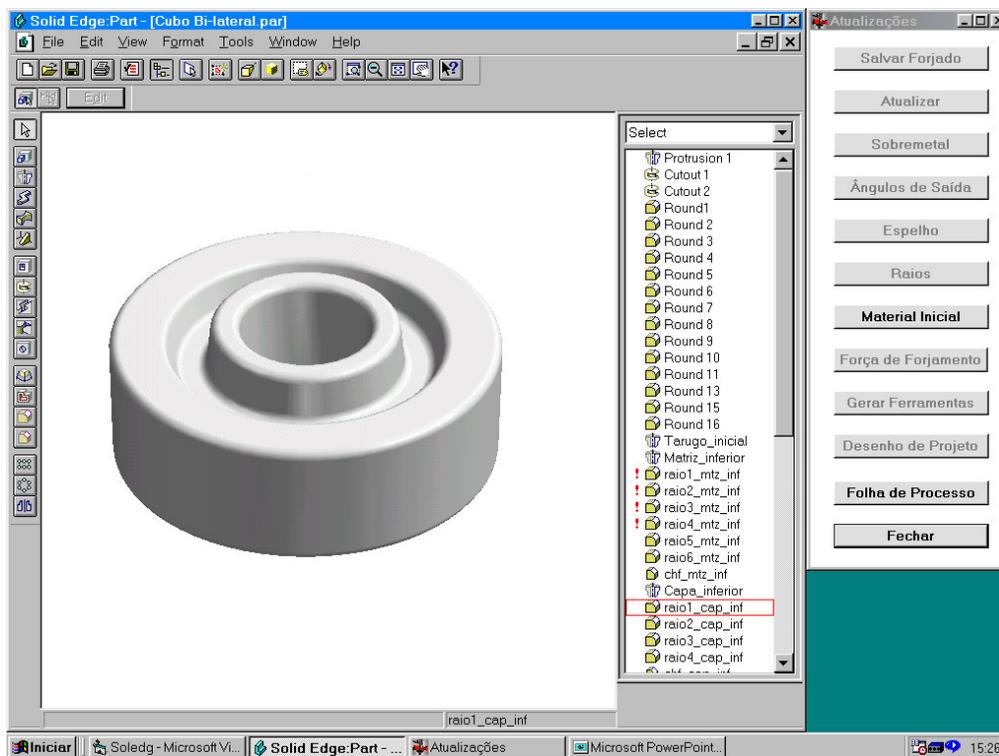


Figura 5. 41 - Área gráfica do *Solid Edge*® apresentando o novo sólido já com todos os critérios de projeto adotados.

O próximo passo a ser executado é a definição do material de partida, que será feita pelo comando intitulado “Material Inicial”, que irá o volume e a massa do forjado gerado para posterior definição da bitola inicial e do comprimento de corte do tarugo.

Na janela “Bitolas Padrão” (Figura 5.42) encontra-se uma tabela com dimensões de barras de secção circular, que variam entre 25,40 mm até 123,83 mm ou de 1” até 4 7/8”. Além disso, a janela apresenta também um campo intitulado “Valores Calculados”, em que são apresentados:

- ✓ Volume do forjado;
- ✓ Massa do forjado;
- ✓ Diâmetro da barra e
- ✓ Comprimento do tarugo.

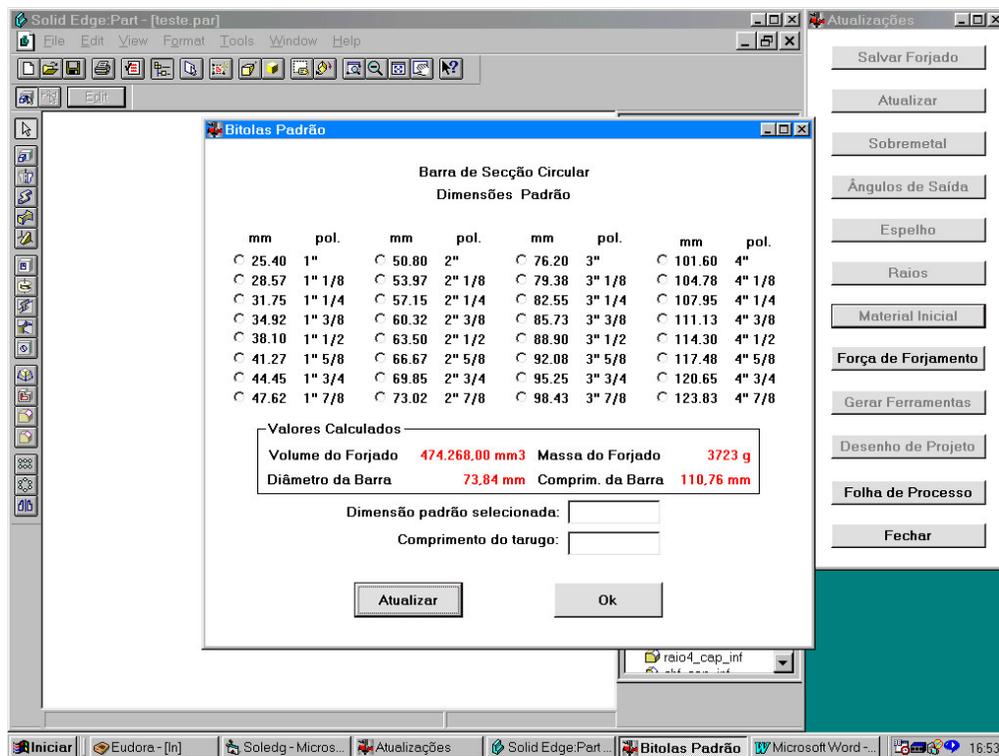


Figura 5. 42 - Janela "Bitolas Padrão".

Entretanto, os itens “Diâmetro da Barra” e “Comprimento da Barra” não são calculados utilizando-se como base as bitolas padrão. Nessa janela o projetista irá selecionar a bitola a ser utilizada durante a produção. Segundo CBF, (1995) o comprimento máximo da barra que poderá ser recalçado a quente na operação de pré-formação da peça, sem que esta sofra flambagem, é de 1,5 vezes seu diâmetro.

O projetista irá selecionar o material simplesmente clicando sobre a bitola padrão apresentada na tabela. É desejável que se tenha em mãos as bitolas disponíveis na empresa e as mais utilizadas experimentalmente em processos anteriormente desenvolvidos. Quando a bitola inicial estiver selecionada, o passo seguinte será atualizar esses valores, pelo comando intitulado “Atualizar”.

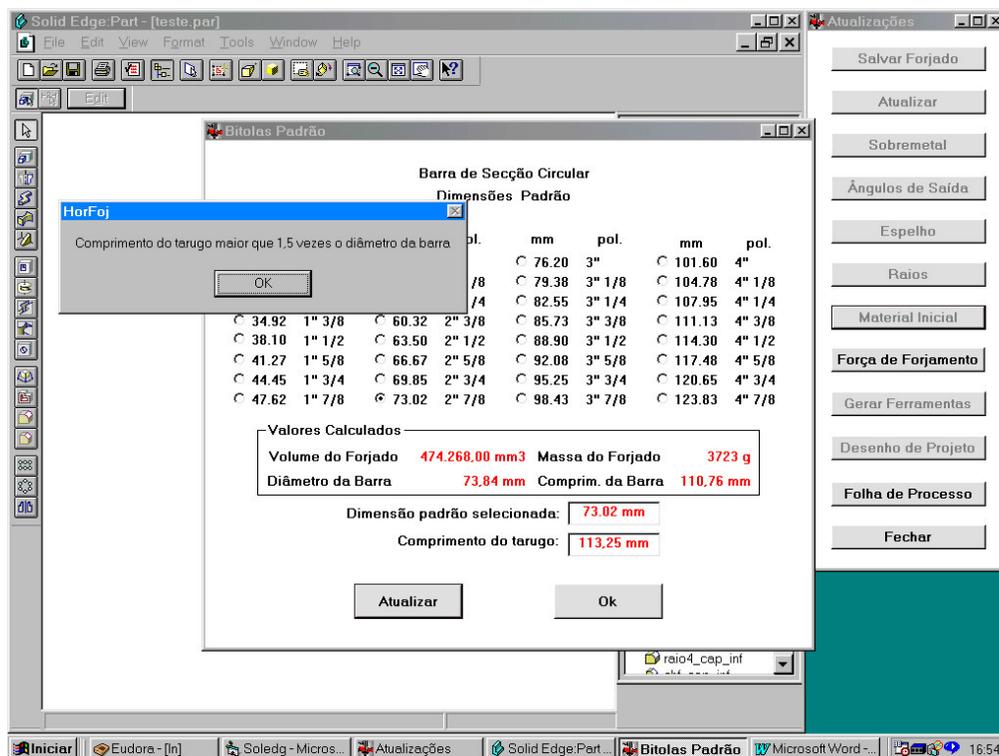


Figura 5. 43 - Janela "Bitolas Padrão", apresentando mensagem de irregularidade na bitola selecionada.

O sistema então irá verificar a relação comprimento/diâmetro da barra e caso tenha sido selecionada uma bitola menor que a apresentada no campo "Valores Calculados" o sistema irá apresentar a mensagem, mostrada na Figura 5.43. A Figura 5.44 apresenta a janela "Bitolas Padrão" com uma dimensão selecionada, maior que aquela calculada, de modo que a relação comprimento/diâmetro do tarugo menor que 1,5 seja satisfeita.

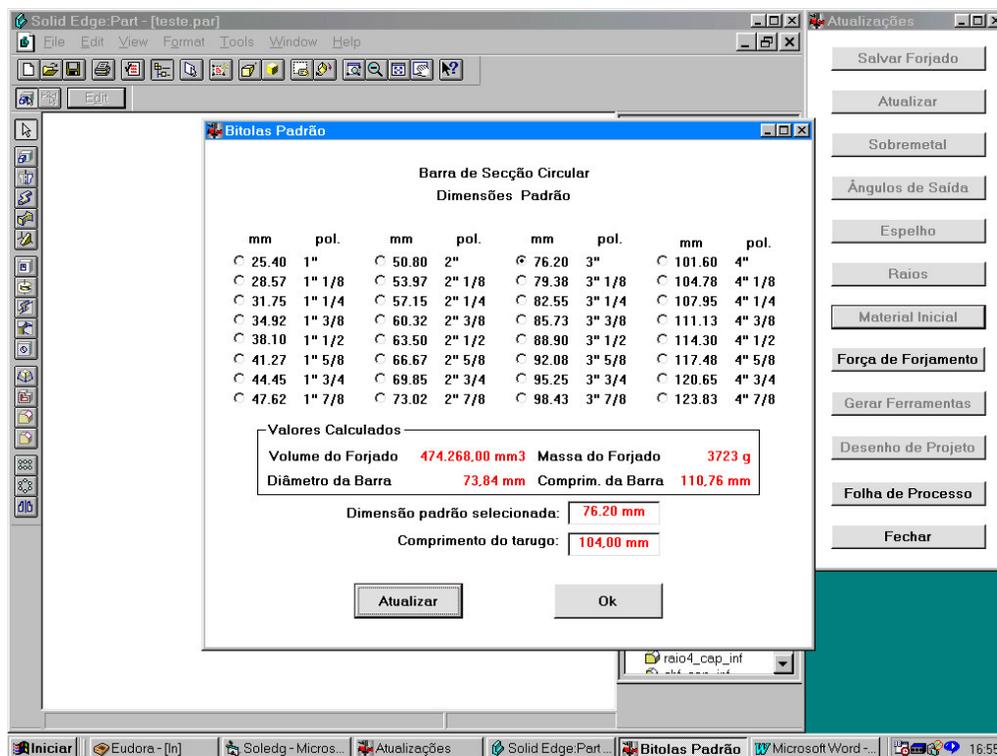


Figura 5. 44 - Janela "Bitolas Padrão" com uma dimensão selecionada maior que a calculada.

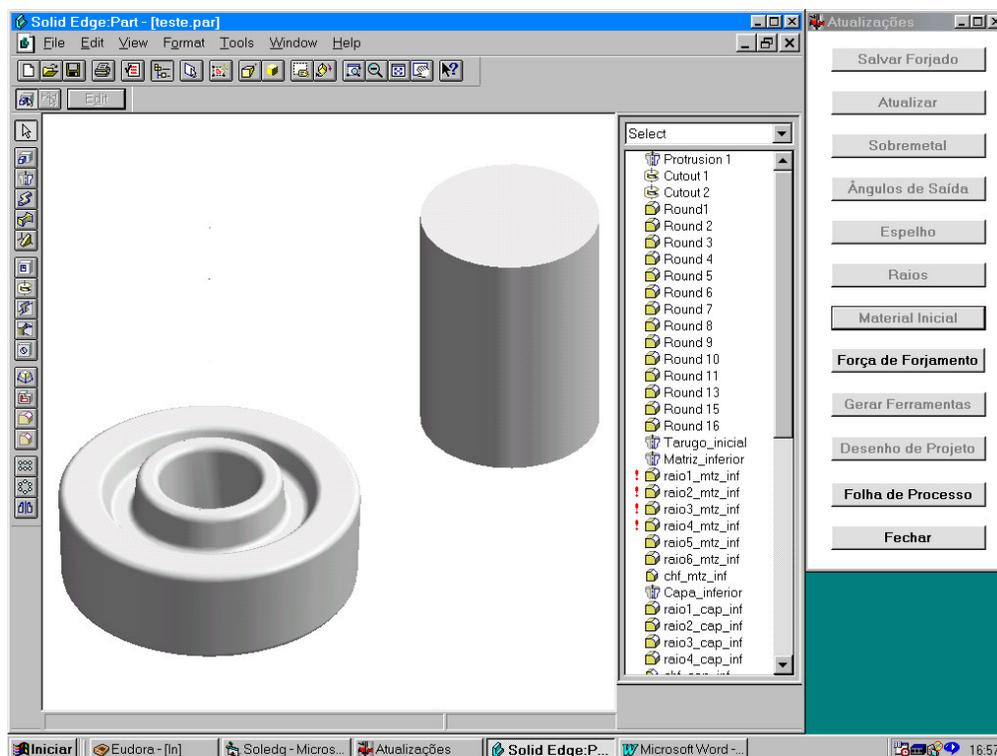


Figura 5. 45 - Área gráfica com o forjado gerado e com o tarugo inicial.

