



TORNO PARA USINAGEM DE ULTRAPRECISÃO NUMERICAMENTE CONTROLADO

Walter Lindolfo Weingaertner

Rodrigo Lima Stoeterau

Universidade Federal de Santa Catarina

Departamento de Engenharia Mecânica

Laboratório de Mecânica de Precisão - LMP

Caixa Postal - 476 - EMC

Campus Universitário - Trindade

88.040-970 - Florianópolis - SC

Fone: (048) 331 9395 ou 234 5277

Fax: (048) 234 1519

e-mail: www@emc.ufsc.br; jgdst@emc.ufsc.br

Resumo. *Este trabalho versa sobre o desenvolvimento de um torno de ultraprecisão comandado numericamente e dotado mancalização aerostática plena. Partindo da definição dos parâmetros para a máquina, através dos requisitos do projeto conceitual, passando pela fabricação, montagem e ajustagem dos diversos componentes e sistemas, até os testes de qualificação geométrica e dinâmica do protótipo.*

Palavras-chave: *Ultraprecisão, Usinagem, Máquinas-ferramentas, Comando Numérico..*

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, passados quase dois séculos desde os primórdios da revolução industrial, a evolução da tecnologia de fabricação tem permitido que muitos componentes de alta tecnologia possam ser fabricados em bases regulares, com uma precisão (relação entre dimensão e tolerância) de uma parte em 100.000 ou mais (Smith & Chetwynd, 1994; Berkman)

A usinagem de ultraprecisão, no sentido atual, tem como base os trabalhos pioneiros de Bryan, no Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), no fim dos anos 60 e começo dos anos 70 (Berkman; Ikawa, Et. Ali, 1991; Tanigushi, 1994; Purquero, 1975), quando a usinagem de ultraprecisão começou a ser pesquisada como forma alternativa de produção para elementos ópticos de precisão, cujo processo tradicional ainda se baseava em lapidação e polimento sucessivos, processos demorado e limitados à geometrias elementares.

No início dos anos 70, nos laboratórios da Du Pont, Perkin-Elmer, Union Carbide e Lawrence Livermore National Laboratory obteve-se pela primeira vez superfícies ópticas em polymethylmethacrylat (PMMA), cobre, prata e alumínio em máquinas de grande precisão e

ferramentas de diamante monocristalino (Ikawa, et. ali, 1991). Trabalhos experimentais subsequentes foram estendidos ao campo de aplicação dos componentes ópticos complexos. Nos anos 80 foram desenvolvidas máquinas-ferramentas com complexos sistemas de metrologia, controle e empregando ferramentas de diamante de altíssima qualidade (Ikawa, et. ali, 1991; Tanigushi, 1994).

Nas últimas décadas a usinagem de ultraprecisão se tornou uma área de pesquisa independente e permitiu uma popularização de equipamentos de alta tecnologia, tais como a lentes de contato, componentes periféricos de microcomputadores, vídeo cassetes, toca discos laser entre muitos outros.

No Brasil as pesquisas na área de mecânica de precisão remontam ao início da década de 70, com as pesquisas na área de mancais aerostáticos liderados por Ruffino na USP-São Carlos (Purquério, 1975; Martin et ali, 1997). A primeira máquina-ferramenta para usinagem de ultraprecisão foi desenvolvida no Brasil em fins da década de 80, por Weingaertner (1992) no Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC. Tratava-se de um torno dedicado controlado por CLP para a produção de cilindros fotorreceptores, com guias e mancais aerostáticos.

A necessidade de obter componentes ópticos transmissivos e reflexivos de altíssima precisão e complexibilidade geométrica, exige a obtenção de uma solução para nanodeslocamentos controlados em dois e, em alguns casos de três eixos simultaneamente. A análise da pergunta "*Como obter estes componentes com a melhor relação custo/benefício?*" levou a três soluções distintas, conforme a Tabela-1, que apresenta uma comparação em termos de vantagens e desvantagens para cada uma delas .

Tabela 1 – Componentes ópticos de alta precisão e qualidade:
Vantagens e desvantagens das soluções básicas

SOLUÇÃO	VANTAGENS	DESvantagens
- IMPORTAÇÃO DOS COMPONENTES	- MENOR CUSTO	- RESTRIÇÕES DE VENDA - TEMPO PARA RECEBIMENTO - PROJETO DETALHADO
- IMPORTAÇÃO DA MÁQUINA	- TEMPO PARA OPERACIONALIZAÇÃO	- ALTO CUSTO - RESTRIÇÕES DE IMPORTAÇÃO - RESTRIÇÕES NO USO - MANUTENÇÃO
- DESENVOLVIMENTO DA MÁQUINA	- DOMÍNIO DA TECNOLOGIA - ISENÇÃO DE RESTRIÇÕES - FACILIDADE DE MANUTENÇÃO - POSSIBILIDADE DE OFERECER SERV. - CUSTO MENOR	- TEMPO PARA OPERACIONALIZAÇÃO

Optou-se para o desenvolvimento de um protótipo de uma máquina-ferramenta numericamente controlada para usinagem de ultraprecisão, por se vislumbrar neste desenvolvimento o maior número de oportunidades que permitam o acompanhamento e o entendimento desta tecnologia.

2. DESENVOLVIMENTO

O desenvolvimento do protótipo foi dividido em:

- Projeto conceitual,
- Projeto detalhado.
- Fabricação, montagem e ajustagem.
- Qualificação.

