

METODOLOGIA E PROJETO DE UM CABEÇOTE HIDROSTÁTICO DE ULTRAPRECISÃO UTILIZANDO GRANITO SINTÉTICO E MANCAIS CERÂMICOS

Eng. Leonardo Guimarães Garcia

DEDALUS - Acervo - EESC



31100005117

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Benedito de Moraes Purquerio

SÃO CARLOS
NOVEMBRO de 1999



Class.	TESE-EESC
Cutt.	2409
Tombo	176 99

31100005117

S/S 1064010

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

G216m

Garcia, Leonardo Guimarães
Metodologia e projeto de um cabeçote hidrostático de ultraprecisão utilizando granito sintético e mancais cerâmicos / Leonardo Guimarães Garcia. -- São Carlos, 1999.

Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São Carlos-Universidade de São Paulo, 1999.
Área: Engenharia Mecânica.
Orientador: Prof. Dr. Benedito de Moraes Purquerio.

1. Cabeçote de ultraprecisão. 2. Projeto de ultraprecisão. 3. Mancais hidrostáticos. 4. Mancais de cerâmica. 5. Granito sintético. I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Engenheiro **LEONARDO GUIMARÃES GARCIA**

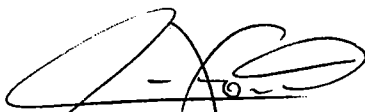
Dissertação defendida e aprovada em 17.09.1999
pela Comissão Julgadora:



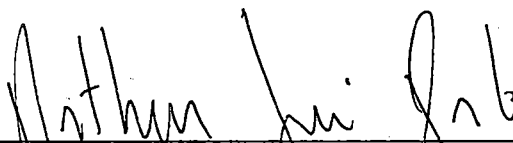
Prof. Titular **BENEDITO DE MORAES PURQUÉRIO (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Prof. Titular **JOÃO LIRANI**
(Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo)



Prof. Doutor **CARLOS ALBERTO FORTULAN**
(Universidade Federal de São Carlos - UFSCar)



Prof. Associado **ARTHUR JOSÉ VIEIRA PORTO**
Coordenador da Área de Engenharia Mecânica



JOSÉ CARLOS A. CINTRA
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

Dedico esse trabalho a meus pais,
Antonio e Eunice
por tudo o que não sei dizer.

Dedico a meus pais...

Agradecimentos

À Deus, acima de todas as coisas...

Ao Prof. PhD. Benedito de Moraes Purquerio, pela valorosa orientação e imensa paciência.

Aos amigos Paulo Wrege, Rogério Akihide Ikegami e Fernando de Moraes Mendonça Ribeiro pelo companheirismo e apoio.

Ao aluno do curso de Imagem e Som da UFSCar, Anderson Zanati Dultra, pela elaboração do desenho-tema da apresentação da dissertação.

Aos demais professores e colegas da EESC-USP e da UFSCar, que me auxiliaram em muitos momentos de dificuldade, técnica ou não.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	iii
LISTA DE TABELAS.....	v
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	vi
LISTA DE SÍMBOLOS.....	vii
RESUMO.....	xi
ABSTRACT.....	x
1. INTRODUÇÃO.....	01
2. SITUAÇÃO ATUAL EM PROJETO DE CABEÇOTES DE ULTRAPRECISÃO....	05
2.1 Introdução.....	05
2.2 O Conjunto	05
2.3 Os Componentes.....	09
2.3.1 – Estrutura.....	10
2.3.1.1 – <i>Granito sintético</i>	11
2.3.2 – Mancais Radial e Axial	19
2.3.2.1 – <i>Cerâmicas de Engenharia</i>	25
3. METODOLOGIA DE PROJETO DE UM CABEÇOTE DE ULTRAPRECISÃO....	30
3.1- Introdução.....	30
3.2- O Processo de Projeto.....	35
3.2.1 - Definição de tarefas.....	40
3.2.2 - Definição das especificações.....	41
3.2.3 – Busca de idéias.....	43
3.2.3.1 – <i>Desenvolvimento da estrutura funcional do equipamento</i>	44
3.2.3.2 – <i>Designação da lista de componentes</i>	45
3.2.3.3 – <i>Estudo do arranjo físico dos componentes</i>	45
3.2.3.4 – <i>Desenvolvimento de todas as soluções para os componentes</i>	47
3.2.4 - Avaliação.....	50

3.2.5 - Layout de projeto.....	57
3.2.6 - Detalhamento de projeto	58
3.2.7 - Construção do protótipo	60
3.2.8 - Testes de funcionamento	60
3.2.9 - Tarefas pós-projeto	61
4. DESENVOLVIMENTO DE UM PROJETO DE CABEÇOTE DE ULTRAPRECISÃO	63
4.1 Introdução	63
4.2 Definição das Tarefas.....	63
4.3 Especificações	64
4.4 Busca de Idéias, Avaliação e <i>Layout</i>	65
4.4.1 O Conjunto.....	65
4.4.2 Os Componentes.....	66
4.4.2.1-Carcaça.....	67
4.4.2.2-Flanges de acionamento e suporte.....	68
4.4.2.3-Eixo-árvore.....	69
4.4.2.4-Mancais.....	69
4.4.2.5-Sistema hidráulico.....	77
4.5 Detalhamento, Fabricação, Montagem e Metrologia	78
4.6 Testes de Funcionamento	80
5. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES.....	82
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
APÊNDICE	
GLOSSÁRIO	

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Cabeçote com mancais esféricos.....	06
Figura 2.2	Cabeçote com mancal dianteiro semi-esférico e traseiro esférico.....	07
Figura 2.3	<i>Layout</i> de um cabeçote de ultraprecisão típico.....	10
Figura 2.4	Insertos para estruturas de granito sintético.....	14
Figura 2.5	Elementos para posicionamento de insertos.....	16
Figura 2.6	Esquema básico de um sistema hidráulico para alimentação de um mancal hidrostático.....	22
Figura 2.7	Esquema de um restritor variável.....	23
Figura 2.8	Fluido eletroreológico.....	24
Figura 3.1	O projeto e suas influências.....	36
Figura 3.2	Fase de definição de tarefas.....	41
Figura 3.3	Fase de especificação.....	42
Figura 3.4	Fase de busca de idéias.....	49
Figura 3.5	Diagrama do problema de tomada de decisão.....	53
Figura 3.6	Fase de avaliação.....	56
Figura 3.7	Fases de <i>layout</i> e detalhamento do projeto.....	59
Figura 3.8	Fases de construção do protótipo, testes de funcionamento e tarefas pós-projeto.....	61
Figura 3.9	Síntese do processo de projeto de um cabeçote de ultraprecisão.....	62
Figura 4.1	Esquema externo do cabeçote de usinagem.....	66
Figura 4.2	Molde da carcaça de granito sintético.....	68
Figura 4.3	Parâmetro de carregamento <i>versus</i> β	71
Figura 4.4	Ábaco de projeto para mancais hidrostáticos.....	72
Figura 4.5	Representação das ranhuras do mancal axial.....	74

Figura 4.6	Estimativa da área a ser fresada.....	76
Figura 4.7	<i>Layout</i> do projeto.....	77
Figura 4.8	Principais erros de cilindridade.....	79

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Medidas para otimização térmica.....	08
Tabela 2.2	Propriedades dos materiais estruturais.....	11
Tabela 2.3	Materiais para moldes.....	16
Tabela 3.1	Itens que influenciam um projeto.....	37
Tabela 3.2	Critérios de escolha em engenharia.....	53
Tabela 3.3	Critérios de escolha para projetos de precisão.....	54
Tabela 4.1	Características dos materiais estruturais.....	67
Tabela 4.2	Tipos de mancais de precisão e suas características.....	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHM (*Analytical Hierarchy Method*);

BOM (*Bill of Material* ou Lista de Material);

C/SCSC (*Cost/Schedule Control Systems Criteria*);

CAD (*Computer Aided Design* ou Computador Auxiliando o Projeto);

CAE (*Computer Aided Engineering* ou Computador Auxiliando a Engenharia);

CAM (*Computer Aided Manufacturing* ou Computador Auxiliando a Manufatura);

CPM (*Critical Path Method*);

DFMA (*Design for Manufacturing and Assembly* ou Projetar para Construir e Montar);

DFR (*Design for Recycling* ou Projetar para Reciclar);

DOE (*Design of experiments* ou Planejamento de Experimentos);

FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis* ou Modo de Falha e Análise de Efeito);

PDM (*Product Data Management* ou Gerenciamento de Dados de Produto);

PERT (*Program Evaluation and Review Technique*);

SC/TG (Sistemas de Classificação/Tecnologia de Grupo);

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Área do mancal	m^2
A_e	Área efetiva do mancal	m^2
A_s	Comprimento da ranhura	mm
A_r	Área da ranhura a ser fresada	m^2
\bar{A}	Fator de correção para a área efetiva do mancal	
a/L	Razão soleira/comprimento do mancal	
B	Largura do mancal axial	mm
C_d	Folga diametral	mm
$C_{d(máx)}$	Folga diametral máxima	mm
$C_{d(mím)}$	Folga diametral mínima	mm
D	Diâmetro do eixo-árvore	mm
h	Espessura do filme de fluido	mm
h_o	Espessura do filme de fluido para $p_r = \beta P_s$	mm
H	Dissipação de potência no mancal	W
H_f	Potência dissipada por fricção	W
H_p	Potência dissipada no bombeamento	W
k	Comprimento da ranhura a ser fresado	mm
K	Razão de potência	
L	Comprimento do eixo-árvore	mm
n_s	Número de rebaixos por fileira de alimentação	
N	Rotação do eixo-árvore	rpm
$N_{máx}$	Máxima rotação permitida	rpm
p_r	Pressão na ranhura	atm
P_s	Pressão de alimentação	atm
q	Vazão do fluido lubrificante através do mancal axial	m^3/s
Q	Vazão do fluido lubrificante através do mancal radial	m^3/s

\bar{Q}	Fator de correção para a vazão do fluido lubrificante	
R	Raio externo do anel interno do mancal axial	mm
R_1	Raio interno do mancal axial	mm
R_2	Raio externo do mancal axial	mm
Re	Número de Reynolds	
S_{ho}	Número Híbrido de Sommerfeld para $K=1$	
W	Carga estática	N
\bar{W}	Fator de correção para a carga estática	
Y_s	Largura da ranhura	mm
Z_s	Profundidade da ranhura	mm
Z'_s	Profundidade da ranhura corrigida para o fresamento	mm
β	Razão de pressão para $h=h_0$	
η	Viscosidade do fluido lubrificante	$N.s/m^2$
λ	Rigidez do mancal	MN/m
$\bar{\lambda}$	Fator de correção para a rigidez do mancal	
θ	Ângulo de fresamento da ranhura do mancal axial	°
ρ	Densidade do fluido lubrificante	kg/m^3

RESUMO

GARCIA, L. G. (1999). *Metodologia e projeto de um cabeçote hidrostático de ultraprecisão utilizando granito sintético e mancais cerâmicos*. São Carlos, 1999. (93 páginas). Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

O presente trabalho é direcionado ao projeto de máquinas de ultraprecisão, visando a redução de custos de produção e o aumento da qualidade e da precisão dos produtos. Para tanto, desenvolve-se uma metodologia de projeto que contempla os pontos relevantes do projeto mecânico de um cabeçote de usinagem de ultraprecisão, desde o estabelecimento das metas até a entrega do projeto definitivo, e que funcione como uma referência capaz de apontar os diversos aspectos que norteiam as tomadas de decisão, auxiliando o projetista a se organizar frente a tarefa de selecionar, dentre as inúmeras possibilidades, aquela que melhor se adequa à situação particular do projeto. Apresenta-se como estudo, o projeto de um cabeçote de alto desempenho com mancais hidrostáticos de cerâmica de alumina e estrutura de granito sintético, desenvolvido segundo uma metodologia inovadora e estabelecida de acordo com o estado-da-arte na área de projeto de cabeçotes de ultraprecisão e de seus componentes.

Palavras-chave: Cabeçote de ultraprecisão, Projeto de ultraprecisão, Mancais hidrostáticos, Mancais de cerâmica, Granito sintético

ABSTRACT

GARCIA, L. G. (1999). *Metodologia e projeto de um cabeçote hidrostático de ultraprecisão utilizando granito sintético e mancais cerâmicos*. São Carlos, 1999. (93 páginas). Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

The present work is addressed to the design of high precision machine tools, seeking the reduction of production costs and the increase of the quality and precision of the products. A design methodology is introduced to contemplate the essential points of a high precision spindle design from the establishment of the goals up to the delivery of the final design, and to work out as a reference capable to cover the most important aspects of an engineering decision to help the design engineer to organise himself on the task of selection of the better solutions for his particular problem and context. In addition, a case study of a high performance spindle design incorporating hydrostatic bearings in advanced ceramic (alumina) and structure in polymeric concrete is shown, which was developed according to an innovative method established in agreement with the state-of-art in design of high precision spindles and its components.

Key words: Precision spindle, Hydrostatic bearing, Polymeric concrete, Advanced ceramic, Methodology.

1 INTRODUÇÃO

Há cerca de trinta anos o mundo conheceu o início de um processo de transformação econômica que mudaria todos os paradigmas relativos à produção industrial. Crises como a de 1974, gerada pelo aumento do preço do petróleo, levaram empresas dos países desenvolvidos a um processo de modernização, sustentado basicamente por três novos imperativos: a tecnologia (em vez da mão-de-obra barata), a internacionalização ou globalização (em vez dos mercados nacionais) e a manufatura flexível e integrada (substituindo a rigidez do taylorismo clássico) [BECKOUICHE, 1993].

Com a crise dos mercados nacionais, os países desenvolvidos passaram a investir na transnacionalização de suas grandes empresas, com vistas à remessa de lucros. Essas megaempresas internacionais, que passaram a atuar em todo o mundo capitalista, criaram (mas principalmente inspiraram) redes de relação entre elas, o comércio e o público que se alastraram por toda parte. Desse processo resultou a globalização dos setores produtivo e financeiro, fortemente apoiado nas inovações tecnológicas (principalmente as ligadas à microinformática) e nas novas técnicas de produção industrial (como os sistemas de integração de manufatura). Trata-se, portanto, de um conjunto sistêmico, que instalou uma nova fase da história humana [SANTOS, 1997].

O Brasil se engajou nesse processo tardiamente, devido às conseqüências do nosso processo de industrialização. Como se sabe, a industrialização brasileira, cujo impulso definitivo só foi dado na década de 50 com o programa de substituição de importações, se baseou na

importação maciça de tecnologia, o que resultou numa evolução muito pequena da ciência e tecnologia do país, diferentemente dos países desenvolvidos, que sempre basearam seu crescimento econômico em grandes investimentos na área de pesquisa e desenvolvimento.

Com a chegada da crise dos anos 70, o paradigma industrial mudou radicalmente, adotando tecnologias intensivas em informação, flexíveis e computadorizadas. O Brasil, desprovido de centros de pesquisa e desenvolvimento industrial atuantes e com um mercado interno protegido da concorrência por leis alfandegárias, não acompanhou essa tendência mundial, o que ocasionou, ao longo da década de 80, uma grave crise econômica, marcada pelo endividamento, desordem das contas públicas, etc. [COUTINHO, 1995].

Os reflexos dessa crise (falta de investimentos, escassez de pesquisa e desenvolvimento de produtos de alto nível tecnológico, recessão econômica) criaram um círculo vicioso que levou nossa indústria à estagnação. Se voltarmos nossa atenção para o setor de máquinas-ferramentas, considerado vital tanto como setor difusor de progresso técnico quanto como pilar mestre de sustentação de toda a produção de bens de consumo, poderemos notar quão grave é a situação do setor produtivo brasileiro.

Até agosto de 1997, cerca de 1/3 das máquinas-ferramentas em operação no país tinham mais de 10 anos de uso e apenas 10% do total estavam equipadas com controle numérico computadorizado (CNC). Ao analisar esses números, bem como o contexto de pouquíssimas pesquisas no qual eles se inserem e que os justifica, Maria Carolina Bottura, editora da revista *Máquinas e Metais*, escreveu em seu editorial: "Nada é mais verdadeiro e urgente que a necessidade de atualização tecnológica da produção metal-mecânica brasileira." [BOTTURA, 1998].

No caminho dessa atualização rumo à competitividade sustentada pela tecnologia, as novas concepções (desde a utilização de novos materiais até a adaptação das tecnologias de rede ao sistema de CNC das máquinas) devem ser encaradas como possibilidades reais. Segundo Ryuji Wada, membro da Setsunan University (Japão), "o que está definido é que chegou o momento em que as máquinas-ferramentas devem sair fora do convencional, incluindo as funções, as formas e os custos convencionais." [WADA, 1997].

O presente trabalho é uma resposta a essa demanda pela inovação tecnológica no setor de máquinas-ferramentas, que se tornou particularmente intensa no Brasil devido ao longo período de crise econômica. Seguindo as tendências internacionais de utilização de novas tecnologias com vistas ao estabelecimento de uma posição competitiva sólida frente ao mercado [LOVERIGDE, 1990], propôs-se um trabalho de pesquisa e desenvolvimento direcionado ao projeto de cabeçotes de precisão com tecnologia de ponta.

Estabeleceu-se, então, os seguintes objetivos para o trabalho:

- a) Apresentar a situação atual na área de projetos de cabeçotes de ultraprecisão;
- b) Formular uma metodologia de projeto de cabeçotes de ultraprecisão;
- c) Apresentar um projeto de cabeçote de usinagem de alto desempenho elaborado segundo essa metodologia.

Sendo assim, no Capítulo 2, apresenta-se as contribuições tecnológicas e científicas mais atuais na área de projetos de cabeçotes de ultraprecisão. A ênfase desse capítulo recai sobre os materiais empregados na fabricação dos componentes do cabeçote, principalmente a estrutura e os mancais, uma vez que constituem os elementos principais do equipamento.

No Capítulo 3, parte-se para o desenvolvimento de uma metodologia de projetos que contemple todos os aspectos relevantes de um projeto de cabeçote de ultraprecisão (desde o estabelecimento das metas até a entrega do equipamento), estabelecendo critérios capazes de auxiliar o projetista na escolha desse ou daquele caminho. Pretende-se com isso criar um método específico de projeto de cabeçotes, capaz de manter o projetista sempre atento aos diversos aspectos que norteiam as tomadas de decisão, além de ajudá-lo a se organizar frente a tarefa de selecionar, dentre as inúmeras possibilidades, aquela que melhor se adequa à situação particular do projeto.

O Capítulo 4 apresenta um projeto de cabeçote de alto desempenho, com configuração adequada à utilização em fresadoras e mandriladoras, desenvolvido segundo o método de projeto descrito no capítulo anterior. A intenção aqui é a de ilustrar as potencialidades do método na forma de um exemplo real, permitindo ao leitor uma análise crítica mais apurada do método proposto.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho.

2 SITUAÇÃO ATUAL EM PROJETO DE CABEÇOTES DE ULTRAPRECISÃO

2.1 Introdução

O presente capítulo apresenta uma revisão das principais inovações tecnológicas que vem sendo aplicadas em projetos de cabeçote de ultraprecisão. Inicialmente, apresenta-se uma discussão geral a cerca de cabeçotes de usinagem, com a intenção de apontar as principais tendências que levam à realização de um bom projeto. A segunda parte do capítulo trata basicamente das novidades relacionadas aos mancais e à estrutura do cabeçote, dando especial ênfase à questão dos materiais.

2.2 O Conjunto

O desafio tecnológico que se apresenta ao projetista que concebe um cabeçote de ultraprecisão é o de criar um conjunto com alta rigidez, precisão de posicionamento, suavidade de giro e amortecimento [PURQUERIO, 1994]. Para alcançar esses objetivos, o projetista deve se aproveitar das inovações que os componentes e o próprio conjunto tem recebido.

Nesse sentido, novas configurações, criadas especialmente para responder aos requisitos de qualidade atuais, têm surgido. Na busca pela máxima rigidez do conjunto, PURQUERIO *et al* (1994) sugere um arranjo utilizando mancais hidrostáticos esféricos como forma de garantir o perpendicularismo entre o mancal radial e os mancais axiais (Figura 2.1). Mancais de Yates (onde os mancais axiais e o mancal radial são

combinados numa única peça) também constituem uma opção ao problema do perpendicularismo.

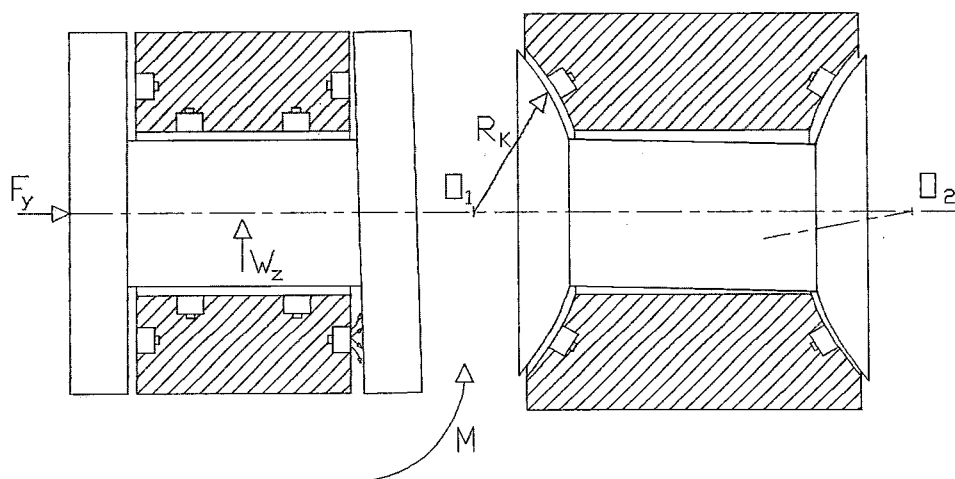


FIGURA 2.1 – Cabeçote com mancais esféricos [PURQUERIO *et al*, 1994]

PENTEADO (1996) apresenta uma configuração similar à apresentada por PURQUERIO (1994), dotada de um mancal dianteiro semi-esférico e um traseiro esférico, que possui a vantagem de permitir o alinhamento do eixo com relação ao conjunto (Figura 2.2).

Ainda sobre configurações, WECK *et al* (1991) sugerem todo um arranjo inovador (utilizando novos materiais, sistema de arrefecimento, etc.) para um cabeçote de ultraprecisão que utiliza mancais hidrostáticos, a fim de eliminar o calor gerado durante o seu funcionamento. Motivado pela mesma problemática, SPUR (1994) apresenta uma abordagem para a otimização térmica de sistemas mecânicos, que pode ser perfeitamente aplicada a projetos de cabeçotes. Nela, regras de projeto apropriadas à diminuição dos efeitos térmicos são associadas a técnicas de compensação de erros, como sugerido na Tabela 2.1. As medidas de projeto agem na causa dos erros, ao passo que a compensação tenta diminuir ou até eliminar os efeitos dos mesmos sobre as peças a serem fabricadas.

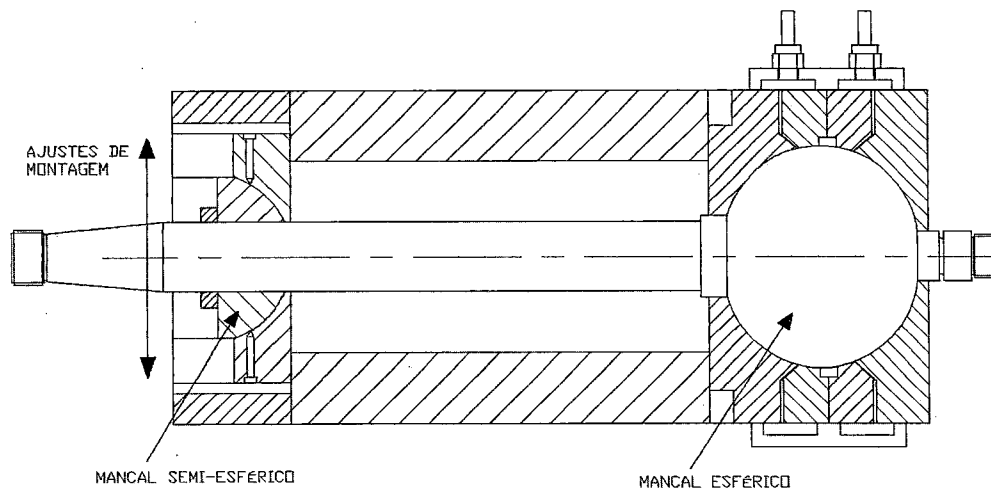


FIGURA 2.2 – Cabeçote com mancal dianteiro semi-esférico e traseiro esférico [PENTEADO, 1996]

TANABE & YANAGI (1996) sugerem a utilização conjunta de sistemas de refrigeração como forma de evitar não só o aquecimento de todo o conjunto mas também garantir uma distribuição de temperatura uniforme em todo o cabeçote. Os autores propõem a utilização de dois sistemas: um interno (controlado por computador de acordo com as condições de trabalho do cabeçote), responsável pela extração do calor gerado nos mancais através da circulação de um fluido refrigerante ao seu redor; e um externo, responsável pela manutenção da uniformidade térmica do cabeçote e que utiliza um segundo fluido, a baixas temperaturas. Os resultados experimentais apontam para deformações e dilatações dos componentes praticamente nulas.

Apesar da expressividade dos resultados apontados acima, a utilização dessa solução pode inviabilizar economicamente o projeto. Porém, para cabeçotes hidrostáticos, se um dos refrigerantes for também o lubrificante dos mancais, um projeto similar ao de TANABE torna-se muito mais factível.

TABELA 2.1 – Medidas para otimização térmica [SPUR, 1994].

Medidas de projeto para reduzir...				Compensação	
Fluxo de calor	Diferencial de temperatura	Deformação	Deslocamento	Com energia auxiliar	Sem energia auxiliar
Fontes de calor	Transferência de calor	Material	Direção	Controle de temperatura	Medição
- refrigeração	-aumentar o coeficiente	-baixo	-construção	-refrigeração	-temperaturas
-localização externa	-aumentar as superfícies	coeficiente de dilatação térmica	térmica balanceada	-aquecimento	aquecimentos
-isolamento					
-aumento de eficiência		-aumento da rigidez estática	- contrabalançar os deslocamentos		Cálculo
Cavacos	Material				deslocamento
-remover	-baixa condutividade térmica		-vetores de deslocamentos tangenciais ao plano de trabalho		
Refrigerante					
-temperar	-elevada capacidade térmica				
Ambiente					
-ar condicion.					
-inibir a irradiação					

Todas essas abordagens baseadas na refrigeração do conjunto precisam, para se tornarem efetivas, de um controle rigoroso da temperatura do refrigerante. No entanto, devido às altas taxas de extração de calor, realizar esse controle torna-se uma difícil tarefa. OTSUKA (1977) sugere um sistema de refrigeração que, aliado a um sistema de controle, é capaz de efetivar a manutenção da temperatura do fluido nos níveis desejados.

