



Universidade Federal da Paraíba
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Mestrado - Doutorado

**IMPLEMENTAÇÃO E ANÁLISE DE UM
RETROFITTING APLICADO EM UMA MÁQUINA
DE 3 EIXOS.**

por

Wagner Correia Peixôto

Dissertação de Mestrado submetida à Universidade Federal
da Paraíba para obtenção do título de Mestre

WAGNER CORREIA PEIXÔTO

**IMPLEMENTAÇÃO E ANÁLISE DE UM
RETROFITTING APLICADO EM UMA MÁQUINA
DE 3 EIXOS.**

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica da Universidade
Federal da Paraíba, em cumprimento às
exigências para obtenção do Título de
Mestre.

Orientador: Professor Dr. João Bosco de Aquino Silva

João Pessoa - Paraíba

2016

P379i Peixôto, Wagner Correia.
Implementação e análise de um *retrofitting* aplicado em
uma máquina de 3 eixos / Wagner Correia Peixôto.- João
Pessoa, 2016.
122f. : il.
Orientador: João Bosco de Aquino Silva
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CT
1. Engenharia mecânica. 2. Máquinas-ferramentas.
3. *Retrofitting*. 4. CNC. 5. Compensação de erros.

UFPB/BC

CDU: 621(043)

IMPLEMENTAÇÃO E ANÁLISE DE UM RETROFITTING APLICADO EM UMA MÁQUINA DE 3 EIXOS

por

Wagner Correia Peixoto

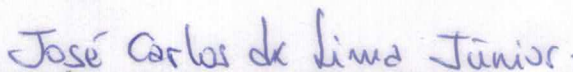
Dissertação aprovada em 26 de fevereiro de 2016



Prof. Dr. JOÃO BOSCO DE AQUINO SILVA
Orientador – UFPB



Prof. Dr. MARCELO CAVALCANTI RODRIGUES
Examinador Interno - UFPB



Prof. Dr. JOSÉ CARLOS DE LIMA JÚNIOR
Examinador Externo – UFPB

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Waldir Peixoto da Silva e Nadir Correia Peixoto, aos meus irmãos Wanessa Correia Peixoto e Waldir Peixoto da Silva Junior, à minha namorada Géssica Geissa da Nóbrega e a todos os meus amigos que estiveram comigo e me apoiaram em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Waldir e Nadir, por todo o suporte e incentivo para os meus estudos.

Aos meus irmãos Wanessa e Waldir, por sempre estarem ao meu lado.

À minha namorada Géssica, por me apoiar nos momentos mais difíceis e estar do meu lado nos mais alegres.

Ao meu orientador João Bosco, por todos os seus ensinamentos, suporte, confiança e inspiração para conclusão desse trabalho.

Ao professor José Carlos por todo o suporte dedicado para conclusão desse trabalho.

Ao meu amigo Joab, pelos momentos de descontração tomando o café e realizando testes no LEP.

Aos meus amigos Gustavo, Pedro Granville, Herculano e Marlio pelas conversas entre as aulas e pelos trabalhos conjuntos nas disciplinas.

Aos meus amigos do Laboratório de Engenharia de Precisão (LEP) da UFPB, Rafael, Henrique, Verilton, Pedro, Chico, Fábio e Fidelis por toda a ajuda, incentivo e companheirismo.

Aos meus amigos da Coordenação de Manutenção da CBTU-Maceió, Alberto, Bruno, Caio, Cristhian, Erick, Fábio, Leonardo, Lucas e Thiago por toda a ajuda e acolhimento nessa nova empreitada.

À todos os professores, funcionários e amigos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

À CAPES pelo apoio financeiro.

RESUMO

As máquinas-ferramentas com controle numérico computadorizado, ou máquinas-ferramentas CNC, surgiram devido à necessidade da indústria da aviação para produzir peças cada vez mais complexas e precisas. O *retrofitting* de máquina-ferramenta é a modificação de uma máquina tradicional para uma com controle numérico computadorizado. Devido à popularização dos computadores, diminuição de custos dos componentes eletrônicos, expansão da Internet e projetos de código aberto, o *retrofitting* tornou-se uma opção cada vez mais comum na indústria como alternativa para a compra de novas máquinas-ferramentas com CNC incluso. O objetivo deste estudo foi a implementação do *retrofitting* em uma máquina de 3 (três) eixos no Laboratório de Engenharia de Precisão da Universidade Federal da Paraíba. Para essa adaptação, a máquina foi modificada para utilizar um Kit com drivers de interface da HobbyCNC e novos motores de passo. Após o *retrofitting*, foi utilizado um sistema Laser XL-80 para medição dos erros de posicionamento. Os testes foram realizados, em cada eixo, comandando-se a máquina para 5 posições e medindo-se as posições reais atingidas e, depois, foram realizados os mesmos testes no sentido inverso. Com os resultados medidos, são calculados os erros de posicionamento, histerese, repetitividade e exatidão conforme a norma ISO 230-2. No eixo Y foi realizado outros testes com a compensação dos erros medidos anteriormente. Houve uma melhora significativa na exatidão do eixo Y após a compensação. Também foram realizados testes de erros angulares, com a utilização de um nível eletrônico Talyvel 5, ao longo do eixo Y. Os resultados obtidos no teste foram satisfatórios e o *retrofitting* atingiu suas expectativas, por proporcionar a possibilidade de realizar mais pesquisas, na área de Comando Numérico Computadorizado.

Palavras-chave: máquinas-ferramentas, *retrofitting*, CNC, compensação de erros

ABSTRACT

The computer numerical control machine tools, or CNC machine tools, emerged due to the need of the aviation industry to produce increasingly complex and accurate parts. The *retrofitting* of machine tools is the modification of a traditional machine for a computer numerical control one. Due to the popularization of computers, electronic components decreased costs, Internet expansion and open source projects, the *retrofitting* has become increasingly widespread in industry as an option for the purchase of new machine tools with CNC included. The objective of this study was to implement the *retrofit* on a 3-axis machine from the Precision Engineering Laboratory of the Federal University of Paraíba. For this adaptation, the machine has been modified to use a kit with interface drivers from HobbyCNC and new stepper motors. After the *retrofit*, it used a 80-XL Laser system for measuring position errors. The tests were performed on each axis, commanding the machine to five positions and measuring the actual positions reached and, then, the same tests were carried out in reverse direction. With the measured results, the positioning errors, hysteresis, repeatability and accuracy calculated by ISO 230-2 standard. It was conducted other tests in compensating the previously measured errors on the Y axis. There was a significant improvement on the Y-axis accuracy after compensation. Also, angular errors tests were carried out, with the use of an electronic level Talyvel 5, along the axis Y. The results of the test were satisfactory and the *retrofitting* reached its expectations, providing the possibility of further research in the area of numerical control.

Keywords: machine tools, *retrofitting*, CNC, error compensation,

SUMÁRIO

CAPÍTULO I.....	17
APRESENTAÇÃO.....	17
1.1. INTRODUÇÃO	17
1.2. OBJETIVO GERAL.....	18
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
1.4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	19
CAPÍTULO II.....	20
FUNDAMENTOS DO COMANDO NUMÉRICO (NC) E COMANDO NUMÉRICO COMPUTADORIZADO (CNC)	20
2.1 INTRODUÇÃO	20
2.2 COMANDO NÚMERICO (NC).....	20
2.3. COMANDO NÚMERICO COMPUTADORIZADO.....	21
2.4. COMPUTADORES PESSOAIS E CNC.....	23
2.5. LINGUAGEM NC	23
2.6. <i>RETROFITTING</i> DE MÁQUINAS-FERRAMENTA	24
2.7. AVALIAÇÃO DE CUSTOS PARA <i>RETROFITTING</i>	25
2.8. KITS DE <i>RETROFITTING</i>	25
2.9. SOFTWARES CNC.....	27
2.10. CONCLUSÕES.....	28
CAPÍTULO III.....	29
REVISÃO BIBLIOGRAFICA DE TÉCNICAS PARA MEDIÇÃO E ANÁLISE DE ERROS EM MÁQUINAS FERRAMENTAS.....	29
3.1. INTRODUÇÃO	29
3.2. REVISÃO DE LITERATURA SOBRE MEDIÇÃO DE PERFORMANCE DE MÁQUINAS	29
3.3. CONCEITOS METROLÓGICOS.....	31
3.3.1. Erro de medição.....	31
3.3.2. Erro Aleatório	32
3.3.3. Erro sistemático	32

3.3.4. Exatidão.....	33
3.3.5. Precisão	34
3.3.6. Tendência	34
3.3.7. Correção	35
3.3.8. Incerteza padrão.....	35
3.3.9. Repetitividade.....	36
3.3.10 Fontes de erros.....	36
3.3.11. Erros geométricos	37
3.3.12. Gráfico de exatidão e repetitividade	38
3.4. CONCLUSÕES.....	40
CAPÍTULO 4.....	41
<i>RETROFITTING</i> DE UMA MÁQUINA DE TRÊS EIXOS	41
4.1. INTRODUÇÃO	41
4.2. HISTÓRICO E CARACTERÍSTICAS DA MÁQUINA.....	41
4.3. MOTIVAÇÃO PARA O <i>RETROFITTING</i>	45
4.4. REALIZAÇÃO DO <i>RETROFITTING</i>.....	45
4.4.1. Escolha do kit CNC	45
4.4.1.a. Interface BPC-STD	46
4.4.1.b. Driver SMC-U-ADV.....	47
4.4.2. Escolha dos motores	48
4.4.3. Adaptações mecânicas necessárias na máquina	49
4.4.4. Instalação do kit e conexão no computador	51
4.4.4.a. Ligação elétrica dos drivers.....	51
4.4.4.b. ConFiguração de resolução.	52
4.4.4.c. ConFiguração da corrente.....	54
4.4.4.d. Conexão dos drivers na interface E/S	54
4.4.4.e. Conexão no computador.....	57
4.4.5. Escolha de setup do software CNC.....	58
4.5. CONCLUSÕES.....	62
CAPÍTULO 5.....	63
TESTES EXPERIMENTAIS, RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	63
5.1. INTRODUÇÃO	63