O projeto conceitual tem por objetivo obter as relações que abrangem o espectro do desenvolvimento de uma máquina-ferramenta. O projeto conceitual teve início com a introdução de questionamentos específicos aos diversos clientes envolvidos no

desenvolvimento, questionamento o qual servirá de base para formulação da casa da qualidade. A casa da qualidade relaciona as necessidades com os requisitos, onde ambos são relacionados de acordo com o grau de importância. A organização dos requisitos permite que diversas estrutura de funções parciais, com arranjos cinemáticos possíveis e os sistemas necessários para a obtenção da solução ótima sejam formulados e comparados. A figura 1 apresenta a seqüência de ações tomadas no desenvolvimento do projeto conceitual.

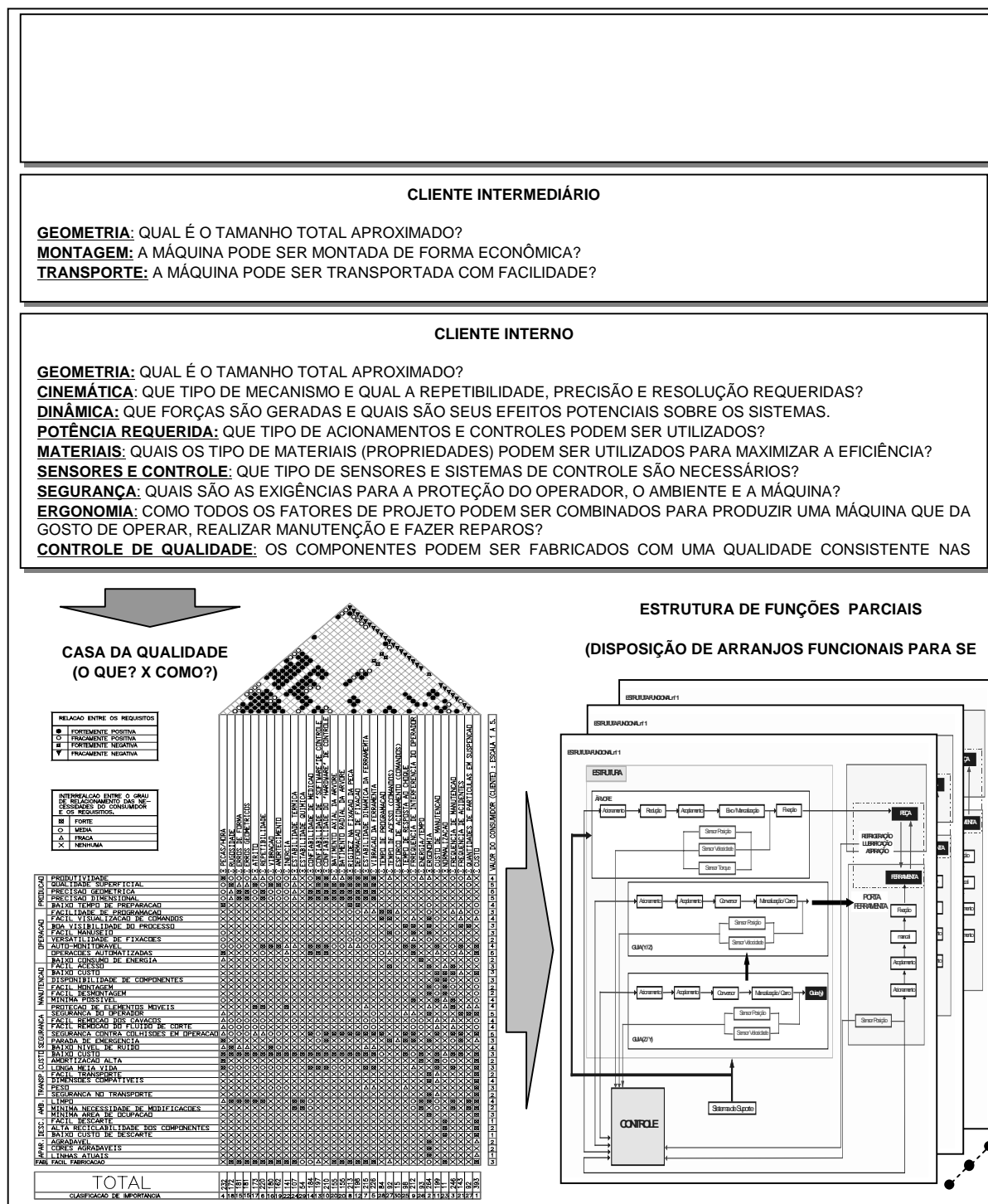


Figura 1 - Seqüência esquemática do desenvolvimento do Projeto Conceitual

A partir da escolha do melhor arranjo cinemático, proporcionado pelas estruturas de funções, foram definidos os diversos materiais, componentes e sistemas necessários à construção do protótipo. Para cada material, componente e sistema foram elaboradas matrizes

de comparação que permitiram uma seleção apropriada. Esta seleção levou à uma concepção básica do protótipo, com a disposição dos elementos escolhidos em sua provável posição no arranjo final, conforme mostrado esquematicamente na Figura 2.