Todos esses casos evidenciam que, na busca pelo desempenho ideal do cabeçote, sua configuração precisa ser desenhada sob medida para cada aplicação. O projetista, através das inúmeras facilidades disponibilizadas pela microeletrônica e pela fabricação de precisão, além da contribuição de

sistemas CAD Inteligente, que unem Inteligência Artificial à busca dos melhores parâmetros qualitativos e quantitativos de projeto (ROWE, CHENG & IVES, 1992), e dos *softwares* desenhados exclusivamente para o projeto de cabeçotes hidrostáticos (MONTUSIEWICZ & OSYCZKA, 1997), deve converter essas contribuições em maior eficiência e rapidez na elaboração de um projeto.

2.3 Os Componentes

A maioria das inovações na área de cabeçotes de ultraprecisão estão direcionadas aos seus componentes, abrangendo inúmeros aspectos de projeto e fabricação. A Figura 2.3 apresenta o *layout* de um cabeçote de ultraprecisão típico e seus principais componentes. Apesar da importância de cada um deles, essa seção discute com maiores detalhes apenas as inovações relativas à estrutura e aos mancais, considerados os principais componentes do cabeçote.

O eixo-árvore e os flanges de acionamento (que liga o cabeçote ao sistema de acionamento) e suporte (que prende a peça-obra ao cabeçote) são elementos tradicionais utilizados em quase todos os tipos de máquinas. Por esse motivo, as técnicas para seu projeto, fabricação e montagem já estão bem estabelecidas, o que basicamente restringe suas inovações ao campo dos novos materiais.

O sistema de fixação da peça-obra por vácuo não constitui essencialmente uma inovação, no entanto a aplicação dessa tecnologia continua a exigir muita atenção por parte dos projetistas e dos pesquisadores, no sentido de se determinar com clareza os valores ótimos de funcionamento do sistema. O mesmo pode ser dito a respeito do sistema hidráulico, presente nos cabeçotes de ultraprecisão ou como sistema de alimentação de fluido lubrificante (em mancais hidrostáticos ou hidrodinâmicos), ou como sistema de resfriamento do conjunto.

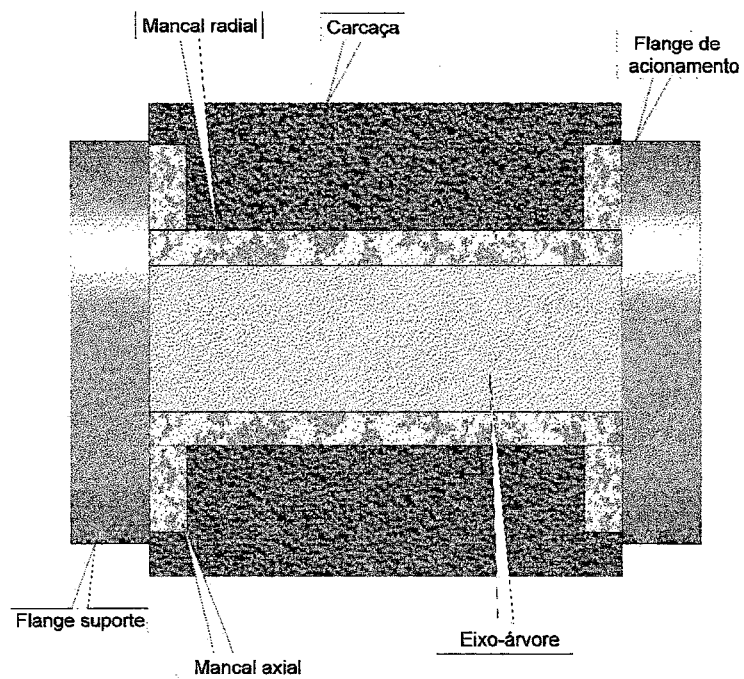


FIGURA 2.3 – *Layout* de um cabeçote de ultraprecisão típico.

2.3.1 – Estrutura

A precisão de um cabeçote depende fortemente da sua estrutura, pois é essa que confere ao sistema rigidez mecânica e térmica, amortecimento e estabilidade dimensional. A capacidade da estrutura em manter as corretas relações dimensionais entre os elementos críticos do cabeçote, por longos períodos de tempo estando sob carregamento constitui sua característica fundamental, a qual é determinada pelo projeto, pelo método de fabricação, pelo material e pelo ambiente que circunda a estrutura [WILLS-MOREN, 1988].

No que tange à inovação, a utilização do granito sintético pode ser considerada uma das grandes novidades inseridas na área de estruturas de máquinas de precisão, por elevar consideravelmente seu desempenho. Por esse motivo, discute-se a seguir as características desse material.

2.3.1.1 – Granito sintético

O granito sintético é um composto formado por uma matriz polimérica (formada geralmente por resina epoxi ou fenólica) e granito natural. Devido as suas propriedades intrínsecas (alto amortecimento interno, estabilidade dimensional e baixo custo), esse material tem sido aplicado a todos os tipos de estrutura de precisão. A Tabela 2.2 apresenta algumas propriedades do granito sintético em comparação a outros materiais estruturais [RIBEIRO, 1998].

TABELA 2.2 – Propriedades dos materiais estruturais [RIBEIRO, 1998].

PROPRIEDADE	Alumínio	Ferro fundido	Granito sintético
Densidade (kg/dm ³)	2,7	7,15	2,45
Módulo de Elasticidade (kN/mm ²)	30	90	36-42
Resistência à Tração (N/mm ²)	180	195	12-18
Resistência à Compressão (N/mm ²)	180	720	100-120
Coefficiente de Expansão Térmica (K ⁻¹)	24 x10 ⁻⁶	10 x10 ⁻⁶	12-14x10 ⁻⁶
Condutibilidade Térmica (W/m.K)	209,5	50	1,2-2
Capacidade Térmica (J/kg.K)		500	1250

As propriedades físico-químicas favorecem sobremaneira a utilização do granito sintético em estruturas de máquinas-ferramenta. Sua estabilidade dimensional permite que estruturas sejam construídas sem a preocupação de que mudanças no material possam ocorrer (como aquelas causadas por tensões residuais em peças fundidas). Além disso, sua baixa densidade e seu alto amortecimento interno (devido à matriz polimérica) atribuem ao material vantagens com relação à rigidez que o credencia como material para aplicações estruturais.

No caso da rigidez estática, a baixa densidade do granito sintético permite que suas peças tenham paredes mais espessas que aquelas geralmente encontradas em estruturas metálicas, sem que haja aumento considerável de peso. Esse ganho de secção se reflete na rigidez, tornando-a similar àquelas observadas em estruturas metálicas, ao mesmo tempo em que compensa seus baixos valores de resistência mecânica (vide módulo de elasticidade e resistência a tração da Tabela 2.2).

O alto amortecimento interno do granito sintético (cerca de 8 vezes maior que o do ferro fundido) justifica a alta rigidez dinâmica de uma estrutura desse material (estudos do comportamento de uma peça estrutural feita de granito sintético apontam a eliminação das frequências de ressonância inferiores a 100Hz e a diminuição considerável das frequências até 170Hz) [RIBEIRO, 1998].

Dentre as propriedades químicas, destaca-se sua excelente estabilidade frente aos fluidos normalmente presentes numa máquina-ferramenta [RIBEIRO, 1998], o que afasta a impossibilidade de aplicação do material devido a sua matriz polimérica.

As propriedades térmicas do granito sintético também favorecem sua aplicação em estruturas de precisão. Se somarmos à baixa dilatação desse material a sua muito baixa condutividade térmica, o quadro para a sua utilização se torna bastante favorável. Uma vez que o granito sintético conduz lentamente o calor, e considerando que as regiões onde o calor é produzido são conhecidas, o projetista pode criar um sistema de refrigeração de menor extensão, menor custo e maior confiabilidade.

O granito sintético também apresenta uma alta capacidade térmica, que, aliada às paredes espessas e à baixa condutividade térmica, confere à estrutura uma grande inércia térmica, garantindo uma folga extra contra eventuais falhas do sistema de refrigeração.

No que concerne à fabricação, o granito apresenta três características importantes. A primeira delas é que qualquer usinagem da estrutura pode (e deve) ser eliminada. A importância desse fato é enorme, principalmente no que se refere aos custos de fabricação, que caem bastante. Se adicionarmos a essa análise o fato de que, no processo de moldagem do granito, pressão ou altas temperaturas não são necessárias (bem como tratamentos térmicos pós-processamento), o gasto final com a etapa de fabricação torna-se um ponto muito positivo a favor do granito sintético.

Uma segunda característica de importância para a fabricação é a possibilidade de moldagens sucessivas e da colagem de peças à estrutura de granito sintético. Tais opções atribuem flexibilidade ao projeto da estrutura, permitindo ao projetista escolher os detalhes da moldagem de forma a estabelecer o compromisso ideal entre custo de fabricação e desempenho.

Além disso, a utilização de insertos torna-se muito facilitada: há grande liberdade no que diz respeito às suas formas e tamanhos, bem como sua localização e sua precisão de posicionamento. A Figura 2.4 apresenta exemplos típicos de insertos para estruturas de granito sintético.

Finalmente, a questão do custo. Normalmente, uma solução inovadora apresenta um compromisso, nem sempre conveniente, entre suas propriedades superiores e o seu custo de implantação. No caso do granito sintético, no entanto, a problemática do compromisso se faz ausente, na medida em que o custo total do processo de obtenção da estrutura usando esse material é, em geral, menor que para os outros materiais. Na obtenção do granito utiliza-se de matérias-primas relativamente baratas (o granito natural utilizado pode ser conseguido até de graça, em empresas interessadas em descartar os resíduos produzidos pela utilização do granito natural), o preço dos moldes pode ser perfeitamente abatido das moldagens sucessivas (como no caso do processo de fundição), não é necessária uma fábrica de grande porte nem maquinário sofisticado para a fabricação das

estruturas, o tempo de espera até se atingir as propriedades ideais da estrutura é bem menor que para outros materiais, além do importante fato de que as etapas de usinagem podem ser dispensadas.



FIGURA 2.4 – Inserções para estruturas de granito sintético [RIBEIRO, 1998]

Para gozar das propriedades acima listadas, o projetista precisa atentar para as particularidades de projeto que utilizam esse tipo de material e para o processo de obtenção do material em si. Com relação ao projeto, as semelhanças do processo de moldagem do granito sintético com outros métodos de processamento (fundição, injeção) devem ser conhecidas e

exploradas. No entanto, conhecer suas diferenças é fundamental. As principais são [RIBEIRO, 1998]:

- A moldagem do granito sintético permite maior liberdade com relação à geometria da peça (diferentemente da fundição convencional, na qual várias configurações geométricas precisam ser evitadas, como cantos vivos, por exemplo);

- O molde de granito sintético geralmente é desmontado a cada moldagem (ao invés de se extrair a peça do molde), sendo essa a principal razão da liberdade de geometria encontrada nesse processo. No entanto, essa pode ser, para algumas aplicações, uma limitação do ponto de vista econômico;

- No processo de moldagem não há aquecimento nem pressão sobre o material, o que diminui os custos e a periculosidade do processo mas dificulta o preenchimento do molde;

- Insertos devem ser fabricados e inseridos no molde, de forma que a moldagem garanta sua fixação na estrutura. Sendo assim, peças externas à estrutura devem ser previstas com antecedência, pois deverão se ligar à máquina através de insertos com rosca, previamente inseridos na estrutura.

Com relação ao molde, a maior preocupação deve ser quanto a sua rigidez. Deformações ou problemas devido à vibração durante a moldagem devem ser evitados a todo o custo, pois a manutenção das características dimensionais da estrutura é fator decisivo para sua utilização. Reforços do molde, paredes de molde espessas e de material apropriado são variáveis nas quais o projetista deve pensar.

As tolerâncias dimensionais e de acabamento superficial podem ser garantidas pela correta fabricação do molde e escolha do seu material. A cerca do posicionamento relativo entre insertos, para que o erro seja

pequeno é necessário que se utilize elementos controladores de tolerâncias (ou insertos metrológicos), como os da figura abaixo [RIBEIRO, 1998].

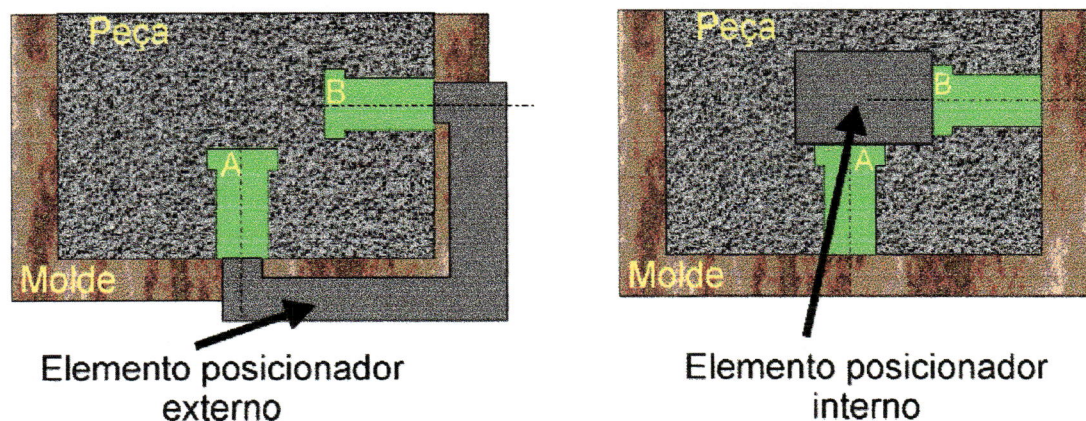


FIGURA 2.5 – Elementos para posicionamento de insertos [RIBEIRO, 1998].

A escolha do material mais adequado ao molde deve levar em consideração a aplicação futura da peça a ser moldada, o volume de produção da peça e o custo de fabricação e do material do molde. A tabela abaixo compara as três opções mais utilizadas.

TABELA 2.3 – Materiais para moldes [RIBEIRO, 1998].

MATERIAL	VOLUME DE PRODUÇÃO	CUSTO
Metálico (aço, alumínio)	Alto	Alto
Madeira	Baixo	Baixo
Nylon	Médio-Alto	Alto

Moldes metálicos são recomendados quando o volume de produção for muito alto e/ou a precisão dimensional da estrutura e posicional dos insertos for alta. Moldes de madeira são ideais para moldagem de lotes unitários, não devendo ser utilizados muitas vezes devido ao desgaste natural que sofrem. Os moldes de nylon apresentam duas vantagens importantes: primeiro, podem ser aplicados na moldagem de peças complexas, uma vez que permitem grande liberdade geométrica; e segundo, permitem uma grande redução na quantidade de desmoldante com relação aos outros materiais.

Quanto ao próprio granito sintético, sua obtenção pode ser dividida em quatro fases [RIBEIRO, 1998]:

- britagem e classificação do granito natural;
- otimização do empacotamento;
- cálculo da quantidade de material;
- adequação do processo de moldagem.

Após a escolha do tipo de granito natural a ser utilizado, torna-se necessário adequar o tamanho de suas partículas às necessidades do processo de moldagem. Para tanto, utiliza-se um triturador mecânico, que quebra o granito em diversos diâmetros pelo movimento de suas mandíbulas. É preciso lembrar que a quantidade de britas desse ou daquele diâmetro está ligada à regulagem do triturador e ao número de vezes que o granito é triturado [RIBEIRO, 1998].

Obter um produto adequado na britagem é fundamental para o sucesso da moldagem, uma vez que a otimização do empacotamento e o preenchimento adequado do molde dependem da disponibilidade da granulometria correta. Sobre esse assunto, RIBEIRO (1998) chama a atenção para o fato de que “a maior das britas não deve ser maior que a metade da menor cavidade a ser preenchida pelo material durante a moldagem”. Portanto, é necessário que o projetista defina o projeto do molde antes da britagem, de forma a conhecer de antemão quais as granulometrias de utilização mais provável (aquelas próximas e inferiores a maior brita possível de ser utilizada).

O produto da britagem são pedaços de granito de diferentes dimensões, os quais devem ser classificados por peneiras padronizadas de acordo com a norma NBR 5734-98. Estando as peneiras sobrepostas e montadas sobre algum dispositivo vibratório, pode-se iniciar a classificação, a qual resulta na obtenção das frações de brita, separadas umas das outras

segundo seu diâmetro equivalente, isto é, segundo o diâmetro da malha anterior àquela que a reteve (por exemplo, se uma brita atravessa a peneira de malha 7,93mm mas não atravessa a seguinte, de 4,75mm, então seu diâmetro equivalente é de 7,93mm). Tendo então à disposição as diversas frações de britas, passa-se à escolha do fator de empacotamento.

A importância em se determinar um fator de empacotamento “ideal” para cada aplicação é grande. O empacotamento máximo de britas deixa o menor espaço vazio entre as pedras, de forma que a quantidade de resina polimérica utilizada é a menor possível. Em matéria de custo isso é muito interessante, porém a diminuição da resina influencia as propriedades do material (principalmente a de amortecimento interno). Isso leva a crer que a otimização do fator de empacotamento deve ser um processo capaz de estabelecer o compromisso “ideal” entre desempenho e custo.

Tendo sido determinado o fator de empacotamento (através de alguma técnicas de otimização, como por exemplo a descrita em RIBEIRO), o projetista precisa calcular a correta quantidade de brita e resina. Para isso, é necessário calcular o volume da peça a ser moldada e, a partir dessa quantidade e do fator de empacotamento, extrair o volume (ou peso) das frações de brita e de resina a ser utilizada.

A adequação do processo de moldagem a cada peça específica é função do projeto e deve ser pensada antes da moldagem da peça, de forma a garantir, dentre outras coisas, um bom preenchimento do molde pelo material, um acabamento superficial adequado e um tempo de moldagem inferior a trinta minutos, como é mostrado nos passos para se realizar a moldagem propriamente dita, descritos abaixo [RIBEIRO, 1998] :

- Calcular a massa de resina com um acréscimo de 10% para garantir um completo e bom acabamento superficial da peça, pois a resina restante adicionada ao molde no final da moldagem forma uma camada lisa na superfície do molde envasado;

- Pesar e misturar as britas da mistura até atingir uma distribuição homogênea;
- Pesar, preparar e misturar a resina e o endurecedor. A partir desta etapa até a conclusão do envasamento, o tempo gasto não deve ser superior a 30 minutos;
- Juntar a resina e as britas lentamente e com o auxílio de uma espátula, misturar os materiais até que as britas atinjam um molhamento total;
- Acionar a mesa vibradora com uma frequência da ordem de 70Hz;
- Envasar o molde com o auxílio de uma espátula para que o material se espalhe bem no molde;
- Moldar gradativamente o restante do material;
- Manter o molde vibrando por aproximadamente 30 minutos para extrair as bolhas de ar que eventualmente possam se formar no interior da mistura.

2.3.2 – Mancais Radial e Axial

Os mancais são os componentes mais importantes de um cabeçote de usinagem. No caso de aplicações de precisão, essa importância transcende o escopo do projeto, atingindo as mais altas esferas do processo competitivo: “O projeto de mancais de precisão é reconhecido pelo meio industrial de hoje como uma necessidade estratégica” [PURQUERIO, 1989b].

Existem atualmente muitas configurações para o par eixo-mancal capazes de garantir alta precisão de funcionamento. No entanto, a literatura especializada tem apontado os mancais pressurizados externamente (mancais hidrostáticos e aerostáticos) como as melhores opções, no que diz respeito ao desempenho e à precisão.

Mancais hidrostáticos e aerostáticos baseiam-se no princípio da sustentação do eixo por um fluido pressurizado. Para mancais aerostáticos, o fluido é tipicamente o ar. Para os hidrostáticos, há um grande número de possibilidades para o fluido, que vão desde a água até os óleos lubrificantes. Decorre das diferenças de propriedade entre gases e líquidos as diferenças de projeto e desempenho entre os dois tipos de mancais. Mancais hidrostáticos apresentam rigidez e amortecimento muito superiores às dos aerostáticos, além de permitir maiores folgas na fabricação [PURQUERIO, 1989b].

Apesar da superioridade de desempenho, os mancais hidrostáticos sofrem com o aquecimento do conjunto, causado principalmente pelo cisalhamento do lubrificante. Muitas pesquisas têm sido desenvolvidas no intuito de se preservar a precisão do conjunto a despeito dessa geração de calor. Dentre elas, destacam-se as propostas de novos sistemas de refrigeração e do controle do funcionamento do mancal através de sistemas computacionais. Essa última tem atraído muitos pesquisadores que, ao longo dessa década, têm contribuído em inúmeras vertentes. No artigo de NOMURA, KANAI & MIYASHITA (1991), um sistema de controle de *runnout*, baseado em atuadores hidrostáticos diferenciais e uma servo-válvula, é apresentado. A idéia é a de se ajustar a posição do *datum* do eixo através do fluxo de óleo liberado pela servo-válvula, a qual é controlada pelos sensores. Seguindo a mesma linha, SANTOS & RUSSO (1998) desenvolveram os princípios operacionais e o roteiro de cálculo de mancais com injeção eletrônica de óleo, utilizando também servo-válvulas e atuadores hidrostáticos.

Ainda sobre a eliminação do calor gerado, outra solução possível é a de se utilizar fluidos de baixa viscosidade, como a água por exemplo. A utilização da água, no entanto, esbarra na turbulência gerada na alimentação do mancal [ARONSON, 1995]. Para superar esse problema, Alexander Slocum propôs uma nova concepção de projeto para mancais

hidrostáticos, que se baseia na restrição de fluxo de lubrificante pelo próprio mancal. Como resultado, diz seu projetista, velocidades até quatro vezes maiores que as possíveis para os cabeçotes hidrostáticos típicos podem ser atingidas, além da maior rigidez e acuracidade [ASHLEY, 1996].

A tecnologia de projeto de mancais auto-restritores hidrostáticos à água baseia-se no controle do fluxo de fluido de cada bolsa através de sua bolsa oposta: "...O fluido escoar para fora da bolsa na superfície do mancal, cruza os rasgos de compensação, cuja área está em harmonia com a área dos rasgos das bolsas opostas, e entra numa pequena bolsa coletora que é conectada a uma grande bolsa do outro lado do canal de alimentação do mancal. À medida em que o canal de alimentação é carregado e a passagem por um dos lados se torna estreita, a resistência ao fluxo aumenta para o restritor que gera uma força na direção da carga. Dessa forma, o fluido escoar mais facilmente para o restritor que está resistindo ao carregamento." [SLOCUM *et al*, 1995].

De concepção mais simples, os mancais de restrição fixa são ainda hoje utilizados largamente. Dentre as várias configurações, uma tem despertado interesse entre os pesquisadores: trata-se das restritores de ranhuras. As pesquisas apontam para as vantagens significativas associadas à utilização de algumas dessas configurações, que permitem até a utilização de materiais cerâmicos na fabricação de buchas para o mancal. Utilizando essa solução, o fluxo de fluido através do restritor é laminar, o que confere as principais vantagens dessa configuração frente às outras. Decorre disso uma maior simplicidade nos parâmetros de projeto, além de maiores rigidez e capacidade de carga [BALESTRERO, 1991].

Todo equipamento que utiliza mancais hidrostáticos necessita de um sistema de alimentação capaz de manter um fluxo adequado de fluido. A figura abaixo apresenta um sistema hidráulico típico para alimentação de um mancal hidrostático.

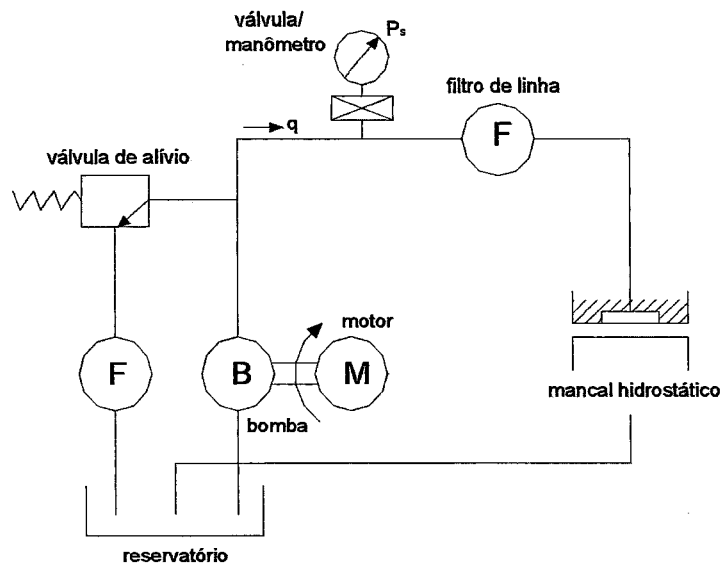


FIGURA 2.6 – Esquema básico de um sistema hidráulico para alimentação de um mancal hidrostático [ROWE, 1983].

Devido às exigências cada vez maiores pelo aumento de desempenho dos mancais, dispositivos de restrição variável chamados válvula de controle de vazão tem sido inseridos no esquema acima, como forma de garantir vazão constante do lubrificante para o mancal. Atualmente, existem muitas propostas construtivas para esse tipo de válvula (exemplos desse componente podem ser encontrados em ROWE, 1983, p. 80), capazes de garantir aumento de rigidez e capacidade de carga, além de ajustar o sistema de alimentação de fluido caso as condições de funcionamento se alterem.

YOSHIMOTO, ANNO & FUJIMURA (1993), apresentam um sistema, também baseado em restritores variáveis, que utiliza o equilíbrio de forças entre o lado superior e inferior de um disco polimérico como forma de controle do fluxo de fluido que entra na folga do mancal (Figura 2.7). Com

essa concepção, os autores afirmam ser possível atingir e manter uma alta rigidez sem as dificuldades encontradas em arranjos com válvulas, que necessitam de um ajuste manual do ponto ótimo de funcionamento para que a rigidez infinita possa ser atingida [MIZUMOTO *et al*, 1990].