5.2. MEDIÇÃO DE POSICIONAMENTO.....	63
5.2.1. Equipamentos e materiais.....	63
5.2.1.a. Laser XL-80.....	65
5.2.1.b. Compensador XC-80 e sensores de temperatura	65
5.2.1.c. Conjunto de espelhos	66
5.2.1.d. Adaptadores para fixação dos espelhos.....	66
5.2.2. Metodologia do teste	67
5.2.3. Teste no eixo X.....	68
5.2.4. Teste no eixo Z	74
5.2.5. Teste no eixo Y	81
5.3. COMPENSAÇÃO DO EIXO Y	87
5.3.1 Equipamentos e materiais.....	87
5.3.2. Metodologia.....	88
5.3.3 Teste de compensação do eixo Y.....	88
5.4 MEDIÇÃO DE ERRO DE ROLAMENTO (ROLL) EM Y.....	95
5.4.1 Equipamentos e materiais.....	95
5.4.1.a. Talyvel 5.....	96
5.4.2. Método de medição de ângulos roll - yry.....	97
5.5 MEDIÇÃO DE TOMBAMENTO (PITCH) EM Y	101
5.5.1 Equipamentos e materiais.....	101
5.5.2. Método de medição de ângulos pitch - yrx	101
5.6 MEDIÇÃO DE RETILINEIDADE (RETITUDE) EM Y	105
5.6.1. Método de cálculo da retilineidade em ytz.....	106
5.7 CONCLUSÕES.....	109
CAPÍTULO VI	110
CONCLUSÃO	110
6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	110
6.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	111
APÊNDICE.....	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 4. 1: Especificações dos motores do eixo vertical e horizontal	48
Tabela 4. 2: Especificações do motor do eixo com guias aerostáticas.	49
Tabela 4. 3: Funções dos pinos da conexão do driver com a interface.....	55
Tabela 5. 1: Valores medidos nas posições do eixo X, em mm. 69	
Tabela 5. 3: Valores de média das posições no eixo X, em mm.	70
Tabela 5. 4: Valores de tendência calculados no eixo X, em mm.	70
Tabela 5. 5: Valores de histerese obtidos no eixo X, em mm.	71
Tabela 5. 6: Valores obtidos de Incerteza Padrão e Repetitividade no eixo X, em mm.	72
Tabela 5. 7: Valores medidos nas posições do eixo Z, em mm.....	76
Tabela 5. 8: Valores de média das posições no eixo Z, em mm.....	77
Tabela 5. 9: Valores de tendência calculados no eixo Z, em mm.	77
Tabela 5. 10: Valores de histerese obtidos no eixo Z, em mm.....	77
Tabela 5. 11: Valores obtidos de Incerteza Padrão e Repetitividade no eixo Z, em mm.	78
Tabela 5. 12: Valores medidos nas posições do eixo Y, em mm.	83
Tabela 5. 13: Valores de média das posições no eixo Y, em mm.	83
Tabela 5. 14: Valores de tendência calculados no eixo Y, em mm.	83
Tabela 5. 15: Valores de histerese obtidos no eixo Y, em mm.	84
Tabela 5. 16: Valores obtidos de Incerteza Padrão e Repetitividade no eixo Y, em mm.	85
Tabela 5. 17: Valores médios de posições medidas no eixo Y, em mm.....	88
Tabela 5. 18: Valores de correção calculados para o eixo Y, em mm.....	89
Tabela 5. 19: Valores compensados de posicionamento no eixo Y, em mm.....	89
Tabela 5. 20: Valores medidos nas posições do eixo Y após a compensação, em mm... ..	89
Tabela 5. 21: Valores de média das posições no eixo Y após a compensação, em mm.	90
Tabela 5. 22: Valores de tendência calculados no eixo Y após a compensação, em mm.	90
Tabela 5. 23: Valores de histerese obtidos no eixo Y após a compensação, em mm.....	90
Tabela 5. 24: Valores obtidos de Incerteza Padrão e Repetitividade no eixo Y após a compensação, em mm.	91
Tabela 5. 25: Ângulos de rolamento medidos.	98
Tabela 5. 26: Valores de Incerteza Padrão e Repetitividade para os ângulos de rolamento.....	99
Tabela 5. 27: Valores medidos de ângulos pitch.	102
Tabela 5. 28: Valores de Incerteza Padrão e Repetitividade para os ângulos pitch.	103
Tabela 5. 29: Valores calculados de retitude.....	106
Tabela 5. 30: Valores de Incerteza Padrão e Repetitividade para a retilineidade.	107

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1: Esquema básico do controle numérico.	21
Figura 2. 2: Funcionamento da UCM.	22
Figura 2. 3: Layout de UCM livre utilizando arduino.	26
Figura 2. 4: Controlador SINUMERIK 840Di.	27
Figura 3. 1: Componentes dos erros paramétricos, para o deslocamento na direção do eixo x.	38
Figura 3. 2: Gráfico de exatidão e repetitividade unidirecional.	39
Figura 3. 3: Gráfico de exatidão e repetitividade bidirecional.	39
Figura 4. 1: Esquema inicial da máquina com apenas 1 eixo.	41
Figura 4. 2: Eixo original da máquina.	42
Figura 4. 3: Eixo vertical projetado por Nóbrega (2011).	42
Figura 4. 4: Vistas frontal (a) e lateral (superior) do eixo de guia aerostáticas.	43
Figura 4. 5: Eixo de guia aerostáticas.	44
Figura 4. 6: Máquina antes do <i>retrofitting</i>	44
Figura 4. 7: Esquema lógico da interface.	46
Figura 4. 8: Foto da interface BPC-STD.	47
Figura 4. 9: Driver SMC-U-ADV.	48
Figura 4.10: Modificações realizadas para acoplamento do motor no eixo horizontal.	49
Figura 4.11: Modificações realizadas para acoplamento do motor no eixo vertical.	50
Figura 4. 12: Modificações realizadas no eixo com guia aerostáticas.	50
Figura 4. 13: Esquema de ligação elétrica dos drivers.	51
Figura 4. 14: Localização dos bornes de alimentação dos drivers.	52
Figura 4. 15: Local de ligação do motor no driver.	52
Figura 4. 16: Localização dos jumpers em desenho (a) e foto (b).	53
Figura 4. 17: ConFigurações de passo (a) e demonstração da ligação do jumper (b). ...	53
Figura 4. 18: ConFigurações de corrente de alimentação do motor.	54
Figura 4. 19: Localização dos pinos para conexão do cabo (a) e descrição dos pinos (b).	54
Figura 4. 20: Conexões da interface BPC-STD.	55
Figura 4. 21: Descrição dos pinos da conexão DB-25 (a) e direção dos dados em relação ao computador (b).	56
Figura 4. 22: Ligação de motores com drivers e interface.	57
Figura 4. 23: ConFiguração da porta paralela na BIOS.	58
Figura 4. 24: Tela inicial do software MACH3.	59
Figura 4. 25: Seleção para conFiguração das portas e pinos.	59
Figura 4. 26: ConFiguração das portas e pinos.	60
Figura 4. 27: Seleção para conFiguração dos motores.	60
Figura 4. 28: Tela de conFiguração dos eixos e motores.	61
Figura 5. 1: Princípio de funcionamento da interferometria a laser.	64
Figura 5. 2: Sistema de medição a laser XL-80.	64
Figura 5. 3: Foto do Laser XL-80 do Laboratório de Engenharia de Precisão.	65

Figura 5. 4: Compensador XC-80 e sensores de temperatura..	66
Figura 5. 5: Foto do conjunto de espelhos e acopladores.	66
Figura 5. 6: Foto dos adaptadores para fixação dos espelhos.	67
Figura 5. 7: Esquema de funcionamento da medição de posicionamento.	67
Figura 5. 8: Localização do eixo X.	68
Figura 5. 9: Esquema de montagem do laser no eixo X.	68
Figura 5. 10: Espelhos montados no eixo X.	69
Figura 5. 11: Gráfico de Tendência Média por Posição no eixo X.	71
Figura 5. 12: Gráfico de tendências e repetitividade bidirecional no eixo X.	72
Figura 5. 13: Gráfico de tendências e repetitividade unidirecional na Ida do eixo X. ...	73
Figura 5. 14: Gráfico de tendências e repetitividade unidirecional no Retorno do eixo X.	73
Figura 5. 15: Localização do eixo Z.	75
Figura 5. 16: Esquema de montagem do laser no eixo Z.	75
Figura 5. 17: Espelhos montados no eixo Z.	76
Figura 5. 18: Gráfico de Tendência Média por Posição no eixo Z.	78
Figura 5. 19: Gráfico de tendências e repetitividade unidirecional na Ida do eixo Z.	79
Figura 5. 20: Gráfico de tendências e repetitividade unidirecional no Retorno do eixo Z.	79
Figura 5. 21: Gráfico de tendências e repetitividade bidirecional no eixo Z.	80
Figura 5. 22: Localização do eixo Y.	81
Figura 5. 23: Esquema de montagem do laser no eixo Y.	82
Figura 5. 24: Espelhos montados no eixo Y.	82
Figura 5. 25: Gráfico de Tendência Média por Posição no eixo Y.	84
Figura 5. 26: Gráfico de tendências e repetitividade bidirecional do eixo Y.	86
Figura 5. 27: Gráfico de tendências e repetitividade unidirecional na Ida do eixo Y. ...	86
Figura 5. 28: Gráfico de tendências e repetitividade unidirecional no Retorno do eixo Y.	85
Figura 5. 29: Gráfico de Tendência Média por Posição no eixo Y após a compensação.	91
Figura 5. 30: Gráfico de tendências e repetitividade unidirecional na Ida do eixo Y após a compensação.	92
Figura 5. 31: Gráfico de tendências e repetitividade unidirecional no Retorno do eixo Y após a compensação.	92
Figura 5. 32: Gráfico de tendências e repetitividade bidirecional no eixo Y após a compensação.	93
Figura 5. 33: Gráfico comparativos entres os testes de posicionamento.	94
Figura 5. 34: Gráfico comparativo do eixo Y antes e depois da compensação.	95
Figura 5. 35: Esquema de funcionamento do nível eletrônico.	96
Figura 5. 36: Conjunto do nível Talyvel 5.	96
Figura 5. 37: Montagem do nível para medição dos ângulos roll.	98
Figura 5. 38: Gráfico de desvios angulares yry.	99
Figura 5. 39: Gráfico de repetitividade para os ângulos de rolamento.	100

Figura 5. 40: Montagem do nível na máquina para medição de erros angulares de tombamento.	102
Figura 5. 41: Gráfico de desvios angulares y_{rx}	103
Figura 5. 42: Gráfico de Repetitividade para os ângulos de tombamento.	104
Figura 5. 43: Esquema da variação de retitude.....	105
Figura 5. 44: Gráfico de retilineidade y_{tz}	107
Figura 5. 45: Gráfico de repetitividade para retilineidade.	108

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

BIOS	<i>Basic Input/Output System</i>
CNC	Comando Numérico Computadorizado
E/S	<i>Entrada/Saída</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LEP	Laboratório de Engenharia de Precisão
MIT	Massachusetts Institute of Technology
MMC	Máquina de Medição por Coordenada
NC	<i>Numerical Control</i>
RAM	<i>Random access memory</i>
ROM	<i>Read only memory</i>
PC	<i>Personal Computer</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
UCM	Unidade de Controle de Máquina
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
A	<i>Amperes</i>
Arcsec	<i>arco de segundos</i>
mbar	<i>milibar</i>
$\bar{x}_i$	Média de erro/tendência para alguma posição i
Re_i	Valor de repetitividade em alguma posição i
Re	repetitividade
t	coeficiente t de Student
Td	tendência
$\bar{I}$	média de um número finito de indicações
VVC	valor verdadeiro convencional do mensurando
C	correção
u	incerteza padrão obtida a partir da amostra
I_i	i-ésima indicação
n	número de medições repetitivas efetuadas
v	número de graus de liberdade da incerteza padrão

xpx	erro de posicionamento linear, eixo x;
xy	desvio de retilidade no eixo y, para movimento no eixo x;
xtz	desvio de retilidade no eixo z, para movimento no eixo x;
xrx	rotação em torno do eixo x, rolamento, para movimento no eixo x;
xry	rotação em torno do eixo y, tombamento, para movimento no eixo x;
xrz	rotação em torno do eixo z, guinamento, para movimento no eixo x;
xwy	desvio de perpendicularidade entre os eixos x e y;
xwz	desvio de perpendicularidade entre os eixos x e z;
ywz	desvio de perpendicularidade entre os eixos y e z;
$P_n \dots P_3, P_2, P_1, P_0$	Posições P_n a P_0
$C_0, C_1, C_2, C_3 \dots C_n$	Correções C_0 , a C_n
mm	Milímetros
μm	Micrometros
m	Metros

CAPÍTULO I

APRESENTAÇÃO

1.1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento do Comando Numérico deve muito a força aérea dos Estados Unidos e às primeiras indústrias aeroespaciais. O primeiro trabalho na área é atribuído a John Parsons e seu sócio Frank Stulen durante os anos de 1940. Seus conceitos iniciais utilizavam dados de posicionamento coordenado, contido em cartões perfurados para definir e usar contornos da superfície de aerofólios. O termo Controle Numérico foi adotado em 1951, a partir de um concurso interno entre os pesquisadores do projeto no Massachusetts Institute of Technology (MIT), Estados Unidos. A primeira máquina a entrar em operação, em 1952, tinha um controlador que combinava componentes analógicos e digitais, que consistiam de 292 válvulas eletrônicas e ocupavam um espaço maior que a própria máquina. Apenas na década de 70, a eletrônica e a computação evoluíram o suficiente para permitir usar um computador dedicado como a Unidade de Comando da Máquina (UCM). Essa aplicação veio a se tornar conhecida como Controle Numérico Computadorizado (CNC) (GROOVER, 2010).

