

DESENVOLVIMENTO DE UMA MÁQUINA-FERRAMENTA COM ALTA CAPACIDADE DE AMORTECIMENTO

Leandro José da Silva (UFMG - PPGEP), leandrojosesilva@gmail.com

Eduardo Martins de Oliveira (UFMG - PPGEP), edumgbr@yahoo.com.br

Wanderson de Oliveira Leite (UFMG - PPGEP), wandersonol@uai.com.br

Juan Carlos Campos Rubio (UFMG - Laboratório de Usinagem e Automação), juan@demec.ufmg.br

Tulio Hallak Panzera (UFSJ - Laboratório de Matérias Compósitas), tuliopanzera@hotmail.com

Resumo:

A criteriosa avaliação das características requeridas por um sistema é de fundamental importância para o sucesso do trabalho de um projeto de produto, visando a construção e automação de uma máquina-ferramenta. Este trabalho apresenta em meio acadêmico, um caso prático do desenvolvimento de uma Minifresadora para Prototipagem Rápida e usinagem de alta velocidade de corte. O objetivo principal do projeto foi obter parâmetros técnicos para o desenvolvimento de um sistema confiável dentro dos requisitos estipulados e ao menor custo possível. Para tanto, aspectos relacionados com técnicas e princípios de engenharia de precisão foram estudados e metodologias de montagem (DFA) visando à atenuação de erros de fabricação dos componentes. Desta forma, no final do caso prático é apresentado um equipamento com características técnicas necessárias para uso, dentro de uma metodologia sistematizada.

Palavras chave: Engenharia de Produto, Desenvolvimento de produto, Engenharia de Precisão, Estudo da Prática Profissional, Minifresadora CNC;

1. Prototipagem rápida por retirada de material

A *prototipagem rápida* compreende um conjunto de tecnologias que permitem a produção rápida de uma peça tridimensional numa máquina especial. Basicamente, a concepção deste tipo de processo baseia-se na aplicação dos princípios da tecnologia CAD/CAM, onde um modelo sólido é desenvolvido e transferido eletronicamente desde a base de dados de um programa CAD (projeto auxiliado por computador) para uma máquina de prototipagem ou diretamente desde um sistema de fabricação assistida por computador (CAM). A adoção da tecnologia do comando numérico e do ferramental utilizado na prototipagem rápida e na engenharia reversa permite a produção de peças complexas em um tempo reduzido.

Desta forma, máquinas ferramenta comandadas numericamente ou comumente denominadas como máquinas CNC, e com auxílio de ferramentas computacionais CAD/CAM, apresentam-se como uma opção natural para prototipagem rápida de modelos ou a manufatura rápida de peças ou do ferramental necessário para sua produção, como por exemplo, matrizes e moldes. Esta técnica é denominada de prototipagem rápida por retirada de material. A Figura 1 apresenta um exemplo de prototipagem rápida de um brinquedo rádio controlado, através da usinagem do modelo em *Renshape* para produção das peças plásticas através de *vacuum forming* (www.engraver.com.br).

O CNC (comando numérico computadorizado) consiste em uma evolução do comando numérico, em que o microcomputador, ou microprocessador, é parte integrante do controle da máquina ferramenta. Comando numérico é definido como o método de controle dos

movimentos da máquina ferramenta através da inserção direta de instruções codificadas ao sistema, que interpreta os dados e os converte em sinais elétricos, os quais irão controlar diversas sub-funções da máquina, como por exemplo, a rotação de um eixo, a troca da ferramenta de corte, acionamento ou não do fluido de corte etc. (CAMPOS RUBIO, 2010).

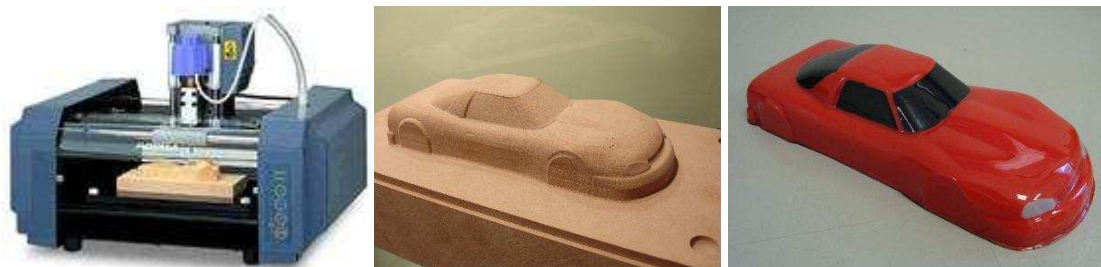


Figura 1 – Prototipagem rápida de modelos em *Renshape* para produção de peças plásticas através de *vacuum forming* (ENGRAVER, 2011)

A unidade de controle numérico da máquina ferramenta pode ser um computador pessoal, através da utilização de um software como programa CNC, que realiza todas as funções lógicas de controle solicitadas. O computador do CNC compila o programa e envia o sinal para o acionamento, que gera o movimento relativo peça-ferramenta. Sendo fornecidos somente os pontos principais e a referência da trajetória, o computador calcula todos os pontos por onde a ferramenta deve passar (CAMPOS RUBIO, 2009). Na Figura 2 são mostrados os diversos elementos constituintes de uma máquina ferramenta CNC.