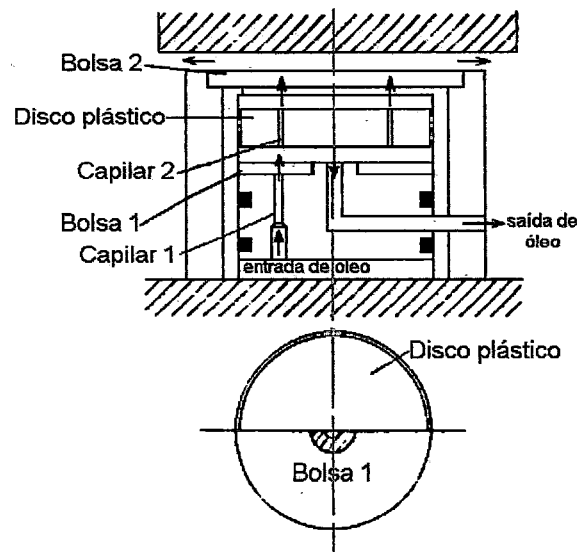


FIGURA 2.7 – Esquema de um restritor flexível [YOSHIMOTO *et al*, 1993].

O dispositivo de regulação da alimentação do lubrificante mostrado no artigo de BUSHUEV, TSYUNOV & PAVLOV (1990) soma-se a essa temática, apresentando um arranjo inovador entre diafragmas, típicos das válvulas citadas acima, capaz de manter constante a pressão em bolsas opostas. Esse sistema apresenta ainda a vantagem de ser adaptável a um grande número de configurações de mancais hidrostáticos.

Além disso, novos lubrificantes têm surgido com o intuito de se diminuir os gastos com energia, manutenção e troca de componentes desgastados. Lubrificantes “feitos sob medida” podem ser obtidos para virtualmente todo tipo de aplicação. No caso dos mancais hidrostáticos, o lubrificante deve ser de baixa viscosidade, estável ao cisalhamento e apresentar inibidores de oxidação. Para casos extremos, podem ser

adicionados aditivos capazes de garantir ao fluido maior estabilidade térmica e uma menor variação de viscosidade [STEVENS, 1995].

Mais recentemente, fluidos eletroreológicos têm se apresentado como solução para um dos maiores problemas apresentados por mancais hidrostáticos, que é a mudança de seus parâmetros de serviço devido à constante variação da viscosidade do lubrificante com o calor gerado por seu cisalhamento. Devido a propriedade desses fluidos de aumentar sua viscosidade pela aplicação de um campo elétrico, a compensação da perda de viscosidade à medida em que o fluido aumenta sua temperatura torna-se possível [AOYAMA & INASAKI, 1997].

O fluido eletroreológico é uma suspensão coloidal de partículas de 1-100 μm em um solvente não condutor. Quando submetido a campos da ordem de 1 KV/mm, este aumenta sua viscosidade em até 3 ordens de magnitude num tempo aproximadamente igual a 1ms. Análises revelaram que o aumento da viscosidade é devido ao surgimento de estruturas induzidas pelo campo elétrico, como na figura abaixo [DASSANAYAKE & FRADEN, 1999].

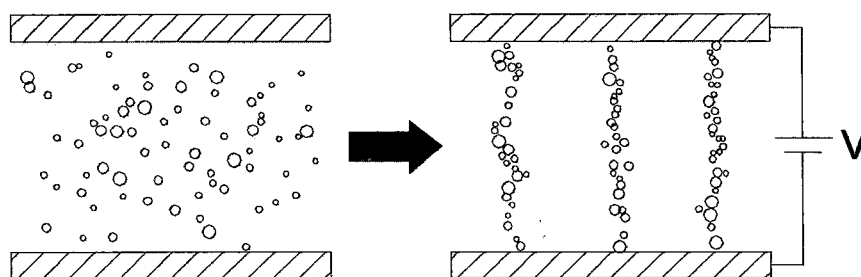


FIGURA 2.8 – Fluido eletroreológico [AOYAMA & INASAKI, 1997].

No âmbito dos materiais, uma das novidades mais discutidas é a utilização de materiais cerâmicos na fabricação de buchas de mancais hidrostáticos. A próxima seção discute esse assunto mais profundamente.

2.3.2.1 – Cerâmicas Avançadas Estruturais

Vivemos hoje uma nova revolução industrial, com novos paradigmas e novos conceitos. A cerca desse fato, MALDONADO & PEITER (1988) afirmam, no que diz respeito aos materiais utilizados pela indústria, que:

"O processo de reestruturação industrial que vivemos hoje implica na reformulação do perfil de utilização e produção de materiais e suas matérias-primas, introduzindo substituições, introduzindo novos produtos, provocando o desenvolvimento de determinados setores e declínio de outros. A partir de agora, a competição capitalista mundial passa a se orientar primordialmente pela produção e pelo consumo de bens com alto conteúdo tecnológico. O fator determinante é a forma de utilização dos materiais e não mais a sua obtenção."

Nesse contexto de inovações tecnológicas e de substituição de materiais, as cerâmicas avançadas estruturais se apresentam como uma opção atrativa para a solução de inúmeros problemas de engenharia. Produtos como mancais, implantes biocompatíveis, válvulas, selos mecânicos, pistões, camisas e guia fios são exemplos de componentes que, ao se utilizarem das vantagens das cerâmicas, puderam alcançar um desempenho superior [IKEGAMI, 1999].

Cerâmicas avançadas são materiais de natureza inorgânica e não metálica, capazes de desenvolver interessantes propriedades eletroeletrônicas, mecânicas, ópticas, térmicas, bioquímicas e biomédicas. Comparada aos metais, o baixo peso, a alta resistência ao calor e ao desgaste das cerâmicas avançadas permitem a sua utilização em inúmeras situações. Por exemplo, em motores a combustão muitas aplicações têm sido desenvolvidas no sentido de se diminuir as emissões de gases e aumentar a economia de combustível, sem perda de eficiência. Os cilindros fabricados em material cerâmico permitem que a combustão na câmara seja realizada a altas temperaturas, obtendo-se desta forma maior eficiência com a conseqüente redução da emissão de gases [NELLY, 1993].

As cerâmicas avançadas estruturais são aquelas que devem apresentar alto desempenho sob solicitações elevadas e/ou em altas temperaturas. Além disso, produtos em cerâmica avançada estrutural são quase sempre submetidos a ataques químicos e ao desgaste abrasivo. Algumas destas propriedades são inerentes ao material, outras são dependentes do processo de fabricação. Medidas da resistência mecânica, resistência ao desgaste, dureza e análise da microestrutura são ferramentas indispensáveis na determinação do desempenho de um produto cerâmico avançado [NIESZ (1983)].

No setor de máquinas-ferramentas, muitos investimentos têm sido feitos no sentido de se desenvolver projetos alternativos, baseados na utilização da cerâmica. Talvez o mais conhecido seja o torno cerâmico: "Para atender às exigências de precisão e qualidade, um torno de ultraprecisão foi quase inteiramente feito em cerâmica." [SPUR, 1994].

Uma outro projeto de máquina-ferramenta de ultraprecisão foi criado de forma que todos os seus elementos estruturais fossem feitos de alumina. O objetivo era desenvolver um protótipo capaz de usinar espelhos para *lasers* e para telescópios astronômicos com a alta precisão de que necessitam. No artigo em que descrevem o procedimento de projeto e as características construtivas dessa máquina, TANIGUCHI *et al* apontam os principais méritos da utilização de cerâmicas avançadas estruturais num projeto de ultraprecisão, que são [TANIGUCHI *et al*, 1986]:

- **A alta rigidez específica**, quase 5 vezes maior que a observada para o ferro fundido, o que determina níveis de deformação bem menores dos componentes estruturais cerâmicos e, conseqüentemente, maior precisão;
- **O baixo coeficiente de expansão térmica**, que colabora para uma menor deformação térmica do conjunto e para uma maior precisão da máquina;

- **A inexistência de deformações plásticas à temperatura ambiente**, cuja conseqüência positiva é a grande estabilidade de forma dos componentes estruturais da máquina;

- **A grande estabilidade química e a impossibilidade de ocorrência de ferrugem;**

- **A alta resistência ao desgaste;**

- **A relativa facilidade em se obter qualquer formato que se queira.**

Da mesma forma, TANIGUCHI *et al* citam os deméritos desse tipo de material:

- **Fragilidade e baixa resistência ao choque**, uma conseqüência da incapacidade desse material de se deformar plasticamente;

- **Pequena capacidade de amortecimento;**

- **Estrutura porosa, fraca no que diz respeito a carregamentos concentrados.**

Motivados pelas características positivas desses materiais, muitas pesquisas têm sido desenvolvidas no sentido de se superar as limitações apontadas acima. Atualmente, as inovações introduzidas através de trabalhos em ciência e engenharia de materiais têm tornado as cerâmicas avançadas estruturais mais adequadas à utilização em máquinas e equipamentos diversos.

É nesse contexto de inovação que vêm surgindo as aplicações tribológicas das cerâmicas de engenharia. Essa talvez seja a área mais capaz de extrair benefícios da utilização de cerâmicas, já que explora todas as suas propriedades positivas. Um exemplo disso é a aplicação da cerâmica como material para bucha de mancais hidrostáticos.

Um mancal hidrostático gera muito calor durante o seu funcionamento. O cisalhamento intenso do fluido lubrificante cria energia térmica, a qual é transmitida ao eixo e à bucha do mancal a todo instante. A importância de se utilizar a cerâmica é que, além da sua inércia química e da sua resistência ao desgaste, seu coeficiente de expansão é muito baixo, o que evita deformações e mudanças de posição dos componentes. Além disso, a cerâmica se vale da simetria da bucha, fazendo com que o calor que porventura não seja extraído atinja a estrutura igualmente, por todas as direções. A soma desses fatores colaboram para a precisão de funcionamento do mancal e de todo o conjunto, justificando assim a aplicação da cerâmica.

Para que os materiais cerâmicos transmitam suas propriedades aos componentes mecânicos, é necessário que haja um processamento adequado da matéria-prima. Sabe-se ainda que a transformação de um pó cerâmico em uma peça passa por etapas específicas, que devem ser realizadas de maneira criteriosa e com planejamento, de forma que as dimensões, o acabamento superficial e a microestrutura de interesse sejam alcançados ao final do processo.

Com relação à obtenção das dimensões e do acabamento superficial necessários, pode-se dizer que esses são determinados pela qualidade do equipamento e do ferramental utilizado na usinagem desses componentes. Alta rigidez e baixos níveis de vibração são requisitos indispensáveis para que um equipamento se credencie ao trabalho de usinar satisfatoriamente peças cerâmicas.

A cerca da microestrutura, esta deve ser escolhida segundo a aplicação. O artigo de TERHECI traz uma série de informações a cerca da microestrutura de cerâmicas avançadas estruturais para aplicações tribológicas, principalmente no que diz respeito a tamanhos de grão.

Num estudo do comportamento tribológico da alumina com 99,9% de pureza, TERHECI mostra, através de testes tipo *pin-on-disk*, que materiais com tamanho de grão na faixa de 14 μ m apresentam melhor resistência ao desgaste que aqueles com grãos entre 4 – 8 μ m. Apesar do incremento nas propriedades mecânicas proporcionado pela diminuição do tamanho de grão, seu aumento eleva consideravelmente a resposta do material ao desgaste, através:

- **da diminuição do número de pontos de nucleação de trincas** pela diminuição de quantidade de contornos de grão por unidade de volume no material (uma decorrência natural do aumento do tamanho de grão da microestrutura);
- **do aumento da tenacidade da microestrutura**, associado ao aumento da deformação plástica nos grãos devido ao calor gerado pela fricção.

Além disso, microestruturas com grãos maiores apresentam maior comportamento mecânico sob carregamento dinâmico, uma vez que, para os materiais cerâmicos, os contornos de grão exercem uma influência negativa sobre a resistência à fadiga [TERHECI, 1997].

3 METODOLOGIA DE PROJETO DE UM CABEÇOTE DE ULTRAPRECISÃO

3.1 Introdução

Esse capítulo apresenta uma metodologia de projeto de cabeçotes de ultraprecisão, desenvolvida com base em diversos métodos e técnicas de projeto existentes. Desejou-se implementar essa metodologia devido a enorme importância que há, para o ato de projetar, em se conhecer as opções, potencialidades e a maneira adequada de se utilizar as técnicas e os métodos existentes.

O objetivo desse capítulo é, portanto, duplo. Primeiro, pretende-se promover um estudo dos métodos e técnicas passíveis de serem utilizados em projetos de cabeçotes. Segundo, deseja-se extrair desses métodos gerais um outro, mais específico, que trate satisfatoriamente o problema do projeto de cabeçotes de ultraprecisão e que seja capaz de servir a três propósitos cruciais: permitir que o projeto final se aproxime ao máximo do "ideal"; incorporar a questão da precisão no cerne do processo de projeto; promover o desenvolvimento do potencial do projetista não só pela racionalização de suas tarefas como também pelo incentivo ao seu aperfeiçoamento constante frente às inovações.

Faz-se importante frisar que esse capítulo não trata o termo "metodologia" enquanto descrição do procedimento utilizado na realização do trabalho (com descrições do tipo de dado a ser obtido, forma de coleta e de análise dos mesmos, etc.). Metodologia aqui é tratada como "estudo científico dos métodos" de projeto existentes, a qual é necessária como

suporte para a criação do método de projeto próprio para cabeçotes de ultraprecisão.

A tarefa de se inserir no âmbito do método questões ligadas ao próprio projetista não é fácil. A motivação para isso é, no entanto, muito grande e nasce do conceito de que “nenhum projeto de qualidade pode surgir sem que haja a intervenção de um bom projetista” [SLOCUM, 1992]. As metodologias e os computadores podem apresentar soluções a várias questões pertinentes ao projeto, mas somente o projetista preparado pode contribuir com novas idéias e concepções, vitais para o desenvolvimento de novas tecnologias e aumento da competitividade.

Todo projetista deve desenvolver seu próprio método de abordagem e resolução de problemas de projeto. Sugere-se que, para isso, o projetista deva [SLOCUM, 1992]:

- **Encorajar a criatividade;**
- **Reconhecer a criatividade dos outros, adotando aquilo que já exista e que funcione;**
- **Encarar os problemas sem depender da sorte;**
- **Ser disciplinado e organizado;**
- **Respeitar a simplicidade e os conceitos técnicos associados ao projeto;**
- **Submeter o projeto continuamente a uma análise de validade econômica.**

Além disso, um bom engenheiro de projeto precisa manter sua mente aberta às novidades (o “como isso funciona?” precisa ser questionado constantemente), ser um grande identificador de problemas e das reais necessidades dos clientes e usar métodos sistemáticos de análise e síntese, que auxiliem na avaliação das inúmeras idéias conceituais geradas no início

da resolução dos problemas (quando a criatividade e a multidisciplinaridade são vitais). Outra importante tarefa do projetista é inculcar suficiente realidade em sua mente, de forma a permitir que sua manifestação interior de criatividade produza soluções para seus problemas reais [SLOCUM, 1992].

Não se pode esquecer que o projetista é um membro da organização para a qual trabalha e que, dessa forma, está sujeito às regras, tanto hierárquicas quanto filosóficas da empresa. Duas observações devem ser feitas a esse respeito. Primeiro, que a capacidade de comunicar idéias e interagir com outros departamentos é fundamental ao projetista. Com a crescente valorização das filosofias de integração, tais como a engenharia simultânea, aliadas a utilização de sistemas computacionais tipo CAD/CAE/CAM dotados de ferramentas de computação colaborativa, tais como correio eletrônico, agenda eletrônica em grupo, vídeo conferência, etc., o projetista tem cada vez mais a sua disposição, ferramentas de integração. No entanto, muito além da mera utilização das novas tecnologias, comunicação e interação constituem o cerne das atividades produtivas numa empresa, sendo portanto indispensáveis.

Uma segunda observação diz respeito à ética. Todo projetista é, antes de tudo, um trabalhador inserido num contexto e, como tal, precisa estruturar sua conduta em torno de um sistema de princípios relativo a si mesmo e a esse contexto. Nasce daí um conjunto de conflitos entre o homem e as instituições, o qual influencia o modo como as questões de projeto serão encaradas. Essa é uma lição importante: bons e maus projetistas não diferem somente pelas técnicas de projeto que adotam, mas também pela maneira como conduzem seu trabalho.

O projetista precisa ainda desenvolver uma visão integral do processo de projeto, não se restringindo a nenhum dos muitos pontos de vista parciais, como o econômico, o de manutenção, de fabricação, etc. Essa é uma das principais características do profissional considerado "ideal" pelas empresas da atualidade [ROZENFELD *et al*, 1999].

A questão sobre como se manter atualizado é também de difícil solução, pois trata, dentre outras coisas, da maneira como lidar e até produzir inovações. Entre consultas a catálogos e revistas técnicas e análise dos produtos da concorrência, insere-se a necessidade do pensamento criativo e inovador. A experiência vem mostrando que, “sem o pensamento criativo, uma indústria morre gradualmente” [NIEBEL & DRAPER, 1974]. Cabe ao projetista manter-se sempre aberto ao novo, encarando as inovações como uma parte indispensável do processo de projeto e como um dos principais meios para se atingir o projeto “ideal”.

Sabe-se que um projeto, apesar dos cuidados e das revisões, nunca é perfeito. No entanto, um bom projetista com domínio das técnicas e métodos de projeto e com visão inovadora, pode criar projetos tão próximos do “ideal” quanto possível. Desde os novos métodos de decomposição do projeto em tarefas minimamente interdependentes [KUSIAK & WANG, 1993] até técnicas de projeto orientado às redes computacionais [PAHNG, 1998], passando pelos *expert systems* [EDWARDS, 1994], as novidades se somam às fórmulas já existentes, aumentando consideravelmente as opções e o nível de qualidade dos projetos.

Um último fator a ser considerado no método é a precisão. Ela foi a mania dos anos 80 e 90. Atualmente, já é possível considerá-la uma unanimidade entre os fabricantes de equipamentos mecânicos, na medida em que se firma como um dos elementos centrais do atual paradigma industrial.

A fim de efetivar a precisão, o projetista precisa desenvolver um projeto robusto (isto é, um projeto capaz de minimizar a influência dos efeitos ambientais sobre o desempenho do equipamento), analisando a máquina enquanto *sistema* (dotada de respostas particulares quanto ao carregamento estático e dinâmico, de uma configuração e de uma conectividade estrutural) e enquanto *geratriz* (tal qual uma “caixa preta” da qual se conhece apenas os resultados finais).

Assumir a máquina como sendo um sistema constitui o ponto de vista mais difundido entre os projetistas, na medida em que esse se impõe desde o princípio do processo de projeto (quando um projetista idealiza algo, seu primeiro pensamento é: que componentes verei utilizar e como irei articulá-los de forma a obter o resultado final desejado?). A importância dessa análise para a precisão é óbvia: uma máquina só pode produzir dimensões precisas numa peça se seus movimentos, rotações e seu funcionamento como um todo forem adequados a essa finalidade (*o sistema idealizado pelo projetista precisa, antes de tudo, ser intrinsecamente capaz de produzir a precisão*). No entanto, apenas esse enfoque não é capaz de garantir a precisão da peça final, a menos que se utilize componentes altamente precisos. Essa é uma possibilidade real, que também deve ser considerada. No entanto, em muitos casos a busca da precisão por esse caminho torna o projeto inviável tanto técnica quanto economicamente.

Enxergar a máquina como uma “caixa preta” leva à escolha de uma das estratégias abaixo como forma de garantir a precisão desejada [SLOCUM, 1992]:

- Garantir a precisão através do mapeamento de erros;
- Garantir a precisão através de um sistema metrológico de apoio, composta por sensores.

Atualmente o mapeamento ou a implantação de sistemas para a medição e correção *on-line* de erros não são mais novidade, sendo práticas já difundidas. O projetista deve analisar essas possibilidades realisticamente, pois elas podem representar a melhor solução para o seu problema particular.

Resumindo: a simples inserção da precisão em toda a discussão sobre projetos muda fundamentalmente alguns dos pontos abordados até aqui. Na verdade, a precisão vem tornar mais difícil e longo o caminho que o projetista percorre, pois acrescenta aos já numerosos requisitos de projeto

o de compreender, efetivar e controlar a precisão de máquinas e processos de fabricação. O diferencial da precisão torna a arte de projetar muito mais complexa, exigindo do projetista mais dedicação e estudo, além da eterna preocupação em como tornar seu processo mais e mais preciso.

3.2 O Processo de Projeto

Esse capítulo apresenta um método para projeto de cabeçotes de ultraprecisão baseado em métodos e técnicas já existentes. Esse novo método foi desenvolvido concomitantemente à metodologia, de forma que o projetista, à medida em que lê o capítulo e a despeito dos caminhos tomados pelo autor, possa ter a liberdade e o entendimento necessários para implementar mudanças e personalizar o método apresentado, tornando-o adequado à sua filosofia de trabalho pessoal. De forma a facilitar a consulta, o método voltado aos cabeçotes será reduzido a fluxogramas relativos a cada etapa de projeto.

Antes do desenvolvimento do método, faz-se necessária uma reflexão a cerca do processo de projeto propriamente dito. Pode-se dizer que o projeto de um cabeçote de ultraprecisão é como um núcleo, para o qual convergem influências oriundas do contexto que o cerca e o define. A Figura 3.1 representa esse conceito na forma de esferas de influência. O projeto (representado pela esfera central) é primeiramente influenciado por uma série de fatores físicos e econômicos. Essas especificações, por sua vez, são definidas por técnicas e métodos de projeto dos quais lança mão o projetista para estabelecer as características do equipamento. Mais externamente está o próprio projetista que, com seu sistema de princípios, determina o desenrolar das atividades relacionadas ao processo de projeto.

Toda essa conjuntura, para o caso específico dos cabeçotes de ultraprecisão, sofre uma simplificação decorrente da especificidade do equipamento e de sua pequena escala de produção. Muitas das discrepâncias entre o método aqui apresentado e os outros, mais generalistas, são causadas justamente pelas peculiaridades listadas acima.

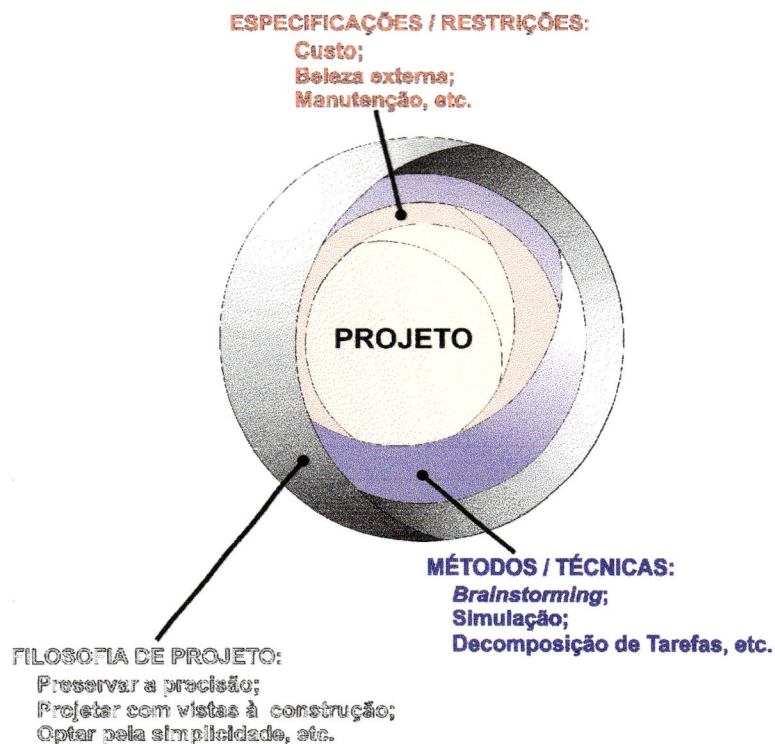


FIGURA 3.1 – O projeto e suas influências.

Como um complemento à Figura 3.1, a Tabela 3.1 traz alguns exemplos para os três tópicos apresentados.

A elaboração de um projeto de cabeçote de ultraprecisão passa, idealmente, por nove fases:

- **Definição de tarefas** (de acordo com as necessidades do cliente);
- **Definição das especificações** (a partir da análise das necessidades);
- **Busca de idéias** (criação das possíveis soluções das tarefas);
- **Avaliação** (escolha da melhor alternativa);
- **Layout do projeto** (desenvolvimento dos desenhos preliminares da solução adotada);
- **Detalhamento do projeto** (finalização do projeto como um todo);

- **Construção do protótipo** (averiguação das hipóteses para a fabricação e montagem);

- **Testes de Funcionamento** (metrologia / testes de desempenho);

- **Tarefas pós-projeto** (planos de manutenção, documentação, etc.).

TABELA 3.1 – Itens que influenciam um projeto [NIEBEL & DRAPER, 1974; PURQUERIO, 1989a; RUFFINO, 1991].

Filosofia de Projeto	Métodos / Técnicas	Especificações/Restrições
Satisfazer o cliente	<i>Brainstorming</i>	Resistência à Tração
Buscar o projeto "ideal"	<i>Analytic Hierarchy Process</i>	Rigidez
Projetar para construir	Análise Sistemática	Custo
Preservar a vida	Decomposição do Projeto	Tempo de Desenvolvimento
Projetar com vistas à medição	Simulação	Funcionalidade
Buscar a máxima repetibilidade	Modelagem Sólida	Aparência
Preservar o meio-ambiente	Prototipagem Rápida	Manutenção
Primar pela simplicidade	FMEA	Limpeza Operacional
Buscar a máxima precisão	CAD	Peso da Estrutura

Cada uma das fases de projeto possui características próprias, de forma que serão abordadas individualmente. No entanto, algumas técnicas de cunho geral podem auxiliar o projetista a resolver muitos dos problemas que surgem, independentemente da fase de projeto. São elas [SLOCUM, 1992]:

- **Análise de problemas similares**, em que o projetista busca inspiração (ou mesmo uma solução pronta para ser implementada) em projetos similares ao seu. A técnica é simples: após a identificação do problema, busca-se em catálogos, revistas técnicas e em outros equipamentos, soluções inventadas por outros que sirvam também como solução para o problema enfrentado;

- **Encadeamento progressivo de idéias**, que parte de um esboço do problema (início da cadeia) até o que se deseja obter no fim do projeto (fim da cadeia), ligando esses pontos com todas as idéias concebíveis;

- **Encadeamento regressivo de idéias**, que estabelece os elementos necessários ao projeto a partir da idéia do projetista do que deveria ser o projeto final.

