



## TECNOLOGIA DE PROJETO DE CABEÇOTE HIDROSTÁTICO DE ULTRAPRECISÃO UTILIZANDO CERÂMICA DE ALUMINA E GRANITO SINTÉTICO

**Leonardo Guimarães Garcia**

Universidade de São Paulo - LAMAFE-EESC-USP – São Carlos- SP

**Benedito M. Purquerio**

Universidade de São Paulo - LAMAFE-EESC-USP – São Carlos- SP,

e-mail: purquerio@sc.usp.br

**Resumo.** *O presente trabalho é direcionado ao projeto de máquinas ferramentas 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 para máquinas ferramentas e de seus componentes.*

**Palavras-chave:** *Cabeçote de ultraprecisão, Máquinas ferramentas, Mancais hidrostáticos, Mancais de cerâmica, Granito sintético*

### 1. INTRODUÇÃO

A crise econômica brasileira das décadas de 80 e 90 corroborou para que boa parte da nossa indústria de máquinas ferramentas se tornasse obsoleta. Se voltarmos a atenção para esse setor, considerado vital tanto como difusor de progresso técnico quanto como pilar mestre de sustentação de toda a produção de bens de consumo, verifica-se quão difícil 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 no qual eles se inserem e que os justifica, “Nada é mais verdadeiro e urgente que a necessidade de atualização tecnológica da produção metal-mecânica brasileira” [BOTTURA,1998]. Dentro deste contexto, o presente trabalho procura indicar uma resposta a essa demanda por inovações tecnológicas no setor de máquinas ferramentas, tendo como objetivos a formulação de uma metodologia de projeto de cabeçotes

de precisão e o estudo de um projeto de cabeçote de usinagem de alto desempenho elaborado segundo essa metodologia. Para satisfazer esses objetivos, considerou-se o desenvolvimento de uma metodologia que contemplasse todos os aspectos relevantes de um cabeçote de ultraprecisão, estabelecendo critérios capazes de auxiliar o projetista na escolha das melhores soluções para esse tipo de projeto, seguida da apresentação uma análise de um cabeçote incorporando mancais hidrostáticos em cerâmica de alumina e estrutura de granito sintético, estudado segundo essa metodologia.

## 2. METODOLOGIA DE PROJETO PARA CABEÇOTES DE ULTRAPRECISÃO

Devido a enorme importância que há para o ato de projetar, em se conhecer as técnicas e os métodos de projeto existentes, apresenta-se uma metodologia de projeto, cujo desenvolvimento resulta numa técnica específica para cabeçotes de precisão capaz de permitir que o projeto final se aproxime ao máximo do “ideal”, incorporar a questão da precisão no contexto do processo de estudo do projeto e promover o desenvolvimento do potencial do projetista não só pela racionalização de suas tarefas como também pelo incentivo ao seu aperfeiçoamento frente às inovações. A metodologia investigada foi dividida segundo as fases que idealmente compõem um projeto de cabeçote de precisão, a saber [KRUTZ, 1992]:

- Definição de tarefas, de acordo com as necessidades do cliente;
- Definição das especificações, a partir da análise das necessidades;
- Busca de idéias – *brain storm* - 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, reprojeto global, etc.

### 2.1 Definição de tarefas

Essa é a primeira fase de todos os projetos e compreende desde o processo de conversação com o cliente até a sua determinação clara de todas as necessidades a serem satisfeitas pelo projeto. Em projetos de máquinas de precisão, a definição das reais necessidades é muito importante, pois oferecer mais do que o estritamente necessário, quando a precisão está envolvida, aumenta o custo do projeto e aumenta muito o custo do equipamento.

### 2.2 Definição das especificações

Nessa fase, o projetista define as especificações que permitirão satisfazer as necessidades do cliente. A particularidade dessa fase é que nela, apenas o projetista e sua equipe determinam os resultados. Nas demais fases a participação de outros setores é indispensável.

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, como por exemplo, o nível de vibração externa ou a 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 *runout* axial e radial permitidos, a mínima rigidez axial e radial toleradas, 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.

### 2.3 Busca de idéias

A busca de novas idéias, conhecida como o *brain storm*, 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.