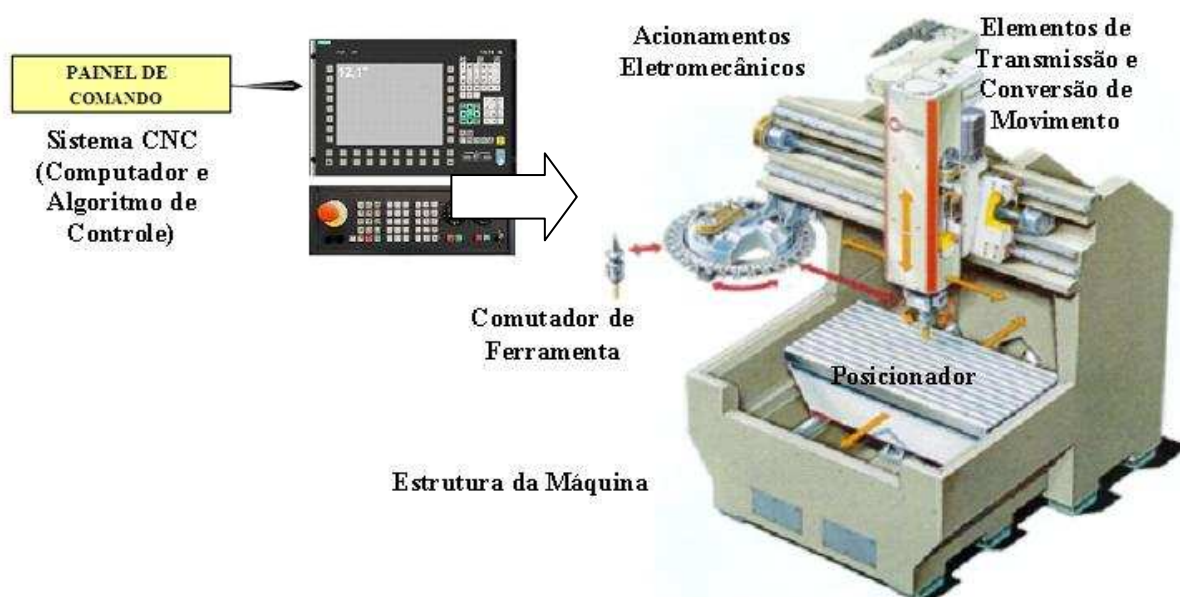


Figura 2 - Componentes de uma máquina ferramenta CNC

1.1. Elementos constitutivos de uma máquina ferramenta CNC

No desenvolvimento de uma máquina ferramenta comandada numericamente, além da unidade de controle numérico, componentes adequados são essenciais para garantir um alto desempenho e a precisão requerida. Estes componentes são pertencentes aos diversos sistemas mecânicos e eletrônicos constituintes da máquina, tais como sistema de acionamento, sensores, elementos mecânicos de conversão e transmissão de movimentos. Além desses elementos, a estrutura sobre a qual a máquina ferramenta é construída exerce papel

fundamental sobre sua precisão e a qualidade dos produtos obtidos, visto que pode ser um fator com efeito significativo sobre a estabilidade, esforços atuantes, vibrações e rigidez do conjunto.

Uma das principais características das máquinas ferramenta é o movimento de translação de seus componentes, muitas vezes com precisão micrométrica, sendo cada um dos elementos constitutivos da máquina responsável por parte do desempenho global do sistema. Desta forma, pode-se afirmar que as máquinas ferramenta CNC são montagens complexas, caracterizadas como um conjunto de tecnologias, das quais podem ser destacados os seguintes componentes:

- a) *Programa Peça*: (Software);
- b) *Gabinete de Comando*: (Computador e Sistema de Controle);
- c) *A Máquina Ferramenta*: (Estrutura, Acionamentos, Sensores e Elementos Mecânicos);
- d) *Sistema de Troca de Ferramenta*: (Magazines e Torres).

Uma máquina CNC trabalha seguindo três passos básicos, bem diferenciados:

- a) CNC lê um programa (transfere para a máquina em código binário);
- b) O operador inicia o ciclo automático (código binário em Comandos Elétricos), para assim, posteriormente, a unidade de controle comparar o número de pulsos enviados e recebidos;
- c) Os acionamentos recebem os pulsos e os transformam em movimento.

1.1.1. Programa Peça

Um comando numérico é um computador com a missão especial de controlar movimentos de máquinas. Os computadores são máquinas elétricas capazes de distinguir duas situações ou estados, a existência, ou não, de certo valor de tensão elétrica. Se houver tensão, pode-se indicar esse estado com o número um. Se não houver tensão, pode-se indicar pelo número zero. Daí os números que auxiliam no controle da máquina, que dão origem ao nome comando numérico.

Desta forma, as instruções (códigos) são identificadas por combinações de zeros e uns. A linguagem de programação dos comandos numéricos permite que a tarefa do programador seja facilitada, pois essa linguagem acaba sendo intermediária entre a linguagem de máquina (utilizando zeros e uns) e a linguagem natural do ser humano.

1.1.2. Gabinete de Comando

As máquinas CNC possuem um computador acoplado que permitem a realização das tarefas de **leitura**, **análise** e **edição** das informações do programa. Em essência, o que difere as máquinas CN das CNC é o computador.

O computador do CN compila o programa e envia o sinal para os acionamentos que se encarregam de gerar o movimento relativo peça-ferramenta, não sendo necessário informar todos os pontos por onde a ferramenta deve passar, mas apenas os pontos principais e a referência da trajetória, que o computador calculará todos os pontos onde a ferramenta deve passar.