Além disso, o estudo de validade econômica e a reavaliação contínua do processo de projeto devem ser consideradas tarefas em constante elaboração. Se assim o for, muitos dos conflitos técnico-econômicos que surgem ao longo do processo poderão ser evitados. Como essas precauções englobam todas as fases do projeto, a melhor maneira de serem efetivadas é através do uso de métodos adequados ao gerenciamento do processo como um todo. Tais métodos, que se iniciam na fase de concepção e seguem até a entrega do projeto final, implementam a gestão do projeto em todas as suas facetas (desde custos até recursos humanos), coordenando e integrando o processo de forma a se atingir melhor e mais rapidamente os objetivos estabelecidos [ROZENFELD *et al*, 1999].

Atualmente, existem vários métodos de gerenciamento disponíveis: CPM (*Critical Path Method*), PERT (*Program Evaluation and Review Technique*), Corrente Crítica, Engenharia de Valor, C/SCSC (*Cost/ Schedule Control Systems Criteria*), dentre outros. Todos eles apresentam meios de se acompanhar o andamento do projeto, de forma que todas as atividades possam ser representadas e que as tarefas e seus respectivos tempos de execução possam ser administrados. As vantagens são inúmeras [SLOCUM, 1992]:

- Encaminha o projeto para uma estimativa inicial mais acertada;
- Facilita a identificação dos pontos críticos do projeto;
- Funciona como argumento para o cumprimento dos prazos;

- Permite a hierarquização de atividades, estabelecendo as relações de precedência entre tarefas (decorre daí a possibilidade de se dividir o projeto e delegá-lo a grupos de trabalho);
- Permite o acompanhamento dos gastos financeiros e de tempo durante o projeto;
- Criam uma sistemática de documentação do processo de projeto.

Apesar do alto grau de desenvolvimento dos métodos de gerenciamento, algumas de suas ferramentas têm sido largamente estudadas. Dentre os muitos trabalhos publicados, há duas linhas de pesquisa muito exploradas:

- Decomposição do projeto em tarefas com o máximo de independência entre elas, de forma a serem executadas por diferentes grupos. As bases teóricas e alguns dos últimos avanços nesse sentido estão relatados em detalhes no artigo de KUSIAK & WANG (1993);
- Superposição de tarefas sujeitas a relações de precedência, permitindo que essas possam ser simultaneamente realizadas. Essa abordagem aparece, por exemplo, em KRISHNAN, EPPINGER & WHITNEY (1995).

A ferramenta computacional tem sido utilizada no gerenciamento de projetos devido as suas muitas qualidades, tais como sua capacidade de lidar com muitas tarefas, ordenando e reordenando-as a qualquer tempo e de maneira facilitada. Sistemas CAD (*Computer Aided Design*) ligados à tecnologia de PDM (*Product Data Management*) permitem que informações pertinentes ao projeto/produto possam ser gerenciadas com vistas à máxima integração entre projeto e manufatura.

Seguindo essa linha, outras técnicas baseadas em *softwares* e voltadas à integração podem se somar ao quadro de parceria CAD/PDM. Com relação à estrutura do produto, a BOM (*Bill Of Material*) pode colaborar

em muito na manutenção e distribuição de dados. Essas listas de material, que contêm desde informações sobre fornecedores de matéria-prima até o ferramental para a produção, poderiam ser expandidas de forma a receber as informações produzidas pelo processo de projeto do produto, compondo o núcleo do sistema PDM. Com as informações sobre o projeto assim dispostas, técnicas tais como o *Workgroup Computing* ou Sistemas de Classificação/Tecnologia de Grupo podem ser implementadas, permitindo que sistemas CAD distribuídos acrescentem e manipulem informações dos bancos de dados sem limitações físicas ou burocráticas.

A seguir, discute-se cada uma das etapas de projeto.

3.2.1 - Definição de tarefas

Essa é a primeira fase de qualquer projeto. Ela compreende todo o processo de conversação com o cliente, terminando com a determinação clara de todas as necessidades a serem satisfeitas pelo projeto.

Nesse trabalho, onde o foco é o processo de projeto, cliente é a designação dada ao grupo de pessoas que, com base em estudos e necessidades próprias da instituição que representam, encomenda um projeto de cabeçote de ultraprecisão. Note que essa abordagem simplifica em alguns aspectos o ciclo do projeto, já que o produto final desejado pelo contratante é tão somente o projeto, sem a necessidade do desenvolvimento do ferramental, da homologação do processo, etc.

No caso específico de cabeçotes de ultraprecisão, a definição do que é necessário é muito importante, principalmente porque oferecer mais, quando a precisão está envolvida, aumenta o custo do projeto e aumenta muito o custo do equipamento.

A Figura 3.2 apresenta as tarefas que compõem essa fase do projeto.

Definição das Tarefas

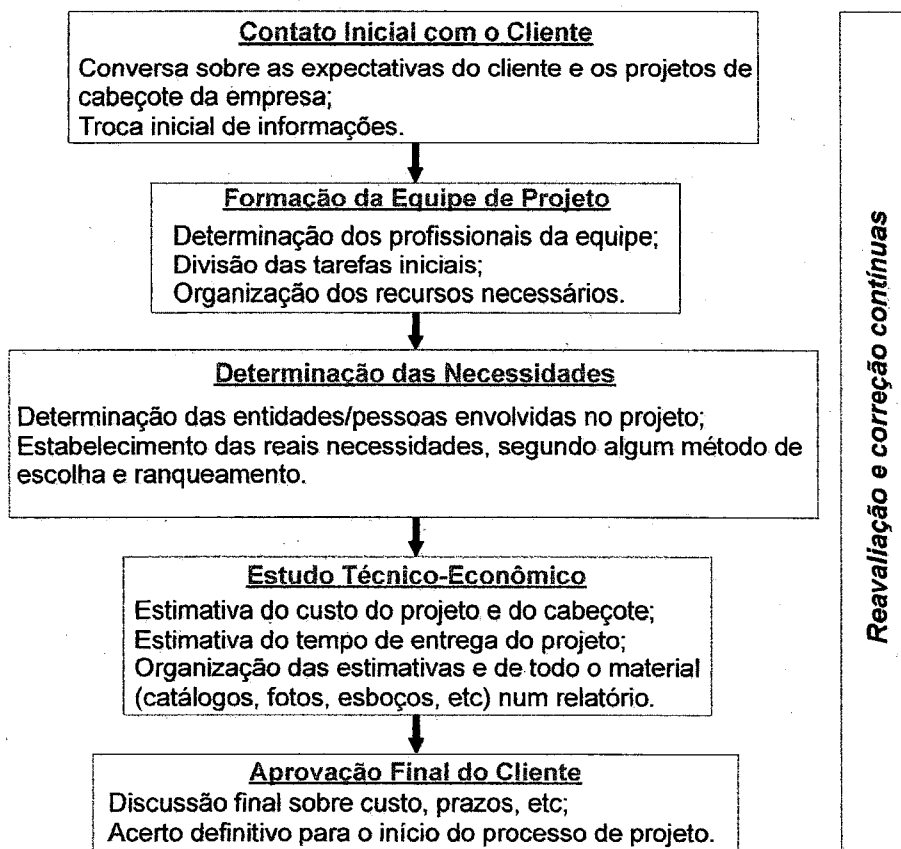


FIGURA 3.2 – Fase de definição de tarefas.

3.2.2 - Definição das especificações

Nessa fase, o projetista define as especificações que permitirão satisfazer as necessidades do cliente, sendo a etapa na qual os problemas de projeto são determinados. A particularidade dessa fase é que nela, apenas o projetista e sua equipe apontam os resultados. Nas demais fases a participação de outros setores, mesmo que pequena, é indispensável.

Um dos métodos utilizados para a determinação de especificações de máquinas de ultraprecisão é a casa da qualidade, ou QFD. Esse consiste em uma matriz de relacionamento das necessidades dos clientes com os requisitos de qualidade necessários ao equipamento. A cada um dos requisitos é atribuído um peso global, de forma a classificá-los de acordo

com seu grau de importância. A maior vantagem da casa da qualidade é a possibilidade de visualização de todas as relações entre requisitos de projeto e necessidades dos clientes [WEINGAERTNER *et al*, 1996].

São muitas as dificuldades em se determinar todos os fatores que afetam as especificações de um cabeçote de precisão. Em linhas gerais, pode-se dizer que essas estão ligadas às necessidades dos clientes mas que algumas delas, tais como as condições do ambiente de uso do cabeçote (nível de vibração externa, limpeza do ambiente) ou a forma como esse será utilizado também são relevantes. Na prática, procura-se impor limites mínimos de desempenho tais como o máximo *runnout* axial e radial permitidos, a mínima rigidez axial e radial tolerada, o desvio térmico do nariz da árvore, a rotação da árvore, etc.) [PURQUERIO, 1990] e estipular o espaço ergonômico [NIEBEL & DRAPER, 1974], além das características peculiares a cada projeto.

A Figura 3.3 apresenta o fluxo de tarefas dessa fase.

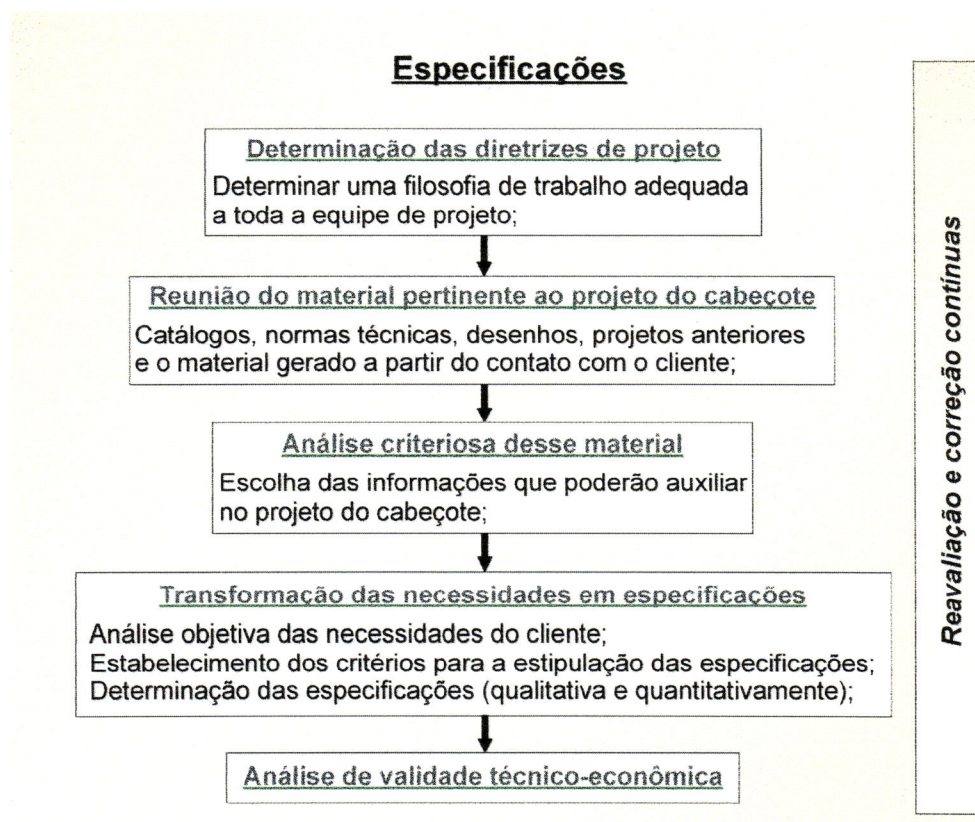


FIGURA 3.3 – Fase de Especificação.

3.2.3 - Busca de idéias

A busca de novas idéias é a fase do projeto na qual são propostas todas as soluções que satisfaçam as especificações apontadas pela equipe envolvida no projeto. Nela, as idéias nascem, desenvolvem-se e, dependendo da análise de suas reais possibilidades, são mantidas ou eliminadas. As que permanecem, passam para a fase posterior do projeto, a avaliação.

A partir dessa fase, as tarefas de projeto são tais que passam a ser mais facilmente realizáveis a âmbito computacional. Esse fato promove uma mudança de *status* do computador, que passa de mera ferramenta de comunicação para um potente transformador de informações (baseado em *softwares* especializados, dotados de ferramentas de cálculo e bases de dados integradas) que auxilia diretamente a realização do projeto.

Atualmente, observa-se um crescimento assustador no número e na qualidade dos pacotes computacionais voltados a projetos. Vale a pena lembrar, no entanto, que esses constituem uma ferramenta da qual o projetista pode (e deve!) lançar mão como forma de melhorar a qualidade do seu trabalho. Em qualquer projeto, o fundamental é sempre o homem e sua mente criativa, pois é ela que permite a articulação das idéias de forma que o todo possa ser concebido. Um bom projeto se resolve com a junção coerente das melhores idéias, o que é possível somente através da inventividade da mente humana.

O atual paradigma de projeto sugere aliar a eficiência dos computadores à criatividade humana, apontando a tendência de se "sair do tráfego e tomar caminhos alternativos" [PURQUÉRIO, 1990]. Insere-se nesse contexto a questão da inovação tecnológica.

Principalmente na década de 1980, firmou-se decisivamente o modelo de manutenção da vantagem competitiva sobre empresas concorrentes através de novas tecnologias [LOVERIDGE & PITT, 1990]. Baseados

nessa tendência, muitos trabalhos vêm sendo produzidos no sentido de promover avanços tecnológicos, sendo que muitos deles são aplicáveis à área de projetos. Mais especificamente na área de cabeçotes de ultraprecisão, trabalhos sobre novos materiais estruturais (como o granito sintético) e tecnologia de mancais têm o maior destaque.

Sugere-se a seguir um conjunto de etapas que compõem a fase de busca de idéias. Antes disso, é importante ressaltar que criatividade e tecnologia serão considerados esteios sobre os quais se apoia o projeto do cabeçote de ultraprecisão. Supõem-se, daqui por diante, que o projetista tenha sempre em mente a importância de se considerar sempre esses dois elementos em suas ações de projeto.

A fase de busca de idéias pode ser dividida em quatro etapas:

- Desenvolvimento da estrutura funcional do equipamento;
- Designação da lista de componentes;
- Estudo do arranjo físico dos componentes;
- Desenvolvimento de todas as soluções para os componentes;

3.2.3.1 – *Desenvolvimento da estrutura funcional do equipamento*

De posse das especificações, a primeira atitude do projetista deve ser a de determinar quais sistemas irão compor o equipamento que está sendo projetado. Na verdade, em muitos casos, esse problema é abordado durante a elaboração das especificações, devido a interdependência entre alguns parâmetros de funcionamento do equipamento e a arquitetura dos sistemas que o compõe.

A isso se segue a tarefa de se desenvolver uma estrutura de funções que integre todos os sistemas num conjunto adequado às expectativas de funcionamento. Isso pode ser feito através de um diagrama que represente

graficamente os sistemas, seus elementos e suas inter-relações. Um exemplo de estrutura de funções, desenvolvido para uma retificadora de precisão, é dado em WEINGAERTNER (1996).

No caso do cabeçote de ultraprecisão desse estudo, sugere-se uma divisão do conjunto em sistemas não muito amplos, de forma a facilitar posteriores processos de análise e otimização do projeto.

3.2.3.2 – Designação da lista de componentes

Para cada sistema idealizado, há que se determinar quais elementos irão compô-lo. O objetivo dessa etapa é garantir ao projetista a facilidade de escolhas gerais de componentes, escapando assim da tentação de selecionar ao invés de levantar possibilidades.

Ao alcançar essa etapa, é certo que o projetista já terá vislumbrado algumas soluções específicas para o projeto. Talvez ele já tenha em mente todo o projeto! No entanto, atribuir prematuramente características específicas a alguns componentes pode limitar em muito as possibilidades de outros. Como forma de se evitar longas etapas de reprojeção, causadas por componentes que se mostram incapazes de satisfazer as exigências de desempenho, aconselha-se cautela e parcimônia nessa etapa.

3.2.3.3 – Estudo do arranjo físico dos componentes

Essa etapa diz respeito às formas de se representar o arranjo físico dos componentes tal como estarão dispostos no conjunto da máquina. Isso é importante principalmente porque dá ao projetista uma primeira visão do conjunto, muito útil na determinação da integração entre os sistemas.

Atualmente vê-se várias técnicas voltadas para essa fase, disponíveis para uso em ambiente computacional. O motivo para isso é duplo. Primeiro, objetiva-se simplificar o processo de determinação dos possíveis arranjos físicos através da ferramenta computacional, atribuindo rapidez e eficiência ao processo; segundo, porque desenvolver uma versão da máquina

acessível ao computador torna o processo de simulação e otimização uma decorrência quase natural do próprio ato de projetar. A satisfação dessas duas metas gera um projeto de maior qualidade e a custos reduzidos, tendo portanto grande aceitação entre os projetistas.

Algumas das técnicas utilizadas atualmente são [HSU & WOON, 1998]:

- **Representação por imagens**, onde modelos visuais (tais como um esboço feito a mão) representam o equipamento num formato facilmente inteligível pelo ser humano. Muito útil na discussão ou no amadurecimento de idéias;
- **Representação por objetos**, na qual os componentes têm suas funções e características representadas por modelos orientados a objetos;
- **Representação por gráficos** ou por fluxogramas, útil na descrição geral de esquemas para a associação de sistemas e para estudo das inter-relações entre os componentes. Essa representação é largamente utilizada, desde estruturas de funções (como em WEINGAERTNER (1996)) até os diagramas de blocos;
- **Representação por modelos geométricos**, onde os componentes são representados por seus aspectos estruturais, produzindo modelos computacionais em duas ou três dimensões;
- **Representação por modelos de conhecimento**, em que regras, casos ou qualquer conhecimento formam um sistema de apoio ao projetista, capaz de modelar o comportamento de componentes ou sistemas;
- **Representação por linguagem**, através da qual se formaliza o conhecimento já estabelecido sobre o equipamento através de uma gramática simplificada, voltada à descrição simples das características da máquina.

3.2.3.4 – Desenvolvimento de todas as soluções para os componentes

Após idealizar os sistemas, seus componentes e o arranjo ideal entre eles, o projetista alcança a principal etapa da busca de idéias: o desenvolvimento das possíveis soluções para cada componente utilizado.

Até esse ponto, todas as idéias adotadas diziam respeito a componentes genéricos, como por exemplo um mancal. O objetivo dessa etapa é levantar todas as possibilidades construtivas para os componentes, de forma a torná-los específicos, como por exemplo passar de um mancal qualquer para um mancal de rolamento, hidrostático, etc.

Para realizar satisfatoriamente essa etapa, o projetista lança mão de um sem número de informações, idéias e conceitos, os quais são extraídos ou de sua experiência e imaginação ou de sistemas de informação. A forma como as alternativas serão levantadas dependerá de uma série de fatores, tais como a filosofia de projeto adotada, a estratégia da empresa frente a utilização de novas tecnologias, a importância do componente para a máquina, o tempo e os meios disponíveis para a pesquisa, dentre outros. Todos esses fatores deverão ser considerados antes do início dessa etapa, de forma a evitar novas buscas por soluções em etapas de projeto posteriores.

Dois aspectos devem ser ressaltados. O primeiro deles diz respeito à inovação tecnológica. Mais que em qualquer etapa de projeto, aqui o projetista precisa adotar uma posição bem definida frente à questão da utilização de novas tecnologias, definindo estratégias para sua apreensão.

Um outro aspecto diz respeito aos meios disponíveis para a efetivação do projeto. É preciso ter em mente quais são as limitações da empresa quanto a materiais, equipamentos e mão-de-obra especializada, com o intuito de se evitar idéias não factíveis.

Existem vários métodos/técnicas usados no desenvolvimento de soluções para o projeto e seus componentes. Alguns deles são listados a seguir [SLOCUM,1992]:

• **Análise sistemática do processo.** Consiste em atribuir ao processo de projeto, desde a concepção até a entrega do projeto final, uma sistemática bem definida, de forma que cada proposta de solução tenha máxima coerência. Pode-se dizer que essa sistematização é a alma do procedimento de se projetar algo.

• **Testes e modelamento.** Modelos matemáticos podem ser usados também nessa fase, como respaldo às soluções propostas. Na verdade, avaliações mais acuradas de cada uma das soluções não deveriam ser realizadas na fase de concepção. No entanto, algumas delas necessitam desse tipo de análise já no início, principalmente quando as especificações do projeto limitam ou exigem muito das soluções propostas.

• **Brainstorming.** *Brainstorming* é o método mais freqüentemente usado para gerar projetos conceituais. Trata-se da discussão das possíveis soluções do projeto em grupo, sem que hajam ressalvas ou críticas às idéias levantadas [SLOCUM, 1992].

Geralmente, métodos como o *brainstorming* são aplicados logo no início da criação do projeto conceitual, funcionando como um jorro inicial de criatividade. Outros métodos, como a análise sistemática, são importantes porque podem filtrar o conjunto de idéias geradas deixando apenas aquelas realizáveis. A proposta inicial para formação de grupos de *brainstorming* sugeria que [PAHL & BEITZ, 1984]:

- **O grupo tivesse no mínimo 5 e no máximo 15 participantes;**
- **O grupo fosse composto por especialistas de diversos campos,** de forma a garantir que todas as áreas tecnológicas pudessem contribuir com idéias;

- **O chefe estivesse ausente.** Se isso não fosse possível, esse deveria conhecer a personalidade dos membros de sua equipe para que pudesse se portar de forma a não inibi-los;
- **Um líder fosse apontado.** Esse teria de manter a ordem, organizando as discussões e excluindo os temas não pertinentes ao problema proposto.

Além disso, foi proposto o seguinte formato para as reuniões:

- Todos os participantes deveriam falar com liberdade, abrindo suas mentes sem receios a críticas;
- Toda as idéias e discussões deveriam ser gravadas, de forma que cada membro pudesse recorrer às mesmas mais tarde;
- A duração das reuniões não deveria ultrapassar 45 minutos.

Vem a seguir a Figura 3.4, que sintetiza essa seção.

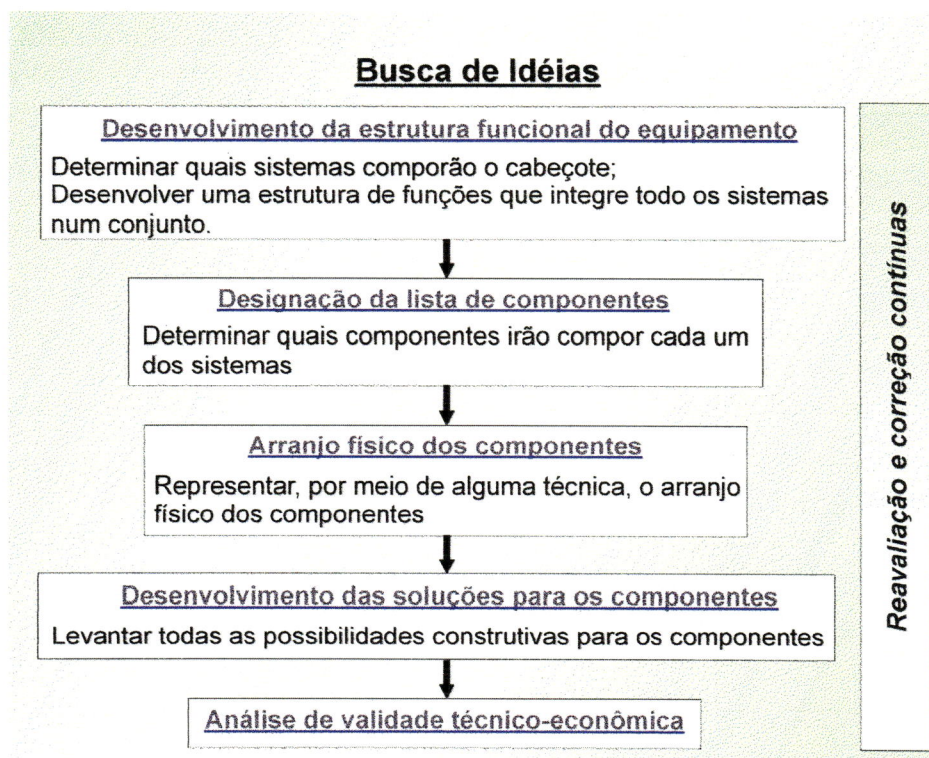


FIGURA 3.4 – Fase de busca de idéias.

3.2.4 - Avaliação

Na etapa de avaliação, o projetista deve escolher uma solução específica para cada um dos problemas de seleção de componentes. A idéia aqui é a de se criar um procedimento que leve à melhor solução dentre aquelas apresentadas na fase de especulação.

Fatores quantitativos tais como rigidez, peso, etc. e qualitativos, como por exemplo a estética, devem ser considerados segundo sua importância no projeto em questão. Mais do que comparar o desempenho do componente "A" frente ao componente "B", há que se considerar nessa fase as inter-relações entre componentes e o arranjo da máquina como um todo.

No artigo de IYENGAR, LEE & KOTA (1994), é descrito um método para avaliação de diferentes configurações para um equipamento, com vistas à maximização do desempenho de uma dada característica (por exemplo o peso total ou a precisão de giro de um eixo). O método consiste basicamente em: 1) escolher os critérios de otimização; 2) compor as configurações que se quer analisar; 3) definir como os componentes e suas interfaces influenciam as propriedades que se quer otimizar; 4) recompor o projeto até sua função principal, contabilizando as influências herdadas de cada nível de projeto até a operação final. Essa abordagem parece muito apropriada ao problema da precisão e repetibilidade do cabeçote, pois permite que se avalie qual configuração é mais adequada às necessidades de precisão de funcionamento.

O impacto ambiental dos processos de fabricação e do funcionamento do cabeçote deve ser analisado com cuidado. O artigo de ABEL, EDWARDS & ASHBY (1994) apresenta as principais estratégias de inserção da questão ambiental em um projeto de engenharia. Basicamente, elas consistem em métodos de gerenciamento coerente de materiais e seus processos de transformação, com vistas à minimização dos seus efeitos sobre o ambiente. Destaca-se aqui a idéia do projetar para reciclar (DFR –

Design For Recycling) como uma das diretrizes de projeto de crescente importância.

Seguindo a mesma linha da DFR, outras filosofias de projeto, tais como a DFM (*Design For Manufacturing*) e a DFA (*Design For Assembly*), objetivam simplificar ao máximo as etapas de fabricação e montagem, aumentando assim a qualidade final do produto em termos de manutenção e assistência técnica, além do ganho a nível de custos. Como essas filosofias se assemelham em muitos aspectos, tem-se usado correntemente o termo DFMA como sendo a junção das duas filosofias numa única.