Ao se clicar sobre o botão “Ok” na janela mostrada na Figura 5.43, esse comando irá gerar um tarugo ao lado do sólido do forjado com as dimensões da bitola e do comprimento segundo os valores apresentados após a atualização, e a área gráfica ficará como mostrada na Figura 5.45.

A partir deste ponto inicia-se a fase do desenvolvimento mais complicada pois é necessário um cálculo estimado da força de forjamento em que alguns parâmetros de processo devem ser considerados, tais como matéria prima e sua tensão limite de resistência, temperatura de forjamento recomendada e velocidade de deformação associada ao equipamento. Como discutido no Capítulo 4 o cálculo exato da força de forjamento torna-se inviável em função das diversas variáveis do processo. Assim, para o cálculo aproximado da força de forjamento serão usados os métodos apresentados no Anexo 1 que serão comparados aos resultados obtidos em simulações com o programa *MSC.Superforge*® 2002 (MSC,2002), baseado no método dos volumes finitos.

A janela apresentada na Figura 5.46, mostra uma lista de materiais utilizados na indústria de forjamento de engrenagens de aço. Assim, deve-se selecionar o material empregado no produto em desenvolvimento a partir da lista de materiais na qual, é mostrado o material “8620”.

Imediatamente após a seleção, o sistema apresenta uma lista com materiais similares que permite ao usuário verificar, caso o material desejado não esteja na lista, se existe um similar. Além disso, também é disponibilizada a faixa de temperaturas de forjamento para cada um dos materiais disponíveis.

A temperatura de forjamento deverá ser digitada no campo disponível. O passo seguinte será selecionar o tipo de equipamento a ser usado. Para validar as informações selecionadas deve-se ativar o botão “Ok”, quando será verificado se o valor da temperatura digitado está correto ou seja, dentro dos limites definidos. Caso não esteja, será mostrada uma mensagem para que se faça a correção. Essas situações podem ser vistas nas Figura 5.46 e 5.47.

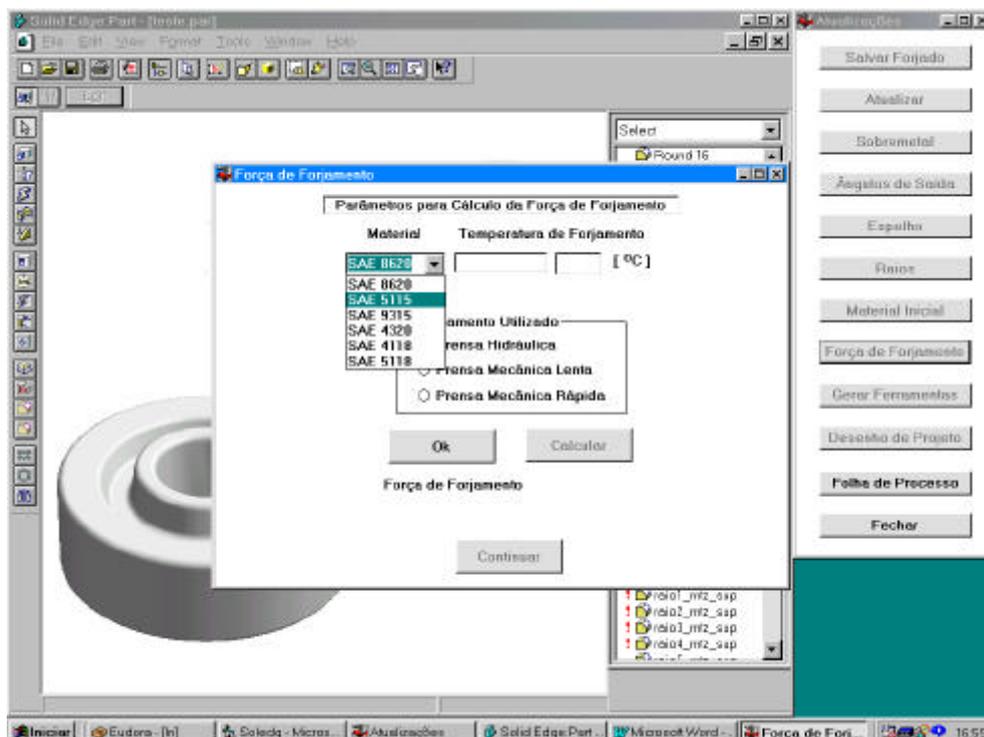


Figura 5. 46 - Tela do *Solid Edge*® com janela “Força de Forjamento” sobreposta.

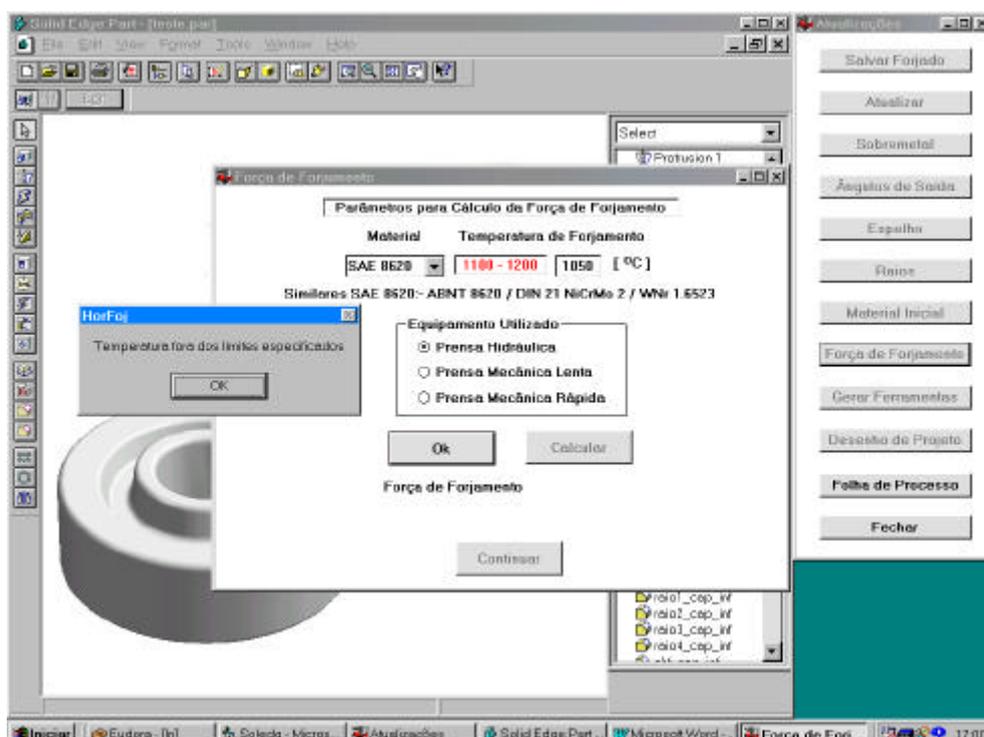


Figura 5. 47 - Janela com a mensagem de irregularidade na temperatura de forjamento selecionada.

A Figura 5.48 apresenta a janela “Força de Forjamento” com as opções corretas selecionadas.

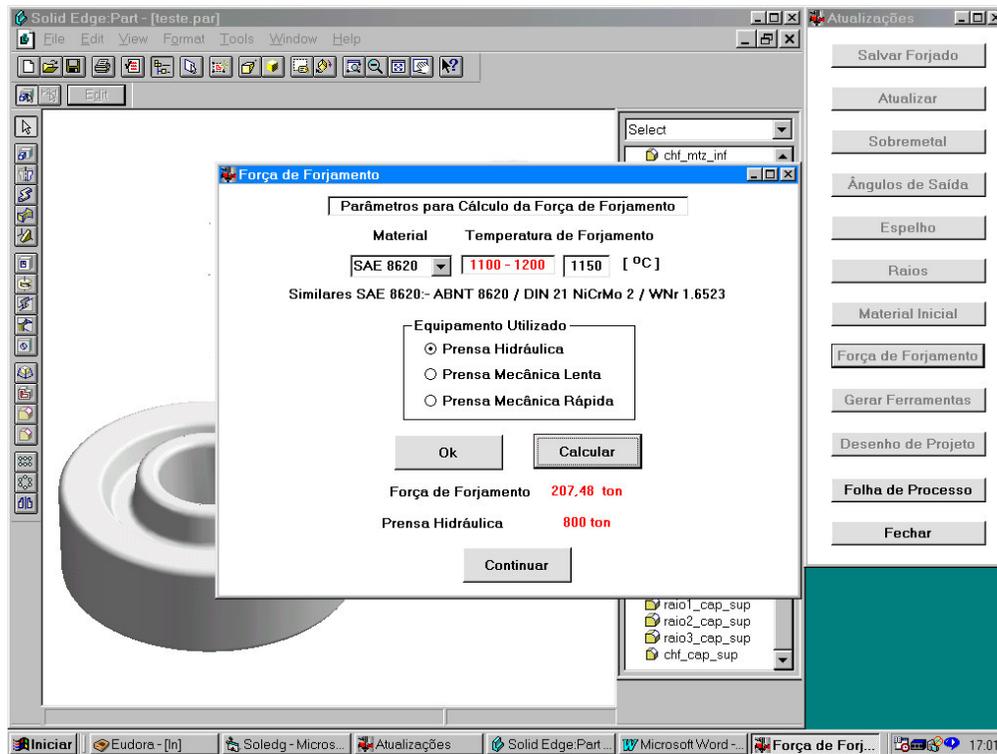


Figura 5. 48 - Janela com a força de forjamento calculada e o equipamento selecionado.

Caso tenha ocorrido algum equívoco na seleção de algum dos itens apresentados na janela “Força de Forjamento” deve-se selecioná-lo novamente e em seguida clicar sobre o botão “OK”, para que o sistema possa reconhecer as alterações e executar os cálculos novamente.

5.2.6 Cálculo da Força de Forjamento pelo APFFQ

Para o cálculo da força de forjamento pelos ábacos de H.Meyer e de Mäkelt, utilizaram-se os dados apresentados na Tabela 5.1, e que foram selecionados para exemplificar um planejamento de processo.

Tabela 5.1 – Dados utilizados no cálculo da força de forjamento.

Parâmetros para cálculo da Força	
Material	= SAE 8620
Temperatura	= 1200°C
Equipamento	= Prensa Mecânica Rápida (Excêntricas)
σ_B	= 79 kgf/mm ² (780 MPa)
k_{fs}	= 3,72 kgf/mm ² (37 MPa)
k_{fd}	= 9,50 kgf/mm ² (94 MPa)
k_{cf}	= 121,48 kgf/mm ² (1190 MPa)
Área projetada	= 13.003,75 mm ² (1)
(1) A área projetada é determinada a partir do maior diâmetro do forjado	

A força de forjamento obtida para essas condições de processo foi igual a 1531×10^4 N (15,3 MN).

O cálculo da força de forjamento pelo ábaco apresentado por Mäkelt apresenta valores para o rendimento, Quadro “III”, os quais não proporcionam valores da força de forjamento condizente com a realidade. Essa diferença foi verificada através de simulações com o *software MSC SuperForge 2002*®.

5.2.7 Cálculo da Força de Forjamento pelo *MSC SuperForge 2002*®

A fim de avaliar o resultado de força de forjamento obtido com o APFFQ, o forjamento de precisão a quente foi simulado com o *software MSC SuperForge 2002*®.

Nas simulações foram definidas algumas condições de processo, como apresentados a seguir.

Quanto à temperatura de forjamento foram analisadas três condições:

- ✓ Temperatura do tarugo:
 - “1” - 950 °C
 - “2” - 1050 °C
 - “3” - 1200 °C

Os equipamentos de forjamento selecionados foram uma prensa hidráulica e uma prensa excêntrica com as seguintes características quanto à velocidade de trabalho:

- ✓ Velocidade da prensa: “1” - 65 mm/s (prensa hidráulica)
“2” - 450 mm/s (prensa excêntrica)

Os materiais foram utilizados segundo a biblioteca disponível no *software* SuperForge e selecionados alguns similares aos utilizados na obtenção de engrenagens forjadas a quente:

- ✓ Materiais: “1” - DIN 1.7015h, similar ao SAE 5115
“2” - DIN 1.7147, similar ao SAE 5120
“3” - DIN 1.7225 , similar ao SAE 4140

- ✓ Pré-forma:

tipo “canoa” simples com 108 mm de diâmetro máximo na parte embarrilada, conforme desenho mostrado na Figura 5.49 e que é comumente utilizada na indústria de forjamento.