O paradigma atual de projeto sugere aliar a eficiência dos computadores à criatividade do projetista, apontando a tendência de se buscar caminhos alternativos. Insere-se nesse contexto a questão da inovação tecnológica que, na área de cabeçotes de precisão, vem sendo representada pelos novos materiais como o granito sintético para os elementos estruturais e as cerâmicas avançadas para os elementos suporte e a indispensável tecnologia dos mancais especiais, aerostáticos, hidrostáticos e magnéticos. Esta fase normalmente é dividida em cinco partes:

- o desenvolvimento da estrutura funcional do equipamento;
- a designação da lista de componentes;
- o estudo do arranjo físico - layout dos componentes;
- o desenvolvimento de todas as soluções para os componentes e
- o esboço em escala do conjunto bem como dos componentes.

***Desenvolvimento da estrutura funcional do equipamento.*** De posse das especificações, a primeira atitude do projetista é determinar quais os sistemas que comporão a máquina ou equipamento que está sendo projetado. A isso se segue a tarefa de 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. No caso do cabeçote hidrostático de precisão deste estudo, sugere-se uma divisão do conjunto em sistemas não muito amplos, de forma a facilitar posteriores processos de análise e otimização do projeto.

***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.

***Arranjo físico – layout – dos componentes.*** Essa etapa diz respeito às formas de se representar o arranjo físico dos componentes tal como estarão dispostos no conjunto da máquina. Dentre as possíveis técnicas destacam-se o diagrama de blocos, desenhos a mão livre, peças de encaixar, modelos de conhecimento, linguagens orientada a objetos, etc.[HSU & WOON, 1997]. Atualmente, muitas dessas técnicas estão 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 de ferramentas computacionais, 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.

***Desenvolvimento de todas as soluções para os componentes.*** Finalmente, o projetista alcança a principal etapa da sua 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 desta 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.

## **2.4 Avaliação**

Na etapa de avaliação, o projetista deve escolher uma solução específica para cada um dos problemas de seleção de componentes. Fatores quantitativos tais como rigidez, peso, etc e qualitativos, como por exemplo a estética, devem ser considerados segundo sua importância específica no projeto em questão. Os custos relacionados à máquina 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.

## **2.5 Layout de projeto**

Nessa fase, os componentes selecionados na avaliação são dimensionados e desenhados. O objetivo desta fase é compor as soluções obtidas numa configuração adequada, levando em consideração os aspectos estéticos, ergonômicos, funcionais, etc. Nessa avaliação mais geral do conjunto, o projetista pode contar com ferramentas de modelamento e simulação, que permitem inferências e reavaliações relevantes para o aumento da qualidade do equipamento.

## **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 detalhamento gráfico – desenhos de detalhes - de todos os pormenores necessários à realização do projeto.

## **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 deve observar quais são essas insuficiências e supri-las.

## **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.

## **2.9 Tarefas pós-projeto**

As tarefas pós-projeto dizem respeito às atividades burocráticas, tais como a elaboração de manuais ou a preparação da documentação técnica necessária, e geralmente ao

acompanhamento e ao reprojeto do equipamento.

As Figuras 1a e 1b mostram o fluxograma que sintetiza a metodologia apresentada.