A DFMA sugere que o projetista atente para algumas diretrizes e para estudos de caso reais que ilustram como alcançar simplicidade e funcionalidade num projeto. Algumas dessas diretrizes são [ROZENFELD *et al*, 1999]:

- Projetar para um número mínimo de componentes;
- Projetar componentes para serem multifuncionais;
- Utilizar componentes e processos padronizados;
- Utilizar uma montagem empilhada (unidirecional);
- Eliminar parafusos, molas, roldanas.

Se, durante o processo de projeto, houver dúvida sobre duas montagens, a DFMA apresenta um método, baseado em critérios tais como os apresentados acima, capaz de associar uma nota a cada uma delas, permitindo assim uma seleção quantitativa.

Mais generalista ainda, a DFX (*Design For eXcellence*) propõe, utilizando diretrizes de projeto, exemplos e contra-exemplos, a busca da otimização simultânea de vários fatores, incluindo a fabricação, a montagem, o impacto ambiental, o custo, o *time-to-market* entre outros. A DFX "é uma estratégia baseada no conhecimento que tenta projetar produtos que

maximizem todas as características desejáveis – tais como alta qualidade, confiabilidade, funcionamento, segurança, uso amigável ao operador e ao ambiente e curto *time-to-market* – num projeto de produto que, ao mesmo tempo, minimiza os custos dentro do ciclo de vida, incluindo custos de manufatura.” [BRALLA, 1996].

Para cada projeto, existem inúmeros compromissos entre função (características do equipamento) e adequação (possibilidades reais de construção), que são regulados por inúmeras variáveis. Para alguns casos, em que uma ou poucas variáveis são essenciais frente às outras, a escolha da melhor solução é facilitada. No entanto, o que geralmente acontece é que há várias variáveis relevantes no projeto, e nem sempre o projetista poderá saber quais são as relações de importância entre elas. Nesse caso, utiliza-se métodos tais como o AHM (ou *Analytical Hierarchy Method*, idealizado por Tomas Saati), que funcionam como um esqueleto, suportando sobre si o procedimento, ditado pelo projetista, de escolha da solução que representa o melhor compromisso entre função e adequação.

De uma maneira geral, tais métodos de tomada de decisão funcionam seguindo algumas etapas:

- **Importar a divisão do projeto em componentes feita na fase de busca de idéias**, que traz todas as decisões a serem tomadas e as alternativas de que dispõe o projetista;

- **Eleger os critérios de escolha** para cada um dos problemas de seleção existentes, tornando possível a geração de diagramas tais quais o da Figura 3.5.

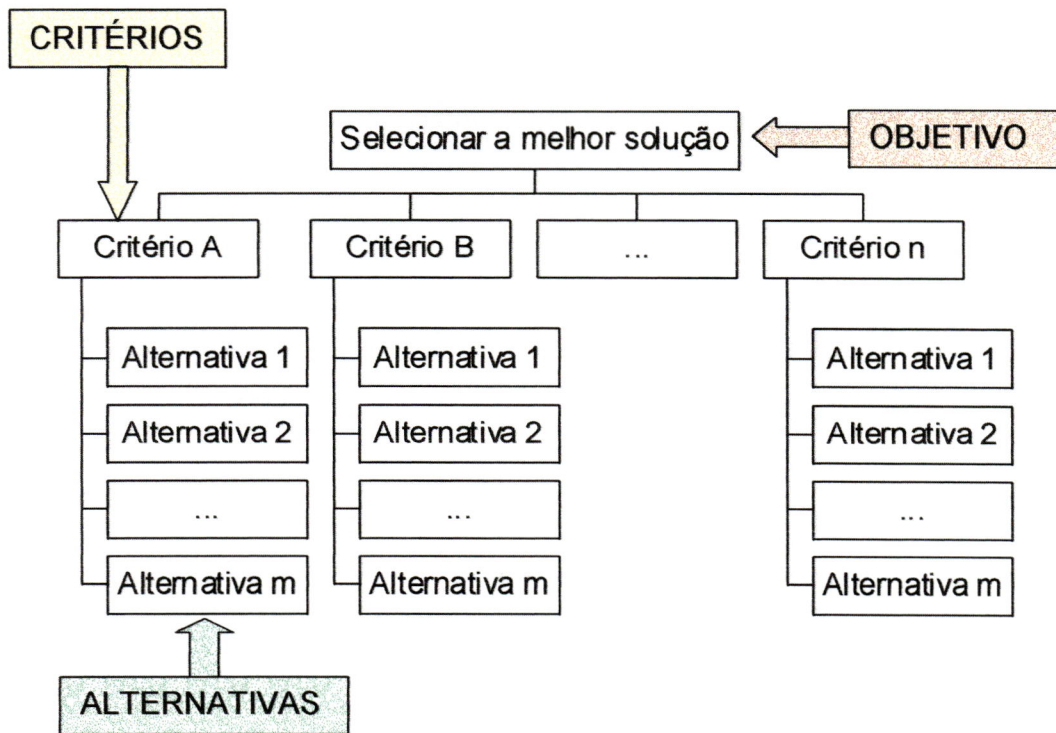


FIGURA 3.5 – Diagrama do problema de tomada de decisão [SAATI, 1999].

Os critérios de escolha para um típico projeto de engenharia são, em muitos casos, os seguintes [SHIGLEY, 1984]:

TABELA 3.2 – Critérios de escolha em engenharia [SHIGLEY, 1984]

Acabamento superficial	Estilo	Rigidez
Atrito	Flexibilidade	Ruído
Confiabilidade	Forma	Segurança
Características térmicas	Lubrificação	Tamanho
Controle	Manutenção	Utilidade
Corrosão	Peso	Volume
Custo	Processo de fabricação	
Desgaste	Resistência	

Quando se trata de projetos de precisão, os critérios mais importantes passam a ser os seguintes [PURQUERIO, 1990]:

TABELA 3.3 – Critérios de escolha para projetos de precisão [PURQUERIO, 1990].

Atrito	Limpeza operacional	Resolução
Custo	Precisão	Segurança
Dificuldade de fabricação	Repetibilidade	Utilidade
Dificuldade de projeto	Resistência	

É importante lembrar que os critérios apresentados acima são os mais utilizados, servindo portanto como referência. No entanto, raramente todos são considerados no processo de escolha, por se tratar de um número muito grande de variáveis a serem analisadas simultaneamente. Além disso, em muitos casos outros critérios de escolha se tornam mais importantes que os apresentados acima. Em suma: o projetista pode utilizar as listas dadas acima como referência, mas somente ele pode ditar os critérios relevantes para a avaliação.

• **Determinar a importância relativa entre os critérios e as alternativas.** Por exemplo, no caso do cabeçote, se o primeiro critério para a escolha do mancal for a precisão de giro, deve-se atribuir, tanto para o critério quanto para cada uma das alternativas de mancal consideradas (rolamento, hidrostático, etc.), valores de importância relativa. Isso significa impor quão importante é a precisão de giro frente aos outros critérios de escolha (por exemplo a rigidez, o peso, etc.) e quão precisos são cada um dos mancais considerados.

• **Tomar a decisão técnica através da manipulação matemática das importâncias relativas.** O resultado dessa etapa final é um *ranking* numérico das alternativas, segundo todos os critérios.

A decisão final deve ser baseada na combinação desse *ranking* com os custos de cada alternativa, na forma de um gráfico custoxbenefício ou através do produto do *ranking* pelo custo de cada alternativa [SAATI, 1999].

É importante dizer que os custos relacionados à obtenção do equipamento tomam uma posição de destaque nessa fase. Diferentemente das etapas anteriores, em que os custos eram preocupações abstratas, aqui eles se tornam fator determinante na escolha das soluções de projeto. Um projetista precisa ter em mente quais os fatores que determinam o custo do produto (em RUFFINO há uma discussão pormenorizada desses fatores). Após isso, ele deve lançar mão de todas as ferramentas disponíveis, desde sua experiência profissional até os *softwares* de cálculo de custos, de forma a tornar o custo final o menor possível. A escolha da solução construtiva mais adequada para cada componente influencia definitivamente esse custo final, na medida em que determina todos os gastos posteriores com a fabricação, acabamento e embalagem. Portanto, a fase de avaliação deve dar um peso especial ao fator custo no momento da escolha das soluções.

Apesar dos métodos de tomada de decisão não apresentarem uma limitação formal quanto ao número de alternativas e critérios, vê-se, da exposição dada acima, que um problema de seleção muito complexo gera um processo de tomada de decisão igualmente difícil. RUFFINO (1991) sugere uma técnica capaz de “reduzir a situação de decisão para o ponto onde se possa aplicar um dos métodos de decisão”. Ela consiste em [RUFFINO, 1991]:

- **Estabelecer um objetivo;**
- **Listar alternativas e critérios (especificações) de projeto;**
- **Reduzir a lista de alternativas através da lista de critérios,** anotando para futuras consultas os motivos para a eliminação de cada alternativa;
- **Reduzir a lista de critérios através das alternativas restantes,** eliminando todos os critérios satisfeitos igualmente por todas as alternativas (por exemplo, se o peso máximo para o componente for respeitado por todas as alternativas e se as diferenças de peso não forem importantes, então

esse critério não será utilizado para a tomada de decisão, podendo ser eliminado).

Desse processo, podem surgir seis resultados diferentes:

- **Não resta alternativas.** O projetista deve procurar outras alternativas que porventura tenha ignorado;
- **Não resta critérios para a tomada de decisão.** Algum novo critério, ainda que subjetivo, deve ser proposto;
- **Resta apenas uma alternativa.** A decisão é imediata;
- **Resta apenas um critério.** Dessa forma, a decisão se torna imediata;
- **Restam alternativas e critérios num número razoável.** Então um método de tomada de decisão pode ser implementado com sucesso;
- **Restam muitas alternativas e critérios.** Sugere-se um retorno ao início do processo para nova redução das listas de alternativas e critérios.

A Figura 3.6 representa as tarefas a serem realizadas nessa fase.

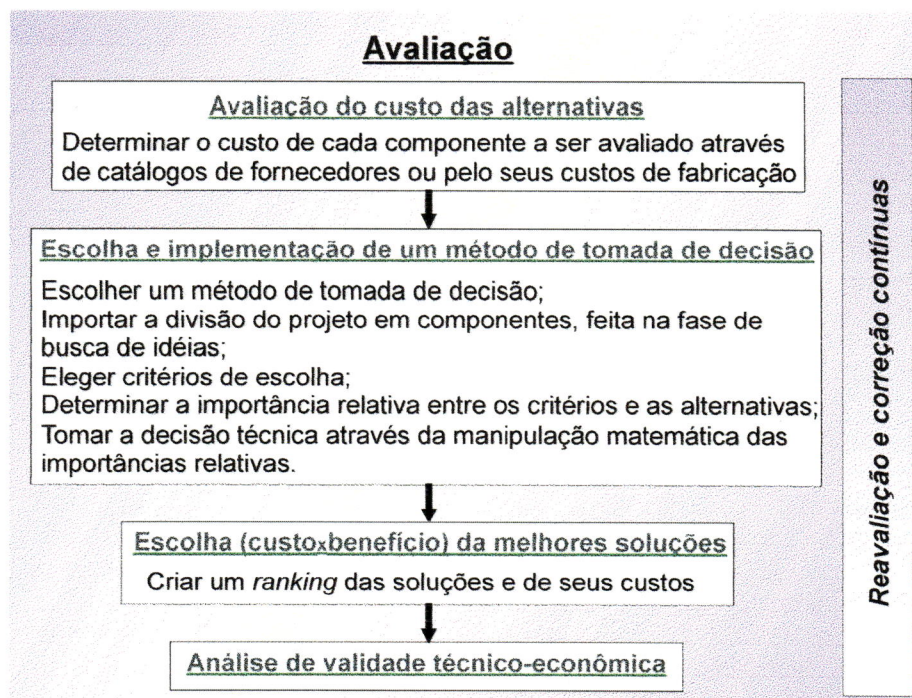


FIGURA 3.6 – Fase de avaliação.

3.2.5 - Layout de projeto

Nessa fase, os componentes selecionados na avaliação são dimensionados e desenhados. O objetivo aqui é compor as soluções obtidas numa configuração adequada, levando em consideração os aspectos estéticos, ergonômicos, funcionais, etc.

Pode-se dizer que essa é uma fase de síntese de tudo o que foi desenvolvido nas etapas anteriores. Sob essa ótica, o *layout* pode ser considerado uma evolução de todos os esquemas (compostos por idéias, desenhos, cálculos) montados até então. Na verdade, muitos dos desenhos de montagem e dos subconjuntos são apenas refeitos, sendo a possibilidade de execução do projeto e os custos finais, somente reavaliados.

Nessa avaliação mais profunda do conjunto, o projetista pode contar com o apoio das estratégias de DFMA, DFR e DFX descritas na fase anterior, além das ferramentas de modelamento e simulação (CAD/CAE), que permitem inferências e reavaliações muito importantes para o aumento da qualidade do equipamento.

É fato que, com os atuais níveis de desenvolvimento da computação, utiliza-se cada vez mais a ferramenta matemática como suporte para o projeto. Realmente, a matemática aliada à computação melhora a qualidade do projeto, economizando o tempo do projetista e permitindo que se obtenha aproximações para fenômenos antes impossíveis de serem modelados. No entanto, é importante que o projetista esteja alerta às limitações dessa abordagem. Segundo Joseph E. Shigley: "Para se manter a perspectiva correta, entretanto, deve-se observar que, em muitas situações de projeto, os fatores importantes são tais que não é necessário efetuar cálculos ou experiências para se definir um elemento ou um sistema. Os estudantes, especialmente, confundem-se muitas vezes, quando caem em situações onde é virtualmente impossível fazer um simples cálculo ou ainda tomar uma decisão de projeto importante. Estas não são, de modo algum, ocorrências extraordinárias; acontecem todos os dias. Faz-se esta

ressalva aqui para que não se cometa o engano de se acreditar que exista uma abordagem matemática racional para cada decisão de projeto.” [SHIGLEY, 1984].

3.2.6 - Detalhamento de projeto

Na fase de detalhamento, o *layout* é transformado num conjunto de desenhos técnicos, visando a fabricação. O detalhamento parte do desenho de conjunto, dos cálculos e catálogos relativos a cada um dos elementos empregados no equipamento, indo até o desenho de detalhes de todos os pormenores necessários à realização do projeto.

Após determinar quais componentes serão fabricados e quais serão comprados, o projetista precisa verificar se seu projeto está adequado à realidade de materiais e processos disponíveis. Além disso, torna-se necessário estabelecer uma estratégia para a escolha dos materiais e processos mais adequados a cada componente. Desde *softwares* específicos, desenvolvidos principalmente em universidades [ABEL *et al*, 1994] até a indicação de especialistas na área, existem muitas maneiras de executar uma boa escolha de processo e material. Como as ferramentas de simulação e otimização não abrangem todas as possibilidades, sugere-se cuidado e parcimônia ao se escolher a maneira como os componentes serão fabricados.

Associa-se também a essa fase a determinação final dos ajuste e tolerâncias entre peças. Novamente, impor uma receita geral para a determinação desses fatores é impossível, na medida em que, para se produzir um equipamento com precisão de desempenho, não é necessário que todos os componentes apresentem tolerâncias estreitas em todas as dimensões. O ideal é encontrar o ponto ótimo, que minimize o custo total da fabricação pela abertura de algumas tolerâncias estrategicamente escolhidas, sem prejudicar o desempenho do conjunto. O artigo de

GASKELL (1991) destaca os métodos estatísticos e suas vantagens quando aplicados nesses casos, através de *softwares* especialistas.

Atualmente, os sistemas CAD/CAE têm oferecido módulos muito eficientes de montagem virtual como forma de se testar ajustes e o comportamento cinemático do conjunto, prevendo erros que, de outra forma, só se revelariam na fase de construção do protótipo.

É também com a intenção de se evitar falhas do produto que a metodologia de análise do tipo e efeito da falha, conhecida como FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*), tem sido empregada. Sua implementação “consiste basicamente na formação de um grupo de pessoas que identificam para o produto em questão suas funções, os tipos de falhas que podem ocorrer, os efeitos e as possíveis causas desta falha. Em seguida são avaliados os riscos de cada causa de falha por meio de índices e, com base nesta avaliação, são tomadas as ações necessárias para diminuir estes riscos, aumentando a confiabilidade do produto.” [ROZENFELD *et al*, 1999].

As idéias apresentadas nas fases de *Layout* e detalhamento de projeto estão representadas na Figura 3.7.

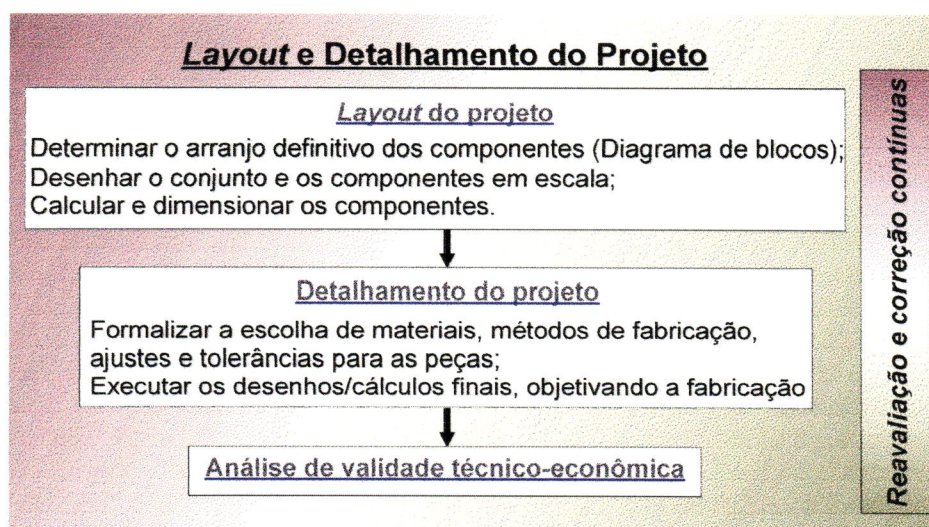


FIGURA 3.7 – Fases de *Layout* e detalhamento do projeto.

3.2.7 - Construção do protótipo

Com o projeto pronto para a fabricação, a fase de construção do protótipo pode então ser iniciada. Seu objetivo é garantir que cálculos e especificações convirjam para um arranjo físico de componentes capaz de satisfazer as necessidades do cliente.

Na grande maioria dos casos, o projeto teórico apresenta-se insuficiente quando confrontado com a prática da construção e montagem. Ao se construir um protótipo, o projetista toma uma posição mais realista frente ao projeto, que o permite encontrar e suprir muitas dessas insuficiências.

Atualmente, tem surgido muitas alternativas à construção física do protótipo, baseadas em modelagem sólida e simulação em ambientes CAD/CAE. Alguns *softwares* se encontram num nível tão avançado de desenvolvimento que já são intitulados "laboratórios virtuais". Neles, o projeto é testado, segundo as exigências de desempenho futuro, através de módulos de cálculo matemático e estatístico. Na interface desses sistemas com o mundo físico, surge uma nova tecnologia, chamada prototipagem rápida, que, com o auxílio de máquinas integradas ao sistema CAD, podem gerar modelos do produto com alta precisão e num curto espaço de tempo, independente da complexidade de formas do produto. O resultado é a diminuição considerável no tempo de desenvolvimento de produtos, a diminuição do custo final e a redução das incertezas e dos riscos naturalmente associados ao processo de projeto, onde o equipamento é ainda uma idéia esboçada num papel [CARVALHO, 1999].

3.2.8 - Testes de funcionamento

Os testes de funcionamento consistem em medições de desempenho do equipamento a fim de se garantir o cumprimento das especificações de projeto. Apesar das possibilidades computacionais de testes de protótipos virtuais, para as situações críticas em que o desempenho e a

confiabilidade no equipamento precisam ser garantidas, os testes com um protótipo real são indispensáveis. Mais do que isso, tais testes precisam ser representativos e, portanto, bem planejados. Técnicas de planejamento de experimentos (DOE – *Design Of Experiments*) são muito úteis aqui, pois funcionam como a garantia de que os resultados apresentados têm um suporte teórico e são confiáveis.

3.2.9 - Tarefas pós-projeto

As tarefas pós-projeto dizem respeito às atividades burocráticas, como por exemplo a elaboração de manuais ou a preparação da documentação técnica necessária, ao acompanhamento e ao reprojeto do equipamento.

A figura abaixo representa as três últimas fases de projeto.

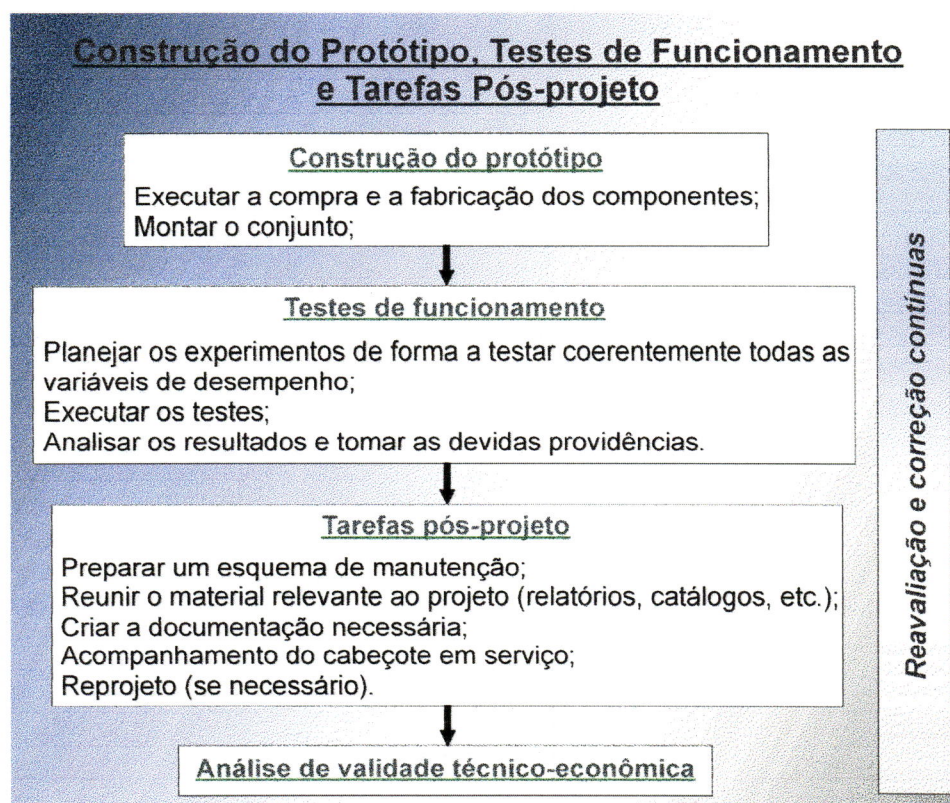


FIGURA 3.8 – Fases de construção do protótipo, testes de funcionamento e tarefas pós-projeto.

4 DESENVOLVIMENTO DE UM PROJETO DE CABEÇOTE DE ULTRAPRECISÃO

4.1 Introdução

A fim de aplicar a metodologia apresentada no capítulo 3, desenvolveu-se um projeto de cabeçote de usinagem de ultraprecisão centrado no desempenho.

Os passos para a elaboração do projeto seguem cada uma das fases propostas pelo método. É importante ressaltar que esse projeto não representa, de forma alguma, o mais "ideal" dentre todos os possíveis projetos de cabeçote. Sua intenção é tão somente a de ilustrar a eficácia do método em auxiliar o projetista a analisar e decidir, de acordo com seu contexto, o que é melhor para seu projeto em particular.

4.2 Definição das Tarefas

Antes de se iniciar o projeto propriamente dito, a metodologia sugere que seja feito um levantamento dos recursos e ferramentas de que a equipe de projeto poderá dispor. Particularmente no caso das ferramentas computacionais, que englobam desde aquelas utilizadas no gerenciamento do projeto e de suas informações (PDM, BoM, SC/TG, CPM, PERT) até as usadas em modelamento e análise (CAD e CAE), faz-se vital conhecê-las e implementá-las logo no início dos trabalhos. Para esse projeto, apenas as ferramentas de CAD serão utilizadas, uma vez que não se justificaria implementar um sistema de informação computacional complexo para a elaboração de um único projeto.

Foi eleita como a linha-mestra desse projeto o desenvolvimento de um cabeçote de usinagem de alto desempenho, capaz de reunir as soluções construtivas mais adequadas à busca da precisão. O termo “alto desempenho” pode ser definido como a síntese das características necessárias a um cabeçote de precisão para que seu desempenho seja satisfatório. Na verdade, ele representa [PENTEADO, 1996]:

- Alta rigidez;
- Alta precisão de giro;
- Alto amortecimento;
- Baixo atrito.

Devido à especificidade dessas necessidades, o custo foi considerado um fator de importância secundária, sendo a qualidade das soluções o fator determinante para sua entrada no projeto.

4.3 Especificações

As especificações desse projeto basearam-se na necessidade de alto desempenho do conjunto. A escolha dos valores numéricos para esses requisitos foram extraídos de catálogos, de outros projetos realizados pelo LAMAFE-USP (Laboratório de Máquinas-Ferramentas) e de publicações recentes. Devido ao número reduzido de relações entre os requisitos de projeto, julgou-se desnecessária a aplicação de métodos tais como o QFD.

Os valores das especificações são mostrados abaixo.

• **Dimensões da carcaça:** O cabeçote foi concebido num formato simples e de pequenas medidas, simplificando assim a fabricação da carcaça, dotada das seguintes dimensões:

- a) Largura de 240,00 mm;
- b) Comprimento de 240,00 mm;

c) Profundidade de 132,00 mm.

• **Características da árvore:**

a) Rotação máxima de 1000 rpm;

b) Diâmetro de 68,00 mm;

c) Comprimento de 132,00 mm.

• **Características do mancal:**

a) Carga estática de 6000 N;

b) Máximo *runnout* de 0,1 μm ;

c) Rigidez mínima de 100 N/ μm ;

d) Máximo desvio térmico de 0,1 μm ;

• **Sistema de fixação da peça-obra por vácuo;**

4.4 Busca de Idéias, Avaliação e *Layout*

A seguir, desenvolve-se simultaneamente as fases busca de idéias e avaliação. Ao seu desenvolvimento, segue-se o *layout* do projeto.