No desenvolvimento deste trabalho a implementação do CNC foi baseado na plataforma IBM-PC. Isto se justifica na medida em que se trata de um equipamento de pequeno porte, destinado a espaços reduzidos, e que não estará exposto a ruídos industriais elevados. Por outro lado, o uso de plataformas de sistemas operativos comerciais, como Windows[®] ou Linux[™], permitirá a utilização de ferramentas computacionais de auxílio a manufatura, como CAD e CAM, de forma facilitada.

1.1.3. Máquina Ferramenta

Diversos componentes podem ser identificados como essências para o desempenho superior das máquinas comandadas numericamente sobre as máquinas convencionais. Para facilitar o estudo, podemos identificar os:

- a) Acionamentos;
- b) Sensores;
- c) Elementos Mecânicos de Conversão e Transmissão de Movimento;
- d) Estrutura.

Dentre os elementos mecânicos de conversão de movimento, os parafusos sem fim ou fusos, estão dentre os mais utilizados em máquinas operatrizes (Figura 3). Os fusos, que podem ser classificados como fusos de deslizamento, deslizamento fluídico ou de esferas recirculantes, são mecanismos que permitem converter o movimento de rotação em translação, e vice-versa (SANTOS,1990). Nesses últimos, as esferas reduzem o atrito entre o eixo e a porca do fuso, redução considerada uma grande vantagem para esse sistema, que apresenta ainda os benefícios de menor potência de acionamento, menor aquecimento e prolongamento da vida útil de serviço.

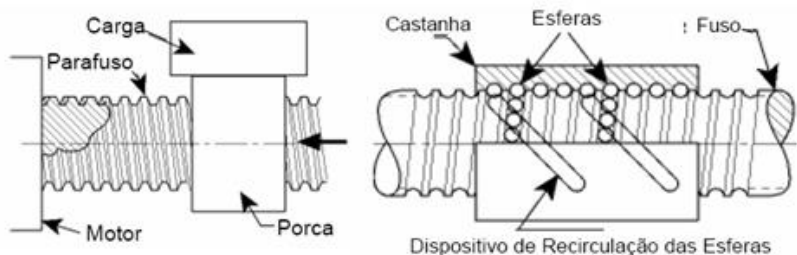


Figura 3 – Parafuso sem-fim (deslizamento) e fuso de esferas recirculantes

As guias de movimento correspondem ao grupo de elementos funcionais, dentro de um sistema posicionador, que permitem o movimento suave entre duas superfícies com movimento relativo, seja de translação ou de rotação. Guias para movimento de translação são chamadas de guias lineares (Figura 4), enquanto que as guias para movimento de rotação são chamadas de mancais rotativos. As guias de rolamento possuem esferas que circulam entre o trilho e o patim, trabalhando em conjunto com o fuso de esferas. Os fusos e as guias devem, portanto, estar em perfeito alinhamento. Guias de rolamento apresentam baixo atrito e a possibilidade de aplicação de pré-carga (minimização de folgas).

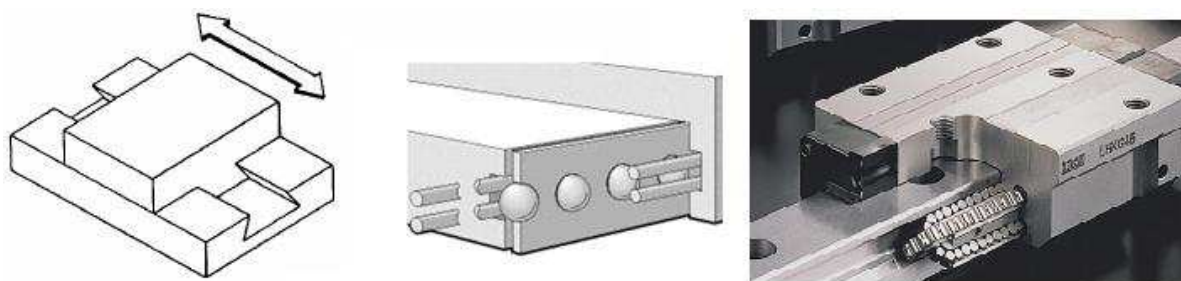


Figura 4 – Guia de deslizamento (rabo de andorinha) e de rolamento (esferas e rolos)

Os acoplamentos têm como finalidade fazer com que a força (energia), velocidade e sentido de rotação entregues por um motor ao seu eixo, possam efetivamente ser transmitidos ao sistema de movimentação (fusos, guias etc.) (MANFÉ *et al.*, 1990). Possuem ainda a função

de compensar desalinhamentos, absorver choques e vibrações, e atuar como fusível mecânico. A permissão de pequenos desalinhamentos é a característica mais importante de acoplamentos flexíveis elásticos para transmissão de baixo e médio torque, sendo também de fácil instalação e remoção.

A movimentação de máquinas ferramenta CNC pode ser proporcionada por vários tipos de motores que deverão converter energia elétrica em energia mecânica. Dentre os tipos de acionamento são encontrados os servomotores (de corrente contínua ou alternada) e os motores de passo (CAMPOS RUBIO, 1992). Servomotores de corrente contínua apresentam maiores vantagens para aplicações em máquinas CNC de grande porte, devido à maior versatilidade e flexibilidade em relação a máquinas CA. Motores de passo são máquinas de relutância variável constituídas de um estator com enrolamentos de excitação e um rotor magnético com saliências. Como vantagens dos motores de passo estão o custo relativamente baixo, simples implementação de controle, vida útil prolongada e ausência de manutenção regular pela ausência de escovas minimizando, conseqüentemente, custos operacionais. Apresentam ainda, compatibilidade com sistemas eletrônicos digitais, o que lhes conferem diversas aplicações, dentre elas como motores de acionamento e posicionamento da mesa de trabalho e da ferramenta em equipamentos de usinagem controlados numericamente (LYRA, 2010).