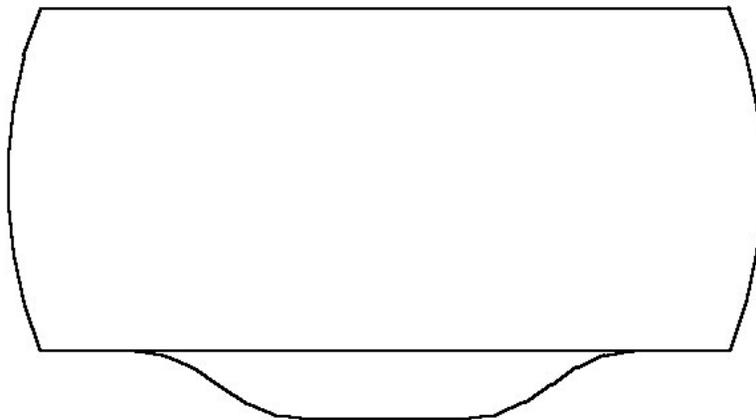


Figura 5. 49 - Desenho esquemático da pré-forma “canoa simples”.

As simulações foram efetuadas considerando:

- ✓ temperatura das matrizes: 380 °C;

- ✓ temperatura ambiente: 20 °C;
- ✓ coeficiente de atrito constante: $\mu = 0,3$;
- ✓ elemento de volume finito com 3 mm de lado e
- ✓ simulação 2D axissimétrica para forjamento a quente em matriz fechada.

Os gráficos da Força de forjamento (F) versus Deslocamento da matriz superior (dm) estão classificados conforme exemplo a seguir:

- ✓ “Condição 123”, tem as seguintes características:
 - primeiro dígito igual a 1 corresponde à primeira temperatura (950 °C) ;
 - segundo dígito igual a 2 corresponde à segunda velocidade de prensa (450 mm/s);
 - terceiro dígito igual a 3 corresponde ao terceiro material (SAE 4140).

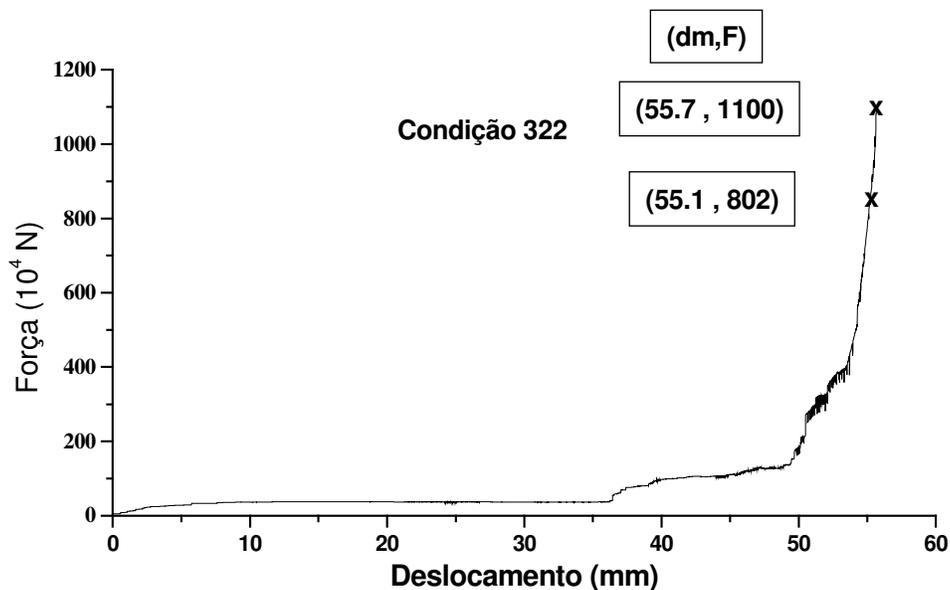


Figura 5. 50 – Gráfico Força de forjamento versus Deslocamento.

O gráfico da Figura 5.50, Força de Forjamento versus Deslocamento da matriz superior, apresenta o comportamento da força de forjamento em função do deslocamento, obtido da simulação conforme a condição 322, isso é, temperatura de forjamento a 1200°C em uma máquina com velocidade de 450 mm/s (coerente com as prensas excêntricas) para o material AISI/SAE 5120, que são condições de processo similares às empregadas nos cálculos com os ábacos de W.Meyer e Mäkelt.

A força máxima de forjamento estimada nessa simulação foi de 11 MN para o deslocamento máximo de 55,7 mm, sendo que nesta condição, a peça estava totalmente preenchida. Entretanto, é interessante destacar que a força aumenta significativamente para um pequeno deslocamento, passando de aproximadamente 8 MN para 11 MN para uma variação de apenas 0,6 mm no deslocamento como ilustrado na Figura 5.50. A Figura 5.51 apresenta a simulação com 98,92% do deslocamento total. Nela verifica-se que apenas uma região no diâmetro maior do forjado, canto superior direito, ainda não está totalmente preenchida. Essa pequena variação do deslocamento representa um aumento de 37,5% na força de forjamento, que é bastante significativo para a escolha da prensa e demonstra a dificuldade de se obter valores exatos da força, mesmo empregando métodos numéricos precisos como o de volumes finitos. Dependendo do raio adotado para essa região, poder-se-ia considerar o processo como já concluído e assim, haveria uma redução sensível da força final de forjamento.

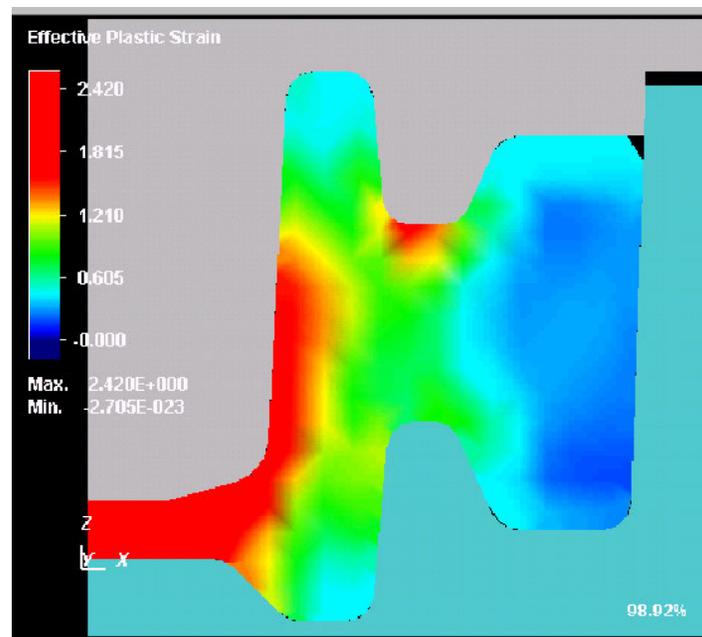


Figura 5. 51 - Simulação apresentando 98,92% do deslocamento.

O valor da força de forjamento calculada pelos ábacos para o exemplo desenvolvido que foi de aproximadamente 1531×10^4 N (15,3 MN), é próximo do valor máximo apresentado pela simulação, de 1100×10^4 N (11 MN). Essa diferença nos valores da força pode ser justificada por algum critério adotado nos cálculos. O mais importante refere-se à falta de uma pré-forma, pois

pelos ábacos considera-se apenas a forma final do forjado. Outro fator importante é o atrito que não é diretamente considerado nos cálculos pelos ábacos. Isso faz com que se tenha uma força de forjamento acima daquela obtida na simulação. Entretanto, as forças de forjamento superestimadas pelos ábacos vão garantir a integridade do equipamento selecionado para a conformação.

Após o cálculo da força, aciona-se o comando “Continuar”, quando a janela “Força de Forjamento” será fechada e o botão “Gerar Ferramentas”, na janela “Atualizações” será ativado. A Figura 5.52 apresenta a tela gráfica final do *Solid Edge*® com o ferramental desenvolvido para o processamento do novo forjado, na qual são mostrados o sólido do forjado com o respectivo tarugo de partida, bem como as matrizes superior e inferior, o extrator, as carcaças e o punção para geração do furo no forjado.

Após o término da geração dos sólidos das ferramentas, o sistema apresenta uma nova janela com o título “Salvar Forjado”, canto superior direito (Figura 5.52), solicitando que o novo forjado seja salvo, caso ainda não o tenha sido no início do desenvolvimento, pois o botão “Ok” dessa janela irá disponibilizar o botão “Desenho de Projeto” e fechar o *Solid Edge*®. Essa janela foi inserida para evitar que o novo forjado seja salvo sobre o arquivo com a geometria primitiva, criada para cada uma das quatro famílias inicialmente desenvolvidas.

Após a geração dos sólidos da peça forjada e das ferramentas o passo seguinte é a geração do desenho de projeto, ou seja, o desenho que será enviado à ferramentaria para posterior confecção. Para a seqüência do planejamento do processo utiliza-se um outro aplicativo do *software Solid Edge*® que é o *Draft* usado para gerar o desenho bidimensional de projeto. Da mesma forma que o *Part*, o *Draft* também é executado pela janela “Atualizações” com o comando “Desenho de Projeto” conforme Figura 5.53.

Assim, o *Solid Edge Draft* é executado e já apresenta uma prancha com um desenho em “2D” de uma engrenagem com geometria similar àquela selecionada no início do desenvolvimento, conforme a Figura 5.54. Novamente, será necessário fazer as atualizações dimensionais e geométricas segundo o novo sólido forjado e ferramental gerados. Para efetivar a atualização do desenho de projeto basta seguir o roteiro mostrado na Figura 5.51.

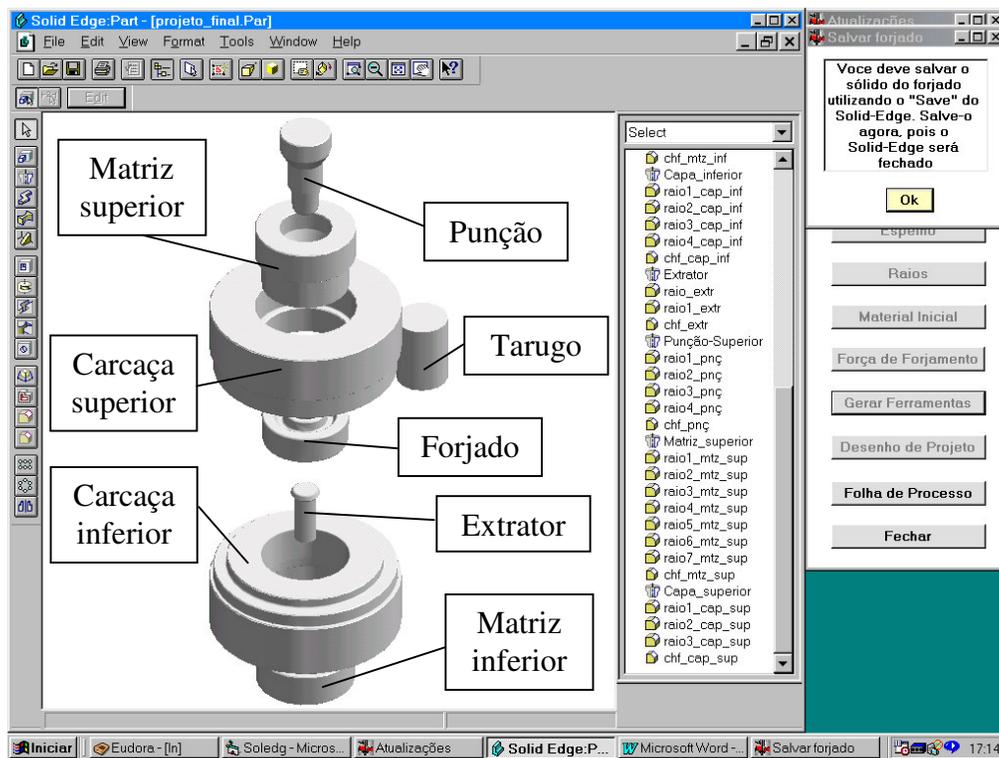


Figura 5. 52 - Tela gráfica final com o ferramental desenvolvido para o novo forjado.

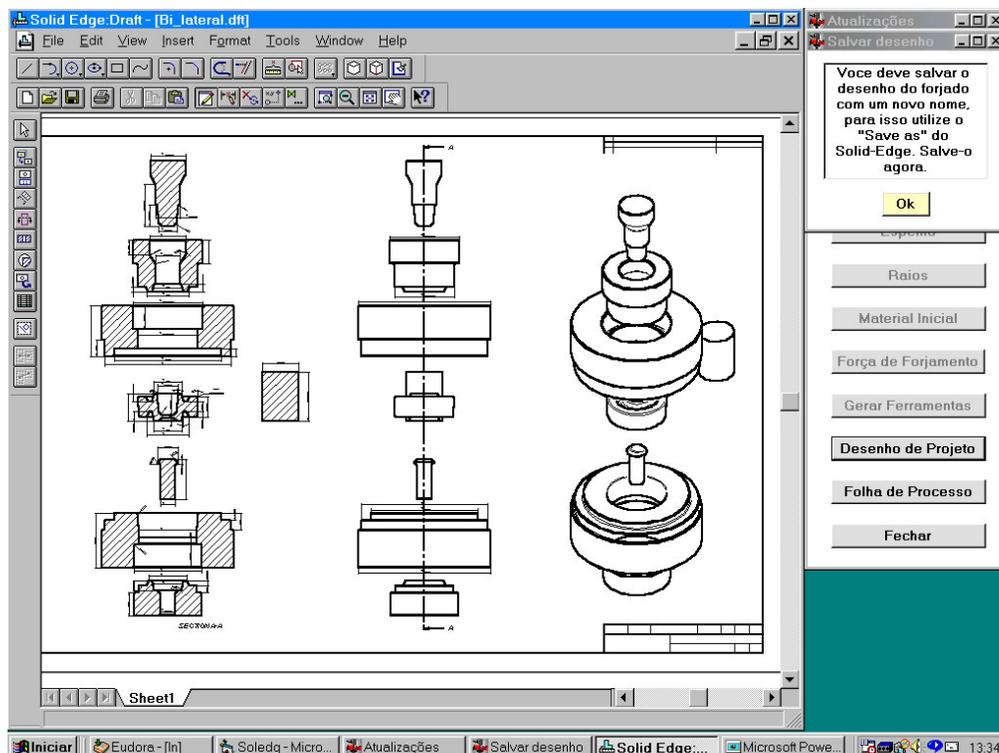


Figura 5. 53 - Tela gráfica do Solid Edge Draft.