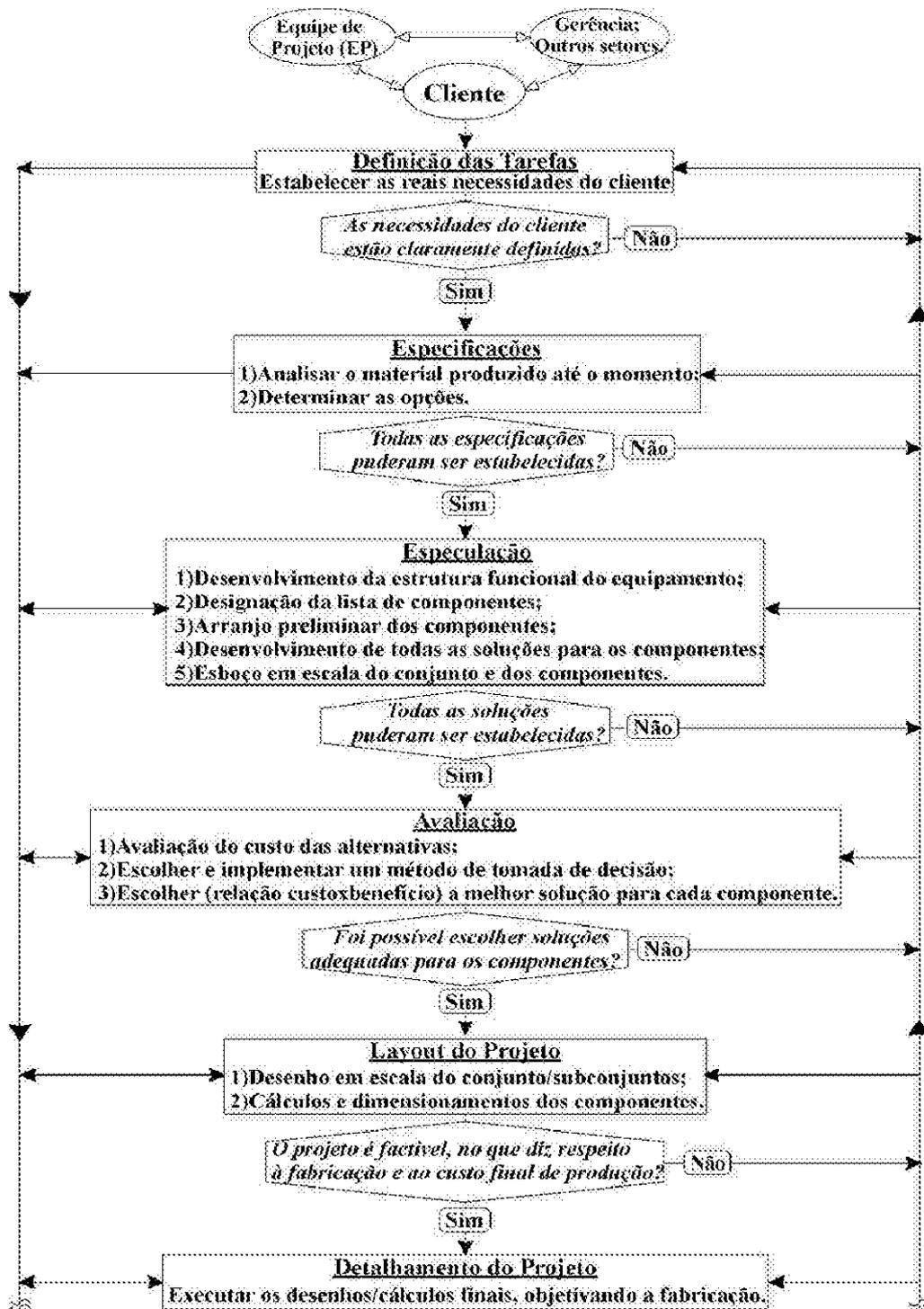


Figura 1a – Fluxograma do processo de projeto (continua).