Atualmente, vivemos em uma época em que qualquer computador pessoal, ou até mesmo um smartphone, tem capacidade de processamento suficiente para funcionar em Controle Numérico Computadorizado. Além disso, a popularização da internet gerou uma disseminação de projetos em plataforma aberta e colaborativa, vários projetos são disponibilizados gratuitamente para qualquer pessoa utilizar ou contribuir realizando melhorias. Isso possibilitou a criação de vários projetos de Kits para *retrofitting* CNC de baixo custo e abertos. Não é mais necessária a aquisição de Kits para CNC ou máquinas CNC caríssimas de grandes empresas para poder obter uma máquina de comando numérico.

A comunidade acadêmica se beneficia muito nesse cenário atual, pois abre as portas para realização de pesquisas na área de CNC com menos custos, hoje com no máximo R\$ 6 mil consegue-se construir uma máquina CNC de baixo custo com infinitas possibilidades de estudos e pesquisas. Esse é o foco desse trabalho, realizar o *retrofitting* CNC de uma máquina-ferramenta de 3 eixos, de baixo custo, e realizar análises da sua performance.

A tecnologia atual tem se desenvolvido no sentido de miniaturização crescente das máquinas. Um celular hoje tem mais recursos para processamento de dados que um computador

há 8 anos atrás. Assim como na área da informática, a manufatura industrial também foi capaz de reduzir o tamanho, não só de suas máquinas e componentes, mas também do produto final, para adaptar-se a essa nova realidade. De modo a atender as necessidades do mercado que cada vez mais utiliza componentes miniaturizados na composição de seus produtos é que surgiram a micro e a nano manufatura, criando técnicas e processos capazes de fabricar peças e componentes tão pequenos, mas com excelentes propriedades e atendendo as tolerâncias dimensionais requeridas (CAVALCANTI; SOARES, 2013).

Devido a essa necessidade de exatidão e precisão cada vez melhores, são aplicados importantes métodos para identificação de erros em máquinas-ferramenta CNC. A medida que se identificam os erros de uma máquinas-ferramenta, podem-se encontrar formas de correção desses erros, de modo a se obter melhores exatidão e precisão.

Este trabalho tem como objetivo realizar o *retrofitting* de uma máquina de três eixos para o controle numérico computadorizado e, a partir disso, medir o nível de exatidão fornecido pelo equipamento e seus erros sistemáticos e aleatórios. A partir da quantificação dos erros, verifica-se a possibilidade de correção na própria programação da máquina, sem realizar nenhuma modificação estrutural. Essa possibilidade de correção dos erros na programação é importante, pois, a estrutura de uma máquina-ferramenta não consegue uma exatidão melhor do que o equipamento que a construiu, além de ser muito difícil realizar a montagem de um equipamento com o mínimo de erros. A correção por software, permite compensar os erros de confecção e montagem da máquina e conseguir uma exatidão que não seria possível em uma máquina sem comando numérico.

1.2. OBJETIVO GERAL

Realização do *retrofitting* para CNC de uma máquina de três eixos, medição da exatidão de posicionamento do equipamento e compensação dos erros para obtenção de uma maior exatidão.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Apresentar os principais conceitos sobre Comando Numérico e *retrofitting*;
- Realizar um *retrofitting*, de baixo custo, para uma máquina de 3-eixos em CNC;

- Medir os erros de posicionamento para os 3 eixos da máquina após o *retrofitting*;
- Determinar a exatidão de posicionamento para os 3 eixos da máquina;
- Compensar os erros sistemáticos de posicionamento do eixo Y;
- Determinar a nova exatidão após a compensação dos erros no eixo Y;
- Medir os erros angulares de rolamento e tombamento ao longo do eixo Y;
- Determinação de retilidade (retitude) ao longo do eixo Y.

1.4. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho de dissertação está organizado em seis capítulos, sendo que cada um destes apresentam os seguintes conteúdos:

- **Capítulo II:** É feita uma breve introdução sobre alguns conceitos de Comando Numérico (NC), Comando Numérico Computadorizado (CNC) e *Retrofitting* de máquinas-ferramenta.
- **Capítulo III:** É feita uma revisão de literatura sobre medição de performance em máquinas-ferramenta e uma introdução teórica sobre alguns conceitos de metrologia aplicada a máquinas.
- **Capítulo IV:** É descrito todos os procedimentos realizados no *Retrofitting* da máquina de três eixos utilizada nesse trabalho.
- **Capítulo V:** Descrição dos resultados e testes experimentais realizados para medir erros de posicionamento, angulares e histerese dos eixos de movimento da máquina.
- **Capítulo VI:** Apresenta as conclusões deste trabalho de dissertação e algumas propostas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTOS DO COMANDO NUMÉRICO (CN) E COMANDO NUMÉRICO COMPUTADORIZADO (CNC)

2.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, será feita uma breve introdução sobre alguns conceitos de Comando Numérico (NC) e Comando Numérico Computadorizado (CNC) essenciais para o entendimento deste trabalho. Os conceitos retratados neste capítulo foram, em sua maioria, baseados no livro AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL E SISTEMAS DE MANUFATURA (Groover, 2010)

2.2 COMANDO NUMÉRICO (CN)

Comando numérico é uma forma de automação programável no qual as ações mecânicas de uma máquina-ferramenta, ou outro equipamento, são controladas por um programa contendo dados alfanuméricos codificados. Esses dados consistem em instruções necessárias para operação de uma máquina (GROOVER, 2010).

Um sistema de CN consiste de três componentes básicos: um programa de instruções de usinagem, uma unidade de controle de máquina e um equipamento de processamento (GROOVER, 2010).

Nas primeiras máquinas CN o programa era codificado por meio de uma fita perfurada, com uma polegada de largura, usando um formato padrão que poderia ser interpretado pela unidade de controle da máquina. Atualmente o meio mais comum é transferência eletrônica de programas do computador (GROOVER, 2010).

A Unidade de Controle da Máquina (UCM) é responsável pelo armazenamento das instruções do programa e sua execução, convertendo cada comando em ações mecânicas do equipamento de processamento, um comando por vez. A UCM é composta por componentes de comunicação com o equipamento de processamento e elementos de controle e realimentação (feedback) (GROOVER, 2010).

O equipamento de processamento é o componente que executa o trabalho produtivo real, como, por exemplo, a usinagem. No exemplo de uma CN para usinagem, o equipamento de

trabalho consiste da mesa e do eixo, bem como dos motores e controles que os dirigem. Na Figura 2.1 pode ser observado o esquema básico de funcionamento do CN (GROOVER, 2010).

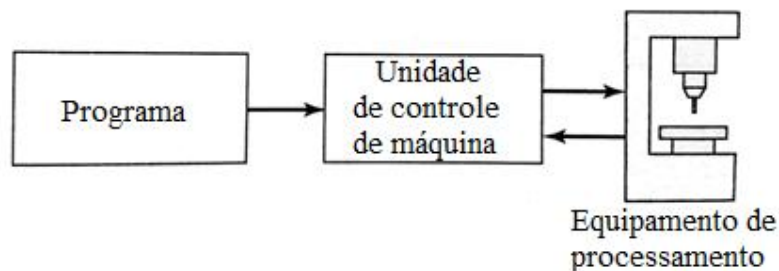


Figura 2. 1: Esquema básico do controle numérico.
Fonte: Groover, 2010.

2.3. COMANDO NÚMÉRICO COMPUTADORIZADO

A diferença do CN para o CNC está na UCM. No CNC a UCM é um microcomputador, e seus periféricos, que armazena as instruções do programa e as executa. O termo Controle Numérico Computadorizado (CNC) é usado para distinguir esse tipo de CN de seus precedentes tecnológicos, que eram inteiramente baseados em eletrônica e componentes discretos. Hoje, praticamente todas as máquinas CN são CNC (GROOVER, 2010).

No CNC a UCM é composta pelos seguintes componentes e subsistemas: unidade central de processamento, memória, interface de E/S, controles para os eixos da máquina-ferramenta e velocidade de rotação do eixo e controles sequenciais para outras funções da máquina-ferramenta. Na Figura 2.2 pode ser observado um esquema desses componentes (GROOVER, 2010).

A unidade central de processamento (CPU) é o cérebro da UCM. Ela gerencia os outros componentes baseados no software contido na memória principal.

A memória do CNC pode ser dividida em duas categorias: memória principal e memória secundária. A memória principal consiste de dispositivos ROM e RAM. O software do sistema operacional e os programas de interface da máquina geralmente são instalados na ROM. Os programas de controle numérico são gravados nos dispositivos de RAM. Os dispositivos de memória secundária de alta capacidade são usados para guardar programas e arquivos de dados maiores, depois transferidos para a memória principal conforme a necessidade. Os discos

rígidos são comuns entre os dispositivos de memória secundária, bem como os dispositivos portáteis (GROOVER, 2010).

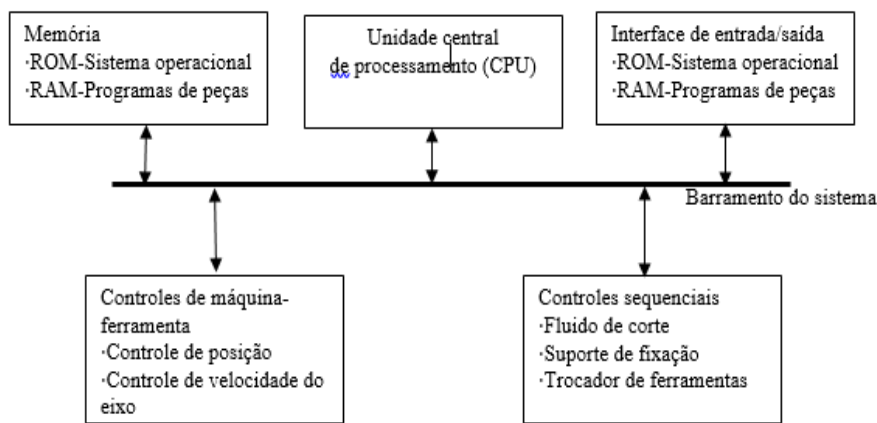


Figura 2. 2: Funcionamento da UCM.
Fonte: Groover, 2010.