A tela da Figura 5.53 apresenta em seu lado direito uma nota alertando para a necessidade de se salvar este arquivo com um novo nome para que não ocorra alteração no desenho de projeto primitivo.

As Figuras 5.54 a 5.59 apresentam as janelas para que a associação (*link*) entre o arquivo do sólido referente ao novo forjado e o arquivo do desenho em duas dimensões, (desenho de projeto), seja efetuada. No lado direito das telas existe uma janela intitulada “Novo Link”, em são apresentados todos os passos até a conclusão do “link” e atualização do desenho de projeto segundo as dimensões do novo forjado.

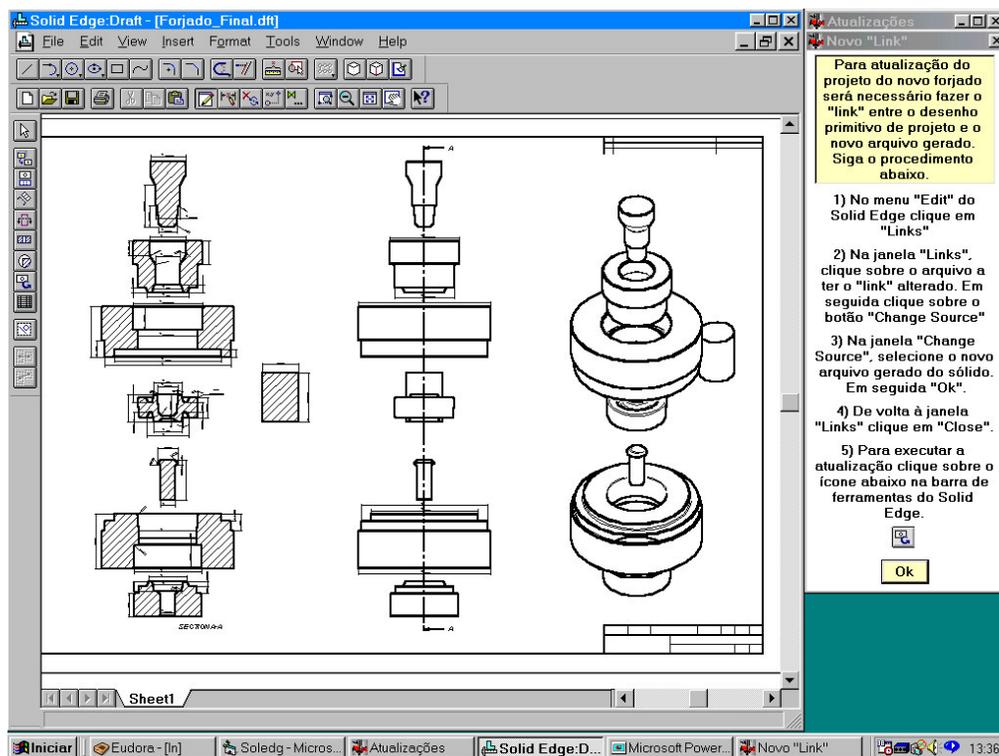


Figura 5. 54 - Janela "Novo Link" procedimento para atualização.

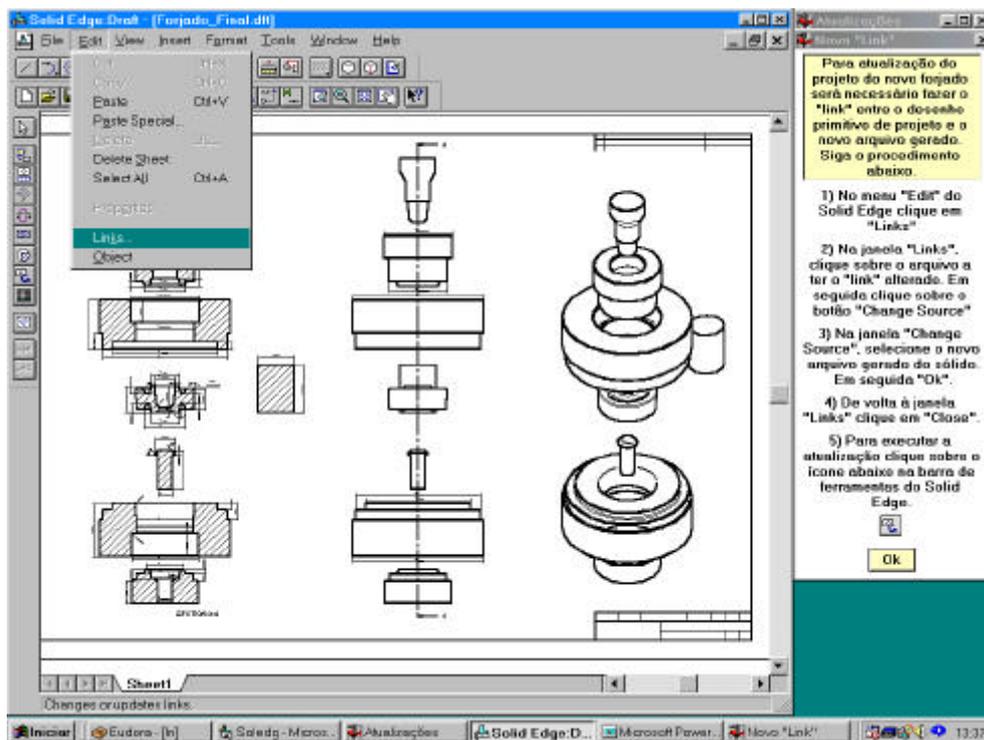


Figura 5. 55 - Comando *Link* no menu *Pull Down*.

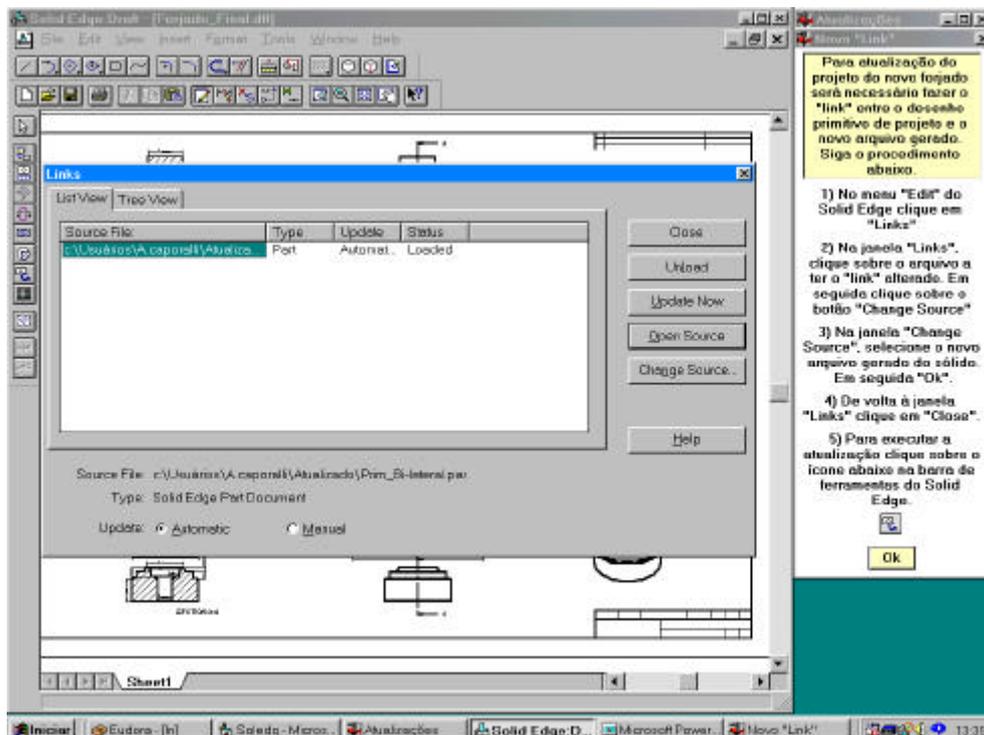


Figura 5. 56 - Janela Links com o arquivo tipo *Part* a ser conectado.

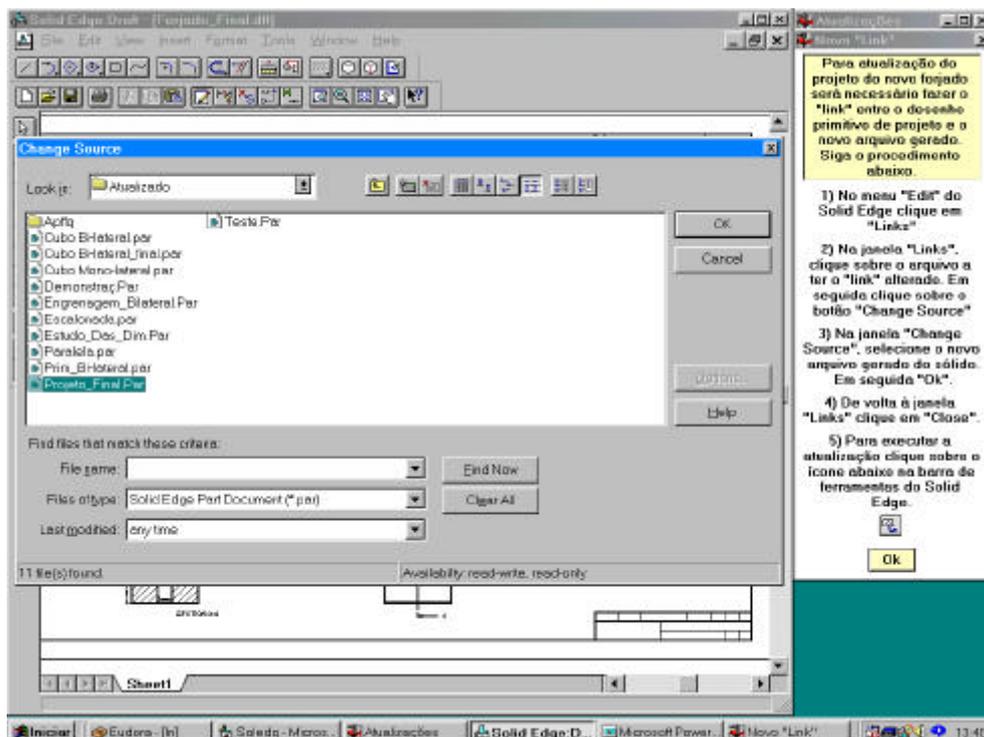


Figura 5.57 - Janela *Change Source*.

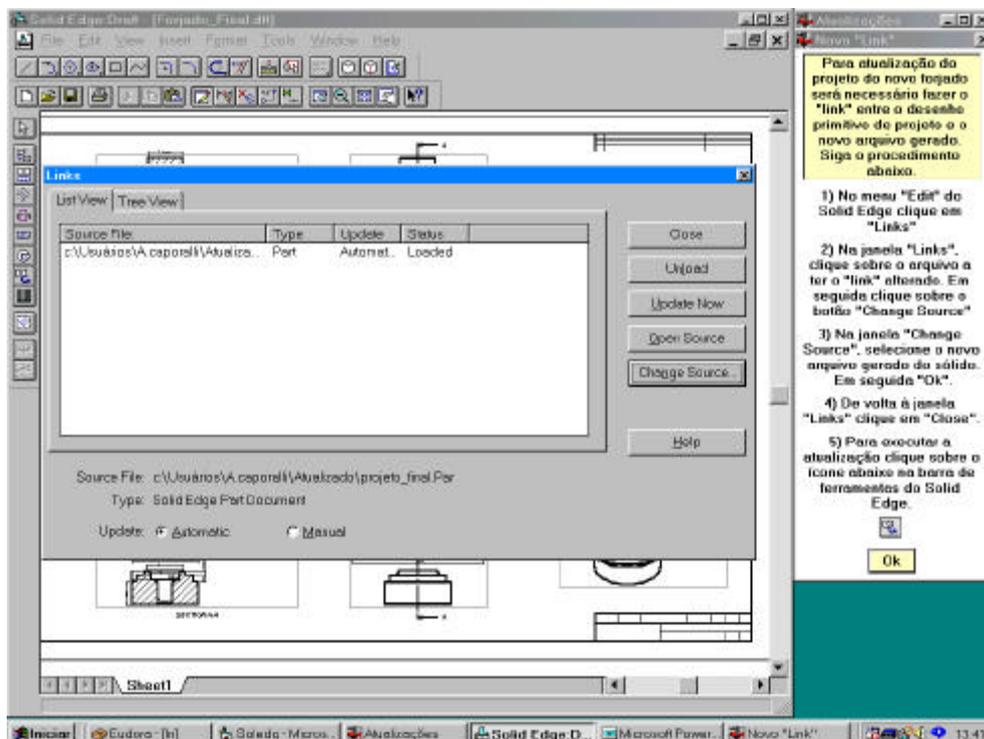


Figura 5.58 - Janela *Link* pronta para ser fechada e consolidada a conexão entre os arquivos.

A Figura 5.58 apresenta a janela *Change Source*, que disponibiliza o endereço onde os arquivos com extensão *.par* estão armazenados. Deve-se selecionar o arquivo gerado do novo forjado, clicando-se sobre o novo arquivo e posteriormente no botão “Ok”. A Figura 5.59 apresenta a tela final do *Solid Edge*® relativa à geração do *link*.