4.4.1 - O conjunto

Devido à simplicidade do cabeçote, pode-se compor sua estrutura funcional com base em três sistemas:

• **Sistema estrutural**, envolvendo a carcaça e os componentes para encaixe dos mancais;

• **Sistema eixo-mancal**, que engloba os flanges de acionamento e suporte, o eixo e os mancais axiais e radial;

• **Sistema hidráulico**, composto pelos tubos e conexões responsáveis pela alimentação dos mancais e pelo sistema de resfriamento.

A lista de componentes apresentada acima foi simplificada de forma a não comprometer o entendimento sobre como o conjunto foi dividido. A lista completa de componentes pode ser vista no Apêndice, que traz o desenho de conjunto do cabeçote. A Figura 4.1 traz uma representação esquemática do arranjo físico do conjunto.

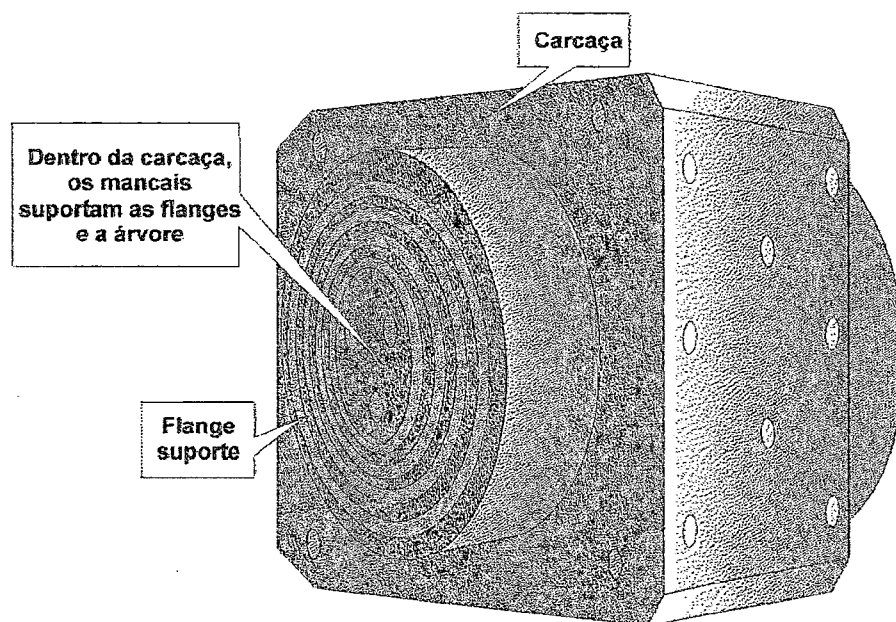


FIGURA 4.1 – Esquema externo do cabeçote de usinagem.

4.4.2 Os Componentes

Após a determinação do arranjo físico, iniciou-se o desenvolvimento das soluções para os componentes objetivando o máximo desempenho. Nessa busca, o estado-da-arte foi considerado, o que levou à utilização de soluções inovadoras para alguns dos componentes.

Todos os dezoito itens que compõem o conjunto foram estudados, com o intuito de se obter a melhor solução para cada um deles. Por motivo

de simplicidade, apenas os principais componentes terão suas informações mostradas aqui.

4.4.2.1 – Carcaça

Com o formato já definido, o projeto da carcaça se resume à seleção do material a ser utilizado, de forma que as necessidades e especificações de projeto sejam preservadas.

Elaborou-se então a Tabela 4.1, que traz as opções de materiais estruturais mais utilizados em máquinas [PENTEADO & PURQUERIO, 1993].

TABELA 4.1 – Características dos materiais estruturais [PENTEADO, 1993]

	Ferro fundido	Aço carbono	Concreto Portland	Granito natural	Granito sintético
Usinabilidade	B	B		P	
Rigidez específica	B	E	R	B	B
Estabilidade secular	E	P	P	E	E
Custo	B	B	E	P	B
Retração/ tempo de cura	E		P		E
Rigidez torcional	B	E	P	P	R
Amortecimento	B	P	B	B	E
Guias/insertos	E/R	P/R	P	P	E
Resistência compressão	E	E	E	E	E
Resistência torção	B	E	P	P	R
Varição da secção	R	B	P	P	R

As letras que avaliam cada uma das opções têm o seguinte significado:

- E para excelente;
- B para bom;
- R para regular;
- P para pobre.

Nenhum método formal de tomada de decisão foi necessário. A escolha pelo granito sintético foi determinada por suas propriedades térmicas e de amortecimento (vide capítulo 2), as quais são imprescindíveis para o alcance das características impostas na fase de especificação.

Com a escolha do granito sintético, tornou-se necessário o desenvolvimento de um projeto para o molde. A Figura 4.2 ilustra a montagem, e o Apêndice traz os desenhos necessários a sua fabricação.

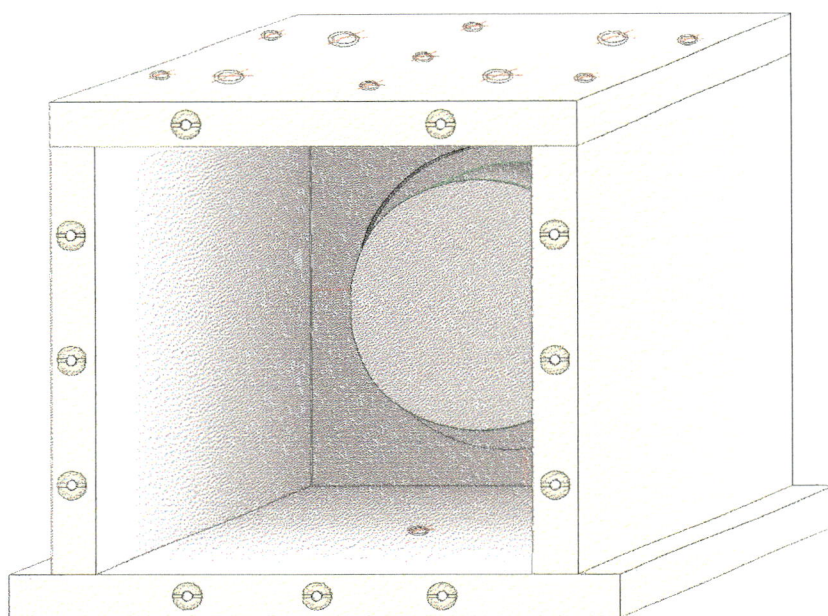


FIGURA 4.2 – Molde da carcaça de granito sintético.

4.4.2.2 – Flanges de acionamento e suporte

O projeto dos flanges segue a concepção tipicamente aplicada em máquinas de usinagem. Além dos detalhes de fabricação, dedicou-se especial atenção ao sistema de fixação por vácuo (flange suporte) e ao acoplamento do sistema de acionamento (flange de acionamento).

4.4.2.3 – Eixo-árvore

O estudo do eixo-árvore não propõe inovações com relação aos eixos-árvore tipicamente utilizados em cabeçotes de máquinas de precisão. Cuidados especiais, todavia, foram tomados no que diz respeito: 1) à alimentação do vácuo da placa de fixação da peça-obra, que exige perfeita vedação entre eixo e flange suporte (possível através de anéis de vedação, rebaixas para encaixe, etc.); 2) aos detalhes de fabricação específicos, como por exemplo a cilindridade do eixo, que possam afetar o desempenho do par árvore-mancal.

4.4.2.4 – Mancais

O cabeçote tem como principais componentes os mancais que o compõe, sendo de extrema importância seu processo de seleção e projeto. Para cabeçotes de precisão, utilizam-se principalmente mancais que não entram em contato direto com o eixo. Essa precaução visa, entre outras vantagens, o amortecimento de vibrações externas que possam interferir com o desempenho dinâmico do conjunto [ARONSON, 1995].

A Tabela 4.2 lista os tipos de mancais disponíveis para aplicações de precisão, bem como suas principais características [PENTEADO, 1996].

TABELA 4.2 – Tipos de mancais de precisão e suas características [PENTEADO, 1996]

	Elemento Rolante	Magnético	Hidroestático	Aerostático
Precisão de Giro	Alta	Muito alta	Muito alta	Muito alta
Rigidez	Alta	Alta	Muito alta	Baixa
Atrito	Baixo	Muito baixo	Muito baixo	Muito baixo
Amortecimento	Baixo	Alto	Muito alto	Baixo
Custo	Baixo	Muito alto	Alto	Alto

Vê-se que, tecnicamente, o mancal hidrostático é superior aos demais, sendo esse o motivo de sua escolha. Entretanto, esses mancais produzem o aquecimento do conjunto, devido ao calor dissipado por atrito. Para se evitar as conseqüências desastrosas de um aumento de temperatura, faz-se necessário criar meios para o resfriamento do conjunto. Técnicas de otimização térmica, tais como a inserção de serpentinas com fluido refrigerante em torno dos mancais, são apresentadas mais detalhadamente no capítulo 2.

O presente estudo utiliza serpentinas e lança mão da idéia de se fabricar mancais utilizando materiais cerâmicos (cerâmica de alumina), com a finalidade de uniformizar a distribuição de temperatura e evitar gradientes indesejáveis [WECK et al, 1990].

Além disso, optou-se pela utilização de restritores de ranhuras nos mancais cerâmicos. Um mancal hidrostático ranhurado difere de outras soluções construtivas pelo tipo de restrição imposta ao escoamento do lubrificante. Nesses mancais, o fluido chega até o eixo por meio de pequenas ranhuras na bucha. Essa concepção está representada nos desenhos dos mancais, presentes no Apêndice.

Os cálculos dos mancais radial e axial foram efetuados segundo o roteiro apresentado em ROWE (1983). Os parâmetros iniciais de projeto foram:

- $W=6000$ N;
- $N_{\text{máx}}=1000$ rpm;
- $D=68$ mm;
- $L=102$ mm $L/D=1,5$;
- $a/L=0,25$;
- $C_d(\text{máx.}) - \beta=p_r/P_s=0,4$ e $K=H_f/H_p=1$;

- $C_d(\text{min.})$ - $\beta=0,7$ e $K=3$;
- Qualidade de fabricação: IT5 (preferencialmente);
- Número de fileiras de alimentação: 2.

Seguindo o procedimento, inicia-se o cálculo do mancal pela estimativa da pressão de alimentação (P_s), através da Equação 4.1:

$$P_s = (\bar{W}/\bar{W}.L.D) \quad (4.1)$$

onde \bar{W} é uma constante obtida através da Figura 4.3. A literatura aconselha uma redução de 20% do valor lido no gráfico, devido às diferenças da razão L/D entre o projeto aqui descrito e o considerado pela figura. Dessa forma, temos que $\bar{W}=0,2856$ e $P_s=30$ atm.

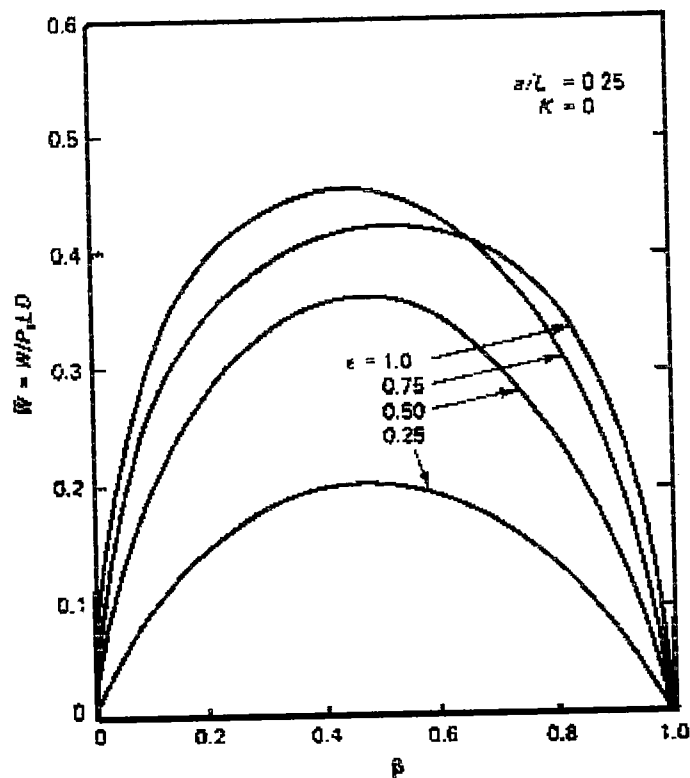


FIGURA 4.3 – Parâmetro de carregamento versus β [ROWE, 1983].

Da Figura 4.4:

- Gráfico S_{ho} x (a/L) : Com $a/L=0,25$ temos $S_{ho}=0,040$;
- Gráfico S_{ho} x $(P_s \cdot C_d^2 / L \cdot D \cdot N \cdot \eta)$: Com $S_{ho}=0,040$, temos $(P_s \cdot C_d^2 / L \cdot D \cdot N \cdot \eta)=9,3$ (para $K=3$) e $(P_s \cdot C_d^2 / L \cdot D \cdot N \cdot \eta)=24$ (para $K=1$);
- Gráfico $(C_d \cdot 10^{-4} / D)$ x D : Para qualidade de fabricação IT5, temos $C_d \cdot 10^{-4} / D=12$ (para o limite superior) e $C_d \cdot 10^{-4} / D=8$ (para o limite inferior);
- Gráfico $(C_d \cdot 10^{-4} / D)$ x $(P_s \cdot C_d^2 / L \cdot D \cdot N \cdot \eta)$: Com os dois valores de $(C_d \cdot 10^{-4} / D)$ e $(P_s \cdot C_d^2 / L \cdot D \cdot N \cdot \eta)$, produz-se dois pares ordenados nesse gráfico. Tomando a média desses pontos, temos que $(P_s \cdot D / L \cdot N \cdot \eta)=28 \times 10^6$. Portanto, $\eta=4.30 \times 10^{-3} \text{ N.s/m}^2$.

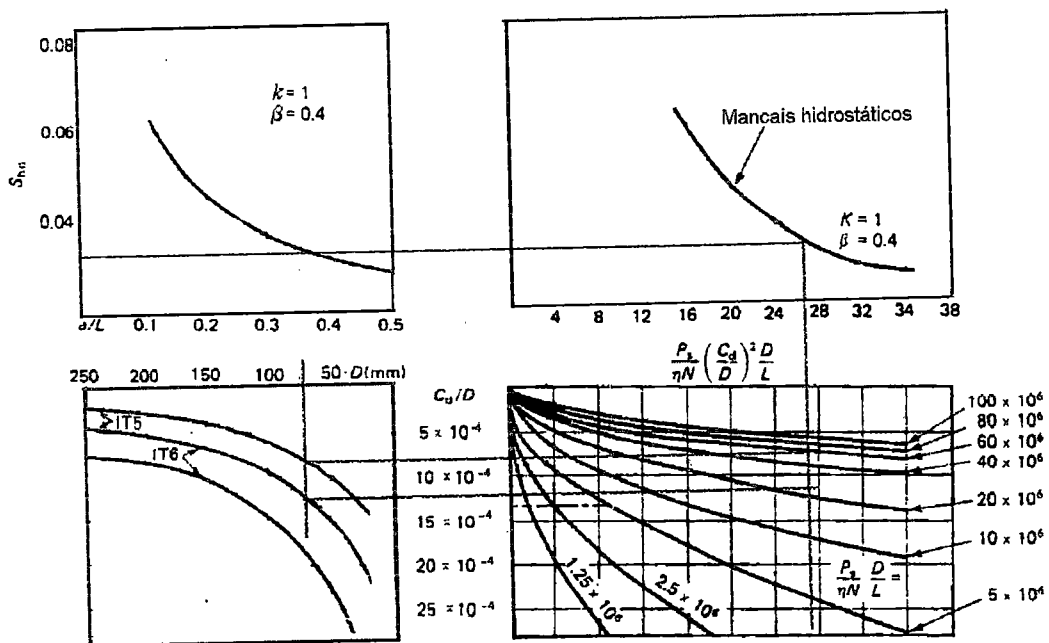


FIGURA 4.4 – Ábaco de projeto para mancais hidrostáticos [ROWE, 1983]

Da etapa anterior, temos que $C_d(\text{máximo})=12 \times 10^4 \cdot D=0,082 \text{ mm}$.
Através do valor de $C_d(\text{máximo})$ calcula-se h_o :

$$h_o = 0.5 \times C_d(\text{máximo}) = 0,041 \text{ mm} \quad (4.2)$$

Com h_0 , calcula-se a vazão de fluido. Pela Equação 4.3, temos que:

$$Q = \bar{Q}.P_s.h_0^3/\eta\dots(4.3)$$

onde a constante $\bar{Q}=0,65$ para essas condições de projeto. Dessa forma, temos que $Q=3,12 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$.

Com o valor da vazão, calcula-se a dissipação de potência no mancal(H):

$$H = H_p + H_f\dots(4.4)$$

Pela Equação 4.5: $H_p=P_s.Q=93,8 \text{ W}$.

Pela Equação 4.6: $H_f=K.H_p= 1.H_p=93,8 \text{ W}$. Portanto: $H=187,6 \text{ W}$.

A rigidez do mancal radial é dada por:

$$\lambda = (\bar{\lambda}.P_s.L.D)/h_0\dots(4.7)$$

onde $\bar{\lambda}=0,3$. Sendo assim, temos que $\lambda=152,2 \text{ MN/m}$.

Após isso, aplica-se o procedimento para determinação das características do restritor. Da sua implementação, resultam os seguintes valores:

- $\rho=850 \text{ Kg/m}^3$;
- Número de rebaixas por fileira(n_s)=6;
- $Y_s=10 \text{ mm}$;
- $A_s=15 \text{ mm}$;
- $Z_s^3=[6(Q/2).Y_s]/[n_s.P_s.(1-\beta).A_s]=0,34667 \times 10^{-11} \text{ m}^3$; $\therefore Z_s=0,15 \text{ mm}$;
- $Re=(\rho .Q)/2.A_s.n_s=0,074$.

O significado dos valores de Y_s e A_s pode ser visto na figura abaixo.

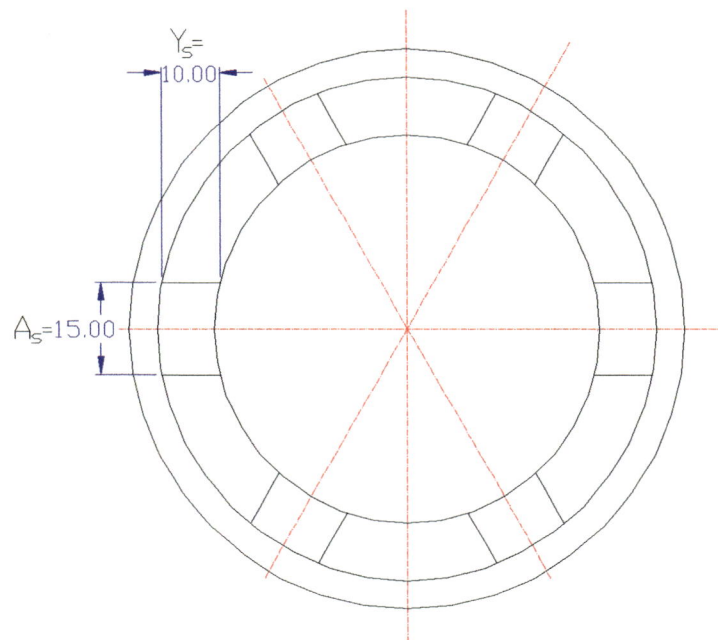


FIGURA 4.5 – Representação das ranhuras do mancal radial.

O procedimento para o cálculo dos mancais axiais é similar àquele utilizado no mancal radial, e se encontra em ROWE (1983). Os dados iniciais são:

- $\beta = 0,5$ (recomendado);
- $P_s = 30$ atm;
- $R_1 = 73,5$ mm;
- $R_2 = 89,5$ mm;

Os valores de R_1 e R_2 são os raios do mancal axial que delimitam sua área útil. O Apêndice traz os desenhos desse mancal, onde os diâmetros se encontram representados.

A próxima providência é calcular a área efetiva do mancal. Da equação abaixo, temos:

$$A_e = A \cdot \bar{A} = \left[\pi \cdot (R_2^2 - R_1^2) \right] \left\{ 0,5 \left[1 - (R_1 / R_2)^2 \right] / \ln(R_2 / R_1) \right\} \dots (4.8)$$

Portanto, $A_e=0,00819 \cdot 0,8265 = 0,00677 \text{ (m}^2\text{)}$;

Para o cálculo da vazão do mancal, utiliza-se a equação:

$$q = (\text{pr} \cdot B \cdot h_0^3) / \eta \dots (4.9)$$

Para $h=h_0$: $q=q_0=(P_s \cdot h_0^3 \cdot Q_0) / \eta$

onde $Q_0=(\beta \cdot \pi) / [6 \cdot \ln(R_2/R_1)] = 1,33$

Para $h_0=0,040 \text{ mm}$: $q_0=2,98 \times 10^{-5} \text{ (m}^3\text{/s)}$

A rigidez do mancal é dada por:

$$\lambda = (P_s \cdot A_e \cdot \bar{\lambda}) / h_0 \dots (4.10)$$

onde $\bar{\lambda}=0.75$ para esse projeto. Sendo assim: $\lambda=377,91 \text{ (MN/m)}$

Novamente, aplica-se o Apêndice A8 de ROWE (1983) para a determinação das características do restritor.

- $\rho=850 \text{ Kg/m}^3$;
- Número de rebaiços(n_s)=12;
- $Y_s=12 \text{ mm}$;
- $A_s=5 \text{ mm}$;

Cálculos com os parâmetros resultam numa profundidade de rasgo(Z_s) igual a:

$$Z_s=[6 \cdot q_0 \cdot Y_s] / [n_s \cdot P_s \cdot (1-\beta) \cdot A_s]^{1/3} = 0,367 \text{ mm}$$

Como a proposta é fresar o anel interno do mancal, a área $A_s \cdot Z_s = 1,84 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ não seria conservada se o movimento da fresa fosse igual à Z_s . Sendo assim, o valor de Z_s deve ser corrigido para um valor Z_s' .

A área fresada ($A_f = A_s \cdot Z_s'$) deve ser igual à área da calota circular descrita pela equação abaixo:

$$A_f = (\theta \cdot R^2 / 2) - [k \cdot R \cdot \cos(\theta/2) / 2] = 1,83 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

onde os valores de R , k e θ estão representados na Figura 4.6. A partir dessa figura, observa-se que:

- $\theta = 2 \cdot \text{sen}^{-1}(k/2 \cdot R)$
- $\cos(\theta/2) = H/R$

Se considerarmos $k = A_s = 5 \text{ mm}$ e fizermos uma manipulação matemática das três últimas equações, teremos que $Z_s' = R - H = 0,714 \text{ mm}$.

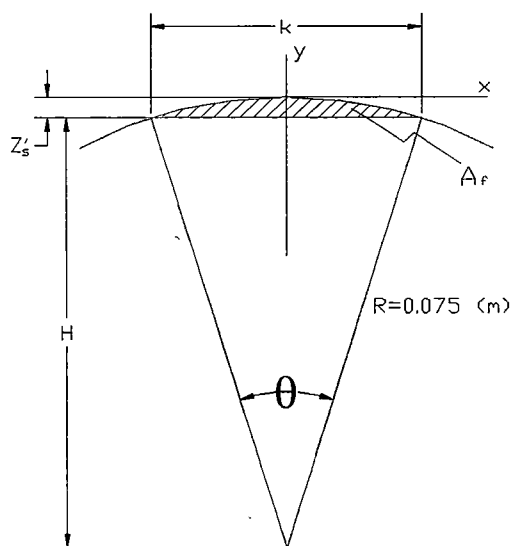


FIGURA 4.6 – Estimativa da área a ser fresada.

4.4.2.5-Sistema hidráulico

A escolha do mancal hidrostático forçou a existência de um sistema hidráulico de alimentação e retirada do fluido que sustenta a árvore. A concepção desse arranjo, elaborado somente no fim do processo de projeto dos componentes, é apresentado na Figura 4.7, que representa o *layout* do projeto.

As diretrizes de DFMA e DFX foram consideradas durante toda essa etapa de *layout*, de forma a garantir um projeto adequado à manufatura e à montagem e em sintonia com as necessidades apontadas inicialmente. Um dos reflexos positivo da adoção dessas técnicas foi a otimização do número de peças com vistas à redução das complexidades de fabricação e a única direção de montagem.

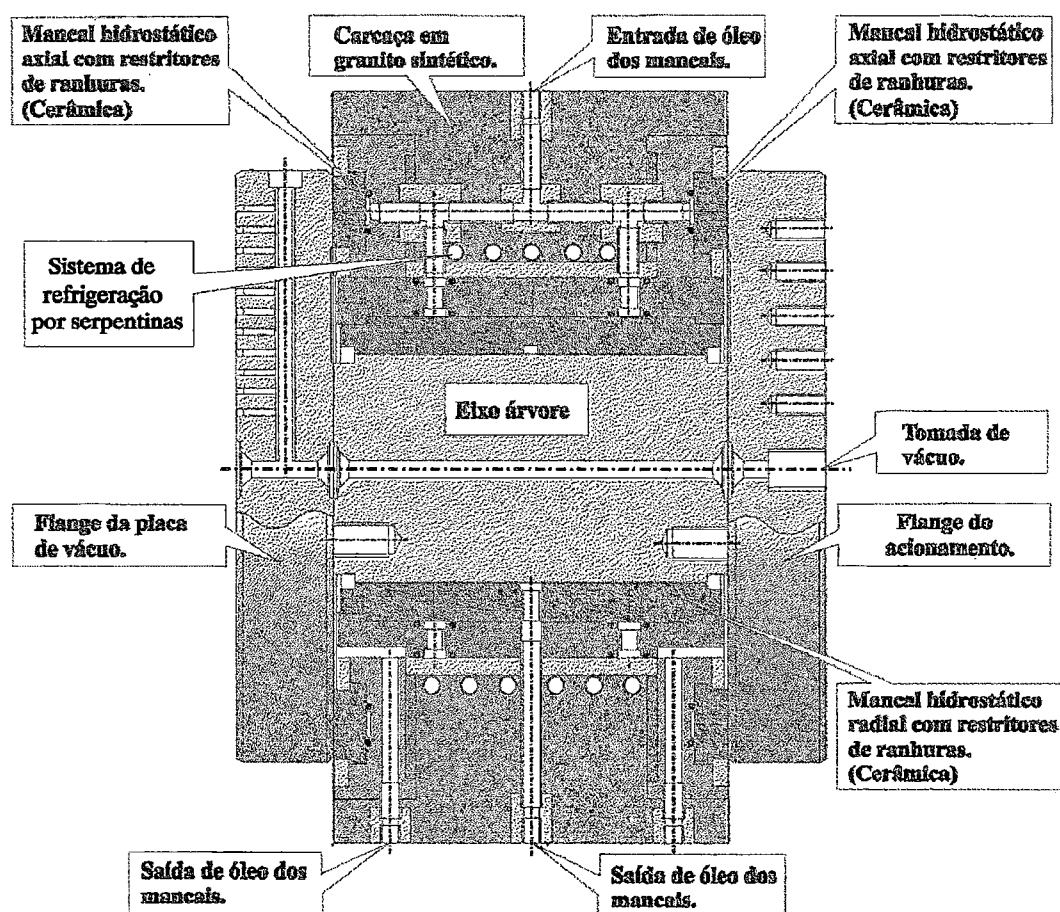


FIGURA 4.7 – Layout do projeto.