A interface de entrada/saída oferece a comunicação entre os vários componentes do sistema CNC, outros sistemas de computador e o operador da máquina. A interface de E/S transmite e recebe dados e sinais dos dispositivos externos. Junto a interface está o painel de controle do operador, que é a interface básica pelo qual o operador da máquina se comunica com o sistema de CNC (GROOVER, 2010).

Os controles para dos eixos das máquina-ferramenta e velocidade do eixo-árvore são componentes de hardware que controlam a posição e a velocidade de cada um dos eixos da máquina bem como a velocidade de rotação do eixo-árvore da máquina-ferramenta. Os sinais de controle gerados pela UCM são convertidos à forma e nível de energia compatíveis com os distintos sistemas de controle de posição usados para movimentar os eixos das máquinas. O sistema de posicionamento pode ser do tipo malha aberta ou fechado. Nesse trabalho foi possível utilizar malha aberta, pois os motores escolhidos foram de passo (GROOVER, 2010).

Os controles sequenciais para outras funções da máquina-ferramenta são utilizados em funções auxiliares da máquina. Essas funções auxiliares são geralmente atuações do tipo liga/desliga, intertravamentos e dados numéricos discretos (GROOVER, 2010).

2.4. COMPUTADORES PESSOAIS E CNC

Os computadores pessoais estão sendo cada vez mais usados na indústria para controle de processos, e o CNC não é exceção. O PC pode ser usado como interface de entrada separada da UCM ou o PC contém a placa de controle de movimento e outros hardwares necessários à operação da máquina-ferramenta. O primeiro caso é muito utilizado na maioria dos kits de baixo custo para *retrofitting* de máquinas ferramentas, onde compra-se o kit CNC com os componentes restantes da UCM, como os controles para os eixos e interface, e se conecta em um PC qualquer. Alguns kits profissionais possuem um PC integrado com a placa de controle, nesses equipamentos pode ser feita toda a programação diretamente na máquina, sem necessidade de conexão com um PC externo (GROOVER, 2010).

2.5. LINGUAGEM NC

A programação atual de máquinas ferramentas é baseada, normalmente, na ISO 6983. Essa norma utiliza códigos de baixo-nível para descrever os movimentos (como G01) e troca (como M5) da ferramenta. A ISO 6983 não suporta geometrias complexas, como interpolação de Spline. Essa norma também não suporta algumas necessidades nas áreas de usinagem a cinco eixos e usinagem a alta velocidade (MAEDER et al, 2002).

A ISO 14649 é uma interface de dados Conforme-Passo para Controle Numérico que objetiva superar os problemas da ISO 6983 e se aproveitar dos avanços na computação e controladores. Essa interface, com modelo de dados orientado a objeto, tem sido desenvolvida em vários projetos de pesquisas recentes, no qual muitas indústrias e universidades têm participado. Uma das características desse padrão é o maior nível de informação. Enquanto na ISO 6983, o programa descreve movimentos e trocas simples de ferramenta (códigos G e M), a interface na ISO 14649 funciona no nível das características da usinagem (como entalhes e perfis), operações (como furação e desbaste) e as sequências de passos de trabalho. Através dessa sequência de operações de usinagem em características, todas as atividades necessárias para produzir uma peça completa da matéria prima podem ser descritas (MAEDER et al, 2002).

Maeder et al (2002) fizeram uma revisão desse novo padrão para máquinas-ferramenta numericamente controladas. No seu trabalho, foram apresentados projetos desenvolvidos nesse novo padrão e seus resultados.

2.6. RETROFITTING DE MÁQUINAS-FERRAMENTA

O termo “*retrofit*” tem o significado de reforma ou melhoria. Na área de máquinas-ferramenta, esse termo é muito utilizado para adaptação de uma máquina convencional para o controle numérico computadorizado ou a adaptação de um controle obsoleto por um mais atual.

De acordo com Groover (2010), a primeira máquina de CN foi desenvolvida por meio do reequipamento (*retrofitting*) de uma fresadora vertical Hydro-Tel da Cincinnati Milling Machine Company (uma fresadora convencional de 24 polegadas por 60 polegadas) que havia sido doada dos equipamentos excedentes da Força Aérea.

Desde a primeira máquina CN até hoje, muitas pesquisas são realizadas sobre *retrofitting* de máquinas ferramentas. Em 1994, Brenes (1994) já pesquisava sobre *retrofit* no Brasil. Brenes (1994) realizou a modernização e análise dinâmica de uma máquina NC. Na sua pesquisa foi modernizada uma fresadora CNC Pratt e Whitney de 3 eixos para um controle mais atual.

A maioria dos projetos de *retrofit* utilizam Kits com interfaces e drivers prontos para adaptação na máquina. Porém o projeto de drivers ou interfaces específicas para as necessidades do equipamento é uma área suscetível a pesquisas. Duan et al (2007) necessitavam realizar um melhoramento em uma Fresa CNC antiga, utilizando os mesmos drivers e motores, mudando apenas o controlador para um software EMC. Para essa tarefa, eles projetaram e confeccionaram uma nova placa de interface com capacidade para conexão no computador e no software. Com isso, transformaram uma máquina CNC antiga, para uma com um controle por software mais atual e de código aberto sem nenhuma modificação estrutural na máquina.

Staroveski et al (2011), adaptou uma furadeira para uma de 3 eixos com um sistema CNC de arquitetura aberta baseada no Linux. Sua máquina foi feita para propósitos educacionais e pesquisa, no projeto de análise do processo de usinagem e algoritmos de controle.

Minhat et al (2014), detalha o *retrofit* de uma fresa convencional para um sistema inteligente digital, com o objetivo de obter dimensões mais exatas.

Parmar et al (2014) propõem que a conversão de grande parte das máquinas fresadoras convencionais para CNC ajudaria a transformação do país em moderno e desenvolvido. No seu trabalho, eles fazem uma revisão sobre a automatização avançada em máquinas de fresamento.

Nesse trabalho poderia ter sido uma abordagem parecida com a de Duan et al (2007), utilizando os mesmos motores, e apenas projetando-se uma nova interface. Porém, como será visto no capítulo 4, foi escolhida a compra de um Kit pronto, pois o foco do trabalho era

observar a possibilidade de realização de um *retrofitting* de forma simples. Fica como sugestão para trabalhos futuros, a possibilidade de criação de uma nova interface específica para a máquina, e se possível, com capacidade de utilização de encoders lineares em malha fechada.

2.7. AVALIAÇÃO DE CUSTOS PARA *RETROFITTING*

A principal vantagem do *retrofitting* de máquinas-ferramenta é a possibilidade de recuperar uma máquina obsoleta e torna-la produtiva novamente. Para realizar esse *retrofitting*, muitos custos devem ser levados em consideração e nem sempre esses custos se justificam em comparação a comprar uma máquina nova.

Vários autores estudaram a viabilidade econômica da realização de *retrofitting* para CNC. Mishira (2011) desenvolveu um modelo de predição de custos para o *Retrofitting*/Recondicionamento/Melhoramento de máquinas CNC usadas em indústrias de manufatura utilizando redes neurais. Concluiu-se que houve um aumento na precisão de predição devido a habilidade da rede neural em capturar relações não lineares.

Gupta et al (2013) fizeram uma análise econômica do *retrofitting* de uma máquina-ferramenta existente. Seus resultados demonstraram que o *retrofitting* é um método de alto custo-benefício para aumento de produtividade, disponibilidade e melhoria do nível de performance de máquinas. Como o *retrofitting* faz um aproveitamento máximo de equipamentos preexistentes, é, portanto, mais econômico que a aquisição de uma nova máquina.

2.8. KITS DE *RETROFITTING*

Como visto no tópico 2.4, existe a possibilidade de utilização de Kits CNC, que correspondem a uma UCM, para conexão na máquina e computador. Atualmente existem centenas de alternativas de kits a venda no mercado, desde mais simples e baratos a mais modernos e profissionais.

Com a popularização da internet e plataformas de arquitetura livre, começaram a se disseminar muitos projetos nessa área que possibilita qualquer pessoa fabricar estes sistemas gratuitamente. Um exemplo de projeto aberto, está no Blog do Professor Marlonnardi (2016). Na Figura 2.3 pode ser observado um esquema de UCM livre utilizando arduíno como controlador. Outras empresas fabricam seus próprios circuitos de baixo custo para utilização. A maioria desses Kits de baixo custo e plataforma livre, costumam usar o PC como interface de entrada separada da UCM, por ser mais econômico se confeccionar uma UCM sem PC.

Outra característica comum nesses Kits de baixo custo é a utilização de motores de passo. Os motores de passo têm a vantagem de poderem ser utilizados em malha aberta, sem necessidade de sensores para medição do posicionamento e realimentação no controle, tornando o circuito mais simples e barato.

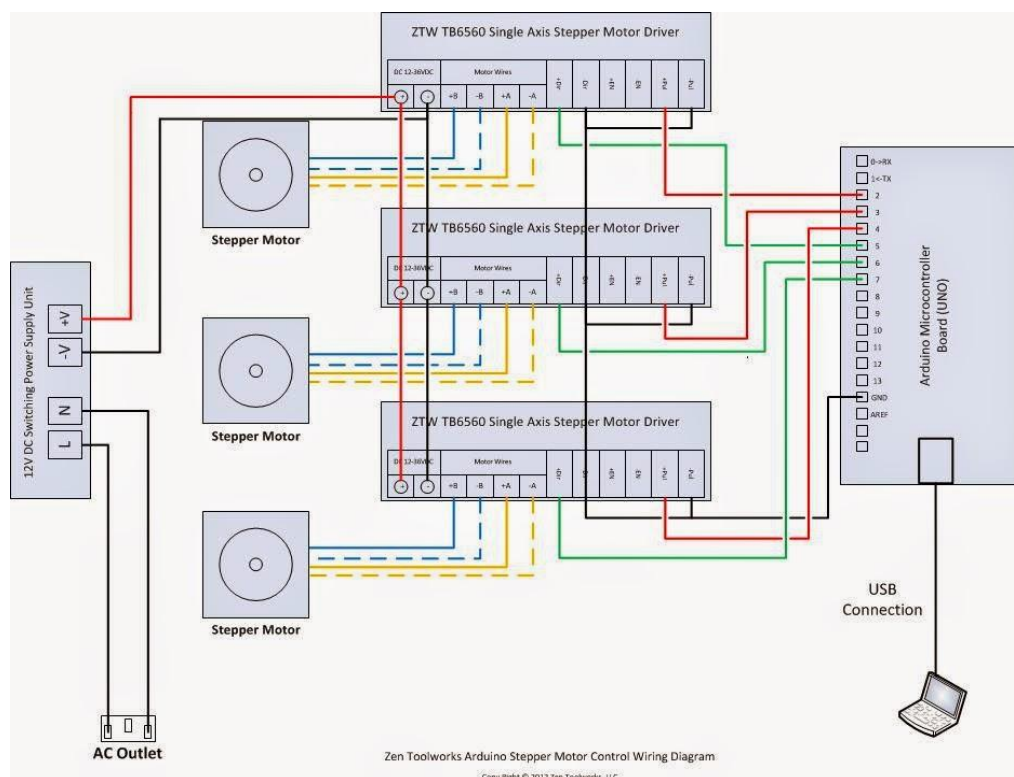


Figura 2. 3: Layout de UCM livre utilizando arduino.