A Figura 5.60, apresenta a prancha com o desenho primitivo que será atualizado. Nessa fase, o desenho aparece com bordas tracejadas em torno de cada uma das vistas Figura 5.60, que indicam que este arquivo está vinculado, ou “linkado” com um outro arquivo e não com o do último forjado desenvolvido. Essas bordas desaparecerão após a execução do comando “*Up date*” (Atualizar) do *Solid Edge*®.

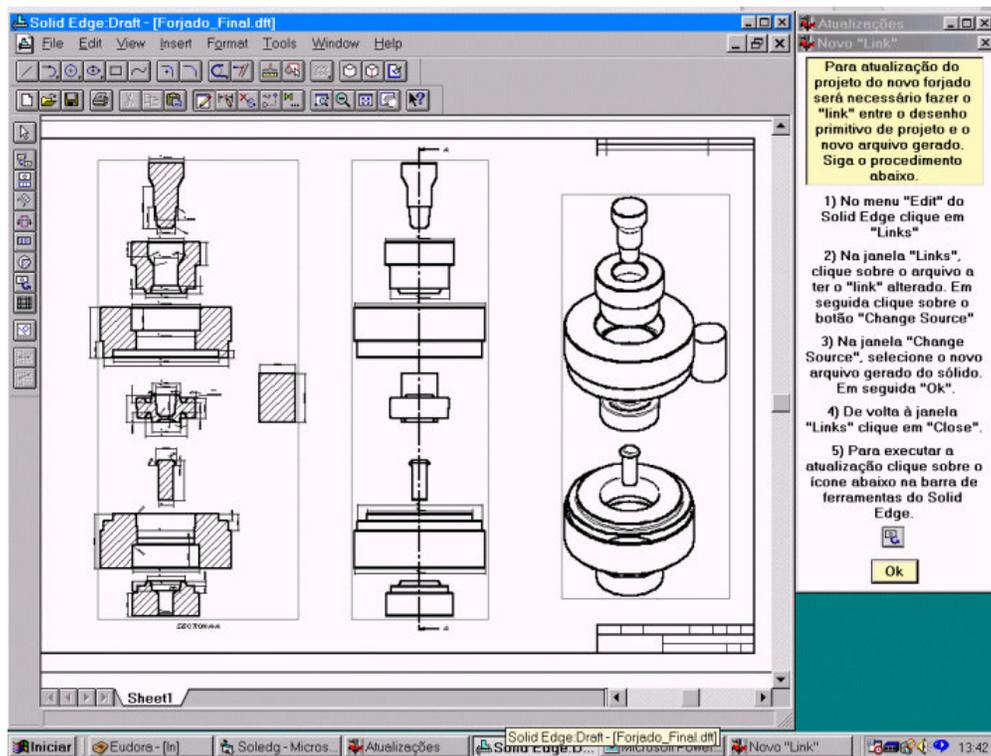


Figura 5. 59 - Prancha mostrando as bordas em cada uma das vistas.

Após a finalização do desenvolvimento do novo forjado e já com o desenho de projeto concluído e atualizado, o *Solid Edge Draft* poderá ser fechado. Assim, para concluir o planejamento de todo processo e aplicação do “APFFQ” emite-se um relatório final de processo com todas as informações geradas ao longo do desenvolvimento, como dimensões atribuídas, características geométricas do forjado, material utilizado, temperatura de forjamento, volume

calculado, diâmetro da bitola inicial, comprimento de corte e força de forjamento. Esse formulário pode ser visto na Figura 5.61.

Folha de Processo no.:-

discriminação:-

Características da peça forjada

diâmetro externo:-	153,6 mm
diâmetro do cubo anterior:-	65 mm
diâmetro do cubo posterior:-	68 mm
altura do cubo anterior:-	19,8 mm
altura do cubo posterior:-	26,8 mm
espessura do dente:-	48,6 mm
ângulo de saída externo:-	2°
ângulo de saída do furo:-	3°
diâmetro do furo:-	45 mm
diâmetro externo da alma:-	100 mm
profundidade do furo:-	47,5 mm
profundidade anterior:-	12,8 mm
profundidade posterior:-	17,8 mm
sobremetal adotado:-	1,8 mm

materia prima:-	SAE 9315
temperatura de forjamento:-	1150 °C
volume do forjado:-	801 733,00mm ³
comprimento de corte:-	129,16 mm
diâmetro inicial do tarugo:-	86,90 mm

força de forjamento:-	296,51 ton
-----------------------	------------

Data

Projetista

Revisado

Responsável

Observações:-

Figura 5. 60 - Formulário final com informações sobre o processo desenvolvido.

5.2.8 Avaliação do APFFQ para um Caso Industrial

Com o objetivo de avaliar o sistema desenvolvido, buscou-se um exemplo industrial junto a uma empresa que tem o forjamento a quente como um de seus principais processos de fabricação (informação verbal)⁴.

A Figura 5.62 apresenta o perfil do forjado obtido pelo procedimento convencional para o planejamento do processo, como descrito no item 1.2 p.4. Nesse procedimento, o tempo gasto

⁴ Cândido M.A., Eaton Divisão Transmissões, Departamento de Engenharia de Forjados.

para conclusão dos desenhos de fabricação do forjado e dos desenhos de todas as ferramentas necessárias, é de aproximadamente 25 (vinte e cinco) horas, conforme informação verbal obtida do projetista responsável.

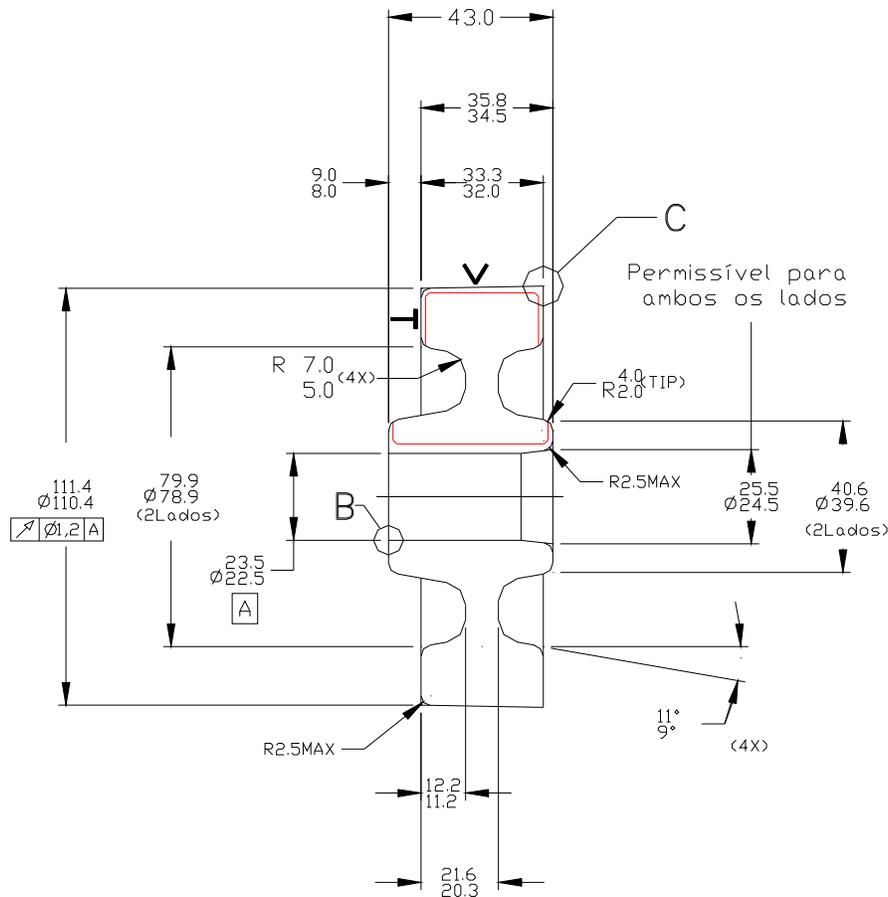


Figura 5. 61 - Figura obtida através do planejamento do processo na indústria utilizando-se o *software* AutoCAD, criado manualmente, (cortesia EATON Divisão Transmissões).

A linha vermelha na Figura 5.62 representa o perfil usinado final e foi empregado para obter-se as dimensões do perfil usinado, que não estavam disponíveis.

Essas dimensões foram inseridas no APFFQ seguindo o procedimento descrito no item 5.2.5 e obteve-se o perfil do forjado mostrado na Figura 5.63.

Capítulo 6

Conclusões e Propostas para Trabalhos Futuros

6.1 Conclusões

As seguintes conclusões podem ser enumeradas a partir do desenvolvimento e utilização do sistema especialista proposto:

- 6.1.1. A primeira conclusão é a mais importante e relaciona-se aos objetivos do trabalho que foram plenamente alcançados, pois com o uso do sistema especialista desenvolvido demonstrou-se que houve uma redução acentuada nos tempos de planejamento do processo e, conseqüentemente, dos custos relacionados ao projeto de engrenagens forjadas.
- 6.1.2. Outra conclusão refere-se à utilidade do sistema proposto. O sistema mostrou-se útil e eficiente no desenvolvimento de novos planejamentos de processos de forjamento para as engrenagens, proporcionando ao projetista uma visão geral do projeto e permitindo-lhe verificar as diversas etapas de projeto do produto forjado e de suas ferramentas.
- 6.1.3. O sistema também se mostrou de fácil utilização, que foi proporcionada pela interface desenvolvida que permite ao projetista facilidades na atribuição de valores durante o planejamento do processo e projeto do novo forjado. Graças a essa interface, o sistema

apresenta, e exige, poucas informações em forma de texto, já que grande parte do planejamento se dá de forma gráfica e apresenta ao projetista a seqüência de desenvolvimento do projeto a ser seguida.

6.1.4. Como grande parte das ferramentas que têm a informática como base de seu desenvolvimento, este sistema também tem algumas desvantagens ou problemas que deverão ser oportunamente sanados. A principal desvantagem refere-se à automação que é suficiente para os objetivos inicialmente propostos, mas que pode ser aumentada de modo a tornar o planejamento do processo mais eficaz e menos susceptível a erros do projetista.

6.1.5. Quanto aos *softwares* utilizados, conclui-se que foram bem selecionados pois a facilidade de se programar o *Solid Edge*® por meio de rotinas do *Visual Basic*®, em muito facilitou a elaboração e avaliação dessas rotinas.

6.2 Propostas para Trabalhos Futuros

6.2.1. Aprimorar o sistema APFFQ com a inclusão de rotinas para o projeto de pré-formas;

6.2.2. Inserir outras famílias de peças para esse mesmo processo de forjamento a quente.

6.2.3. Integrar o APFFQ com *softwares* de simulação numérica para possibilitar a análise das forças de forjamento e do escoamento do material;

6.2.4. Desenvolver um sistema semelhante para o forjamento em recaladoras a quente de peças de revolução;

6.2.5. Desenvolver um sistema semelhante para o forjamento a frio de eixos extrudados e recalcados;

6.2.6. Aproveitar o sólido do forjado gerado pelo *Solid Edge*® integrando-o a um *software* de CAM para geração dos códigos de usinagem por CNC, o que facilitaria e aprimoraria o planejamento do processo como um todo e

6.2.7. Integrar o sistema especialista com um sistema de gerenciamento do ferramental, utilizando para isso técnicas de Tecnologia de Grupo, com a codificação dos itens de cada ferramental proporcionando a utilização de itens comuns a produtos diferentes.

Referências Bibliográficas

- Aberšek, B., Flašker, J., Balič, J., Expert System for Designing and Manufacturing of a Gear Box, *Expert Systems With Applications*, v.11, n.3, pp 397-405, 1996.
- Akgerman, N. and Altan, T., Modular Analysis and Stresses in Closed-Die Forging: Application to a Structural Part, *Journal of Engineering for Industry*, v.94, n.4, pp. 1025-1034, 1972.
- Akgerman N. and Altan T., Application pf CAD/CAM in Forging Turbine and Compressor Blades, *Journal of Engineering for Power*, pp. 290-296, April, 1976.
- Alberti N., and Cannizzaro L., and Micari F., Knowledge-Based Systems and F.E. Simulations in Metal-Forming Processes Design an Integrated Approach, *Annals of the CIRP*, v.40, n.1, pp. 295-298, 1991.
- Altan T., Design and Manufacture of Dies and Molds, *Annals of the CIRP*, v.36, n.2, pp. 455-462, 1987.
- Altan T. and Miller R.A., Design for Forming and Other Near Net Shape Manufacturing Processes. *Annals of the CIRP*, v.39, n.2, pp. 609-620, 1990.
- Altan T., Oh S., and Gegel H., *Conformação de Metais, Fundamentos e Aplicações*, EESC/USP, Projeto REENGE, 1999.

ASM Forging Design Handbook, American Society for Metals, 308 p., 1972.

ASM Metals Handbook, vol. 5, Forging and Casting, 8ª edição, American Society for Metals, 1974.

ASM Metals Handbook, vol. 14, Forging, 9ª edição, ASM International, 1988.

Azushima A., and Kim M., A PS-Based Expert System for Forming Sequence Design, *Annals of the CIRP*, v.39, n.1, pp. 245-248, 1990.

Barker A.J., Numerical Engineering in Car Body Manufacture, *Machinery and Production Engineering*, pp. 268-277, July, 1968.

Bariani P., and Knight W.A., Computer Aided Cold Forming Design: Determination of Machine Setting Conditions, *Annals of the CIRP*, v.34, n.1, pp. 245-248, 1985.

Bariani P., Benuzzi E., and Knight W.A., Computer Aided Design of Multi-Stage Cold Forging Process: Load Peaks and Strain Distribution Evaluation, *Annals of the CIRP*, v.36, n.1, pp. 145-148, 1987.