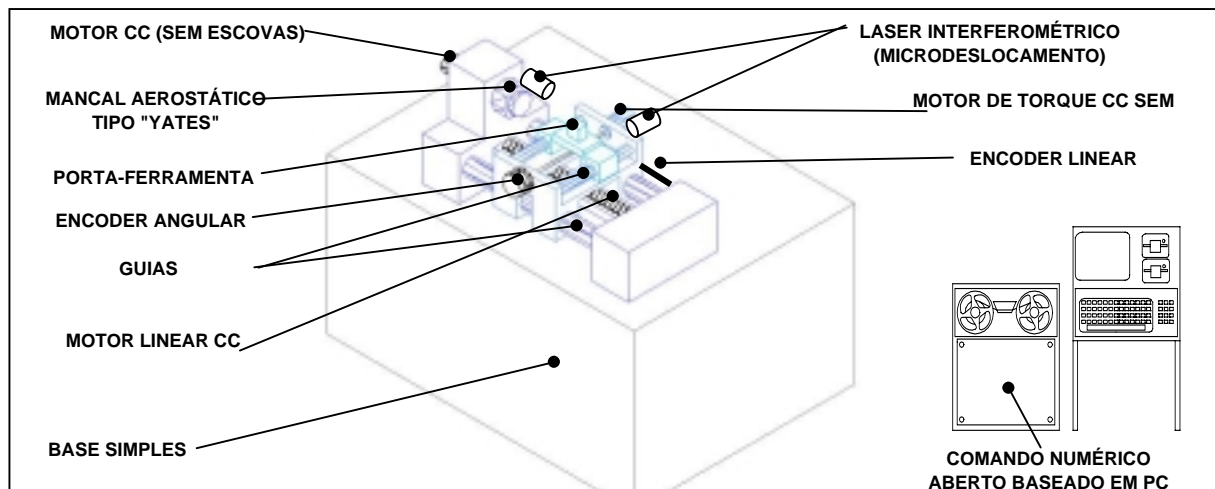


Figura 2 - Escolha dos elementos mais apropriados.

3. IMPLEMENTAÇÃO DA SOLUÇÃO CONCEITUAL

A partir das informações do projeto conceitual foram selecionados os diversos sistemas e componentes necessários a implementação da solução ótima encontrada. Desta seleção de componentes foram elaborados os diversos projetos detalhados necessários. Com o detalhamento do projeto foi iniciado o processo de fabricação, montagem e ajustagem do protótipo. A figura 3 apresenta uma visão esquemática da relação entre o projeto detalho, de certas partes do protótipo, e o resultado após a montagem e ajustagem.

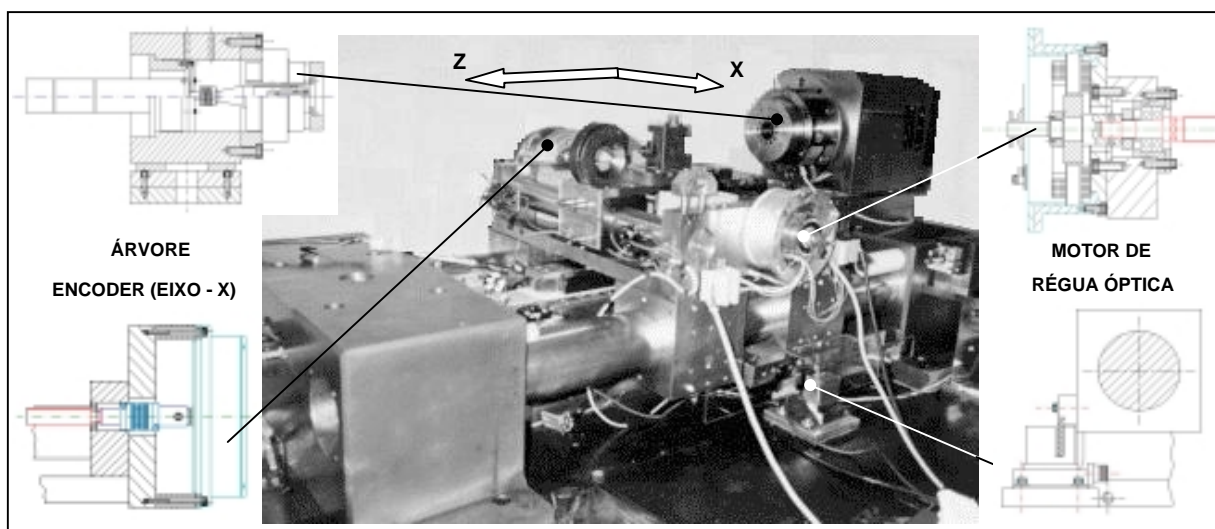


Figura 3 - Visão geral do protótipo e detalhes de montagem

4. O CONTROLE

Para controlar os movimentos do protótipo foi selecionado um CNC de arquitetura aberta baseado em um módulo de controle de movimento DSP, o qual opera como hospedeiro em um computador pessoal. O DSP processa as referências de posição através de um algoritmo de controle, e tem a função de fazer com que a posição atual do motor seja igual a posição comandada. O CNC é capaz de controlar simultaneamente até oito (08) graus de liberdade mecânicos seqüencialmente, processar programas NC e supervisionar informações coletadas na planta.

A figura 4 apresenta o fluxo de sinal entre o módulo CNC-DSP e os eixos ZX do protótipo e também as funções principais da placa de controle. Quando o programa de movimentação, inserido pelo usuário, é executado, uma posição de referência é enviada ao algoritmo de controle. Este também recebe a posição atual medida pelo sensor de posição. Baseado na diferença entre estes dois valores (erro), o algoritmo de controle irá calcular o valor de comando para aquele eixo.