(Em: < <http://professormarlonnardi.blogspot.com.br/p/cnc-caseira.html> >. Acesso em: 10 janeiro 2016.)
 ®Marlonnardi.

As alternativas de Kits profissionais, e mais caros, costumam ter um computador em conjunto com a UCM. Além disso, costumam utilizar servo-motores com sensores de posicionamento e malha fechada. A malha fechada possibilita uma exatidão e precisão melhor, pois o equipamento consegue corrigir alguns erros de posicionamento do sistema no seu funcionamento. Além disso, os servo-motores têm a capacidade de operar em velocidades maiores com torques maiores que os de passo. Essas vantagens justificam um sistema mais complexo e custo mais elevado. Um dos Kits profissionais mais conhecidos são a família de produtos Sinumerik da Siemens.

Na Figura 2.4 pode ser observado um controlador Sinumerik.



Figura 2. 4: Controlador SINUMERIK 840Di. Fonte: (Em:<http://www.industry.usa.siemens.com/drives/us/en/cnc/Pages/cnc-systems.aspx> Acesso em: 10 janeiro 2016.) @Siemens.

2.9. SOFTWARES CNC

O software CNC é a interface responsável por interpretar a programação em código G e realizar todos os cálculos e algoritmos necessários para fornecer o acionamento dos motores, de forma que se realize o movimento desejado. O software, depois da realização dos cálculos, fornece as informações necessárias a UCM de forma que ela forneça os pulsos necessários aos drivers para realização dos movimentos. Existem vários programas que podem ser utilizados para controle CNC. Dentro os mais conhecidos, tem-se: Turbo CNC da DAK Engineering, EMC2 da Linuxcnc e o MACH 3 da Artsoft. O Turbo CNC é pago e utiliza como plataforma operacional o DOS, que é uma interface com baixa popularidade atualmente. O EMC2 é livre, porém só pode ser utilizado na plataforma LINUX. O MACH3 é pago e pode ser utilizado na plataforma Windows.

Como o computador do laboratório era Windows, foi escolhido como software a versão de testes do MACH3 que é gratuita, e apresenta algumas limitações que não afetaram essa pesquisa.

2.10. CONCLUSÕES

Neste capítulo foram descritos conceitos essenciais para conhecimento do que significa Comando Numérico e Comando Numérico Computadorizado. Também foi observado os componentes essenciais de um sistema com Comando Numérico e sua forma de funcionamento. Foi realizada uma breve descrição de *retrofitting*, além de algumas pesquisas que tem sido realizada nesse tema. Foi citado a importância de se avaliar os custos de um *retrofitting* em relação a compra de um novo equipamento, o padrão de programação usado atualmente em CNC e a possível padrão que vai ser utilizado no futuro. Por fim foram descritos os Kits CNCs e softwares disponíveis no mercado atualmente.

CAPÍTULO III

REVISÃO BIBLIOGRAFICA DE TÉCNICAS PARA MEDIÇÃO E ANÁLISE DE ERROS EM MÁQUINAS FERRAMENTAS

3.1. INTRODUÇÃO

Quando se realiza um *retrofitting* em uma máquina-ferramenta, é esperado que o equipamento possua uma boa exatidão e precisão. Deve-se, portanto, realizar medições de performance no equipamento, no intuito de se determinar essas características. Essa medição também possibilita a correção e calibração da máquina-ferramenta, de modo a se atingir as características desejadas.

3.2. REVISÃO DE LITERATURA SOBRE MEDIÇÃO DE PERFORMANCE DE MÁQUINAS

A área de metrologia aplicada em máquinas-ferramenta é fruto de muitos estudos. Com a evolução da tecnologia, e miniaturização das máquinas, é necessária a confecção de componentes cada vez menores. Para isso, as máquinas-ferramenta devem ter cada vez melhores exatidão e precisão, e com isso, os métodos de medição devem ser ainda mais precisos e exatos do que os equipamentos a serem medidos. Portanto, tem-se desenvolvido cada vez mais pesquisas nessa área, de forma que se consiga métodos de medição capazes de levar em conta o maior número possível de fontes de erros que possam afetar a performance de uma máquina.

A medição de erros geométricos de máquinas-ferramenta tem sido alvo de pesquisas constantes, já que esses erros são sistemáticos e passíveis de correção quando identificados.

Um grande desafio nessa área é a medição de erros volumétricos. Os erros volumétricos levam em consideração todos os 21 tipos de erros geométricos. Segundo Longstaff et al (2001), a performance volumétrica está substituindo a exatidão no eixo como medição aceita na performance de posicionamento de máquinas-ferramenta. Longstaff et al (2001) descreveu a implementação de um sistema de compensação volumétrica em um controlador Siemens 840D.

A estrutura desse controlador permitiu a possibilidade de rodar os algoritmos de compensação em um programa compacto DOS em tempo real como parte do ciclo NC.

Khan e Chen (2010) desenvolveram uma metodologia para correção de erros geométricos sistemáticos em máquinas-ferramenta de cinco eixos. Sua metodologia foi capaz de compensar o efeito geral de todos os erros dependentes e independentes de posição que contribuem para a área de trabalho volumétrica. Foi projetado um algoritmo de compensação de erros e uma rotina foi escrita no software Matlab. Seus testes práticos demonstraram uma compensação eficaz e uma melhora significativa na exatidão paramétrica e volumétrica da área de trabalho de máquina-ferramenta de 5 eixos.

Lee et al (2012) analisaram e otimizaram um sistema de medição, constituído de um espelho de referência Tipo-L e 5 sensores capacitivos, para medir erros geométricos de eixos lineares com maior exatidão. As posições do sistema de coordenadas de referência e dos sensores capacitivos foram otimizadas para minimizar a incerteza padrão do componente, o espelho de referência Tipo-L e os sensores capacitivos.

Zhang et al (2013) apresentou uma previsão e compensação analítica dos erros de contorno em uma usinagem de 5-eixos com movimentação da ferramenta em Spline. O método proposto demonstrou, experimentalmente, uma melhora significativa na exatidão no contorno do percurso de ferramenta 5-eixos.

Xiang e Yiang (2014) propuseram um método de medição baseado em duplo Ball Bar para calibração precisa de erros geométricos. Na medição, o Ball Bar funciona como um sensor de deslocamento de alta precisão com um simples grau de liberdade. Baseado nas leituras do Ball Bar, soluções analíticas para 10 erros geométricos, com exceção de dois erros angulares de posição, foram deduzidas. Os resultados confirmaram que o método fornece resultados precisos para erros geométricos em eixos giratórios.

Guo et al (2014), no intuito de solucionar o problema de baixa eficiência na medição de erros volumétricos e prever os erros de máquinas-ferramenta CNC online, propôs um novo método de modelagem de erro volumétrico baseado na tecnologia de fusão de informações, sendo utilizado para predição de erros em uma máquina-ferramenta de cinco-eixos com duas mesas giratórias. Comparando com os métodos de modelagem condicionais, esse método pode ser usado em diferentes tipos de máquinas-ferramenta com diferentes condições operacionais, pela regulação da matriz de peso, a robustez do modelo de fusão é melhorada.

Para fornecer uma especificação de precisão barata para máquinas-ferramenta complexas, tais como máquinas de usinagem de engrenagens, Xu et al (2015) propuseram uma abordagem de projeto de precisão ativa para gerar a especificação da repetitividade de

posicionamento dos eixos NC, para cumprir os requisitos de precisão de trabalho designados, da máquina-ferramenta. A metodologia foi demonstrada e validada através do estudo de caso do projeto de precisão para uma máquina CNC de seis-eixos para fresamento de engrenagem cônica espiral.

Jiang et al (2015) propuseram a medição de todos os erros locais de uma máquina-ferramenta de 5-eixos. Cinco padrões de usinagem foram realizados sucessivamente em uma peça de trabalho cubica. Seu método se baseou na medição dos entalhes usinados na peça de trabalho para os diferentes padrões de usinagem. Esse método se diferencia de outros, pois ao invés de realizar a medição diretamente nos componentes da máquina ferramenta, a medição foi realizada em uma peça usinada na máquina.

Xiang e Altintas (2015) propuseram um método para medir, modelar e compensar ambos os erros geometricamente dependentes e volumetricamente independentes de máquinas ferramentas CNC serial de cinco-eixos. A estratégia de compensação foi demonstrada em uma máquina ferramenta de cinco-eixos controlada por um CNC industrial com uma liberdade limitada, como também por um CNC virtual que permite a incorporação da compensação de todos os 42 erros.

Como visto, a área de medição e compensação de erros em máquinas tem muito potencial de avanço, pois a medida que a tecnologia avança são necessárias máquinas cada vez mais exatas e precisas. Enquanto a tecnologia se desenvolver, a metrologia vai ter novos horizontes de pesquisa.

3.3. CONCEITOS METROLÓGICOS

O conhecimento sobre alguns conceitos e termos de metrologia são essenciais para a análise de performance de máquinas-ferramenta. Neste tópico será feita uma introdução de certos conceitos essenciais para entendimento desse trabalho.

3.3.1. Erro de medição

Segundo o Vocabulário Internacional de Medidas (VIM, 2012) erro de medição é a diferença entre o valor medido de uma grandeza e um valor de referência. O erro está presente toda vez que o comportamento real de um sistema se afasta do ideal. (ALBERTAZZI, 2008)

Nesse trabalho o erro de medição será chamado de erro de posicionamento. O erro de posicionamento será descrito como a diferença entre o valor que o CNC é programado para atingir e o valor real que ele atinge. Para se entender melhor a forma como esse tipo de erro será tratada, imagine a seguinte situação:

É feito um programa em uma máquina CNC com o comando para se mover 10 mm no eixo X. Através de um instrumento de medição com uma maior exatidão, é medido que o CNC se moveu 11 mm. O erro de posicionamento será:

$$\text{erro de posicionamento} = \text{valor ideal} - \text{valor real} \quad (3.1)$$

$$\text{erro de posicionamento} = 11 \text{ mm} - 10 \text{ mm} \quad (3.2)$$

$$\text{erro de posicionamento} = +1 \text{ mm} \quad (3.3)$$

A máquina apresentará nesse movimento um erro de posicionamento igual a + 1 mm. O erro é um conceito idealizado, e os erros não podem ser entendidos exatamente. (GUM, 2003). O erro tem duas componentes: erro aleatório e erro sistemático:

3.3.2. Erro Aleatório

O erro aleatório presumivelmente se origina de variações temporais ou espaciais, estocásticas ou imprevisíveis, de grandezas de influência. Os efeitos de tais variações, daqui para a frente denominados efeitos aleatórios, são a causa de variações em observações repetidas do mensurando. Embora não seja possível compensar o erro aleatório de um resultado de medição, ele pode geralmente ser reduzido aumentando-se o número de observações; (GUM, 2003)

3.3.3. Erro sistemático

O erro sistemático, assim como o erro aleatório, não pode ser eliminado, porém ele também, frequentemente, pode ser reduzido. Se um erro sistemático se origina de um efeito reconhecido de uma grandeza de influência em um resultado de medição, daqui para diante denominado como efeito sistemático, o efeito pode ser quantificado e, se for significativo com relação à exatidão requerida da medição, uma correção ou fator de correção pode ser aplicado

para compensar o efeito. Supõe-se que, após esta correção, a esperança ou valor esperado do erro provocado por um efeito sistemático seja zero. (GUM, 2003)

Para se estimar o erro sistemático de um sistema de medição, devem ser efetuadas medições repetitivas de um mensurando cujo valor verdadeiro é bem conhecido. Quanto maior o número de medições repetitivas, melhor será a estimativa do erro sistemático. Esse erro é calculado por (ALBERTAZZI, 2008):

$$E_s = \bar{I}_\infty - VV \quad (3.4)$$

Sendo:

E_s erro sistemático

$\bar{I}_\infty$ média de um número infinito de indicações

VV valor verdadeiro do mensurando

Como é impossível realizar um número infinito de indicações e determinar o valor verdadeiro de um mensurando, utiliza-se uma estimativa aproximada para o erro sistemático. Essa estimativa é chamada de Tendência (3.3.6).