2. Características da estrutura de uma máquina ferramenta

A precisão de uma máquina ferramenta, principalmente aquelas de alta precisão, é altamente depende da capacidade da estrutura em sustentar as relações dimensionais entre todos os elementos críticos, capacidade esta que deve ser mantida na presença de todas as forças induzidas na estrutura e durante longos períodos de tempo. Durante a operação, diversos esforços podem estar atuando em uma máquina, a saber: forças devido às operações nas quais a máquina está trabalhando (força de corte), forças em desequilíbrio, força devido a vibrações externas, forças de inércia, forças de atrito, forças induzidas devido a efeitos térmicos entre outras. A Figura 5 apresenta um exemplo de análise modal para determinar o nível de desvios provocados durante a operação.

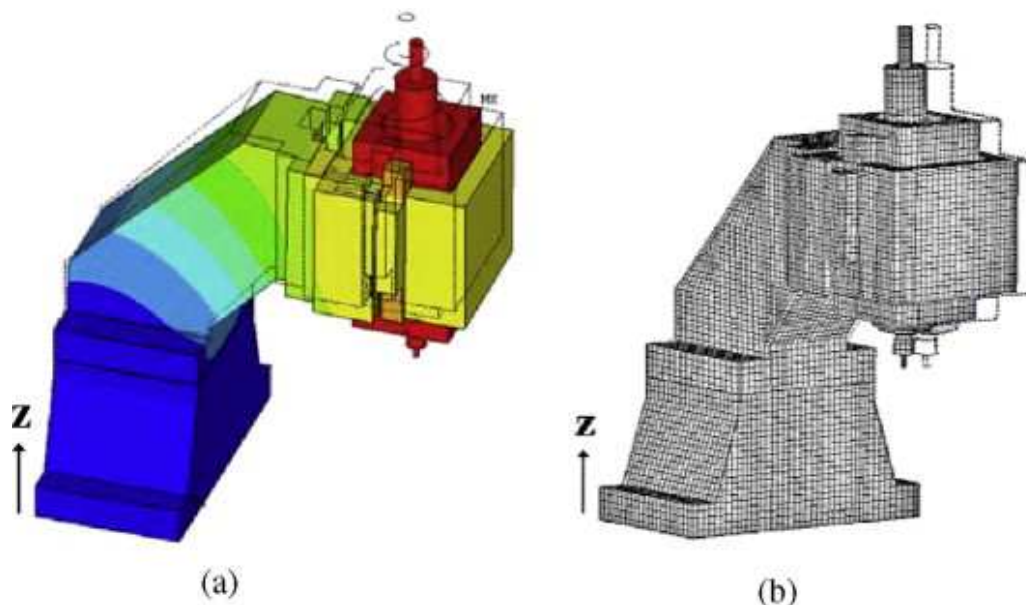


Figura 5 – Exemplo de uma análise de (a) deflexão estática e (b) de análise modal para uma máquina ferramenta (Kim e Chang, 2010)

No projeto da estrutura de uma máquina de alta precisão, requisitos são necessários para garantir estabilidade e o bom funcionamento do conjunto. Estabilidade dimensional de longa duração, alta resistência térmica, alta resistência estática e dinâmica e propriedades de amortecimento, são alguns desses requisitos.

A estabilidade dimensional está intimamente ligada à estabilidade dos materiais utilizados na fabricação da estrutura, visto que a estabilidade estrutural do material no tempo e empenamento dos materiais é tão dependente, tanto da estrutura como dos esforços que agem sobre ela. A resistência térmica da estrutura da máquina ferramenta está relacionada com as deformações térmicas que podem ocorrer devido a fatores como expansão térmica da estrutura, expansão desigual dos componentes devido ao gradiente de temperatura, efeitos bi metálicos e inércia térmica. A combinação desses efeitos ocasiona distorções de natureza complexa por toda a parte da estrutura. Uma baixa resistência estática e dinâmica torna a estrutura, em geral, tão incapaz de produzir resultados precisos, quanto de executar operações de serviço pesado. A resistência de uma máquina é uma função de todos os seus elementos. Assim, torna-se necessário, estudar criticamente a trajetória de carga desde o início e observá-las em todos os estágios do projeto. O requisito de amortecimento na estrutura de uma máquina tem um efeito benéfico nas suas características de desempenho dinâmico, limitando a amplitude de vibração sob condições de ressonância, e agindo contra a tendência de vibração auto-excitada.

O ferro fundido é tradicionalmente considerado um material básico para várias máquinas de precisão. Uma quantidade considerável de experiência prática foi adquirida ao longo dos anos em sua utilização para a obtenção de alta estabilidade dimensional em estruturas. Entretanto, segundo Bloom *et al.* (2000), a partir da segunda metade do século XX fez-se necessária a utilização de novos recursos na confecção de bases de estruturas para máquinas de alta precisão.

A elevada rigidez, capacidade de amortecer vibrações e outras propriedades do ferro fundido, já não se sobrepunha mais aos problemas oriundos da utilização deste material, relacionados aos elevados valores de coeficiente de expansão térmica e a alta condutividade térmica, que podem gerar erros de precisão devidos aos gradientes térmicos. Neste sentido, entre os fabricantes inovadores de máquinas-ferramenta dos Estados Unidos há uma lenta, mas crescente, tendência em optar pelo material compósito particulado para as bases e colunas de máquinas. Eles se fundamentam nas características de custo e desempenho, considerando entre os principais benefícios: alto grau de flexibilidade de fundição, amortecimento de vibrações (8 a 10 vezes maior do que o ferro fundido ou o aço), insensibilidade às mudanças térmicas de curta duração e melhoria na vida da ferramenta de corte ou do rebolo de retificação de cerca de 30% (MASON, 2001).