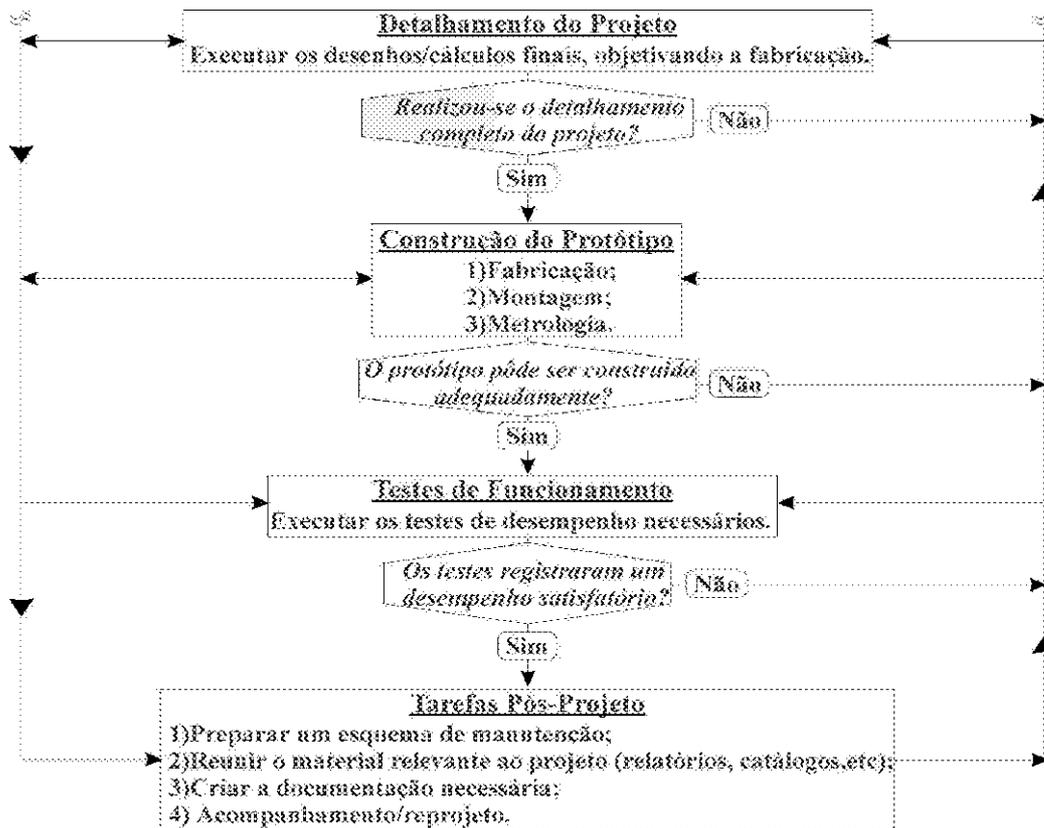


Figura 1b – Fluxograma do processo de projeto (continuação).

### 3. ESTUDO: PROJETO DE UM CABEÇOTE DE ULTRAPRECISÃO

#### 3.1 Definição das Tarefas

Para esse trabalho, a proposta constou do estudo de um cabeçote hidrostático para usinagem de ultraprecisão, centrado no desempenho - alta rigidez, alta precisão de giro, alto amortecimento e baixo atrito, e capaz de reunir as soluções construtivas mais adequadas relativas à busca de precisão.

#### 3.2 Especificações

Segundo as necessidades apontadas anteriormente, foram definidas as seguintes especificações para o cabeçote deste estudo.

a) Dimensões externas. O cabeçote foi concebido de forma a apresentar formas simples e pequenas dimensões, como mostrado na Fig. 2, simplificando assim a fabricação da carcaça, dotada das seguintes dimensões: largura de 240,00 mm; comprimento de 240,00 mm; profundidade de 132,00 mm.

b) Características da árvore: carga estática de 6000,0 N; rotação de 1000,0 rpm; diâmetro de 68,0 mm; comprimento de 132,0 mm.

c) Sistema de fixação da peça-obra por vácuo.

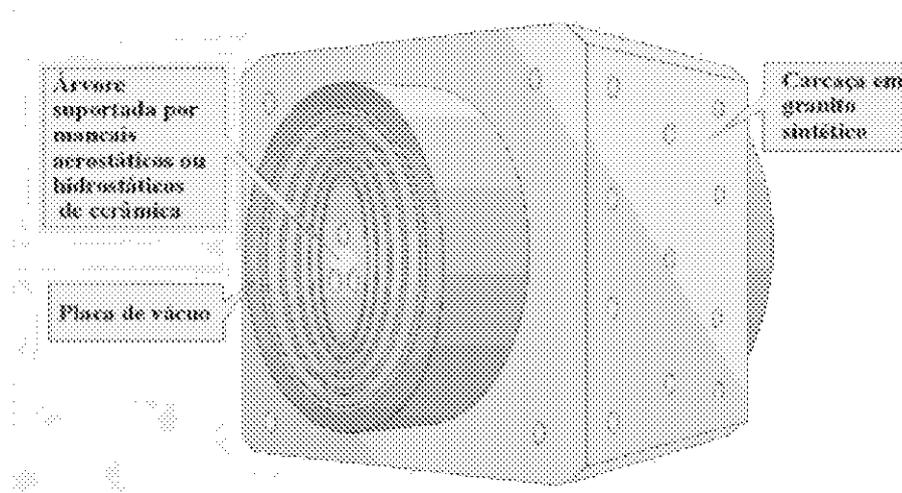


Figura 2 – Esquema externo do cabeçote de usinagem.

### 3.3 Busca de Idéias, Avaliação e *Layout*

As fases de busca de idéias e a sua respectiva avaliação são desenvolvidas simultaneamente. A esse desenvolvimento, segue-se o *layout* do projeto, conforme ilustra a Fig. 3. Para isso, determinou-se inicialmente uma lista dos principais componentes do cabeçote, a saber:

- carcaça;
- flanges de acionamento e suporte;
- eixo-árvore;
- mancais radiais e axiais.

Os cabeçotes, de um modo geral, enquanto conjunto, evoluem na medida em que seus componentes também evoluem. Portanto, pode-se dizer que o estado-da-arte do desenvolvimento de cabeçotes de precisão é constituído basicamente por inovações introduzidas pelos seus componentes. Dessa forma, projetou-se os componentes do cabeçote sempre buscando introduzir soluções inovadoras.