3.3.4. Exatidão

Exatidão é a capacidade de um sistema funcionar sem erros, tendo sempre um ótimo desempenho. Um sistema que sempre acerta é um sistema com ótima exatidão. A exatidão é uma característica qualitativa que não pode ser associada a um número. (ALBERTAZZI, 2008).

A norma ISO 230-2 (1997) define duas estimativas de exatidão:

Exatidão de posicionamento unidirecional de um eixo: Faixa resultante da combinação dos erros sistemáticos em uma direção e a repetitividade na mesma direção.

$$Exatidão\ Unidirecional = Máx(\bar{x}_i + Re_i) - Min(\bar{x}_i - Re_i) \quad (3.5)$$

Sendo:

$\bar{x}_i$ Média de erro/tendência para alguma posição i

Re_i Valor de repetitividade em alguma posição i

No caso, o maior valor de erro médio mais repetitividade naquela direção é subtraído do menor valor de erro médio menos repetitividade obtido na mesma direção.

Exatidão de posicionamento bidirecional de um eixo: Faixa resultante da combinação dos erros sistemáticos nas duas direções e a repetitividade nas duas direções.

O cálculo é semelhante ao unidirecional, a diferença é que se utiliza o maior valor de erro médio mais repetitividade em qualquer direção subtraído do menor valor de erro médio menos repetitividade em qualquer direção.

3.3.5. Precisão

Precisão significa “pouca dispersão”, isto é, capacidade de obter sempre o mesmo resultado quando repetições são efetuadas. Portanto, dizer que um sistema é preciso não significa dizer que sempre acerta, mas apenas que se comporta sempre da mesma forma nas mesmas condições. A precisão também é um parâmetro apenas qualitativo (ALBERTAZZI, 2008).

3.3.6. Tendência

A Tendência é uma estimativa do erro sistemático. A tendência é uma aproximação do erro sistemático considerando um número finito de indicações medidas e uma estimativa suficiente próxima do valor verdadeiro do mensurando. A Tendência pode ser calculada por (ALBERTAZZI, 2008):

$$Td = \bar{I} - VVC \quad (3.6)$$

Sendo:

Td tendência

$\bar{I}$ média de um número finito de indicações

VVC valor verdadeiro convencional do mensurando

3.3.7. Correção

A Correção é a constante aditiva que, quando somada à indicação, compensa o erro sistemático de um sistema de medição. A Correção pode ser calculada por (ALBERTAZZI, 2008):

$$C = -Td = VVC - \bar{I} \quad (3.7)$$

Sendo:

C correção

3.3.8. Incerteza padrão

A incerteza padrão é uma medida da intensidade da componente aleatória do erro de medição. Corresponde ao desvio-padrão dos erros de medição. Deve ser associado a incerteza padrão o número de graus de liberdade com que foi estimada. O número de graus de liberdade reflete o grau de segurança com que a estimativa do desvio padrão é conhecida. O número de graus de liberdade com que a incerteza padrão é estimada corresponde ao número de medições repetitivas menos um. A incerteza padrão e o número de graus de liberdade podem ser calculados por:

$$u = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})^2}{n-1}} \quad (3.8)$$

$$v = n - 1 \quad (3.9)$$

Sendo:

u incerteza padrão obtida a partir da amostra

I_i i-ésima indicação

$\bar{I}$ média das indicações

n número de medições repetitivas efetuadas

v número de graus de liberdade da estimativa da incerteza padrão

3.3.9. Repetitividade

A repetitividade pode ser definida como sendo a metade do valor da largura da faixa simétrica em torno do zero, dentro da qual, para uma dada probabilidade, o erro aleatório é esperado. É calculada pelo produto da incerteza padrão pelo respectivo coeficiente de t de Student. O coeficiente de t de Student serve para compensar uma incerteza de uma estimativa pobre do desvio-padrão. Esse coeficiente é um número maior que 2 e incorpora uma espécie de “coeficiente de segurança” devidamente calculado. A repetitividade pode ser calculada por:

$$Re = \pm t \cdot u \quad (3. 10)$$

Sendo:

Re repetitividade

t coeficiente t de Student para certa probabilidade e $n - 1$ graus de liberdade.

O coeficiente t de Student pode ser obtido a partir da Tabela A.1 do Apêndice.

3.3.10 Fontes de erros

De acordo com Orrego et al (2000 apud HOCKEN, 1980; BURDEKIN, VOUTSADOPOULOS, 1981; HARVIE, 1986; DI GIACOMO, 1986; DE NIJS et al, 1988; WEEKERS, SCHELLENKENS, 1995; SCHELLENKENS, ROSIELLE, 1998), os erros de uma máquina de medir a três coordenadas são agrupados segundo as suas fontes:

1. Erros em função de imperfeições da geometria da máquina (Erros Geométricos), resultantes da manufatura, da montagem e do desgaste de seus componentes. Introduzem graus de liberdade não desejados, e erros resultantes de forças estáticas, como o próprio peso dos componentes móveis das máquinas, que produzem deformações elásticas;
2. Erros do sistema de medição ou sensor, encarregado de definir os pontos coordenados através do contato com a superfície de uma peça;
3. Erros relacionados aos algoritmos matemáticos, que definem as geometrias substitutas e com sua implementação computacional;

4. Erros relacionados com a estratégia de medição: número de pontos e dispersão destes sobre a superfície da peça;
5. Erros derivados da influência das propriedades da peça a ser medida: principalmente erros de forma, rugosidade e peso;
6. Erros devidos às deformações induzidas na máquina pelas variações e os gradientes de temperatura;
7. Erros dinâmicos devido a vibrações.

3.3.11. Erros geométricos

Os erros geométricos podem ser decorrentes de problemas na estrutura da máquina, deformações elásticas dos componentes durante o movimento, falhas na montagem ou de ajuste, propriedades dos materiais utilizados na fabricação e desgastes pelo uso (ROLIM, 2003).

Em uma máquina com três eixos tem-se, para cada eixo, seis componentes de erros geométricos, também chamados erros paramétricos pois dependem da posição. Em cada eixo, são três componentes de translação, sendo duas de retilineidade nas guias, uma de posicionamento na direção dos movimentos e outras três componentes angulares, com rotações infinitesimais, designadas por rolamento (Roll), tombamento (pitch) e guinamento (yaw). Há também três componentes de erros não-paramétricos, referentes a ortogonalidade entre os eixos da máquina. Assim, para uma movimentação nos três eixos estão presentes 21 componentes de erros geométricos (ROLIM, 2003).

Na Figura 3.1 estão indicadas todas as componentes dos erros paramétricos, para o deslocamento na direção do eixo x, com a respectiva simbologia usual para cada um deles sendo indicado abaixo (ROLIM, 2003):

xpx – erro de posicionamento linear, eixo x;

xty – desvio de retilineidade no eixo y, para movimento no eixo x;

xtz – desvio de retilineidade no eixo z, para movimento no eixo x;

xrx – rotação em torno do eixo x, rolamento, para movimento no eixo x;

xry – rotação em torno do eixo y, tombamento, para movimento no eixo x;

xrz – rotação em torno do eixo z, guinamento, para movimento no eixo x;

xwy – desvio de perpendicularidade entre os eixos x e y;

xwz – desvio de perpendicularidade entre os eixos x e z;

ywz – desvio de perpendicularidade entre os eixos y e z;

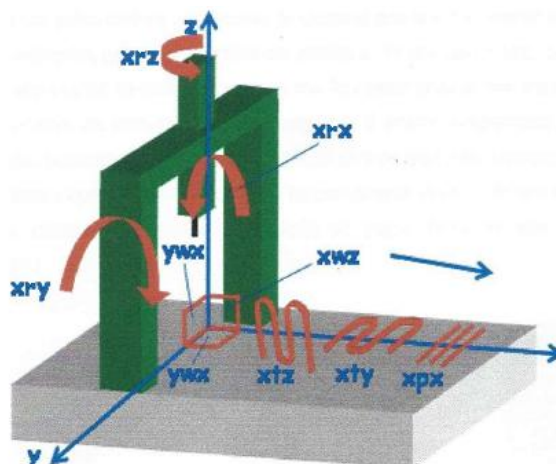


Figura 3. 1: Componentes dos erros paramétricos, para o deslocamento na direção do eixo x.

Fonte: ROLIM, 2003.

3.3.12. Gráfico de exatidão e repetitividade

A norma ISO 230-2 (1997) trata sobre determinação da exatidão e repetitividade de posicionamento em eixos controlados numericamente. Nessa norma, é descrita a criação de um gráfico de exatidão e repetitividade unidirecional e bidirecional.

No gráfico unidirecional, Figura 3.2, são plotadas 3 curvas: uma da média dos erros, uma da média mais os valores de repetitividade e outra da média menos os valores da repetitividade. Nesse gráfico determina-se um valor de exatidão, subtraindo-se o maior valor com o menor valor das curvas de repetitividade. A exatidão está representada no gráfico pela letra A. O gráfico unidirecional tem esse nome, porque só utiliza os valores medidos em um sentido.

No gráfico bidirecional, Figura 3.3, são plotadas as curvas nos dois sentidos, totalizando 7 curvas, 3 para cada sentido e um para média entre os valores dos dois sentidos. Esse gráfico representa o funcionamento do eixo levando em consideração os dois sentidos, e, portanto, o valor da exatidão será calculado levando em conta o maior e menor valor das curvas de repetitividade entre os dois sentidos. A letra A representa o valor da exatidão no gráfico.