3. Desenvolvimento de uma máquina

Este projeto pretende construir uma máquina fresadora de pequeno porte CNC, que associada ao uso de ferramentas computacionais CAD/CAM, permitam seu uso em Prototipagem Rápida de produtos, não só para peças industriais, como também em aplicações não tradicionais como o desenvolvimento de próteses e mecanismos ortopédicos. Para isto, construiu-se no Laboratório de Usinagem e Automação uma fresadora CNC de pequeno porte e arquitetura aberta, e pretende-se agregar ao conjunto as mais modernas ferramentas associadas ao tema em foco.

3.1. Estudo e aplicação dos conceitos de Engenharia de Precisão

O estudo aprofundado dos conceitos de engenharia de precisão e manufatura integrada por computador possibilitará uma melhor adequação do equipamento a ser preparado em função

das características a serem atingidas. Neste tipo de equipamento de fabricação, além da inserção de ferramentas computacionais de auxílio à manufatura, o desempenho das máquinas ferramenta cobra uma importância capital.

O desenvolvimento do projeto em função de um melhor desempenho estático e dinâmico da máquina objetiva analisar as alternativas disponíveis, que permitam melhorar o desempenho global das máquinas e instrumentos controlados numericamente, visando assim, alcançar as especificações de operação predeterminadas. A tomada de decisão em relação às características a serem implementadas na máquina ferramenta CNC no processo de projeto e automação visam, principalmente, otimizar estática e dinamicamente o conjunto, o que possibilita obter, entre outras vantagens, maior precisão e confiabilidade da máquina (SLOCUM, 1992).

Neste sentido, conforme os princípios de projeto de precisão indicados na literatura (SLOCUM, 1992; NAKAZAWA, 1994; CAMPOS RUBIO, 2009), pode-se citar que foram adotados neste projeto os seguintes princípios e axiomas:

- a) Programa Peça: (Software);
- b) Independência funcional;
- c) Redução do Laço estrutural;
- d) Atenuação dos distúrbios externos;
- e) Minimização das deformações térmicas;
- f) Projeto pseudo-cinemático.

Cada um destes aspectos será tratado de forma mais extensa em trabalhos futuros.

A partir da segunda metade do séc. XX fez-se necessária a utilização de novos recursos na confecção de bases de estruturas para máquinas de alta precisão. A elevada rigidez, a capacidade de amortecer vibrações e outras propriedades características do ferro fundido, material utilizado até então, já não se sobrepunham mais aos problemas oriundos da utilização deste material, problemas estes, relacionados aos elevados valores de coeficiente de expansão térmica e a alta condutividade térmica, que podem gerar erros de precisão devidos aos gradientes térmicos. Desta forma, determinadas partículas foram adicionadas a certos elementos obtendo-se a combinação de materiais das classes dos metais, cerâmicos e polímeros, genericamente apresentando uma matriz e um reforço. O reforço é tal, que contribui de alguma forma para melhorar as características físicas do material, seja um aumento na resistência à tração, à flexão, temperatura de deflexão ao calor entre outras. (BLOOM et al., 2000).

O granito é um dos compósitos cerâmicos utilizados, apresentando excelentes propriedades mecânicas e estabilidade dimensional, no entanto, apresenta dificuldades de processamento, limitando a fabricação de componentes que apresentam geometria complexa. (SLOCUM, 1992).

O material compósito particulado em estudo neste trabalho consiste em um material de duas fases: uma é chamada de matriz (resina epóxi), que é contínua e envolve a outra fase, chamada frequentemente de fase dispersa (partículas de sílica (SiO₂)).

A previsão das propriedades mecânicas foi realizada através do modelo micro mecânico baseado nos estudos de Turcsányi, que correlaciona o estado de tensão do compósito particulado com a distribuição de empacotamento, morfologia e a adesão matriz-particulado. Os valores obtidos para o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson efetivo para o material compósito de sílica/epóxi foram de 6,11GPa e 0,23, respectivamente (PANZERA, 2003).

Considerando o esforço crítico atuante em um dos apoios, determinou-se a resposta de deslocamentos e tensões, apresentando os valores 0,001mm e 1,953E-05Pa respectivamente, (Figura 6 (a) e (b)). Estes resultados comprovam o bom desempenho mecânico do material desenvolvido.

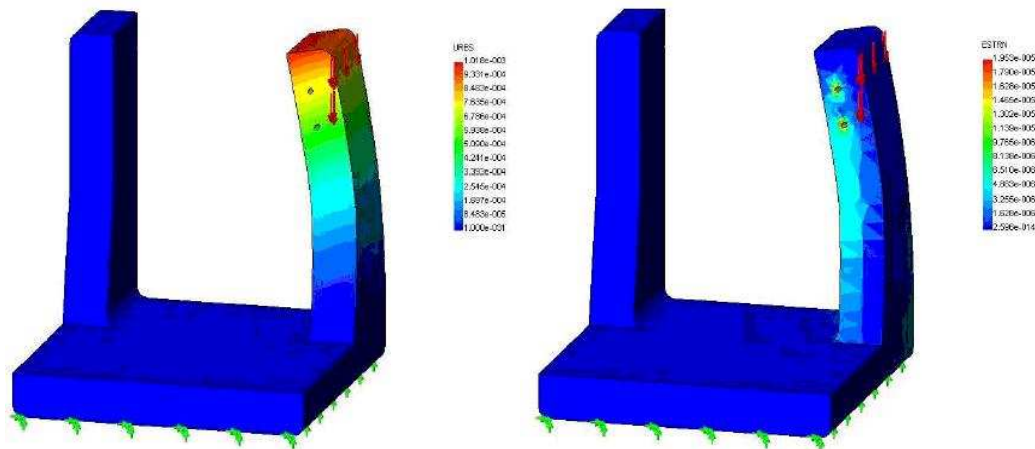


Figura 6 - Estado de tensão e deslocamento linear obtida por elementos finitos (PANZERA, 2003)