O programa de movimentação fornece a posição de referência a medida que for executado. É função do algoritmo de controle fazer com que a posição atual seja igual a posição de referência. Isto somente ocorrerá quando os parâmetros de controle forem corretamente calculados e implementados.

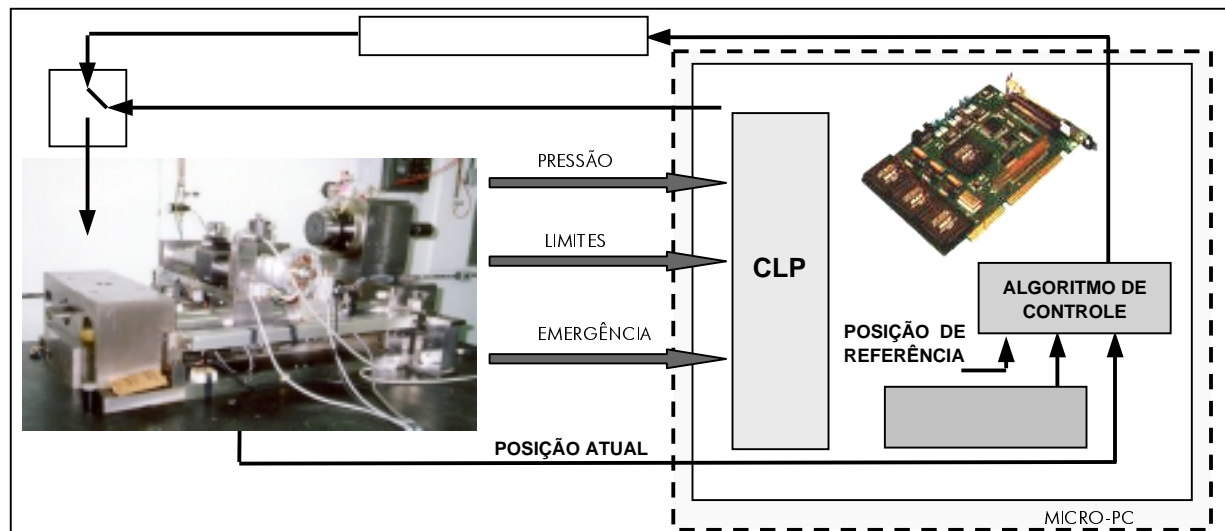


Figura 4 - O Sistema de Controle.

A técnica de controle aplicada foi a de Controlador Realimentado do tipo PI-D Feedforward implementado no CNC. Esta técnica tem a vantagem de permitir um ajuste baseado em um modelo matemático. O controlador PI-D+FF é ajustado baseado em um modelo matemático do sistema em malha aberta. Este sistema é composto das guias aerostática, do servo motor, servo conversor e do sistema de medição. O modelo matemático é obtido através do método de identificação dos mínimos quadrados não recursivo, que utiliza dados medidos na planta em malha aberta. Para isto, a planta em malha aberta é excitada (ex. sinal em rampa) e então a entrada (torque de referência) e saída (posição) são usados no algoritmo dos mínimos quadrados não recursivo, a fim de se determinar parâmetros do modelo matemático.

A avaliação do sistema de controle foi realizada por meio de ensaios de posicionamento. Em máquinas-ferramentas para usinagem de alta e ultraprecisão as velocidades de avanço normalmente utilizadas se situam entre 1 e 100 mm/min. Nestes ensaios foi utilizando um programa de teste NC para definir trajetórias, onde o carro se movia com deslocamentos pré-fixados a uma velocidade de avanço de 1mm/min, e em seguida, pára por três (03) segundos.

Esta seqüência é repetida por três vezes em um sentido, retornando na mesma seqüência ao ponto de partida. A coleta de dados foi realizada utilizando-se os recursos de aquisição da própria placa de controle, a qual opera em 30 MHz. Também foram verificados qual o menor incremento que cada um dos eixos é capaz de realizar. A avaliação foi realizada através do erro de segmento, o qual é definido como a diferença entre a posição comanda e a posição real medida no sistema de medição. A figura 5 apresenta os o gráfico de deslocamento em cada um dos eixos e o respectivos erros de segmentos obtidos na movimentação.