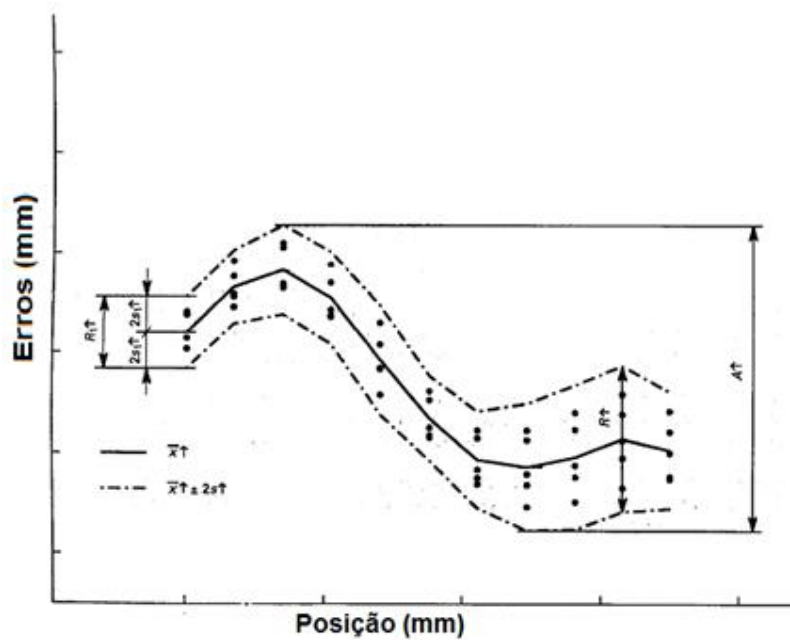


Figura 3. 2: Gráfico de exatidão e repetitividade unidirecional.

Adaptado: ISO 230-2, 1997.

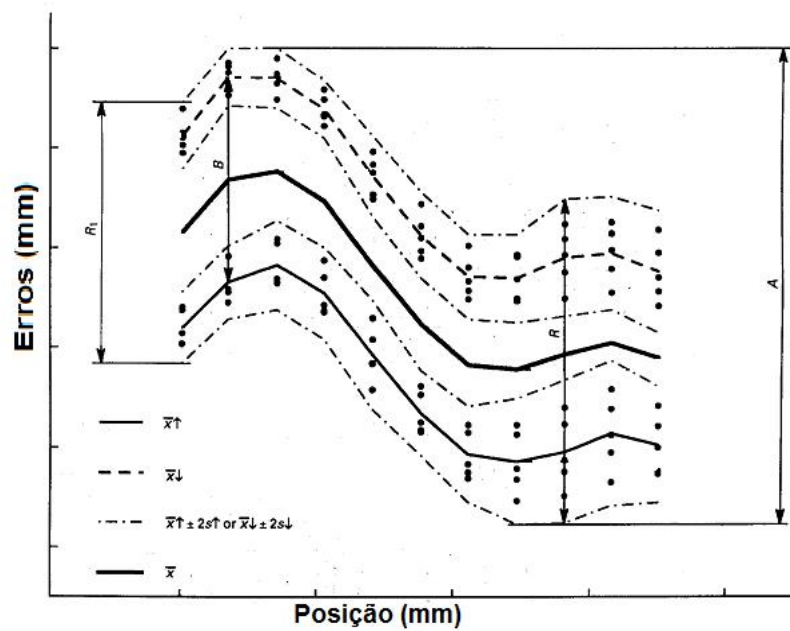


Figura 3. 3: Gráfico de exatidão e repetitividade bidirecional.

Adaptado: ISO 230-2, 1997.

3.4. CONCLUSÕES

Neste capítulo foi realizada uma revisão sobre pesquisas na área de compensação e medição de performance de máquinas-ferramenta. Em seguida foram apresentados alguns conceitos metrológicos importantes que serão usados ao longo deste trabalho. Os conceitos de tipos de erros, precisão, exatidão, incerteza padrão e repetitividade serão usados com frequência neste trabalho. Por fim foi retratado o modelo de gráfico de exatidão e repetitividade descrito na norma ISO 230-2. Essa norma é utilizada em grande parte dos trabalhos para medição de performance de máquinas-ferramenta.

CAPÍTULO 4

RETROFITTING DE UMA MÁQUINA DE TRÊS EIXOS

4.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo será realizado uma descrição da máquina de três eixos na qual foi implementado o *retrofitting*. Em seguida será feita uma descrição dos materiais e procedimentos utilizados para o referido *retrofitting*.

4.2. HISTÓRICO E CARACTERÍSTICAS DA MÁQUINA

O objeto desse estudo é uma máquina desenvolvida no Laboratório de Engenharia de Precisão da Universidade Federal da Paraíba. Inicialmente, a máquina consistia em uma mesa de medição por coordenadas já existente no laboratório, na qual era composta por uma base de 100 mm² que se movimenta por meio de um fuso trapezoidal com passo de 3 mm, guiada em dois eixos em alumínio e com deslocamento máximo de 350 mm. O acionamento do fuso era realizado por meio de um motor de corrente contínua de tensão nominal 12 V. A Figura 4.1 apresenta o esquema inicial da máquina com apenas um eixo. Já na Figura 4.2 tem-se o sistema desenvolvido por Nóbrega (2011).

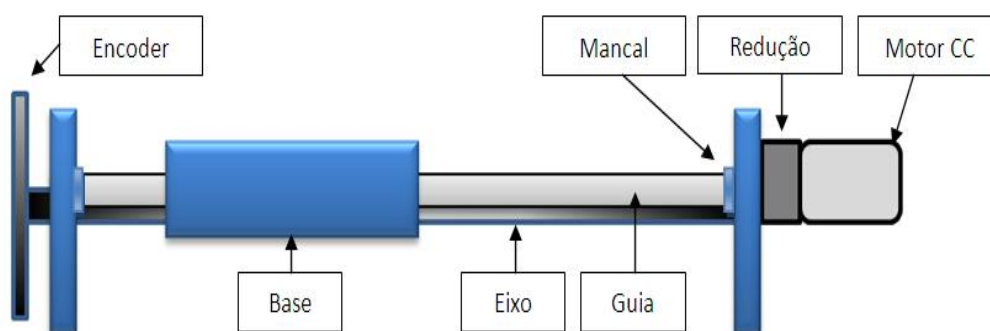


Figura 4. 1: Esquema inicial da máquina com apenas 1 eixo.

Fonte: NÓBREGA, 2011.

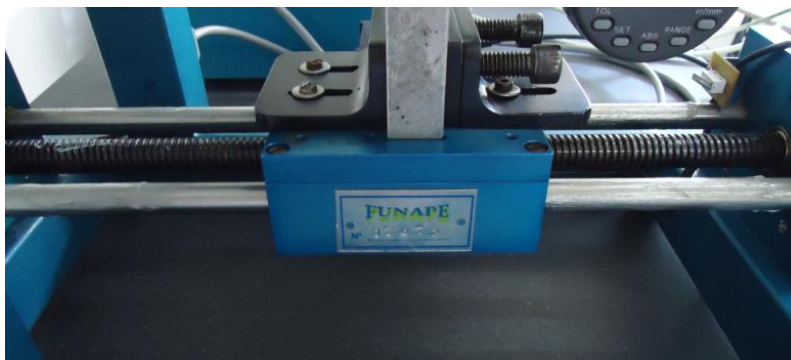


Figura 4.2:Eixo original da máquina.

Fonte: NÓBREGA, 2011.

Nóbrega (2011), projetou uma estrutura vertical, Figura 4.3, com o intuito de promover um segundo eixo da máquina, ou seja, uma estrutura na direção perpendicular ao eixo já existente para fixação e movimentação de um probe. O objetivo do trabalho de Nóbrega (2011), foi desenvolver um sistema de medição por coordenadas utilizando um apalpador touch trigger. A estrutura vertical foi desenvolvida conservando as mesmas características construtivas da mesa de coordenada do eixo horizontal. Foi utilizada uma chapa de aço como base, e um fuso de rosca triangular métrica com passo de 2,5 mm, guiado em dois eixos em alumínio para movimentação. Esse eixo é acionado por um motor de passo com tensão nominal de 8 V.



Figura 4. 3: Eixo vertical projetado por Nóbrega (2011).

Além de Nóbrega (2011), Silva (2011) também desenvolveu mais um eixo para ser acoplado na máquina. Silva (2011) projetou um eixo horizontal com Guias Aerostáticas para ser acoplado na base do eixo horizontal já existente. Com os eixos projetados por Nóbrega (2011) e Silva (2011) a máquina passou a ter 3 eixos de coordenadas. O eixo projetado por Silva (2011), consiste de uma base de 60 mm por 60 mm, essa base fica acoplada a um fuso de 135 mm de comprimento e passo de 0,8 mm. Essa base é alimentada com ar comprimido, e possui canais internos que direcionam esse ar comprimido para a superfície guia, onde a base é apoiada. O fluxo do ar comprimido consegue suspender a base da superfície, reduzindo o atrito da base com o guia. A Figura 4.4 apresenta o desenho do sistema com as guias Aerostáticas. Na Figura 4.5 tem-se o sistema desenvolvido por Silva (2011).

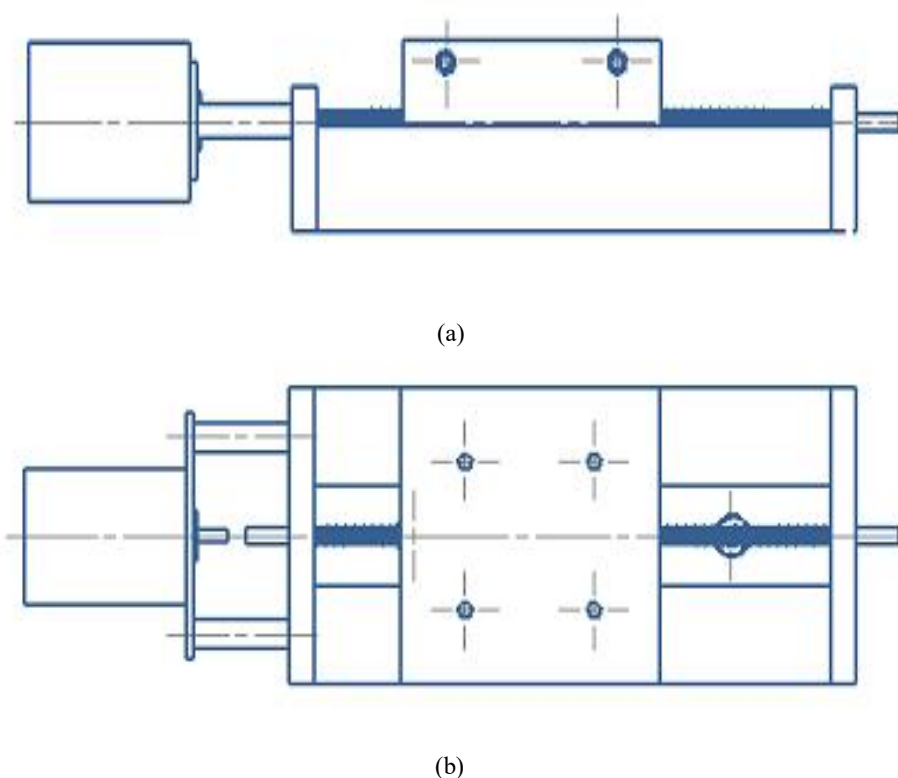


Figura 4.4: Vistas frontal (a) e lateral (superior) do eixo de guia aerostáticas.

Fonte: SILVA, 2011.