**Carcaça.** Com a forma do cabeçote já definida, o projeto da carcaça ficou resumido aos procedimentos de seleção e aplicação do material a ser utilizado, de forma que as necessidades e especificações de projeto pudessem ser preservadas. A Tabela 1 traz as opções usuais dos materiais estruturais mais utilizados em máquinas ferramentas de precisão [PENTEADO et al, 1993]. Nessa tabela, as letras que avaliam cada uma das opções têm o seguinte significado: “E” para excelente; “B” para bom; “R” para regular; “P” para pobre. Considerando as necessidades do presente estudo, constatou-se ser o granito sintético a melhor opção para a aplicação estrutural do cabeçote hidrostático deste estudo.

**Flanges de acionamento e suporte.** O projeto das flanges de acionamento e fixação da peça-obra segue a concepção apresentada na Fig. 3, típica de máquinas ferramentas de precisão e de ultraprecisão. 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).

Tabela 1. Características dos materiais estruturais para máquinas ferramentas  
[PENTEADO, 1993]

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

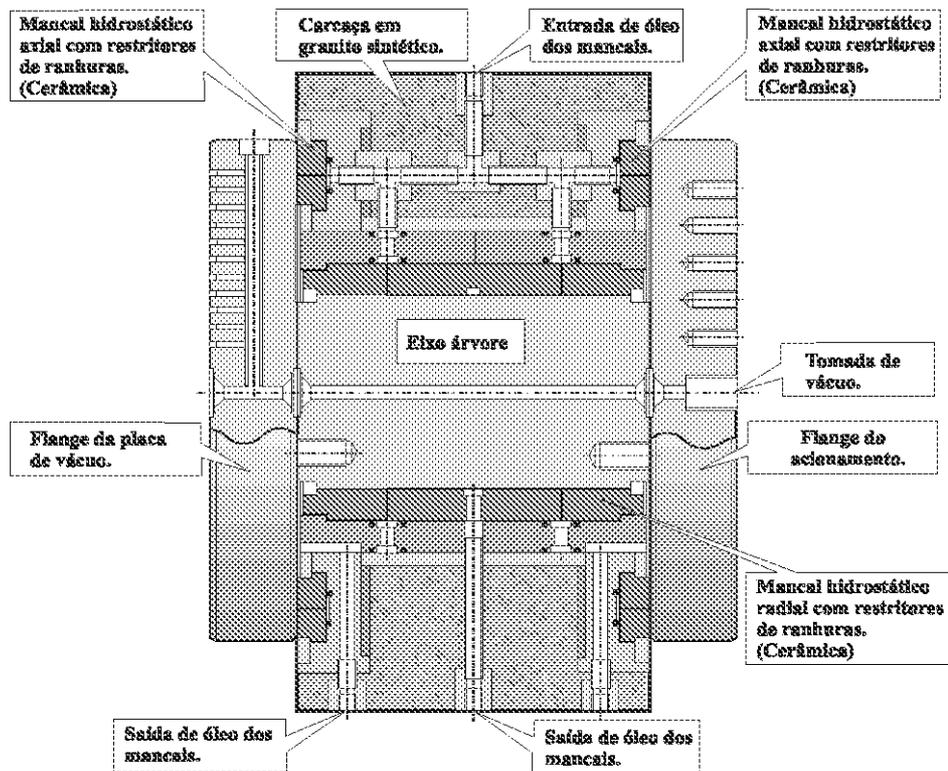


Figura 3– Layout do estudo do cabeçote hidrostático.

**Eixo-árvore.** O estudo do eixo-árvore não propõe inovações com relação aos eixos-árvores tipicamente utilizados em cabeçotes de máquinas de precisão. Cuidados especiais, todavia, foram tomados no que diz respeito: a) 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, rebaixos para encaixe, etc.); b) aos detalhes de fabricação específicos, como por

exemplo a cilindricidade do eixo, que possam afetar o desempenho do par árvore-mancal.

**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 e de ultraprecisão, 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 2 lista os possíveis tipos de mancais para aplicações em equipamentos de precisão e de ultraprecisão, bem como suas principais características [PENTEADO, 1996].