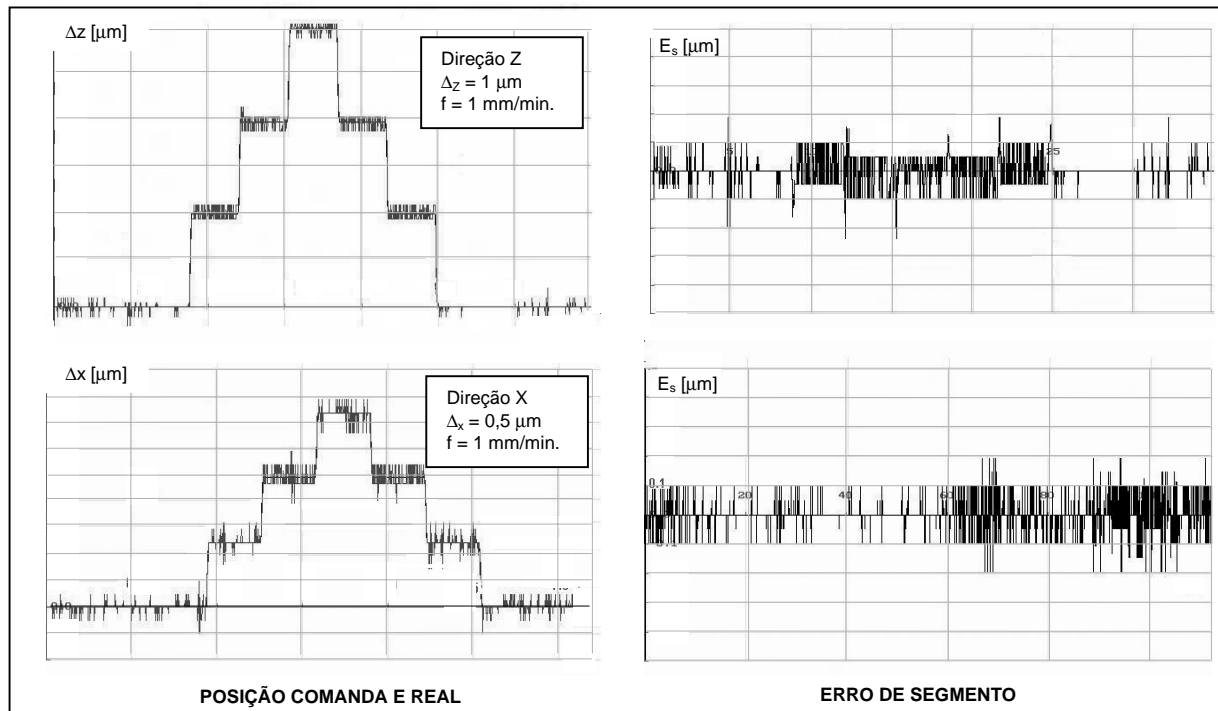


Figura 5 - Resultados dos ensaios do sistema de controle

Os resultados apresentados na figura 5 mostraram que apesar das diferentes soluções de projeto, em termos de sistemas de acionamento, aplicadas aos dois eixos do protótipo (motor linear e motor de torque com fuso de esferas), o algoritmo de controle é capaz de cumprir sua função. O algoritmo de controle proporcionou um movimento suave, sem ressonâncias, capaz de responder de forma rápida as mudanças corridas na planta durante o processo.

5. MODELAMENTO

A formulação de um interrelacionamento físico/matemático é necessária para um entendimento claro das características estática, dinâmica, térmica dos componentes de uma máquina-ferramenta (Weck, 1992; Hill & Tischer, 1991). Neste trabalho foi utilizado o programa de análise de elementos finitos ANSYS®.

O objetivo do modelamento matemático do protótipo através de elementos finitos, foi o de identificar as partes ou componentes da máquina estão mais susceptíveis à deformações, quando sujeitas a carregamentos estáticos ou dinâmicos.

A solução estática foi fundamentada nas equações da mecânica dos sólidos, em especial nas equações básicas da elasticidade as permitem solucionar o problema dos deslocamentos em função de carregamentos (Weck, 1992; Beer & Jhonston, 1982; Shigley, 1986; Kohnke, 1987).

O modelo matemático discreto, equação 1, consiste em grupo de equações que consideram os carregamentos externos (vetor força {F}), a rigidez do sistema (matriz rigidez

[K]), e os deslocamentos genéricos do sistema (vetor deslocamento genérico {A}). A equação 1 representa as condições do sistema para condições de contorno, tais como as introduzidas por travamento, assim como as condições de conexão dos nodos do elemento (Weck, 1992, Cook, 1974; Kohnke, 1987). Em contrapartida os efeitos inerciais e de amortecimento são ignorados exceto para as acelerações de campo, tais como a gravidade (Kohnke, 1987).

$$\{F\} = [K] \{A\} \quad (1)$$

O comportamento dinâmico da estrutura foi modelado utilizando-se a equação do movimento. Considerando o protótipo desenvolvido como um sistema com mais de um grau de liberdade, as propriedades espaciais (massa [M], amortecimento [ξ] e rigidez [K]), as quais constituem o modelo, devem ser expressas em termos de matrizes conforme a equação 2, com { \ddot{u} } e { \dot{u} } são respectivamente os vetores aceleração e velocidade em cada um dos nodos do sistema.

$$[M]\{\ddot{u}\} + [\xi]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\} \quad (2)$$

A figura 6 apresenta uma representação do modelo de vigas utilizado no desenvolvimento e algum dos resultados estáticos e dinâmicos obtidos.