Bariani P., and Knight W.A., Computer-Aided Cold Forging Process Design: A Knowledge-Based System Approach to Forming Sequence Generation, *Annals of the CIRP*, v.37, n.1, pp. 243-246, 1988.

Billigmann J., Feldmann H.D., *Estampado y Prensado a Máquina*, Segunda edición, Editorial Reverté, S.A., 1979.

Biswas S.K., and Knight W.A., Preform Design For Closed Die Forgings: Experimental Basis For Computer Aided Design, *International Journal of Machine Tool Design and Research*, v.15, pp. 179-193, 1975.

Biswas S.K., Knight W.A., Computer-Aided Design of Axisymmetric Hot Forging Dies, *Proceedings of the Fifteenth International Machine Tool Design and Research Conference (MTDR)*, pp. 135-143, Birmingham, England, 1974, London, 1975.

Biswas S.K., Knight W.A., Towards an Integrated Design and Production System for Hot Forging Dies, *International Journal of Production Research*, v.14, n.1, pp. 23-49, 1976.

Bramley A.N., Computer Aided Forging Design, *Annals of the CIRP*, v.36, n.1, pp. 135-138, 1987.

Bramley A.N., Lugora C.F., and Osman F.H., Forging Process Modeller – A Feasibility Study, *Annals of the CIRP*, v.39, n.1, pp. 227-230, 1990.

Button S.T., EM-730 Conformação Mecânica Planejamento do Processo e Projeto de Matrizes para o Forjamento a Quente, 1998.

<http://www.fem.unicamp.br/%7Eesergio1/graduacao/EM730/forjequente.html>

CBF-Centro Brasileiro de Forjarias, Manual da Indústria de Forjamento, Vol.02, 1990.

Choi S.H., and Dean T.A., Computer Aided Design and Machining of Roller Dies for Forging Hammers, *International Journal of Machine Tool Design and Research*, vol. 24, n 2, pp.121-131, 1984.

Choi S.H., and Dean T.A., Computer Aided Design and Machining of Fuller Dies for Forging Hammers, *International Journal of Machine Tool Design and Research*, vol. 24, n 3, pp.181-194, 1984.

Chan Y.K., Mullineux G. and Knight W.A., Computer-aided design and manufacture of hot forging dies, *Metallurgia*, January, pp. 24-30, 1980.

DeGarmo E.P., Black J.T. and Kohser R.A., *Materials and Processes in Manufacturing*, Eighth Edition, Prentice Hall, 1997, Cap. 17: Fundamentals of Metal Forming, p. 446-463.

Di Lorenzo R., Fratini L., Filice L., Micari F. and Bruschi S., Comparison of Analytical Methods and AI Tools for Material Characterization in Hot Forming, *Journal of Materials Processing Technology*, v.125-126, pp. 434-439, 2002.

Dobrzański L.A, Madejski J., Malina W. and Sitek W., The Prototype of an Expert System for the Selection of High-Speed Steels for Cutting, *Journal of Materials Processing Technology*, v.56, pp. 873-881, 1996.

Doege E., Bohnsack R., Closed Die Technologies for Hot Forging, *Journal of Materials Processing Technology*, v.98, pp. 165-170, 2000.

Douglas R., Kuhlmann D., Guidelines for Precision Hot Forging with Applications, *Journal of Materials Processing Technology*, v.98, pp. 182-188, 2000.

Drozda T.J., Money-saving Innovations in Automatic Forming, *Manufacturing Engineering*, v.90, n.2: pp. 32-39, 1983.

Eversheim W., and Miese M., Group Technology Development and Modes of Application, *Proceedings of the Fifteenth International Machine Tool Design and Research Conference (MTDR)*, pp. 7-18, Birmingham, England, 1974, Macmillan, London, 1975.

Fujikawa S. and Ishii K., Diagnostic Expert Systems for Defects in Forged Parts, *Journal of Intelligentm Manufacturing*, vol. 6, pp. 163-173, 1995

Gallardo M., M., Herramientas de Conformar, Editorial Pueblo Y Educación, 1ª edição, 1986.

Glynn D., Lyons G., Monaghan J., Forging Sequence Design Using an Expert System, *Journal of Material Processing Technology*, v.55: pp. 95-102, 1995.

Gokler M.I., and Dean T.A., Computer-aided Sequence Design for Piercing on Horizontal Forging Machines, *Journal of Mechanical Working Technology*, v.8, pp. 13-26, 1983.

Grüning, K., Técnica da conformação, Ed. Polígono, São Paulo, 1973.

Hartley P., Sturgess C.E.N., Dean T.A., and Rowe G.W., Forging Die Design and Flow Simulation: Their Integration in Intelligent Knowledge-Based Systems, *Journal of Mechanical Working Technology*, v.15, pp. 1-13, 1987.

Hong-Vu Kh., and Birch D.W., Integration of CAD/CAM/CAE in na Aerospace Forging Company, Advanced Technology of Plasticity, *Proceedings of the Second International Conference on Technology of Plasticity (ICTP)*, Stuttgart, Germany, August, 1987, 1, pp. 161-167, Springer-Verlag.

Im Y. -T., A Computer-Aided-Design System for Forming Processes. *Journal of Materials Processing Technology*, v.89-90, pp.1-7, 1999.

Kalpakjian S., Manufacturing Processes for Engineering Materials, Second Edition, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1991.

Kim D. -Y., Park J. -J., Development of a Expert System for the Process Design of Axisymmetric Hot Steel Forging. *Journal of Material Processing Technology*, v.101: pp.223-230, 2000.

Kim H. -S., Im Y. -T., Expert System for Multi-Stage Cold-Forging Process Design With a Re-designing Algorithm, *Journal of Material Processing Technology*, v.54, pp.271-285, 1995.

Kim H., and Altan T., Computer-aided Part and Processing-sequence Design in Cold Forging, *Journal of Materials Processing Technology*, v.33, pp. 57-74, 1992.

Kim H., and Altan T., Cold Forging of Steel – Practical Examples of Computerized Part and Process Design, *Journal of Materials Processing Technology*, v.59, pp. 122-131, 1996.

King, B., Expert Systems in Manufacturing,

[http://osiris.sunderland.ac.uk/research/es_ai/brent/es.htm#\[Esp90\]](http://osiris.sunderland.ac.uk/research/es_ai/brent/es.htm#[Esp90]), consultado em 1994.

Knight W.A. and Poli C.R., Product Design for Economical Use of Forging, *Annals of the CIRP*, v.30, n.1, pp. 337-342, 1981.

Knight W.A. and Poli C.R., Design for Economical Use of Forging: Indication of General Relative Forging Costs, *Annals of the CIRP*, v.31, n.1, pp. 159-163, 1982.

Kudo H., Towards net-shape forming. *Journal of Material Processing Technology*, v.22: pp.307-342, 1990.

Kuhlman, G.W., Metals Handbook, Forging of Titanium Alloys, Nona Edição, v.14, 267-287, ASM, Metals Park, Ohio 1988.

Mamalis, A.G., Manolakos, D.E., Baldoukas, A.K., Simulation of the Precision Forging of Bevel Gears Using Implicit and Explicit FE Techniques, *Journal of Material Processing Technology*, v.57: pp.164-171, 1996.

Marcicano J.P.P., *Matrizes de Forjamento Projeto Auxiliado por Computador*, São Paulo 1995 118p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

Martin B., Subramanian G.H. and Yaverbaum G.J., Benefits from Expert Systems: Na Exploratory Investigation, *Expert Systems With Applications*, v.11, n.1, pp. 53-38, 1996.

MSC SuperForge 2002®, www.superforge.com, consultado em 19.02.2003.

Niebel B.W., Na Analytical Technique for the Selection of Manufacturing Operations, *The Journal of Industrial Engineering*, v.17, n.11, pp. 598-603, 1966.

Osakada K., Kado T., and Yang G. B., Application of AI-Technique to Process Planning of Cold Forming, *Annals of the CIRP*, v.37, n.1, pp. 239-242, 1988.

Osakada K., Yang G. B., Nakamura T., and Mori K., Expert System for Cold-Forging Process Based on FEM Simulation, *Annals of the CIRP*, v.39, n.1, pp. 249-252, 1990.

Osakada K., and Yang G. B., Neural Networks for Process Planning of Cold Forging, *Annals of the CIRP*, v.40, n.1, pp. 243-246, 1991.

Rossi, M., *Estampado en caliente de los metales*, Ed. Hoepli, Barcelona, 1971.

Rowe G.W. An Intelligent knowledge-based system to provide design and manufacturing data for forging, *Computer-Aided Engineering Journal*, February, pp. 56-61, 1987.

Sevenler K., Raghupathi P.S., and Altan T., Forming-sequence Design for Multistage Cold Forging, *Journal of Mechanical Working Technology*, v.14, pp. 121-135, 1987.

Sitaraman S.K., Kinzel G.L. and Altan T., A Knowledge-based System for Process-sequence Design in Axisymmetric Sheet-metal Forming, *Journal of Materials Processing Technology*, v.25, pp. 247-271, 1991.

Solid Edge®, <http://www.solidedge.com/>, consultado em 19.02.2003.

Song J.-H. , Im Y. -T., Expert System for the Process Sequence Design of a Ball Stub, *Journal of Materials Processing Technology*, 89-90, pp. 72-78, 1999.

Subramanian T.L., and Altan T., Application of Computer-Aided Techniques to Precision Closed-Die Forging, *Annals of the CIRP*, v.27, n,1, pp. 123-127, 1978.

Tisza, M., Expert Systems for Metal Forming, *Journal of Materials Processing Technology*, v.53, pp. 423-432, 1995.

Vemuri, K.R., Sevenler, K., Raghupathi, P.S., Oh, S.I., Altan, T., Rules and Guidelines for Designing Blocker/Preform Dies in Closed Die Forging with and without flash, Final Report to The National Science Foundation, July 9, 1987. Battelle, Columbus Division.

Vemuri, K.R., Oh S.I. and Altan T., BID: A Knowledge-Based System to Automate Blocker Design, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v.29, n.4, pp. 505-518, 1989.

Viecelli, A., Schaeffer, L., Um *software* para o projeto de matrizes para peças axissimétricas com rebarba, MM, pp. 66-96, dezembro, 1995.

Viglieno, S., Flexibilidade e precisão obtidas com a prensa de fricção, III Seminário de Tecnologia de Forjamento, ABM, São Paulo, pp.IX-03-IX-24, Outubro, 1989

Visual Basic®, <http://www.visualbasic.com>, consultado em 19.02.2003.

Yang, G. and Osakada K., A Review of Expert Systems for Process Planning of Cold Forging, *Manufacturing Review*, v.6, n.2, June 1993.

Yu, G.B. and Dean T.A., A Pratical Computer-Aided Approach to Mould Design for Axisymmetric Forging Die Cavities, *International Journal of Machine Tool Design and Research*, vol. 25, n 1, pp.1-13, 1985.

Anexos

Anexo I

Métodos Empregados para o Cálculo da Força de Forjamento

Para aplicar-se o ábaco apresentado por Mäkelt, (Figura A.I.1) parte-se da temperatura de trabalho e do limite de resistência σ_B do material a ser forjado (Quadro “I”). Com essas informações, obtêm-se a resistência estática à deformação (k_{fs}). No Quadro “II” é necessário conhecer a velocidade de deformação, característica da máquina a ser empregada no trabalho, assim obtêm-se a resistência ideal dinâmica à deformação (k_{fd}). No Quadro “III”, deve-se inserir o rendimento do processo de deformação, que é dependente das dimensões finais da peça, bem como de detalhes de sua geometria, em que se pode distinguir três casos para forjamento a quente, conforme a Figura A.I.2.

- ✓ Recalque livre por matrizes com superfícies planas paralelas, em que é utilizada a relação d_1 / h_1 , (I)
- ✓ Forjado em matriz fechada com rebarba, com condições geométricas (a) e (b), de rebarba livre e com bacia de rebarba, respectivamente, em que é utilizada a relação b / h_g , (II)
- ✓ Recalque em matriz fechada sem rebarba em que vale a relação aproximada $d_1 / 2h_{1m}$ do perfil acabado, (III).