4.5 Detalhamento, Fabricação, Montagem e Metrologia

Após a elaboração do *layout* do cabeçote, os componentes passam por um detalhamento completo de suas características, tendo suas dimensões definidas de acordo com as possibilidades de construção e as necessidades de desempenho. Os erros de forma e de posição, bem como o acabamento superficial, os tratamentos térmicos e as tolerâncias dimensionais devem ser estipulados nessa fase.

As maiores preocupações quanto à fabricação e montagem recaem sobre os mancais. Devido às suas características, os erros aos quais são expostos devem ser os mínimos possíveis. Foi visto durante os cálculos que o máximo erro na folga do mancal (ou a diferença entre o máximo e o mínimo C_d) é de 14 μm . Dessa forma, o máximo erro permitido para as buchas dos mancais é de 7 μm , o que é um valor bastante apertado.

Conhecer os principais erros que afetam o funcionamento dos mancais é fundamental. Segundo MÜLLER (1994), esses são:

- **Erros de cilindricidade** cujos principais tipos estão representados na (Figura 4.8);
- **Erro de batimento plano**, relacionado à montagem do mancal e cuja influência sobre o desempenho pode ser marcante;
- **Erro de planicidade**, relativo aos mancais axiais;
- **Acabamento superficial.**

A fabricação dos mancais é o maior desafio dessa concepção aqui apresentada. A retificação interna da bucha cerâmica de 102 mm do mancal radial, com o máximo desvio de forma e rugosidade média não podendo exceder os 7 μm esbarra no limiar da tecnologia disponível hoje. Além disso, com as tolerâncias de planicidade para o mancal axial na mesma ordem de grandeza, pode-se dizer que o trabalho de usinagem é de

extrema delicadeza. Ter um ferramental adequado, equipamentos com suficiente rigidez e a possibilidade de utilização de processos de usinagem não-convencionais, tais como a lapidação, são alguns dos requisitos necessários para que a fabricação desses componentes não seja prejudicada.

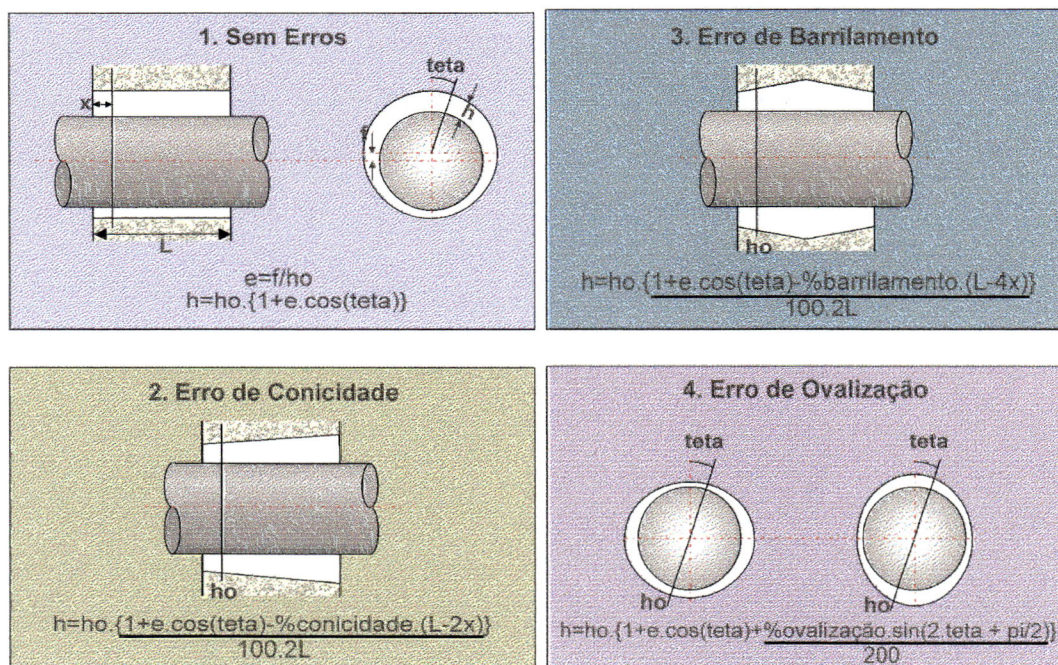


FIGURA 4.8 – Principais erros de cilindridade [MÜLLER, 1994].

É igualmente importante que se tenha à disposição um aparato metrológico adequado às pequenas margens de erros permitidas para os componentes. Máquinas de medir a três coordenadas e rugosímetros são alguns dos equipamentos mais prováveis de serem utilizados.

Quanto à montagem, a maior preocupação deve ser a de preservar os componentes de danos causados por erros no manuseio e no encaixe. Atenção especial deve ser dada aos mancais, devido tanto a fragilidade do material cerâmico com que são fabricados, quanto a importância de se preservar as superfícies (principalmente as de trabalho) contra arranhões, uma vez que a resistência mecânica desses materiais é bastante sensível à presença de defeitos superficiais.

Em seu trabalho a cerca de cabeçotes aerostáticos, MÜLLER (1994) apresenta regras básicas de montagem, aplicáveis a qualquer máquina de precisão. As mais adequadas ao caso específico de cabeçotes hidrostáticos são:

- Limpar perfeitamente a mesa de montagem;
- Pré-limpar os mancais e do eixo-árvore com ultrassom (remoção de gordura);
- Utilizar luva especial no manuseio das peças;
- Limpar as peças metálicas com benzina retificada e pano de seda;
- Utilizar torquímetro, de forma a garantir uma fixação das peças sem distorções.

Além disso, na moldagem da carcaça, há que se utilizar um inserto metrológico (FIGURA 2.5) que garanta um perfeito alinhamento entre as peças de encaixe dos mancais e a estrutura. Sendo assim, as peças que estarão presas ao granito desde a moldagem devem ser montadas sobre uma peça metálica que, solidária ao molde, garanta a manutenção de suas posições relativas durante a fabricação da estrutura e cura do material.

4.6 Testes de Funcionamento

Após a fabricação e montagem do protótipo, passa-se à avaliação final do desempenho do conjunto. Estando todos os erros de forma e de dimensão dentro do especificado, resta a essa etapa observar se os erros de *runnout* e os desvios térmicos, além da rigidez e da capacidade de carga, condizem com o esperado.

Os principais testes de desempenho são [MÜLLER, 1994]:

• **Teste de batimento radial e axial** após a montagem do conjunto, que avaliam o *runnout* final de operação do cabeçote;

• **Testes com carregamento axial, radial e angular**, que medem o deslocamento do nariz da árvore em todas as direções sensíveis;

• **Testes térmicos**, que avaliam o aquecimento e o desvio da árvore com relação ao tempo de funcionamento.

• **Testes dinâmicos**, que visam garantir o bom funcionamento do cabeçote na faixa de rotação prevista.

Para a medição de cada uma dessas características, são necessários equipamentos específicos. A maioria deles é apresentado em MÜLLER (1994), que também mostra alguns procedimentos de medição.

5 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

A tarefa de se projetar equipamentos mecânicos de precisão requer do projetista uma série de habilidades e conhecimentos. Com o advento do paradigma da manutenção da vantagem competitiva através da constante inovação tecnológica, a lista de requisitos sobre o projetista aumentou ainda mais.

O presente trabalho foi desenvolvido de forma de amparar o projetista em questões desse tipo, apresentando estratégias para a sistematização e racionalização das tarefas de projeto, visando a redução de prazos e a melhoria da qualidade dos produtos.

No capítulo 2 foi apresentado o estado-da-arte para a área específica de projeto de cabeçotes de ultraprecisão, onde se procurou apresentar as novidades, seus fundamentos e suas principais referências no mundo acadêmico.

Um outro objetivo dessa etapa do trabalho foi apresentar as duas principais inovações na área de cabeçotes de ultraprecisão, a saber: a utilização do granito sintético como material estrutural; e a adaptação da cerâmica para a confecção de mancais com desempenho térmico superior. Boa parte dos capítulos 2 e 4 foram dedicadas a esses dois assuntos, tal a sua importância.

Mais do que a mera utilização de novidades, o granito sintético e a cerâmica constituem fator decisivo na aplicabilidade de um mancal hidrostático a um cabeçote de precisão, já que contribuem decisivamente

para uma possível eliminação do problema de aquecimento do conjunto (causado pelo cisalhamento do fluido lubrificante). Porém, outros desafios com relação à utilização desses novos materiais devem ser superados, tais como a determinação do seu comportamento dinâmico e de suas características de usinagem.

No capítulo 3 apresentou-se o resultado maior, que corresponde ao cerne dessa dissertação: o método de projeto de cabeçotes de ultraprecisão. Através da união das técnicas, métodos e filosofias de projeto, foi possível propôr uma nova sequência de projeto, capaz de guiar o projetista mais facilmente até a efetivação de seus objetivos.

Durante o desenvolvimento do método, ressaltou-se a importância de aliar as comodidades dadas pelo suporte computacional à inventividade humana durante o processo de projeto. Na verdade, essa premissa norteou toda a elaboração da metodologia, de modo que seus efeitos podem ser observados ao longo de todo o capítulo. Essa dupla perspectiva, por sua vez, levou à criação de um contexto voltado às expectativas do projetista, sempre ansioso por se manter atualizado.

Mais do que isso, procurou-se centrar a metodologia na figura do projetista. Em toda a extensão da metodologia, discutiu-se a importância do projetista, suas perspectivas em face desse novo ambiente competitivo e algumas das melhores soluções disponíveis para a melhoria de seus projetos.

A última parte foi dedicada à elaboração de um projeto factível de cabeçote de ultraprecisão centrado no desempenho. Como então salientado, a intenção em se criar um projeto não foi a de se desenvolver uma espécie de referencial, mas sim a de se apresentar um dentre os ilimitados frutos capazes de serem extraídos do método aqui desenvolvido. Na verdade, tornou-se claro, em vários pontos do capítulo 4, que, dependendo do projetista e do contexto de projeto, os resultados "ideais"

transformam-se radicalmente.

O conjunto desses apontamentos permitem que se considere esse trabalho como uma contribuição à elaboração de uma estratégia global e sistemática na abordagem dos problemas de projeto. Atualmente, os *softwares* CAD/CAE estão tão desenvolvidos que parecem ser capazes de substituir o projetista. Essa é, no entanto, uma idéia enganosa: em projetos mecânicos inovadores, os *softwares* jamais poderão substituir a capacidade humana de articular inúmeras possibilidades na forma de um projeto exeqüível. Sendo assim, ter essa visão global do processo de projeto, além de um procedimento de trabalho sistematizado, constitui uma necessidade real do projetista.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ABEL, C. A., EDWARDS, K. L., ASHBY, M. F. (1994). Materials, processing and the environment in engineering design: the issues. *Materials & Design*, v. 15, n.4, p.179-193.
- [2] ANDRADE, R. S. (1991). *Preliminary evaluation of needs in the design process*. ICED.
- [3] AOYAMA, T.; INASAKI, I. (1997). Applications of electrorheological fluid dampers to machine tool elements. *Annals of the CIRP*, v.46, n.1, p.309-312.
- [4] ARONSON, R. B. (1995). Machine tool 102: spindles. *Manufacturing Engineering*, p.84-90, Mar.
- [5] ASHLEY, S. (1996). Building a better bearing. *Mechanic Engineering*, p.384-389, May.
- [6] BALESTRERO, L. A. P. (1991). *Estudo de restritores ranhurados para mancais aerostáticos radiais e axiais*. São Carlos. 126p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- [7] BECKOUCHE, P. (1996). *Indústria: um só mundo*. Trad. por Isa Mara Lando. 2.ed. São Paulo, Ática. (Série Geografia Hoje).
- [8] BOTTURA, M. C. (1998). Carta ao leitor /Letter/. *Máquinas e Metais*, jan.

- [9] BRALLA, J. G. (1996). *Design for excellence*. McGraw-Hill, United States of America.
- [10] BRANDON, J. A.; AL-SHAREEF, K. J. H. (1992). Optimization strategies for machine tool spindle-bearing systems: a critical review. *Journal of Engineering for Industry*, v.114, p.244-253, May.
- [11] BREDIN, H. W.; PETERSON, M. B. (1983). Directions in tribology. *Mechanical Engineering*, v.105, n.10, p.52-56.
- [12] BUSHUEV, V. V.; TSYUNOV, O. K.; PAVLOV, V. A. (1990). Adaptive-control supply systems for hydrostatic spindle bearings. *Stanki i Instrument*, v.61, n.7, p.10-14.
- [13] CARVALHO, J. (1999). Projeto assistido por computador. EESC-USP. /Curso apostilado/
- [14] COUTINHO, L. G.; FERRAZ, J. C., orgs. (1995). *Estudo da competitividade da indústria brasileira*. 3.ed. Campinas, São Paulo, Papirus.
- [15] CORBETT, J. (1998). Smart machine tools. *Journal of Systems and Control Engineering*, v.212, n.3, p.203-213.
- [16] DASSANAYAKE, U., FRADEN, S. (1999). *Structure of electrorheological fluids*. <http://www.elsie.brandeis.edu/er/> (13 may).
- [17] DOWSON, D. et al. (1989). Tribological design of machine elements. /*Proceedings of the 15th Leeds-Lyon Symposium on Tribology*/
- [18] EDWARDS, K. L. (1994). Towards more effective decision support in materials and design engineering. *Materials & Design*, v.15, n.5, p.251-258.

- [19] EL-MAGD, E., FARAG, M. M. (1992). Design, processing and cost considerations in materials substitution. *Materials & Design*, v.13, n.6, p.339-344.
- [20] ENCHEV, P.; KOREIKOV, T.; ENCHEV, M. (1997). Geometrical accuracy of spindles of metal-cutting machines. *Journal of Machine Tools Manufacture*, v.37, n.10, p.1441-1447.
- [21] FARAG, M. M., EL-MAGD, E. (1992). An integrated approach to product design, materials selection and cost estimation. *Materials & Design*, v.13, n.6, p.323-327.
- [22] GASKELL, P. (1991). Low-cost design for manufacture – the role of statistical methods. *Materials & Design*, v.12, n.4, p.217-219.
- [23] GLAESER, W. A. (1992). *Materials for tribology*. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, Netherlands.
- [24] HSU, W.; WOON, I. M. Y. (1998). Current research in the conceptual design of mechanical products. *Computer-Aided Design*, v.30, n.5, p.377-389.
- [25] IKEGAMI, R. A. (1999). Estado da arte do processamento de cerâmica. /Apostila de uso interno da pós-graduação/
- [26] IYENGAR, G., LEE, C., KOTA, S. (1994). Towards an objective evaluation of alternate designs. *Journal of Mechanical Design*, v.116, p.487-492, Jun.
- [27] KHALIL, M. F.; EL-SHORBAGY, K. A. (1985). Surface roughness effects on externally pressurized bearings performance. *Wear*, p.1-10.

- [28] KHER, A. K. (1988). Thermal distortion in machine tools. In: McKEOWN, P. A. et al. *The mechanical design of high precision machines*. Cranfield Institute of Technology, Cranfield, Bedford. p.18-23. /curso apostilado/
- [29] KINGERY, W. D., BOWEN, H. K., UHLMANN, D. R. (1976). *Introduction to ceramics*, 2ed., Jonh Wiley & Sons, New York.
- [30] KRISHNAN, V., EPPINGER, S. D., WHITNEY, D. E. (1995). Accelerating product development by the exchange of preliminary product design information. *Journal of Mechanical Design*, v.117, p.491-498, Dec.
- [31] KRUTZ, G. W.; SCHUELLER, J. K.; CLAAR, P. W. (1994). *Machine design for mobile and industrial applications*. Society of Automotive Engineers, Warrendale, USA.
- [32] KUSIAK, A., WANG, J. (1993). Decomposition of the design process. *Journal of Mechanical Design*, v.115, p.687-695, Dec.
- [33] LOVERIDGE, R.; PITT, M. (1990). *The strategic management of technological innovation*. England, John Wiley & Sons.
- [34] MALANOSKI, S. B., LOEB, A. M. (jun. 1961). The effect of the method of compensation on hydrostatic bearing stiffness. *Journal of Basic Engineering*, p.179-187.
- [35] MALDONADO, J; PEITER, C.C. (1988). As Pesquisas Já Desenharam o Século XXI. *Cadernos de Ciência*, Finep, p. 2-7.
- [36] MIZUMOTO, H. et al. (1990). An infinite-stiffness hydrostatic lead screw with a hydrostatically controlled active restrictor. *Bulletin of the Japan Society for Precision Engineering*, v.24, n.1, p.15-20.

- [37] MONTUSIEWICZ, J.; OSYCZKA, A. (1997). Computer aided design of machine tool spindle with hydrostatic bearings. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, v.211, n.B1,p.43-57.
- [38] MÜLLER, L. A. (1994). *Desenvolvimento de um cabeçote de precisão*. Florianópolis. 110p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina.
- [39] NELLY, J. E. (1993). Cost-effective ceramic automotive components through low pressure injection molding. In: *Annual Conference on Composites and Advanced Ceramic Materials*, p. 691-698. /Proceedings/
- [40] NIEBEL, B. W.; DRAPER, A. B. (1974). *Product design and process engineering*. U.S.A., McGraw-Hill.
- [41] NIESZ, D.E. (1983). Processamento de pós. *Cerâmica*, v.29, n.166, p.297-304.
- [42] NOMURA, T. et al. (1991). Study on automatic runout compensation for hydrostatically supported spindle. *Journal of Japanese Society of Precision Engineering*, v.25, n.2, p.136-141.
- [43] OHSUMI, T. (1991). Characteristics of a hydrostatic bearing with a controlled compensating element. *Wear*, v.150, p.177-194.
- [44] OSCROFT, R. J.; BIRKBY, I. (1997). Design on ceramics. *Materials World*, p.212-213, Apr.
- [45] OSMAN, T. A. at al. (1996). Experimental assessment of hydrostatic thrust bearing performance. *Tribology International*, v. 29, n.3, p.233-239.

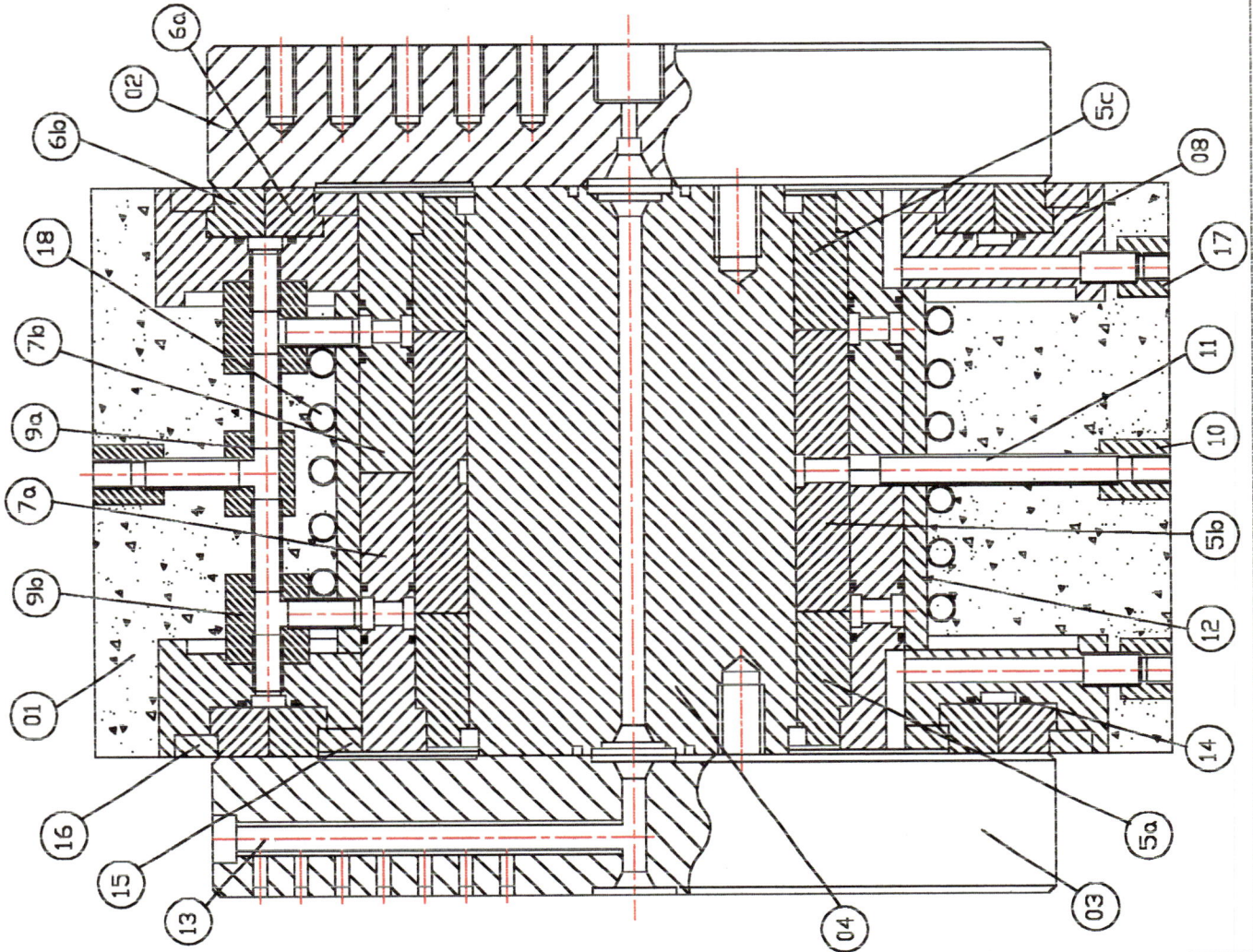
- [46] OTSUKA, J. (1977). A study on the coolant temperature control (for cooling machine tools and machined workpieces to prevent thermal deformation). *Bulletin of the Japanese Society of Precision Engineering*, v.11, n.3, p.109-114.
- [47] PAHL, G.; BEITZ, W. (1984). Engineering design. *Design Council*, Londres, p.87-88.
- [48] PAHNG, F.; SENIN, N.; WALLACE, D. (1998). Distribution modeling and evaluation of product design problems. *Computer-Aided Design*, v.30, n.6, p.411-423.
- [49] PENTEADO, L. A. A. (1996). *Uma revisão da metodologia de projetos de máquinas ferramenta de ultraprecisão*. São Carlos. 165p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- [50] PENTEADO, L. A. A.; PURQUÉRIO, B. M. (1993). Aplicação de granito polimérico na engenharia mecânica de precisão. In: XVII JORNADAS METALURGICAS & II ENCUENTRO ARGENTINO DE CERAMICOS E REFRACTARIOS, San Carlos de Bariloche, 1993. *Anais*. Sociedad Argentina de Metales. v.1, p.276-279.
- [51] PURQUERIO, B. M. *et al.* (1994). Máquina de ultraprecisão: um projeto desenvolvido no Brasil. *Máquinas e Metais*, p.152-163.
- [52] PURQUERIO, B. M. (1990). *Tópicos de projeto de máquinas de precisão*. EESC-USP. /curso apostilado/
- [53] PURQUERIO, B. M. (1989a). Mancais de filme de fluido: projeto e fabricação. *Máquinas e Metais*, p.72-83.

- [54] PURQUERIO, B. M. (1989b). *Projetos e desenvolvimento em engenharia de precisão. /Trabalho apresentado no 2º Encontro Internacional de Engenharia de Precisão/.*
- [55] RIBEIRO, F. M. M. (1998). *Técnicas de projeto para aplicação de granito sintético em estrutura de microscópio óptico.* São Carlos. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- [56] ROWE, W. B. *et al.* (1992). An intelligent design system for recessed hydrostatic journal bearings. *Wear*, v. 159, p.95-105.
- [57] ROWE, W.B. (1983). *Hydrostatic and hybrid bearing design.* Butterworth & Co.
- [58] ROZENFELD, H. *et al* (1999). *Conhecimentos sistematizados pelo NUMA.* <http://www.numa.org.br> (3 mar.).
- [59] RUFFINO, R. T. (1991). *Técnicas de projeto.* EESC-USP. /curso apostilado/
- [60] SAATI, T. L. (1998). *The analytical hierarchy process.* <http://www.expertchoice.com> (5 out.).
- [61] SAKAI, Y. (1984). Ultra-precision machine tool. *Bulletin of the Japan Society for Precision Engineering*, v.18, n.2,p.146-152.
- [62] SANTOS, I. F., RUSSO, F. H. (1998). Tilting-pad journal bearings with electronic radial oil injection. *Journal of Tribology*, v.120, p.583-594. (Jul.)
- [63] SANTOS, M. (1997). *Técnica, espaço, tempo: globalização e meio técnico-científico informacional.* 3.ed. São Paulo, Hucitec.
- [64] SANTOS, P. S. (1988). O que é cerâmica de alta tecnologia ou cerâmica avançada?. *Cerâmica*, v.XI, n.2, p.39-44.