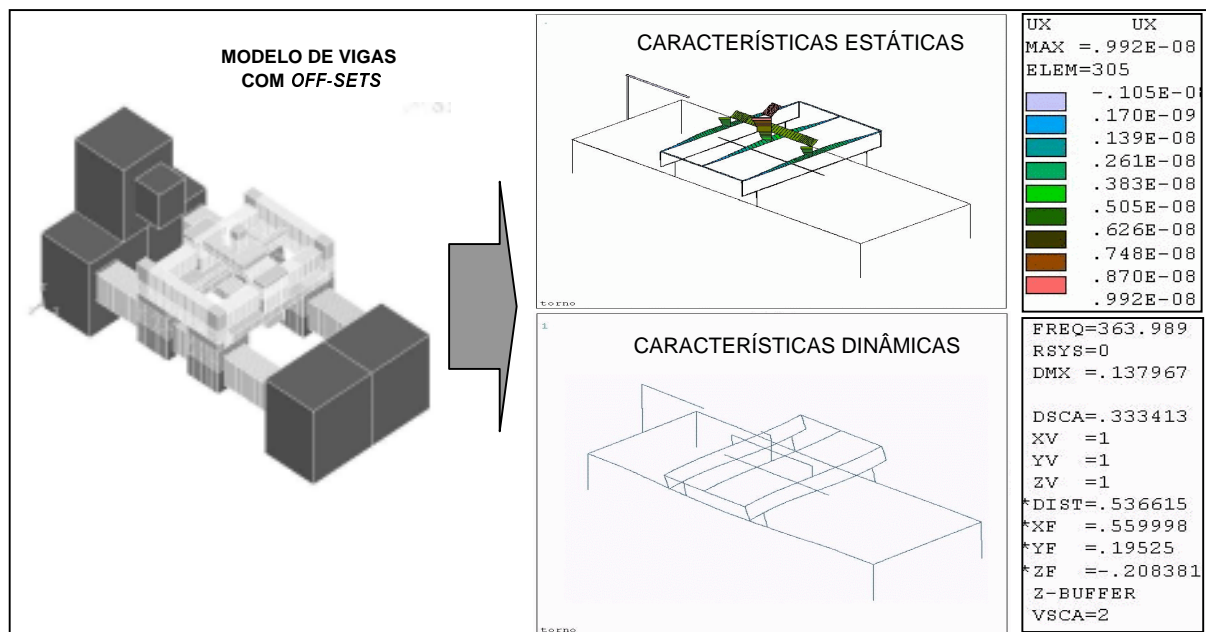


Figura 6 – Modelo de elementos vigas do protótipo

6. QUALIFICAÇÃO

O projeto da máquina-ferramenta é avaliado em função da estabilidade e repetibilidade, como considerações primárias. A precisão, enquanto muito importante, pode ser melhorada até aos limites impostos pela estabilidade e repetibilidade da máquina-ferramenta através do mapeamento dos erros presentes que podem ser devidamente corrigidos pelos comandos de movimentação (Slocum, 1992.).

Os ensaios de precisão e repetibilidade de posicionamento foram realizados de acordo com a norma ISO 230-2 (1988). As condições ambientais foram respeitadas conforma a mesma norma ($20 \pm 0,5$ °C), com a máquina descarregada, ou seja sem peça montada na árvore, e durante os ensaios forma implementadas os valores de correção para a rotina de

compensação. Apesar de ser uma máquina com dois eixos coordenados as medições foram realizados de forma unidirecional, com as aproximações sendo realizadas na mesma direção no sentido do eixo.

O aparato experimental e seus respectivos elementos constituintes são apresentados na figura 7, sendo que o mesmo foi utilizado para ambos os eixos (Z e X).

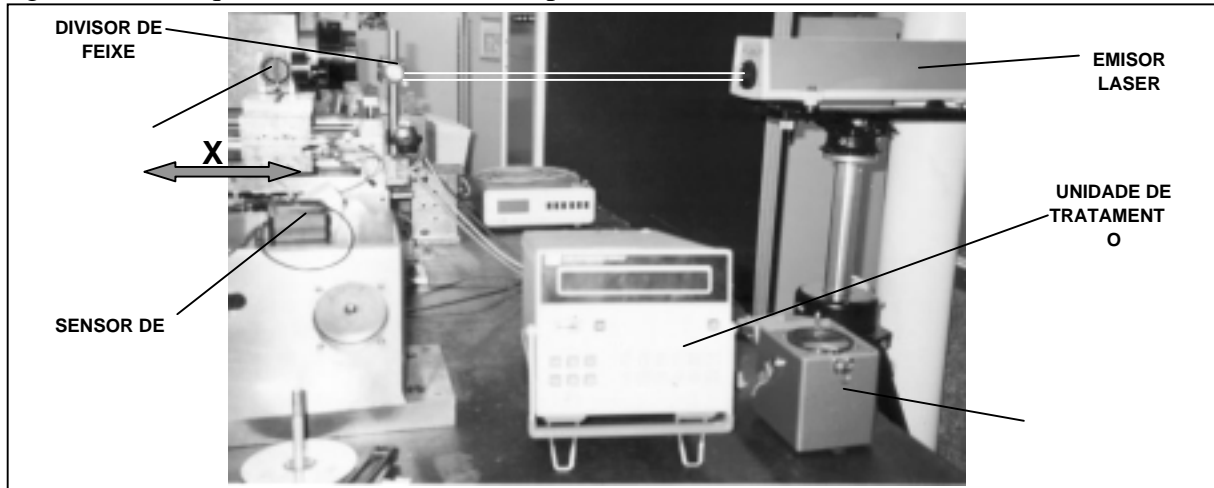


Figura 7 – Aparato experimental dos ensaios de posicionamento

A figura 8 apresenta os resultados para repetibilidade e valor reverso (erro de posicionamento) obtidos nos ensaios após a compensação. A compensação consiste em uma rotina implementada no comando da máquina que permite que se introduza a diferença entre a posição real, obtida por um sistema externo a máquina, e a posição medida no sistema de medição da máquina. Assim esta rotina corrige automaticamente os desvios de posicionamento ao longo do curso de deslocamento, aumentando a precisão da máquina.