3.2. Construção dos Posicionadores da Máquina Fresadora

Em função da existência no laboratório do anteprojeto da Máquina Fresadora CNC e um posicionador de pequeno porte já em funcionamento (Figura 7), serão a construção dos posicionadores restantes um dos principais objetivos pontuais deste projeto de pesquisa. A criteriosa avaliação das características da máquina a ser desenvolvida é de fundamental importância para o sucesso do trabalho de projeto, de forma a obter um equipamento confiável dentro dos parâmetros estipulados e ao menor custo possível. Além do CNC, várias partes dos conjuntos mecânicos e eletromecânicos merecem uma especial atenção na análise de escolha dos diversos subconjuntos (WECK, 1984).

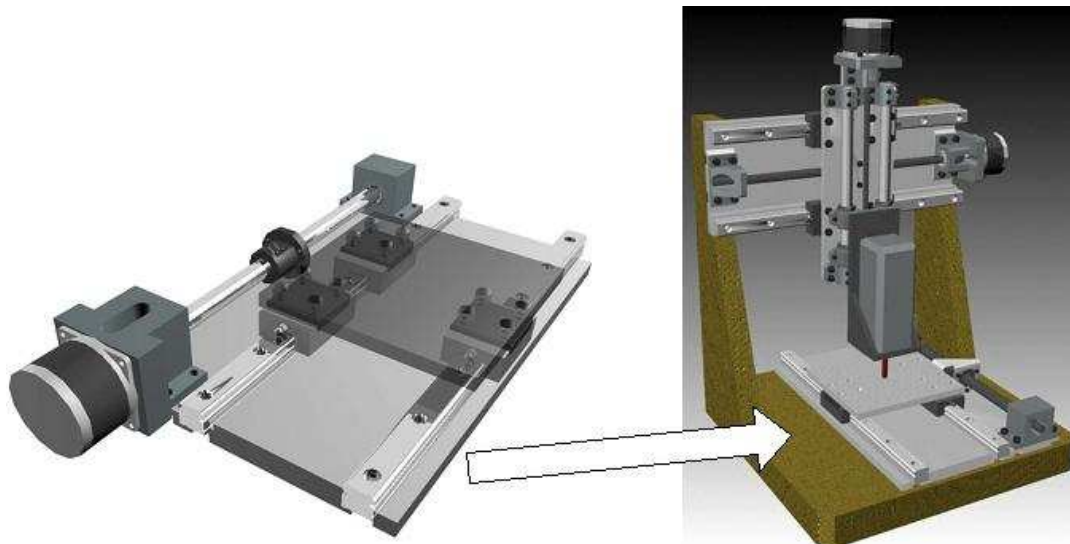


Figura 7 - Posicionador Modular para a Máquina CNC de Pequeno Porte (SHOJI, 2002)

Posteriormente, a metodologia adotada prevê a montagem dos demais eixos de movimento (posicionadores) sobre a estrutura da máquina. Para isso, foi necessário fixar os mancais, o motor e seu acoplamento, o fuso de esferas recirculantes com sua castanha e rolamentos, e as guias lineares e seus carros à placa-base do eixo.

Realizou-se então o alinhamento das guias lineares, por meio de um relógio comparador e uma base magnética presa aos carros das guias (Figura 8). Chegou-se a um desvio de paralelismo de aproximadamente 10 μ m.

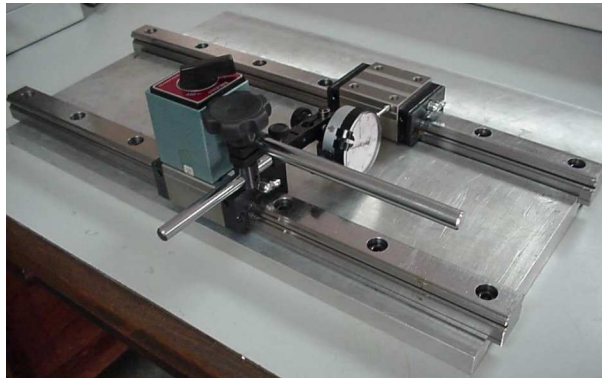


Figura 8: Alinhamento das guias lineares do eixo Y

3.2.1. Análise e Montagem dos Acionamentos

Os acionamentos dos três eixos da fresadora são realizados por motores de passo. Paralelamente à construção e à montagem dos eixos, montou-se os motores de passo. O acoplamento escolhido para a transmissão do movimento é do tipo junta de Oldham, com um elemento intermediário de nylon. Devido à flexibilidade do nylon, um pequeno desalinhamento entre o eixo do motor e o fuso é permitido. A figura 9 apresenta a montagem final do posicionador para o eixo Y com motor de passo e acoplamento flexível em desatque.