- [65] SHIGLEY, J. E. (1984). *Elementos de máquinas*. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos.
- [66] SLOCUM, A. H. et al. (1995). Design of self-compensated, water hydrostatic bearings. *Precision Engineering*, v.17, p.173-185.
- [67] SLOCUM, A. H. (1992). *Precision machine design*. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice Hall.
- [68] STEVENS, C. (1995). Lubricant selection vital to maintenance solutions. *Plant Engineering*, p.64-68, Aug.
- [69] STOUT, K. J. (1988). *Design of high precision fluid film bearings*. Cranfield Institute of Technology, Cranfield, Bedford. /curso apostilado/
- [70] SPUR, G. (1994). Otimização térmica através de projeto e técnicas compensatórias. Trad. por Norberto de P. Lima. *Máquinas e Metais*, p.46-67, set.
- [71] TANABE, I.; YANAGI, K. (1996). Dual cooling jacket around bearings with feed-forward temperature control system to decrease thermal deformation. *JSME International Journal*, série C, v.39, n.1, p.149-155.
- [72] TANABE, I.; TAKADA, K. (1994). Thermal deformation of machine tool structures using resin concrete. *JSME International Journal*, v.37, n.2, p.384-389.
- [73] TANIGUCHI, N. et al. (1986). Development of ultra precision machine tool made of ceramics. In: CIRP, 35/1., 1986. *Anais*. p.279-282.

- [74] TERHECI, M. (1997). Grain boundary and testing procedure: a new approach to the tribology of alumina materials. *Wear*, v.211, p.289-301, Apr.
- [75] UMEDA, Y., TOMIYAMA, T., YOSHIKAWA, H. (1995). A design methodology for self-maintenance machines. *Journal of Mechanical Design*, v.117, p.355-361, Sep.
- [76] WADA, R. (1997). Há de haver um conceito bem diferente do atual para as máquinas de amanhã. Trad. por Marco A. Conceição. *Máquinas e Metais*, p.20-43, mai.
- [77] WECK, M. *et al.* (1991). High precision spindle technology. Aachen, Germany, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie. /Tutorial/
- [78] WILLS-MOREN, W. J. (1988). *The design of structures for high precision machines*. Cranfield Institute of Technology, Cranfield, Bedford. /curso apostilado/
- [79] WEINGAERTNER, W. I. *et al.* (1997). *Desenvolvimento de uma retificadora para obtenção de superfícies com qualidade nanométrica*. /Trabalho apresentado no VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica/.
- [80] YOSHIMOTO, S. *et al.* (1993). Static characteristics of a rectangular hydrostatic thrust bearing with a self-controlled restrictor employing a floating disk. *Journal of Tribology*, v.115, p.307-311. (Apr.)

APÊNDICE

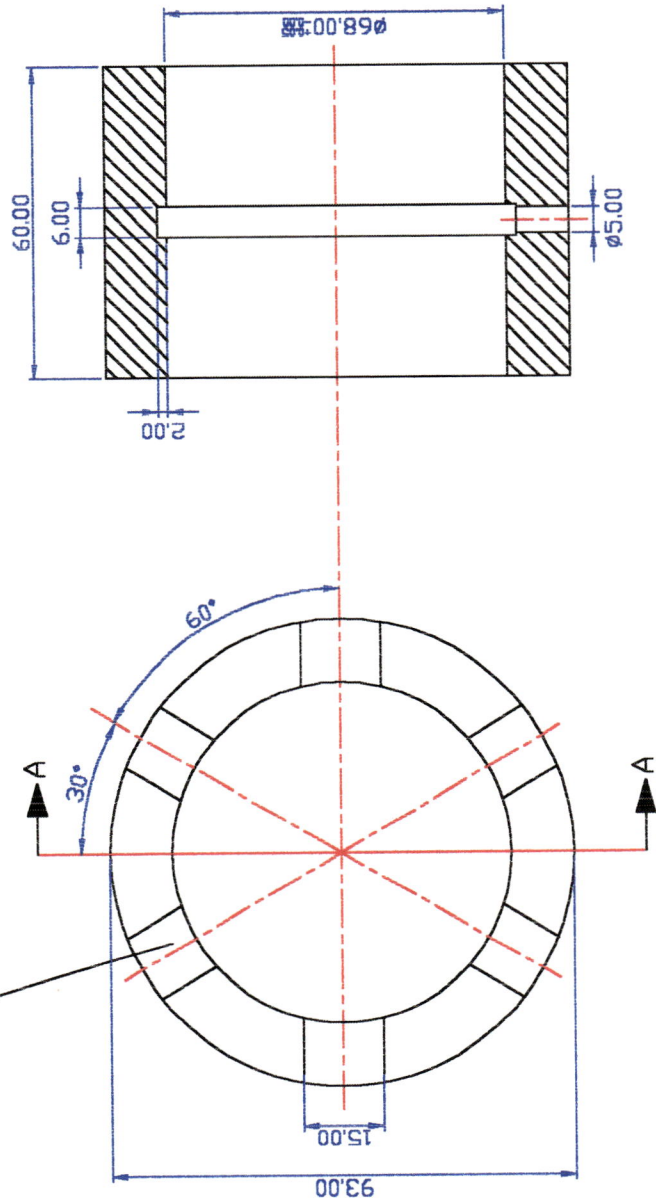


QTD	REF	DESCRIÇÃO	MATERIAL	DIMENSÃO	PESO		
18	01	Serpentina para resfriamento	Cobre				
17	02	Terminal de saída (C/ rosca)	Brnze	Sextavado 1/2"			
16	02	Anel de fixação externo	Aço Inox				
15	02	Anel de fixação interno	Aço Inox				
14	12	Anel de vedação O-ring	Borracha				
13	03	Cursor de vácuo	Nylon	Allen M5 s/ cabeça			
12	01	Anel de vedação radial	Aço 1020				
11	07	Mangueira 1/4"	Poliuretano				
10	01	Terminal de entrada e saída	Brnze	Sextavado 1/2"			
9b	02	Terminal de distribuição	Brnze	Sextavado 1"			
9a	01	Terminal de distribuição geral	Brnze	Sextavado 1"			
08	02	Anel de encaixe/mancal axial	Aço 1020				
7b	01	Bucha externa (Parte ID)	Aço 1020				
7a	01	Bucha externa (Parte I)	Aço 1020				
6b	01	Mancal axial (anel externo)	Alumina 96%				
6a	01	Mancal axial (anel interno)	Alumina 96%				
5c	01	Mancal radial (parte IID)	Alumina 96%				
5b	01	Mancal radial (parte ID)	Alumina 96%				
5a	01	Mancal radial (parte D)	Alumina 96%				
04	01	Elco	SAE 304				
03	01	Flange suporte	SAE 304				
02	01	Flange de acionamento	SAE 304				
01	01	Carcaça	Granito Sintético				
POSIGTE DENOMINACAO			MATERIAL	DIMENSÃO	PESO		
TOLERANCIAS NA0 ESPECIFICADAS (DIN 7168)							
QUAL PRECISAO	ATE 6	6 ATE 30	30 ATE 100	100 ATE 300	300 ATE 1000	1000 ATE 2000	2000 ATE 10000
FINA	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	0,5	0,8
MEIO	0,1	0,2	0,3	0,5	0,8	1,2	2,0
VASTA	0,2	0,5	0,8	1,2	2,0	3,0	4,0
DEB			DENOMINACAO DA PEÇA			DES. CONJUNTO	
#PRIV.			26104/99			Cabeçote hidrostático	
#REF.			ESCALA			DESENHO NO	
#PRIV.			1:1			11	



LAMAFE

06 rasgos quadrados de profundidade de 0.15mm



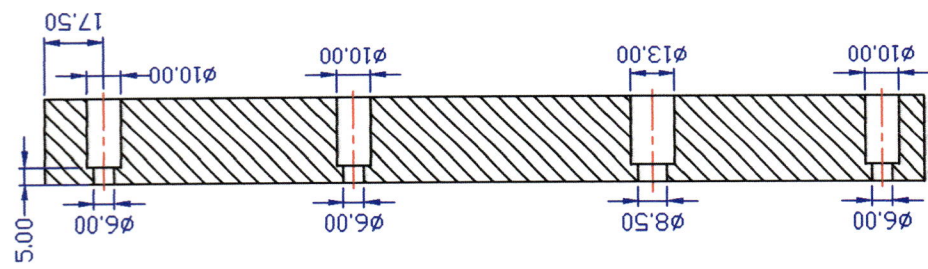
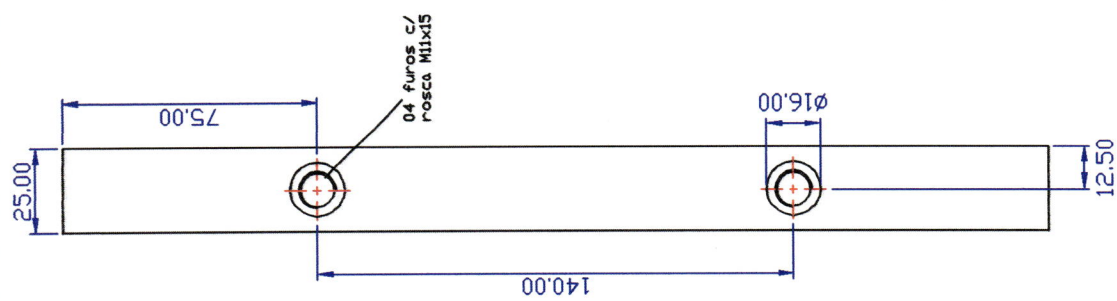
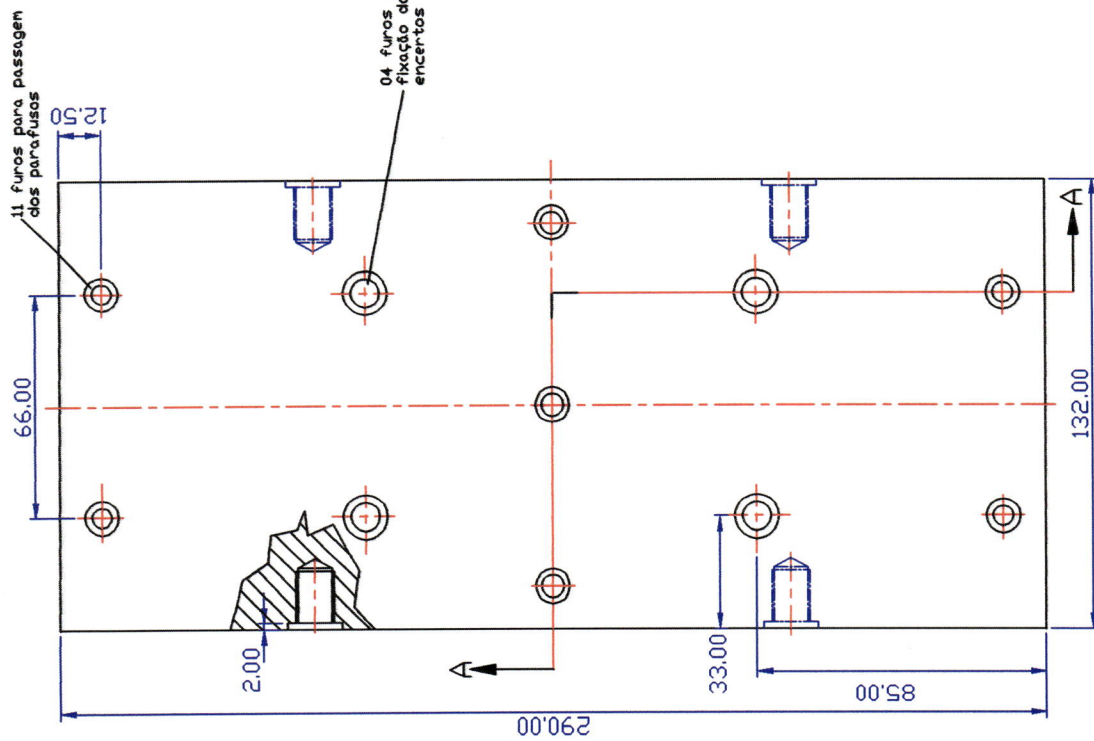
Corte AA

5b 01

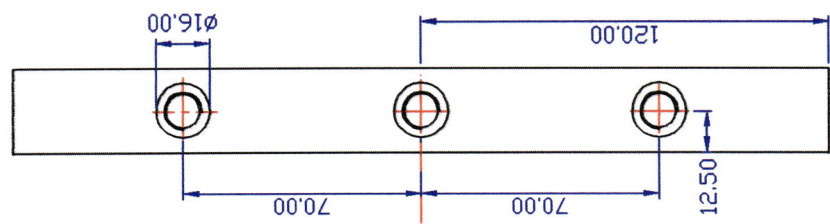
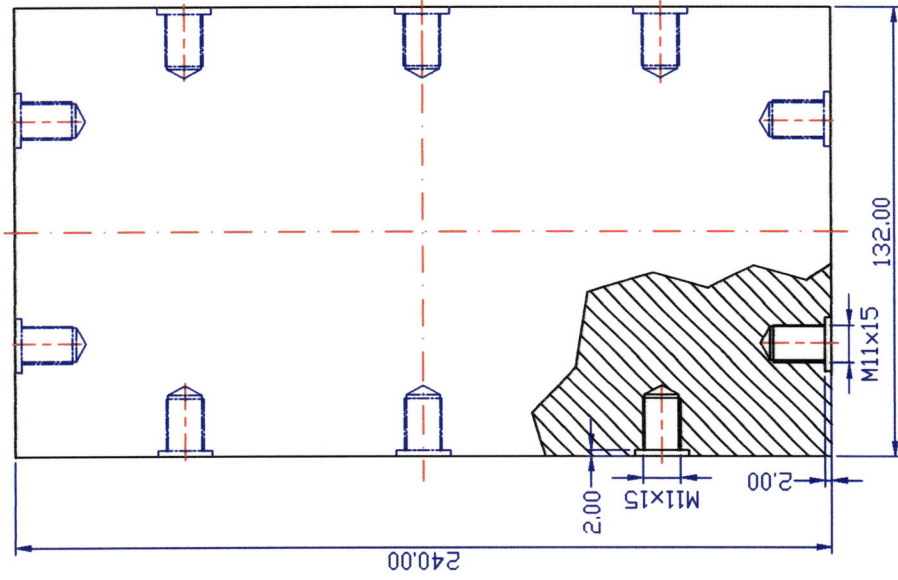
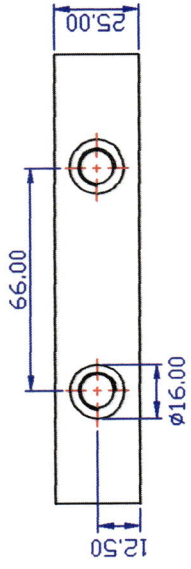
POSIGTE	DENOMINACAO	MATERIAL	DIMENSAO	PESO			
TOLERANCIAS NAO ESPECIFICADAS (DIN 7168)							
GRAL. PRECISAO	ATE 6	6 ATE 30	30 ATE 120	120 ATE 315	315 ATE 1000	1000 ATE 2000	2000 ATE 4000
FINA	0.05	0.1	0.15	0.2	0.3	0.5	0.8
MEIA	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	1.2	2.0
VASTA	0.2	0.5	0.8	1.2	2.0	3.0	5.0
DES. DENOMINACAO DIA PECA							
12/07/98							
Mancal radial (Parte II)							
Cabecote hidrostático							
ESCALA DESENHO No.							
TRAT. TERM.							
1:1							



LAMAFE

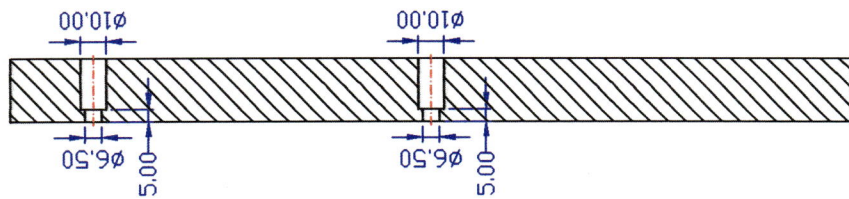
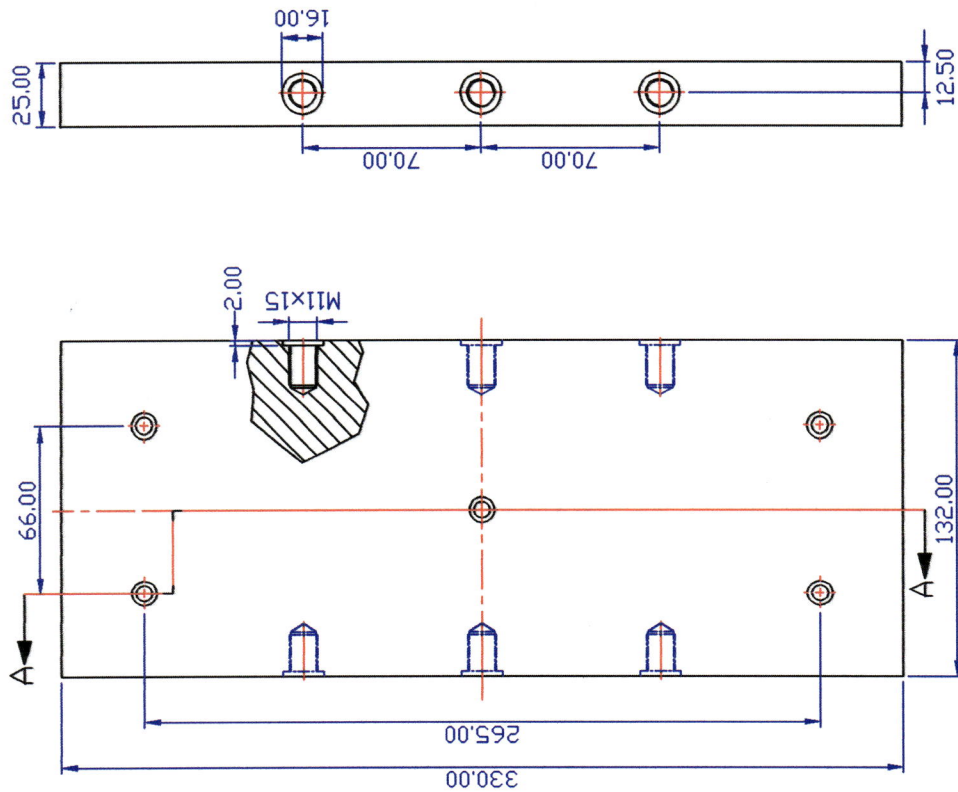


POSICITE	DENOMINACAO	MATERIAL	DIMENSAO	PESO			
TOLERANCIAS NA0 ESPECIFICADAS (D I N 7 1 6 8)							
GRAU PRECISAO	ATE 6	6 ATE 30	30 ATE 120	120 ATE 315	315 ATE 1000	1000 ATE 2000	2000 ATE 4000
FINA	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	0,5	0,8
MEDIA	0,1	0,2	0,3	0,5	0,8	1,2	2,0
VASTA	0,2	0,5	0,8	1,2	2,0	3,0	4,0
DES. 270798		DENOMINACAO DA PECA		PES. CONTEUDO			
PROJ.		Tampa de enchimento		Molde			
VERIF.		TRAT. TERM.		ESCALA		RESERVA NO.	
APROV.		LAMAPE		1:1,5			



03 02

POSICOTE	DENOMINACAO	MATERIAL	DIMENSAO	PESO			
TOLERANCIAS NAO ESPECIFICADAS (D I N 7 1 6 8)							
GRAU PRECISAO	ATE 6	6. ATE 30	30 ATE 120	120 ATE 315	315 ATE 1000	1000 ATE 2000	2000 ATE 4000
FINA	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	0,5	0,8
MEIA	0,1	0,2	0,3	0,5	0,8	1,2	2,0
VASTA	0,2	0,5	0,8	1,2	2,0	3,0	4,0
DES.		DENOMINACAO DA PECA		DES. COMB. UNID.			
PROJ.		Lateral 01		Molde			
VERIF.				TRAT. TERM.		ESCALA	
APROV.						1:1,5	
LAMAPE						DESCR. NO.	



Corte AA

POS. QTE.	DENOMINACION	MATERIAL	DIMENSIONES	PESO			
06	01						
TOLERANCIAS NAO ESPECIFICADAS (D I N 7 1 6 8)							
GRAN. PRECISAO	ATE 6	6 ATE 30	30 ATE 120	120 ATE 315	315 ATE 1000	1000 ATE 2000	2000 ATE 4000
FINA	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	0,5	0,8
MEDIA	0,1	0,2	0,3	0,5	0,8	1,2	2,0
VASTA	0,2	0,5	0,8	1,2	2,0	3,0	4,0
DES. 290998		DENOMINACION DA PEÇA			PES. CONJUNTO		
PROJ.		Base			Molde		
VERIF.		TRAT. TERM.			ESCALA		
APROV.		1:2			RESUMO NO.		



LAMAFE

GLOSSÁRIO

AHP (*Analytical Hierarchy Method*): Método de tomada de decisão utilizado desde a decomposição do projeto em problemas individuais de escolha até a tomada de decisão para cada problema, através da hierarquização e manipulação matemática dos pesos relativos entre critérios e alternativas;

BOM (*Bill Of Material*): Lista de todas as submontagens, componentes intermediários, matérias-primas e itens comprados que são utilizados na fabricação e/ou montagem de um produto, mostrando as relações de procedência e a quantidade de cada item necessário;

C/SCSC (*Cost/ Schedule Control Systems Criteria*): Metodologia que exerce o controle integrado de custos, prazos e do trabalho efetivamente realizado no decorrer de um projeto;

CAD (*Computer Aided Design*): Sistemas computacionais que auxiliam o projeto na manipulação e criação de informações. Sua atuação vai desde a elaboração de rascunhos até a criação de redes de projeto distribuído;

CAE (*Computer Aided Engineering*): Sistemas computacionais de simulação e otimização de situações ligadas à engenharia, tais como estudos de tensão-deformação de peças em serviço, transferência de energia num trocador de calor, preenchimento de moldes de injeção, etc.;

CAM (*Computer Aided Manufacturing*): Sistemas computacionais de preparação da manufatura que representam os processos e as tecnologias usadas no chão de fábrica;

CORRENTE CRÍTICA: Metodologia de gerenciamento de projetos baseado na teoria das restrições, que oferece métodos de estimativa de tempo, de enfoque de tarefas, de monitoração de projeto, de viabilidade econômica e de formação de redes de precedência;

CPM (*Critical Path Method*): Método de gerenciamento de projetos baseado em cartas que descrevem as atividades de projeto visualmente, determinando quais as atividades a serem realizadas e quais as relações de precedência entre elas;

DFMA (*Design for Manufacturing and Assembly*): Filosofia de projeto que orienta o projetista na busca das melhores soluções para a fabricação e montagem de um produto. É baseada em diretrizes de projeto e em estudos de caso;

DFR (*Design for Recycling*): Filosofia de projeto voltada para a criação de produtos amigáveis ao meio-ambiente, seja na fabricação, durante sua utilização ou mesmo no seu retorno ao meio;

DFX (*Design for Excellence*): Estratégia baseada no conhecimento que tenta projetar produtos que maximizem todas as características desejáveis – tais como alta qualidade, confiabilidade, funcionalidade, etc. – num projeto de produto que, ao mesmo tempo, minimiza os custos dentro do ciclo de vida;

DOE (*Design of Experiments*): Designação geral de todas as técnicas de planejamento de experimentos passíveis de serem aplicadas à realidade industrial, em ensaios e testes de equipamentos;

ENGENHARIA DE VALOR: Técnica de projeto que visa atingir o valor ótimo de um produto através da busca de soluções de projeto que minimizem o custo sem afetar o desempenho;

ENGENHARIA SIMULTÂNEA: Abordagem sistemática para o desenvolvimento integrado e paralelo do projeto de um produto e os processos relacionados, incluindo manufatura e suporte. Essa abordagem procura fazer com que as pessoas envolvidas no desenvolvimento considerem, desde o início, todos os elementos do ciclo de vida do produto, da concepção ao descarte, incluindo qualidade, custo, prazos e requisitos dos clientes;

ESTRUTURA METROLÓGICA: Elemento físico usado na moldagem de uma estrutura de granito sintético como o fim de garantir a manutenção da posição relativa entre elementos da estrutura ou do molde;

EXPERT SYSTEMS: Programas computacionais voltados ao projeto que auxiliam a tomada de decisão através de tutores;

FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*): É uma ferramenta que busca evitar, através da análise das falhas potenciais e de propostas de melhoria, a ocorrência de falhas no projeto. Sua implementação consiste basicamente na formação de um grupo de pessoas que identificam, para o produto em questão, os tipos de falha que podem ocorrer, seus efeitos e suas possíveis causas. Em seguida são avaliados os riscos de cada causa de falha por meio de índices e, com base nesta avaliação, são realizadas as ações necessárias para diminuir estes riscos, aumentando a confiabilidade do produto;

MODELAGEM SÓLIDA: Recurso oferecido por alguns sistemas CAD que permitem a criação de um ente computacional (que poderia ser um equipamento mecânico, por exemplo), ao qual se associa virtualmente massa e volume. Essa possibilidade facilita grandemente a análise por meio

de sistemas CAE, além de permitir uma visualização mais realista do equipamento;

PDM (*Product Data Management*): Sistema computacional que visa gerenciar todas as informações e processos relativos ao ciclo de vida de um produto. Sua maior contribuição é para a redução do *time-to-market*, dos custos e do tempo de desenvolvimento do produto;

PERT (*Program Evaluation and Review Technique*): Método de gerenciamento de projetos similar ao CPM. Baseia-se na criação de redes de precedência entre as tarefas de projeto;

QFD (*Quality Function Deployment*): Técnica que tem por objetivo auxiliar o time de desenvolvimento a incorporar no projeto as reais necessidades dos clientes. Por meio de um conjunto de matrizes, parte-se dos requisitos expostos pelos clientes e realiza-se um processo de "desdobramento" transformando-o em especificações técnicas do produto;

RUNOUT: Deslocamento total medido por um instrumento direcionado contra uma superfície em movimento ou movida, com relação a uma superfície fixa;

SC/TG (Sistemas de Classificação/Tecnologia de Grupo): Tecnologia de Grupo é uma filosofia de manufatura que, aliada aos Sistemas de Classificação, promove a identificação e o agrupamento de peças ou outros objetos similares (planos de processo, produtos, montagens, ferramental, etc.) com o intuito de se evitar redundâncias na produção e armazenamento de informações;

TIME-TO-MARKET: É o tempo gasto pela empresa para projetar e disponibilizar um novo produto para o consumo;

WORKGROUP COMPUTING: Computação colaborativa é uma filosofia baseada na utilização da ferramenta computacional como suporte ao trabalho em grupo de pessoas que possuem um objetivo comum de negócio;