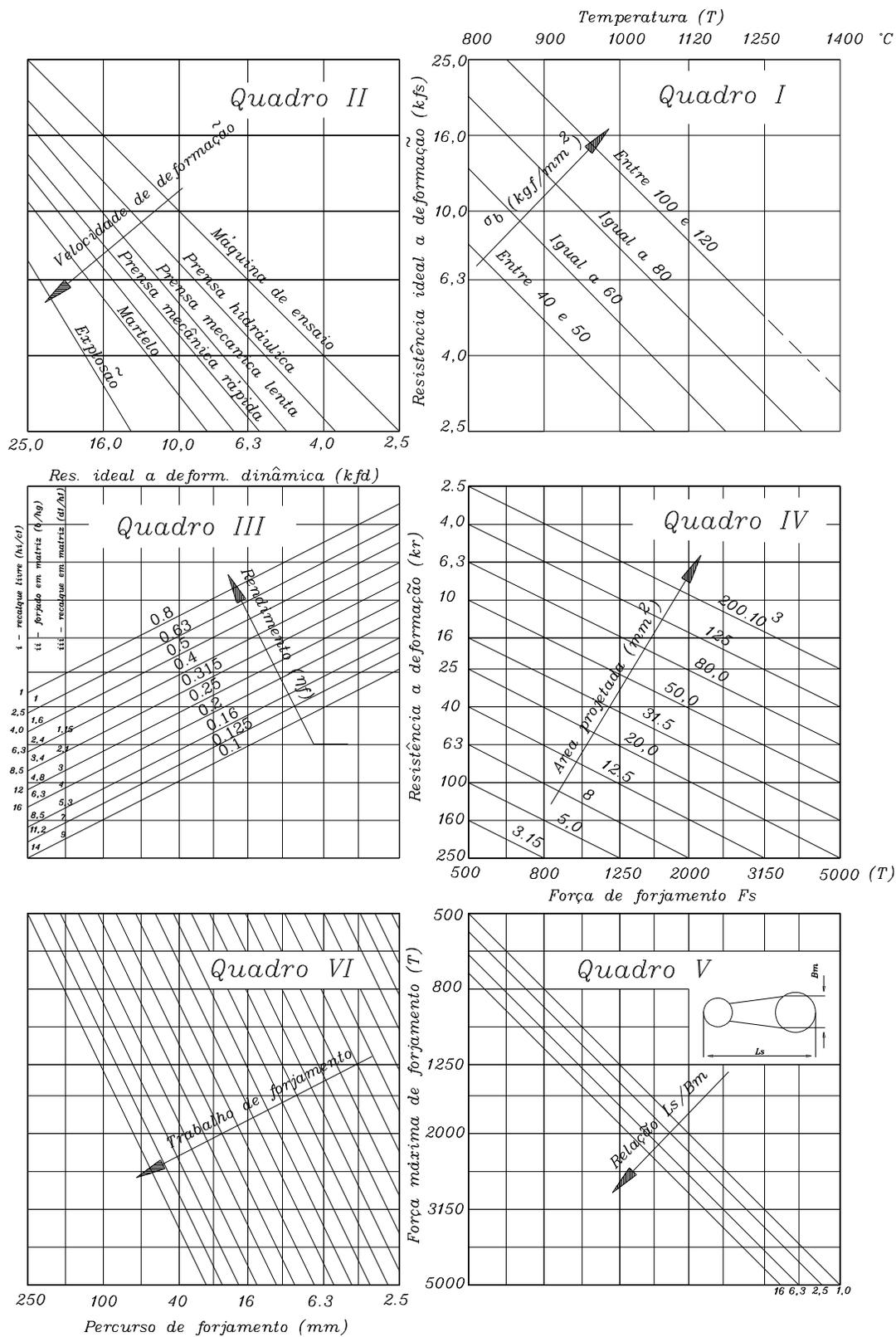


Figura A.I. 1 - Diagrama segundo Mäkel para o cálculo da força de forjamento.

No sistema especialista proposto utilizou-se a condição de recalque “III” apresentada na Figura A.I.2. Essa decisão foi tomada pelo fato de trabalhar-se com peças forjadas de precisão, sem rebarba.

No Quadro “IV” toma-se a maior área transversal “**A_{proj}**” resultando na força de forjamento “**F**”.

Por tratar-se de peças cuja geometria é obtida a partir de perfis revolucionados, os Quadros “V” e “VI” não serão discutidos.

Para facilidade dos cálculos pode-se utilizar as expressões mostradas no Quadro A.I.1, que relacionam os parâmetros de cálculo para cada quadro do diagrama conforme Button (1998). Na Tabela A.I.1 **a** e **b** são constantes associadas ao rendimento do processo.

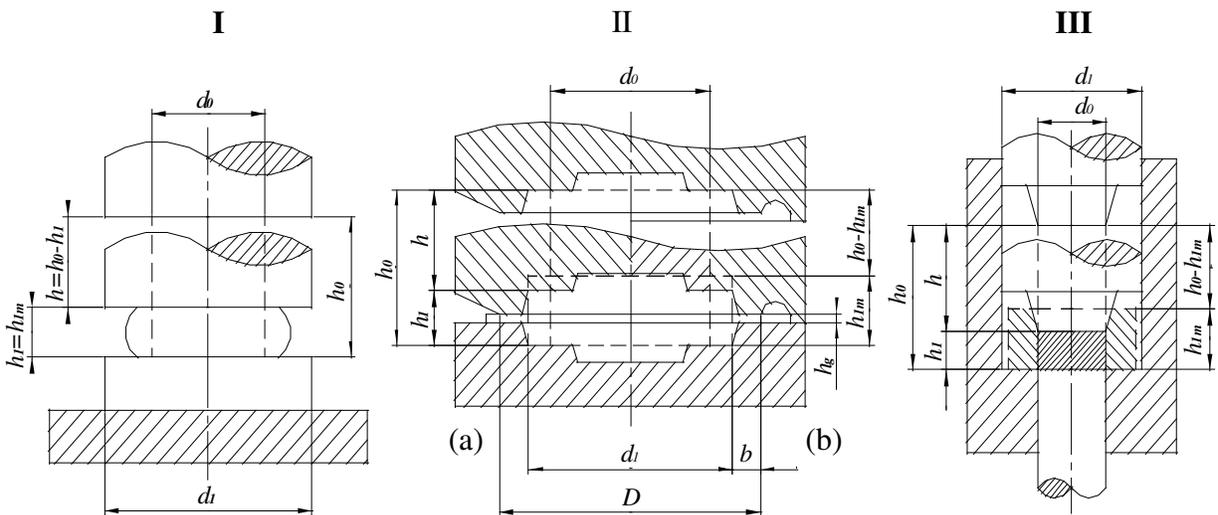


Figura A.I. 2 - Condições de forjamento.

Quadro A.I. 1 - Expressões para o cálculo de k_{fs} , k_{fd} , k_r .

<u>Quadro "I"</u>	
σ_B entre 40 e 50 kgf/mm ²	$k_{fs} = 0,112.10^{14} .T^{-4.18}$
σ_B igual a 60 kgf/mm ²	$k_{fs} = 0,487.10^{13} .T^{-4.0}$
σ_B igual a 80 kgf/mm ²	$k_{fs} = 0,146.10^{14} T^{-4.09}$
σ_B entre 100 e 120 kgf/mm ²	$k_{fs} = 0,180.10^{15} .T^{-4.39}$
<u>Quadro "II"</u>	
Máquinas de ensaio	$k_{fd} = k_{fs}$
Prensa Hidráulica	$k_{fd} = 1,47.k_{fs}^{0.95}$
Prensa mecânica lenta	$k_{fd} = 2,59.k_{fs}^{0.84}$
Prensa mecânica rápida	$k_{fd} = 3,5. k_{fs}^{0.76}$
<u>Quadro "III"</u>	
$k_r = a.(k_{fd})^b$	
<u>Quadro "IV"</u>	
$F = k_r . A_{proj}$	

Tabela A.I. 1 - Valores de a e b em função do rendimento do processo.

Rendimento	A	B	Rendimento	a	B
0,8	1,26	1	0,25	3,84	1,02
0,63	1,71	0,952	0,2	4,15	1,12
0,5	2,14	0,952	0,16	6,15	1,02
0,4	2,78	0,909	0,125	7,34	1,06
0,375	2,94	1,05	0,1	9,84	1,02

No ábaco apresentado por H. Meyer, (Figura A.I.3) a força de forjamento é fortemente influenciada pela temperatura e pelo equipamento utilizado no processo de conformação. Dessa forma, a aplicação desse ábaco tem início utilizando-se informações do equipamento e das

dimensões iniciais da peça a ser forjada, passando posteriormente pela temperatura de trabalho e em seguida pela geometria do forjado.

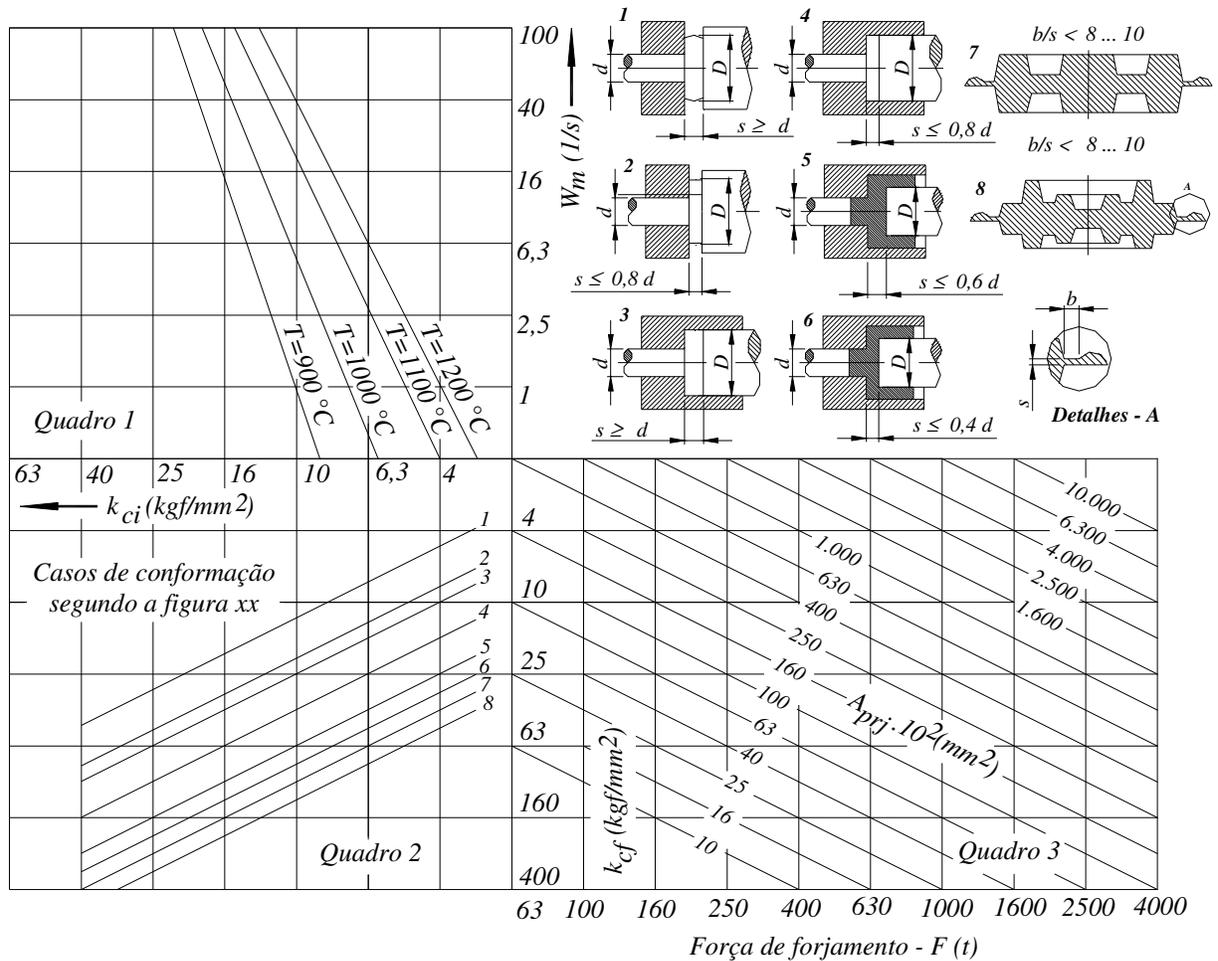


Figura A.I. 3 - Diagrama segundo H. Meyer para cálculo da força de forjamento.

Inicialmente, deve-se determinar a taxa média de conformação (w_m) conforme as equações apresentadas na Tabela 2.2. A taxa média de conformação (w_m) é determinada pela multiplicação de um valor correspondente ao equipamento utilizado no trabalho por (w_0) velocidade inicial de conformação, que depende da velocidade da máquina (v) e também da altura inicial da peça (h_0) que se refere à altura da pré-forma e não à do tarugo inicial.

Com o valor calculado de w_m insere-se a temperatura de forjamento (Quadro “I”), obtendo-se o valor de k_{cj} . Posteriormente deve-se inserir um coeficiente relacionado à forma geométrica do forjado (Quadro “II”), conforme as opções disponíveis nas figuras ao lado do Quadro “I”. No Quadro “III” toma-se a maior área transversal (A_{proj}) que resulta na força de forjamento (F).

Para facilitar os cálculos e elaboração das rotinas programadas no *Visual Basic*® 5.5 foram definidas as expressões que representam cada uma das condições apresentadas no ábaco e que podem ser vistas no Quadro A.I.2.

No Capítulo 5, “Sistema Especialista para forjamento a quente de precisão”, após a atualização da tela gráfica do *SolidEdge*®, observa-se que o sistema não apresenta a pré-forma do forjado final, mas apenas o sólido com a geometria e dimensões finais do forjado e do tarugo com as dimensões iniciais no processo.

Assim, para se utilizar o ábaco apresentado por H. Meyer que se inicia calculando-se o valor de “ w_m ”, seria necessário conhecer a altura inicial da peça que considera ser a altura da pré-forma, bem como características do equipamento empregado. Dessa forma, como não se conhece as dimensões da pré-forma inicia-se o cálculo da força de forjamento substituindo-se o valor de “ w_m ” pelo valor de “ k_{fd} ”, obtido pelo método de Mäkelt em função do material trabalhado e do equipamento utilizado.

Quadro A.I. 2 - Expressões para o cálculo dos parâmetros do método de H.Meyer.