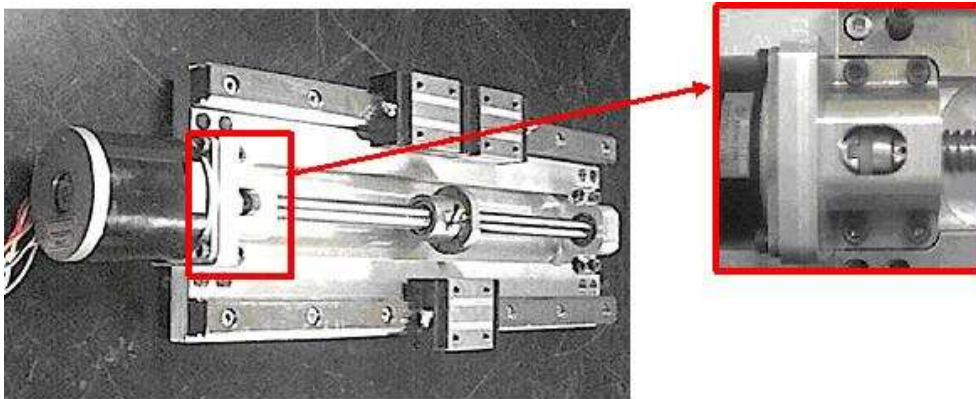


Figura 9: Posicionador para o eixo Y com motor de passo e acoplamento flexível em desatque.

3.3. Correção do desalinhamento das colunas da estrutura da máquina fresadora

Uma das partes relevantes deste projeto trata do desenvolvimento da estrutura tipo pórtico escolhida para a máquina. Essa estrutura foi desenvolvida em material compósito polimérico reforçado por partículas de sílica, no laboratório de Usinagem e Automação, em um trabalho anterior pelos pesquisadores. Entretanto, devido às distorções térmicas ocasionadas pelo processo de cura exotérmica da resina polimérica durante a montagem da estrutura, fez-se necessário o desenvolvimento de um dispositivo para corrigir o desalinhamento das colunas da estrutura existente. Assim, parte dos objetivos deste trabalho foi de garantir melhor precisão.



Figura 10 – Molde em acrílico e vazamento da estrutura de material compósito.

Devido à magnitude dos desvios ocorridos durante a cura do material, o assentamento da base do eixo Y diretamente na estrutura conforme o projeto, tornou-se completamente inviável. Surgiu assim a necessidade de desenvolver um sistema de niveladores para a estrutura do eixo X e também uma peça para interface entre a estrutura de compósito particulado de sílica e o suporte do eixo Y a partir do levantamento da topologia das faces de assentamento, conforme ilustrado na figura 11.

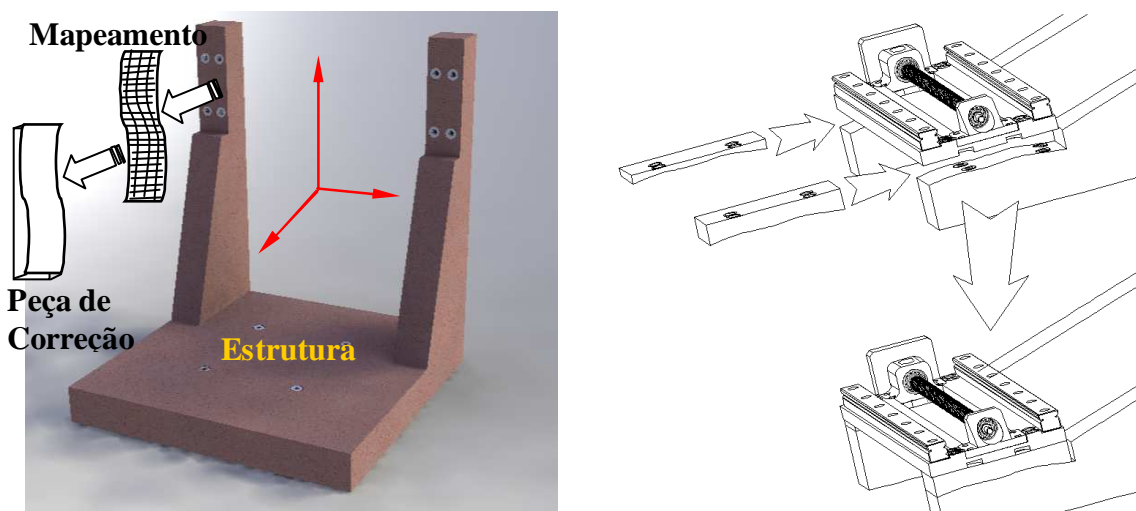


Figura 11 – Correção do desvio no assentamento do eixo Y.

O levantamento da topografia (erros geométricos) foi feito com a utilização de uma mesa de desempeno, como padrão de planicidade, e um paquímetro traçador de altura, como mostrado na Figura 12. A peça foi alinhada conforme os trilhos do eixo X e uma malha traçada nas superfícies de apoio. Os pontos assim determinados foram utilizados para mapear a superfície.

A Figura 13 apresenta uma vista geral da montagem definitiva dos eixos ou posicionadores para os três graus de liberdade da máquina CNC, eixos X, Y e Z. Mostrando os acionamentos eletromecânicos montados, assim como os elementos de apoio e nivelamento da máquina.