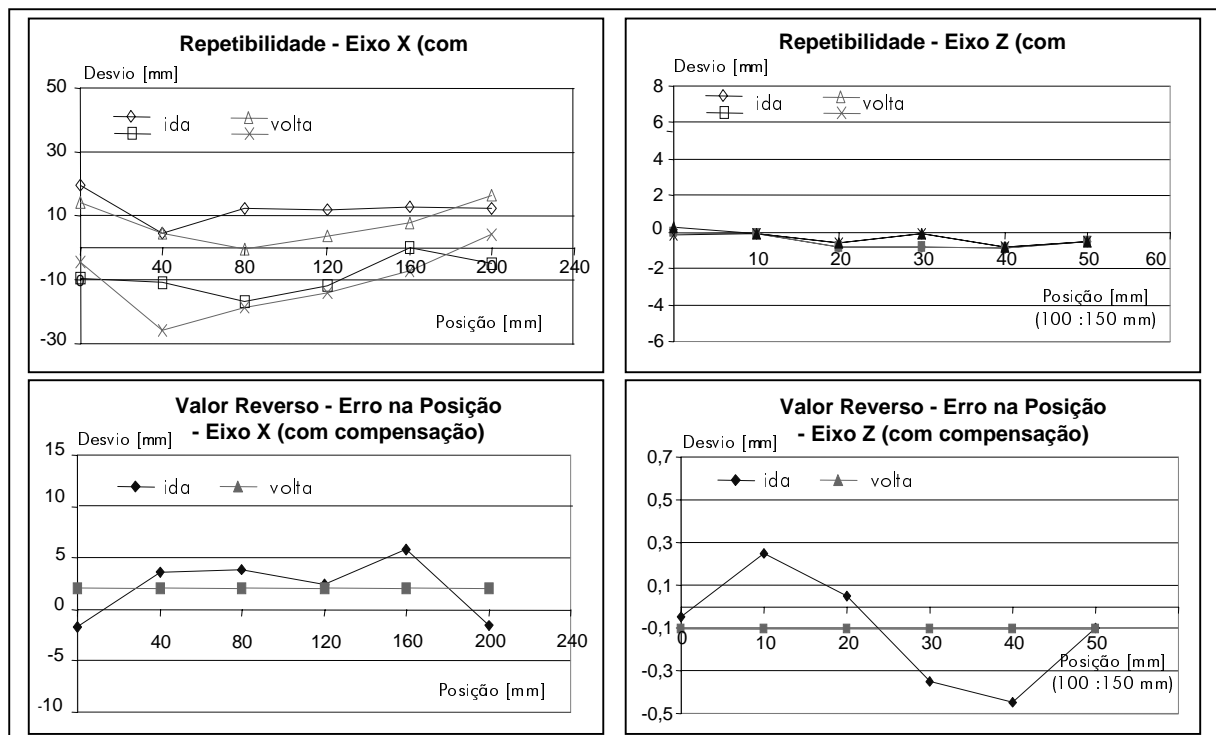


Figura 8 - Resultados dos ensaios de posicionamento.

O estudo experimental de vibrações em estruturas tem provado ser uma das principais fontes de informações para entender e controlar as mesmas. Desta forma, apoiado nos

resultados obtidos com o modelo matemático do protótipo foram realizados ensaios dinâmicos cujos os objetivos foram:

- validar o modelo e
- identificar as frequências críticas,

A validação do modelo permite que os procedimentos adotados possam ser aplicados em desenvolvimentos futuros, tornando-se uma ferramenta útil na identificação de pontos fracos no projeto.

O método impulsivo foi empregado na identificação dos parâmetros dinâmicos do protótipo, e a escolha dos pontos de medição e aplicação foi feita tomando por base os resultados do modelo. A identificação das frequências críticas permitiu se definir faixas de operação para a máquina, evitando que esta seja operada em condições próximas as suas ressonâncias. A figura 9 apresenta os resultados obtidos para o porta ferramentas, ponto mais crítico em termos dinâmicos. Devido as próprias características do processo de usinagem o porta-ferramenta tende a ser o ponto mais suscetível a excitação dinâmica, cujas as amplitudes de deslocamento resultantes se reproduzem na peça usinada.