Observa-se que, tecnicamente, o mancal hidrostático é superior aos demais relativamente às características apresentadas, motivo pelo qual optou-se pela sua seleção. Entretanto, esses mancais produzem aquecimento do conjunto devido ao calor dissipado por atrito, quando opera a altas rotações. Para se evitar as consequências desastrosas de um aumento de temperatura não prevista, deve-se criar meios para o resfriamento do conjunto, como a inserção de serpentinas com fluido refrigerante em torno dos mancais ou a implementação de um sistema de controle da temperatura do fluido que alimenta o mancal, dentre outros. O presente estudo lança mão da idéia de se fabricar mancais utilizando materiais termicamente isolantes, como por exemplo a cerâmica de alumina [WECK et al, 1990], cuja finalidade é uniformizar a distribuição de temperatura em torno do eixo, evitando-se assim gradientes de temperatura indesejáveis. O calor produzido durante a utilização do cabeçote deve ser extraído dos mancais, a fim de serem evitados erros de funcionamento do conjunto.

Tabela 2. Tipos de mancais de precisão e suas características [PENTEADO, 1996]

	<b>Elemento Rolante</b>	<b>Magnético</b>	<b>Hidrostático</b>	<b>Aerostático</b>
<b>Precisão de Giro</b>	Alta	Muito alta	Muito alta	Muito alta
<b>Rigidez</b>	Alta	Alta	Muito alta	Baixa
<b>Atrito</b>	Baixo	Muito baixo	Muito baixo	Muito baixo
<b>Amortecimento</b>	Baixo	Alto	Muito alto	Baixo
<b>Custo</b>	Baixo	Muito alto	Alto	Alto

#### 4. DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou uma metodologia de projeto de cabeçotes de precisão, a qual foi ilustrada com o estudo de um cabeçote hidrostático baseado na sua possível implementação. A tarefa de se projetar equipamentos mecânicos de precisão e de ultraprecisão requer uma série de habilidades e conhecimentos indispensáveis ao projetista, aos quais esse artigo se propõe a contribuir. Desta forma, algumas das estratégias do projeto de cabeçotes de precisão, bem como algumas informações técnicas, foram apresentadas como ferramentas auxiliares do projetista na execução de um projeto onde a precisão constitui uma meta principal. Além disso, a redução de prazos e a melhoria da qualidade dos projetos, através da sistematização dos esforços e racionalização das tarefas, também motivaram a elaboração dessa metodologia.

Com relação ao cabeçote estudado, a utilização de granito sintético e de mancais hidrostáticos cerâmicos surgiram como soluções inovadoras para os equipamentos de precisão e de ultraprecisão, e exclusivas, se as velocidades operacionais deste tipo de cabeçote forem altas (> 5.000,0 rpm). 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.

O presente trabalho pode ser considerado como uma contribuição à tecnologia de projeto e de desenvolvimento de máquinas e equipamentos de precisão e de ultraprecisão, ao apontar uma estratégia global e sistemática na abordagem dos problemas de projeto envolvidos. Atualmente, os *softwares* tais como CAD/CAE estão tão desenvolvidos que parecem ser capazes de substituir o projetista em muitas das suas contribuições. 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 exequível. Sendo assim, ter essa visão global do processo de projeto, além de um procedimento de trabalho sistematizado, constitui uma necessidade real do projetista de máquinas.

## 5. REFERÊNCIAS

- ARONSON, R. B. Machine tool 102: Spindles, Manufacturing Engineering, pp. 84-90, mar. 1995.
- BOTTURA, M. C. Carta ao leitor /Letter/, Máquinas e Metais, jan.1998.
- HSU, W. & WOON, I. M. Y. Current research in the conceptual design of mechanical products, Computer-Aided Design, vol. 30, n. 5, pp. 377-389. 1997.
- KRUTZ, G. W. et al. Machine design for mobile and industrial applications, Society of Automotive Engineers, Warrendale,USA. 1994.
- NIEBEL, B. W. & DRAPER, A. B. Product design and process engineering, U.S.A., McGraw-Hill. 1974.
- PENTEADO, L. A. A. Uma revisão da metodologia de projetos de máquinas ferramenta de ultraprecisão, Dissertação, Universidade de São Paulo – Escola de Engenharia de São Carlos, São Paulo. 1996.
- PENTEADO, L. A. A. & PURQUERIO, B. M. Aplicação de granito polimérico na engenharia mecânica de precisão, Anais da XVII Jornada Metalurgica & II Encuentro Argentino de Ceramicos e Refractarios, San Carlos de Bariloche, Sociedad Argentina de Metales, vol. 1, pp. 276-279. 1993.
- WECK, M. et al. High precision spindle technology, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie, Aachen, Germany. 1991.

### DESIGN TECHNOLOGY OF HIGH PRECISION HYDROSTATIC SPINDLE USING CERAMICS AND POLYMERIC CONCRETE

*Abstract.* 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 able 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 and ultra precision spindles and its components.

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