Quadro "I"	
Temperatura 1200 °C	$k_{ci} = (w_m / 0,0045)^{0,2550}$
Temperatura 1100 °C	$k_{ci} = (w_m / 0,001)^{0,2332}$
Temperatura 1000 °C	$k_{ci} = (w_m / 0,0002)^{0,2171}$
Temperatura 900 °C	$k_{ci} = (w_m / 3.10^{-6})^{0,1828}$
Quadro "II"	
Forma geométrica – caso 7	$k_{cf} = 9,9032 \cdot k_{ci}^{1,0112}$
Forma geométrica – caso 8	$k_{cf} = 12,447 \cdot k_{ci}^{1,012}$
Quadro "III"	
$2000 \leq A_{proj} < 2500$	$F = (k_{cf} / 0,6247)^{1,0371}$
$2500 \leq A_{proj} < 3200$	$F = (k_{cf} / 0,3959)^{0,9990}$
$3200 \leq A_{proj} < 4000$	$F = (k_{cf} / 0,3107)^{0,9970}$
$4000 \leq A_{proj} < 5000$	$F = (k_{cf} / 0,2475)^{0,9976}$
$5000 \leq A_{proj} < 6300$	$F = (k_{cf} / 0,1981)^{0,9988}$
$6300 \leq A_{proj} < 8000$	$F = (k_{cf} / 0,1577)$
$8000 \leq A_{proj} < 10000$	$F = (k_{cf} / 0,1246)^{0,9996}$
$10000 \leq A_{proj} < 12000$	$F = (k_{cf} / 0,1)$
$12000 \leq A_{proj} < 16000$	$F = (k_{cf} / 0,0776)^{0,9970}$
$16000 \leq A_{proj} < 20000$	$F = (k_{cf} / 0,0626)^{0,9991}$
$20000 \leq A_{proj} < 25000$	$F = (k_{cf} / 0,0503)$
$25000 \leq A_{proj} < 40000$	$F = (k_{cf} / 0,0395)^{0,9990}$
$40000 \leq A_{proj} < 63000$	$F = (k_{cf} / 0,0246)^{0,9976}$
$63000 \leq A_{proj} < 100000$	$F = (k_{cf} / 0,0158)^{0,9996}$
$100000 \leq A_{proj} < 160000$	$F = (k_{cf} / 0,01)$
$160000 \leq A_{proj} < 250000$	$F = (k_{cf} / 0,0062)^{0,9991}$

Anexo II

Inter-relação entre os softwares *Solid Edge*® e *Visual Basic*®

Como visto no Capítulo 5, para cada uma das famílias geometricamente distintas existe um sólido previamente projetado. Para que o arquivo desse sólido seja alterado e atualizado pelo *Visual Basic*®, é necessária a aplicação de rotinas referentes aos comandos do *Solid Edge*® conforme mostrado na Figura A.II.1.

A utilização do aplicativo *Visual Basic*® permitiu a criação de janelas para interface com o usuário nas quais pode-se atribuir valores às dimensões do novo forjado a partir de informações dimensionais extraídas do desenho do produto usinado. Esses valores são atribuídos por meio de caixas de texto disponíveis no *Visual Basic*® sendo que cada uma dessas caixas de texto está vinculada a uma variável que será posteriormente reconhecida pelo *Solid Edge*®.

A Figura A.II.2 apresenta a janela “Dimensões - CuboBi-Lateral” mostrando o nome de cada uma dessas caixas de texto.

Tomando-se como exemplo a linha de programação em destaque da rotina mostrada na Figura A.II.1, verifica-se a seguinte interação: Para o *Solid Edge*® **diamext** (diâmetro externo da engrenagem) é uma variável previamente determinada, cujo valor será tomado no documento “**Bilat** Form” (mostrado na Figura A.II.2) representado pela janela de interface intitulada “Dimensões - CuboBi-Lateral” da caixa de texto “Text1”, que no *Visual Basic*® representa a variável tipo texto *Bilat.Text1.Text*.

```
Soledg - Geombilat (Code)
(General) transfere_variáveis

If familia = 3 Then
• diamext = Val(Bilat.Text1.Text)
  diamextalma = Val(Bilat.text4.Text)
  diamcuboant = Val(Bilat.Text2.Text)
  diamcubopost = Val(Bilat.Text3.Text)
  Espdente = Val(Bilat.Text5.Text)
  altcuboant = Val(Bilat.Text6.Text)
  altcubopost = Val(Bilat.Text7.Text)
  profanterior = Val(Bilat.Text8.Text)
  profposterior = Val(Bilat.Text9.Text)
  diamfuroant = Val(Bilat.Text12.Text)
End If

If familia = 4 Then
```

Figura A.II. 1 – Rotina de transferência de valores de variáveis referente à família “Cubo Bi-Lateral”.

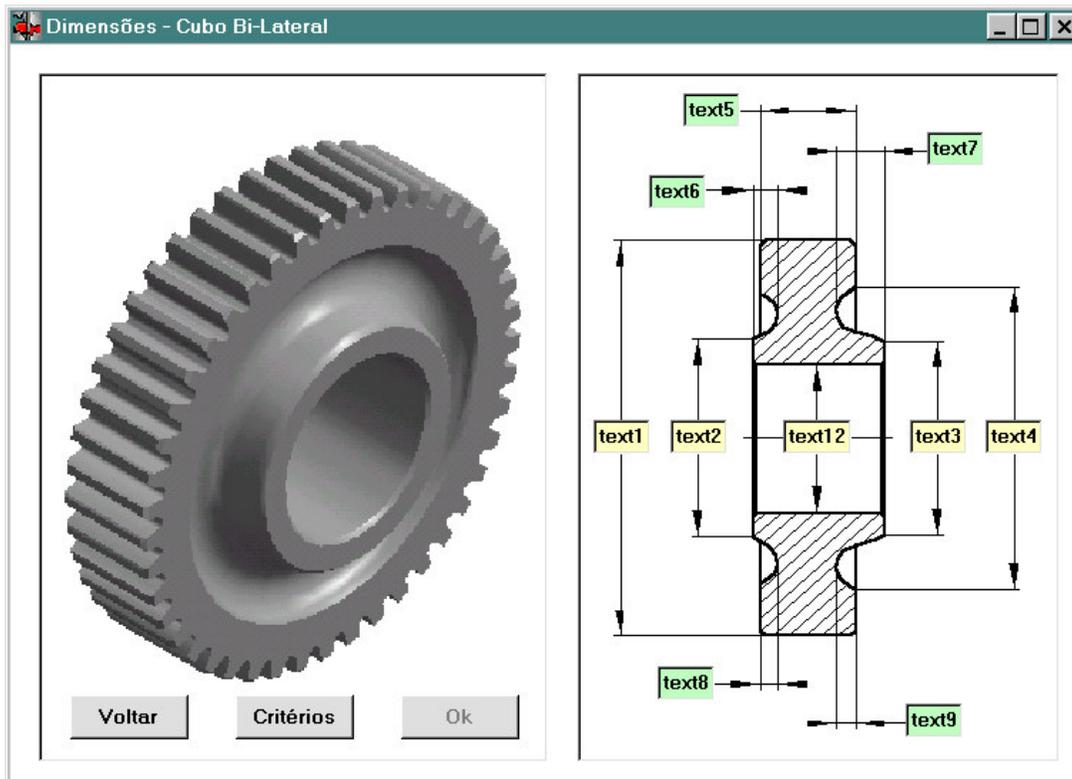


Figura A.II. 2 - Janela “Dimensões Cubo Bi-Lateral” mostrando o vínculo de cada caixa de texto com sua respectiva variável.

A Figura A.II.3 apresenta uma tabela de variáveis definidas no ambiente do *Solid Edge*® para projeto do perfil da engrenagem, em que cada dimensão definida para esse perfil, a ser rotacionado, recebe um nome que será o mesmo empregado para a rotina do *Visual Basic*®, mostrado na Figura A.II.1.

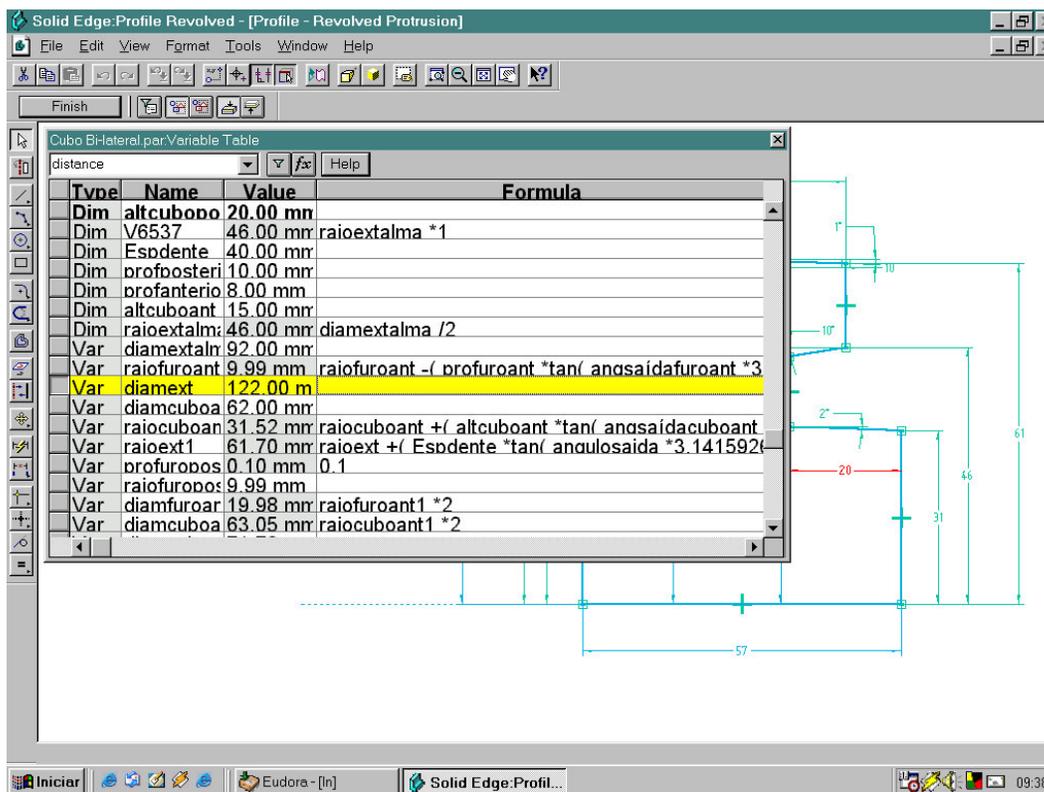


Figura A.II. 3 - Área gráfica do *Solid Edge*® mostrando a tabela de variáveis criadas para posterior alteração do perfil a ser rotacionado.

A Figura A.II.4 apresenta a área gráfica do *Solid Edge*® utilizada para projetar o perfil que será rotacionado, dando origem ao sólido primitivo do forjado. Nessa janela verifica-se que a existe uma cota em destaque (em vermelho). Essa cota corresponde à metade do maior diâmetro do forjado cujo nome da variável a ela vinculada é “diamext”.

Quando o comando “Atualizar” disponível na janela “Atualizações”, apresentada na Figura 5.38, for ativado, o *Visual Basic*® irá reconhecer os valores atribuídos a cada uma das janelas de texto mostradas na Figura A.II.2. Esses valores serão transferidos para o *Solid Edge*® para a atualização do perfil de rotação do forjado primitivo para um novo perfil referente ao forjado em desenvolvimento.

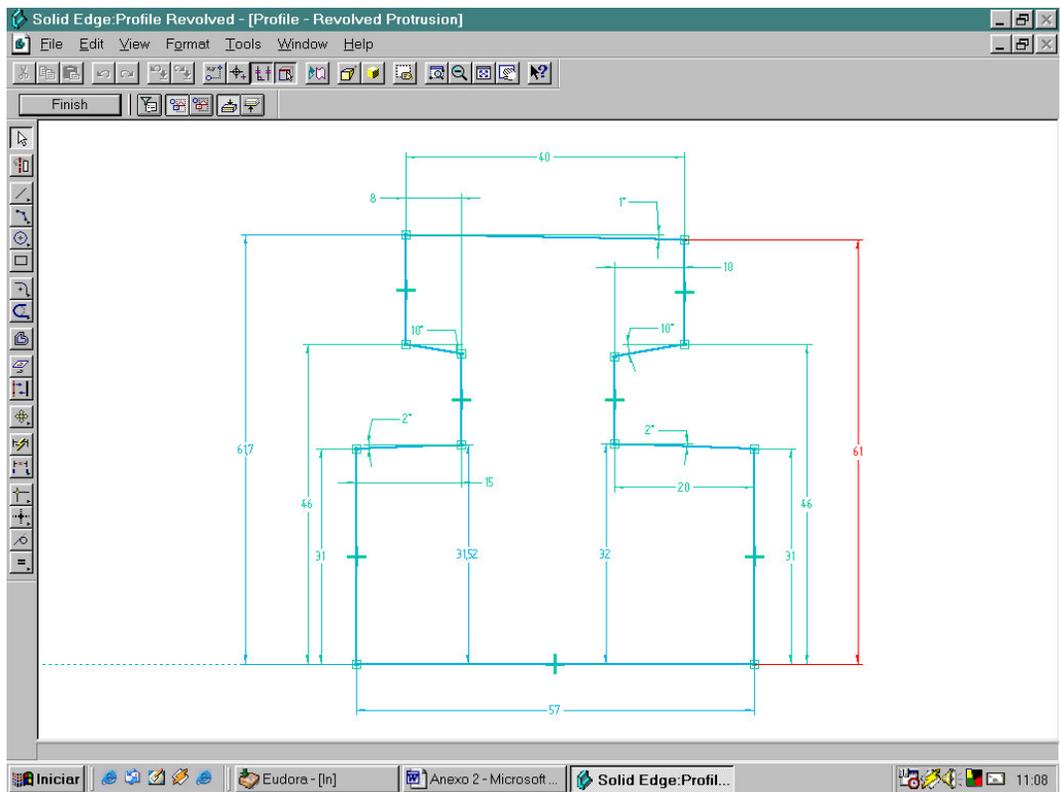


Figura A.II. 4 - Destaque da cota 61 mm no perfil referente ao forjado primitivo da família Cubo Bi-Lateral.