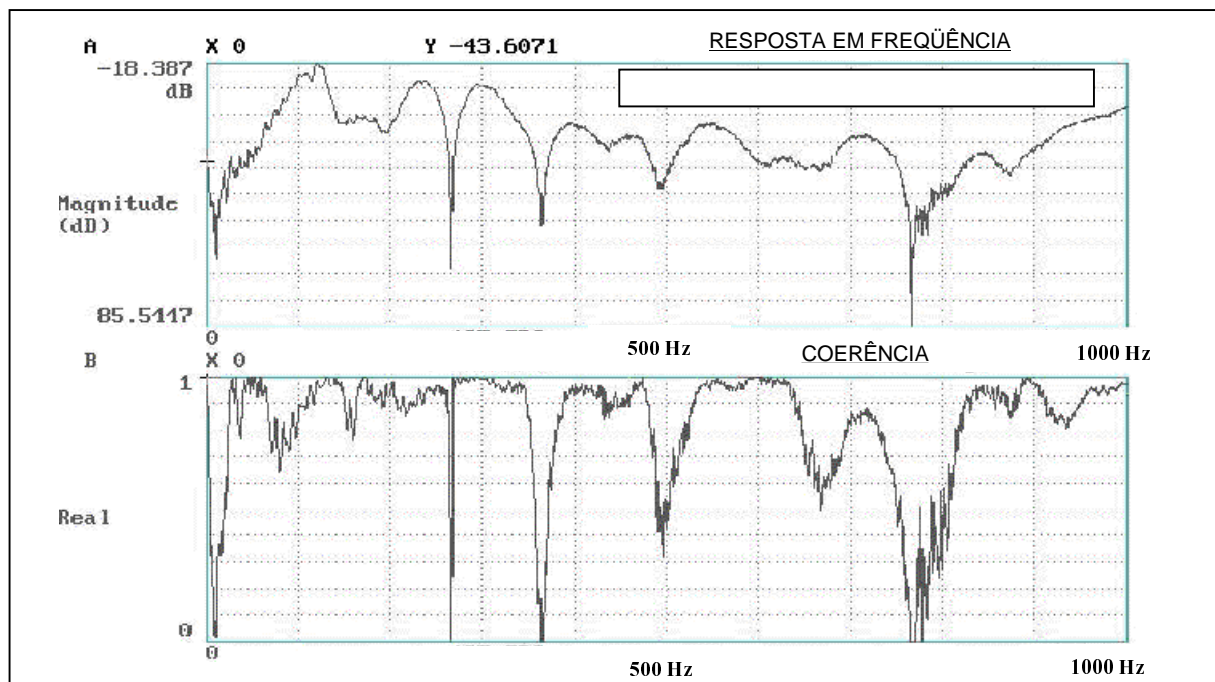


Figura 9 - Resposta em frequência e coerência no porta-ferramenta.

6. CONCLUSÕES

Dentro das propostas iniciais para este trabalho os resultados obtidos mostraram-se dentro das expectativas.

O resultados obtidos para o eixo X em termos de precisão, correspondem aos previstos na literatura. Este eixo apesar de ter um sistema de realimentação de posição de altíssima resolução (25.920 pulsos/volta) apresenta limitações de ordem mecânica, tais como a imprecisão do fuso, elasticidade nas uniões e acoplamentos entres outros erros cumulativos na cadeia cinemática.

O eixo Z por sua concepção (acionamento por motor linear), não apresenta os erros devido a uniões, acoplamentos e elementos afins, estando por isto sua precisão limitada ao sistema de medição e ao sistema de controle.

O modelamento por meio de elementos de viga mostrou-se falho nas considerações sobre a condição de acoplamento entre mancais aerostáticos e eixo. A introdução desta consideração levaria a condições de contorno muito complexas na interface mancal/eixo. Um segundo modelo baseado em elementos sólidos 3D, com novas considerações para a condição mancal/eixo, apresentou resultados mais próximo aos resultados medidos. O modelo de vigas permitiu identificar quais são os componentes mais comprometidos em termos de vibrações e permitiu reavaliar algumas considerações do projeto.

Agradecimentos

Ao CNPq e FINEP pelo apoio dados no desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Beer, F. P., Jhonston, E.R., 1982; Resistência dos Materiais, Macgraw Hill.
- Berkmans, W. J.; N.D., Prediction of Tolerances in Precision Cutting for Mass Production.
- Cook, R. D., 1974, Concepts And Applications of Finite Element Analysis, Jonh Wyley & Sons, Inc.
- Hill, A., Tischer, W., 1991, Dynamical Behavior of an Ultra-Precision Turning Machine, Progress In Precision Engineering (6th Ipes – 2nd Icum), Springer – Verlag.
- Ikawa, N. Et. Ali., 1991; Ultra-Precision Metal Cutting - The Past, The Present and the Future, CIRP, Vol.40/2/.
- ISO 230-2, 1981, Acceptance Code For Machine Tools, Part – 2, Determination of Accuracy and Repeatability of Positioning of Numerically Controlled Machine Tools.
- Kohnke, P. C., 1987, Ansys - Engineering Analysis System – Theoretical Manual.
- Martin, C. A., Weingaertner, W.L., Jesus, G. A. R., Stoeterau, R.L., 1997, Control Strategies Applied to Sub-Micro-Metric Positioning, 9th IPES, Vol. 2, p 464-467 -Braunschweig, Germany.
- Purquério, B. M., 1975, Bancada de Ensaio Para Mancais Aerostáticos Axiais: Projeto, Construção e Testes Experimentais, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica –USP.
- Shigley, J.E., 1986, Mechanical Engineering Design – First Metric Edition, Macgraw Hill, 1986.
- Smith, S.T., Chetwynd, D.G., 1994, Foundations of Ultra-Precision Mechanism Design, Gordon and Brench Science Publisher.
- Slocum, A., 1992, Precision Machine Design, Prentice Hall, New Jersey.
- Tanigushi, N., 1994, The State of the Art of Nanotechnology of Ultra-Precision and Ultra-Fine Products, Precision Engineering Vol. 16 No. 1, Janeiro.
- Weck, M., 1992, Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme, Vol. 4, Vdi-Verlag.
- Weingaertner, W. L., 1992, Desenvolvimentos na Usinagem de Ultraprecisão, Monografia - UFSC.

NUMERICALLY CONTROLLED LATHE FOR ULTRAPRECISION MACHINING

Abstract.

This paper concerns about the development of an ultra-precision full aerostatic CNC Turning Machine. From the initial steps in the parameters definition for the machine, by the requests in the conceptual project, throw out manufacturing, assembly and adjustments of parts and other systems, and the final geometrical and dynamics tests.

Key words: Ultra-precision machine, Machine Design, Machine-tool, CNC, air bearings.