Figura 12 – Mapeamento dos desvios no assentamento do eixo Y

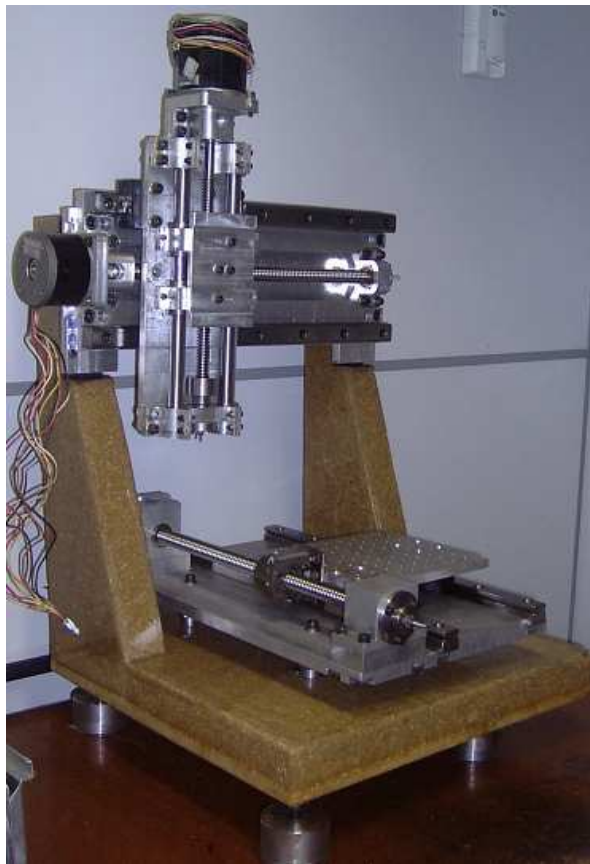


Figura 13 – Montagem definitiva dos posicionadores X, Y e Z sobre a estrutura de alto amortecimento interno.

4. Considerações Finais

Inicialmente pode-se afirmar que, os conceitos que foram apresentados na parte de Revisão Bibliográfica servem como base para o desenvolvimento do projeto do produto. Da mesma forma, a pesquisa realizada em trabalhos anteriores da elaboração da estrutura, assim como da parte mecânica, colaborou para o entendimento e progresso na montagem da minifresadora CNC que permita seu uso na prototipagem rápida.

Uma vez que a estrutura da máquina CNC utilizada é um dos aspectos inovadores, pode-se afirmar que permitiu sua utilização com pequenas adaptações, mostrando resultados satisfatórios no projeto e construção da estrutura para máquina e equipamentos de precisão.

O que poderá no futuro ser utilizado em outros projetos com requisitos similares ou testado em novos produtos.

Finalmente, a utilização dos fundamentos e princípios da engenharia de precisão auxiliaram de forma eficaz no desenvolvimento do projeto, na fabricação e montagem dos sistema, assim como nas melhorias implementadas na equipamento. A integração de conhecimento de diversos ramos da engenharia, conforme apresentado, tornará possível no futuro o desenvolvimento de novos produtos utilizados o *know how* adquirido por meio desse caso prático, ou ainda, a utilização em novos projetos mais complexos.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à CAPES, pela concessão da bolsa para os três primeiros autores; à FAPEMIG (PPM-00393-09) e CNPq pelo suporte financeiro.

Referências

CAMPOS RUBIO, J. C. Metodologia e Principios de Projetos em Engenharia de Precisão. Apostila do curso de Pós Graduação Engenharia Mecânica da UFMG, Belo Horizonte, 2010.

CAMPOS RUBIO, J. C. Programação de Comando Numerico. Apostila do curso de Engenharia Mecânica da UFMG, Belo Horizonte, 2009.

CAMPOS RUBIO, J. C. *Controladora Flexível Multieixo para Acionamento de fresadoras de Alto Desempenho Dinâmico*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1992.

CAMPOS RUBIO, J. C. NASCIMENTO, R. A., CAMARGOS, F. O., CARDOSO L. M. E SANTOS, N. C; S.; Cnstrução de uma maquina fresadora para prototipagem rápida por usinagem. 10º Colóquio de Usinagem, Uberlândia, 2004.

ENGRAVER 2011: www.engraver.com.br. Acesso: Abril 2011.

KIM J-H, CHANG, S-H. Design of μ -CNC machining centre with carbon/epoxy composite–aluminium hybrid structures containing friction layers for high damping capacity. *Composite Structures*, V. 92, (9), 2128-2136, 2010.

LYRA, P. V. A. *Desenvolvimento de uma Máquina Fresadora CNC Didática*. Universidade de Brasília. 2010. Trabalho de graduação. Acesso: Abril 2001. Disponível em: <http://alvarestech.com/temp/cnc/Fresadora%20CNC%20Did%20tica.pdf>.

MANFÉ, G., Pozza, R. e Scarato, G. *Desenho técnico mecânico*, Ed. Hemus, 1990

MASON, F. Bases de máquinas de polímeros fundidos. *Máquinas e Metais*, abril 2001, 64-83.

NAKAZAWA, H. *Principles of precision Engineering*. Oxford University Press, Oxford. 1994;

PANZERA, T. H. *Estudo do comportamento mecânico de um compósito particulado de matriz polimérica*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de São João del Rei. Departamento de Engenharia Mecânica. 2003.

SANTOS, D. R. Fuso de esferas recirculantes e guias lineares. *Mecatrônica atual*, 1990 São Paulo,

SHOJI, A. A. *Projeto e construção de um posicionador translativo de pequeno porte para uma fresadora CNC*. Trabalho de Conclusão em Engenharia Mecânica da UFMG. Belo Horizonte. 2002.

SLOCUM, A. *Precision Machine Design*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ. 1992.

WECK M. *Handbook of Machine Tools*. Vol. 1, 2, 3 e 4, John Wiley & Sons, Chichester. 1984.