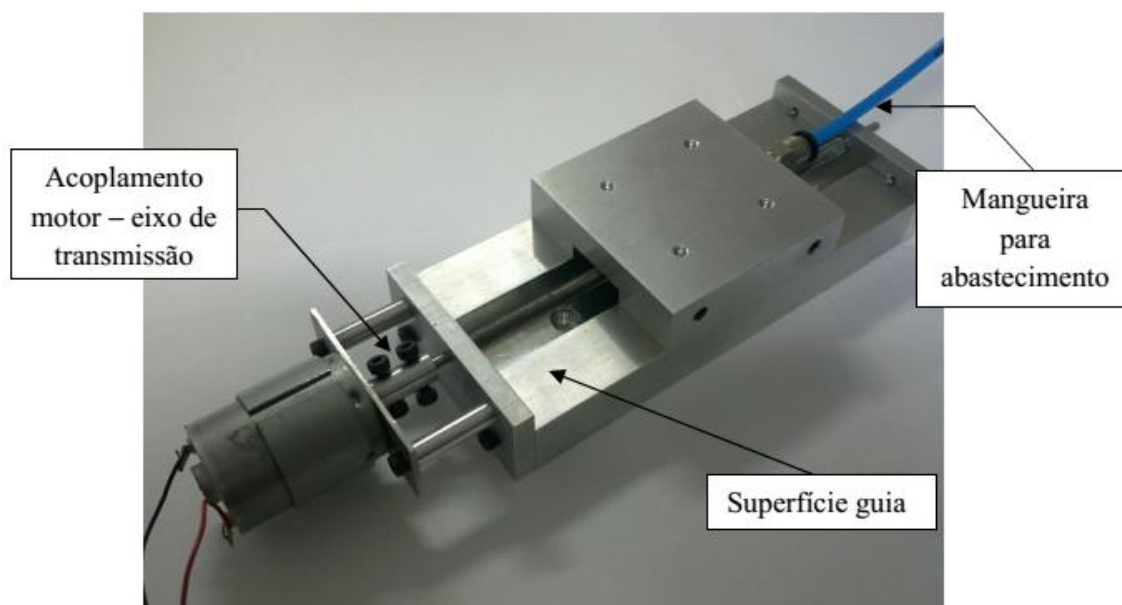


Figura 4.5: Eixo de guia aerostáticas.

Fonte: SILVA, 2011.

Na Figura 4.6 tem-se uma foto da máquina completa após as modificações realizadas por Nóbrega (2011) e Silva (2011). A máquina estava na situação mostrada na Figura 4.6 no momento que se decidiu realizar o *retrofitting*.

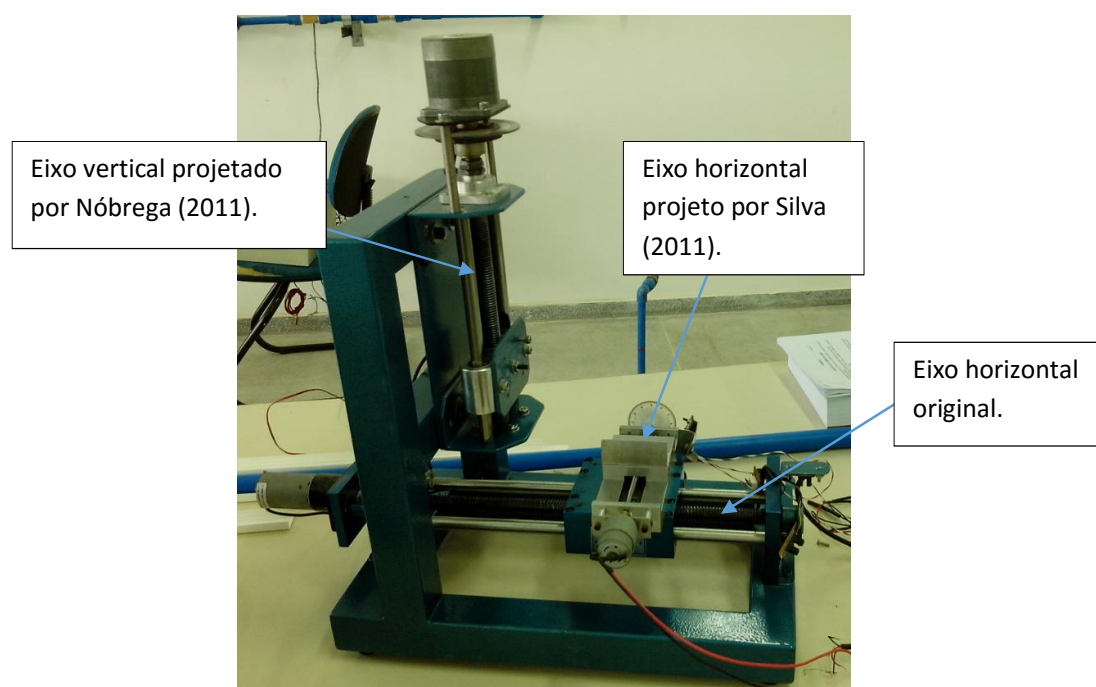


Figura 4.6: Máquina antes do *retrofitting*.

4.3. MOTIVAÇÃO PARA O *RETROFITTING*

A máquina estava apresentando certas dificuldades para realização de movimentos complexos. Era necessário criar um algoritmo para realização de cada movimento, e no caso de movimentos circulares, que depende de variações de velocidades em relação a dois motores era muito difícil a execução. No controle CNC, a programação é simples, onde basta colocar o comando para movimento circular com as coordenadas do ponto final e centro da circunferência, o programa realiza todos os cálculos e controle para realização do movimento. A principal motivação para realização desse *retrofitting* foi facilitar o controle da máquina em estudo, além de abrir o leque para movimentos e rotinas mais elaboradas.

4.4. REALIZAÇÃO DO *RETROFITTING*

O *retrofitting* da máquina seguiu as seguintes etapas:

1. Escolha do kit CNC;
2. Escolha dos motores;
3. Adaptações mecânicas necessárias na máquina;
4. Instalação do kit e conexão no computador;
5. Escolha e setup do software de controle CNC.

4.4.1. Escolha do kit CNC

Para escolha do kit CNC, foram levadas em consideração 3 pontos:

1. Baixo Custo;
2. Facilidade de instalação;
3. Facilidade de aquisição.

Os melhores Kits CNC do mercado são de grandes empresas como a SIEMENS, porém necessitam serem importados e, além disso, apresentam uma instalação complexa. Decidiu-se escolher um kit que fosse de baixo custo, considerando que a máquina foi projetada para fornecer alta exatidão. Assim sendo o nível de exatidão que um kit de baixo custo consegue atingir atende as exigências da máquina. O interesse em escolher um kit de fácil instalação é

verificar se uma pessoa sem conhecimentos avançados na área, conseguiria realizar um *retrofitting* em um equipamento e ainda assim obter um bom grau de exatidão, com um baixo custo. Sobre a facilidade de aquisição, existem muitos kits de baixo custo no exterior, porém esse fator fica comprometido devido à alta taxa tributária para importação e o tempo de espera relativamente longo para obtenção de um kit desses, por isso decidiu-se nesse ponto fazer a aquisição de um kit nacional.

Com esses pontos considerados, decidiu-se pela aquisição de um Kit CNC da HOBBYCNC BRASIL (<http://www.hobbycnc.com.br>). Esses Kits são comercializados e fabricados no Brasil, apresentam baixíssimo custo e são de fácil instalação. O Kit adquirido é composto por uma placa de interface E/S BPC-STD e três drivers SMC-U-ADV para motores de passo.

4.4.1.a. Interface BPC-STD

A interface BPC-STD tem 10 entradas digitais opto-isoladas, sendo 9 (nove) entradas para controle de três drivers de motores de passo com os sinais STEP/DIR/ENAS, uma saída para controle de relé e uma entrada para parada de emergência. A alimentação da interface é independente dos drivers o que junto aos componentes de isolamento óptico garante um total isolamento dos drivers e do PC. Além disto, a interface tem um buffer de corrente na entrada paralela que reduz a carga na saída paralela do PC. (HOBBY CNC)

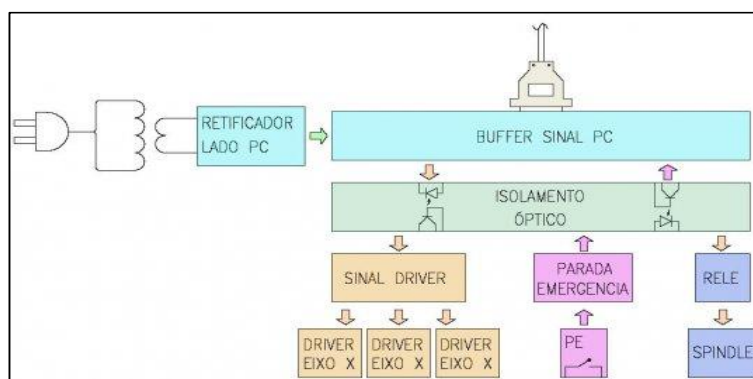


Figura 4.7: Esquema lógico da interface.
Fonte: Manual BPC-STD.

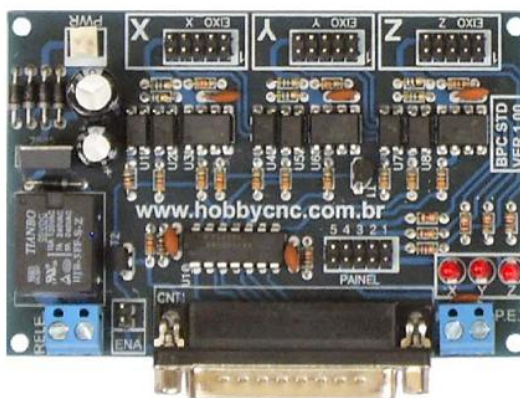


Figura 4.8: Foto da interface BPC-STD.
Fonte: Manual BPC-STD.

Essa interface foi escolhida devido a necessidade de se movimentar 3 motores, e apresentou um baixíssimo custo, em torno de R\$ 150,00. Nas Figuras 4.7 e 4.8 apresentam-se o esquema lógico da interface e da interface BPC-STD, respectivamente.

4.4.1.b. Driver SMC-U-ADV

A interface SMC-U-ADV é um driver microcontrolado para 1 motor de passo unipolar, podendo trabalhar com correntes de até 4 A por fase, o gerenciamento de corrente via PWM (CHOPPER) permite alimentação do motor com tensões maiores, o que permite alto desempenho com frequências até 90Khz modo livre (1/40 PASSO) e frequências superiores a 40Khz com carga no motor proporcionando velocidades acima de 3.000 rpm. Um recurso muito importante é o sistema automático de detecção de inatividade, quando o motor fica parado por um período de aproximadamente 3 a 4 segundos a controladora reduz a corrente que está fluindo para o motor, assim reduz o aquecimento do motor e da etapa de potência do motor sem nenhum comprometimento do desempenho do sistema. Esta controladora trabalha em modo CNC que é aplicado em máquinas CNC, tem entrada de controle padrão STEP/DIR/ENA, a configuração de corrente e resolução de passos é via jumpers. Outra característica importante é o circuito retificador da alimentação que simplifica e reduz o custo final, pois para alimentar a controladora e os motores é necessário somente um transformador de 45 vac / 4 A. Compatível com grande quantidade de programas disponíveis na internet tais como TurboCNC, Kcam, Mach2, Mach3, EMC. (HOBBY CNC).

Esse driver é usado apenas para motores de passo unipolares e apresentam uma resolução considerável de 1/60 passo a um custo de R\$ 250,00. A Figura 4.9 mostra a placa Driver SMC-U-ADV.

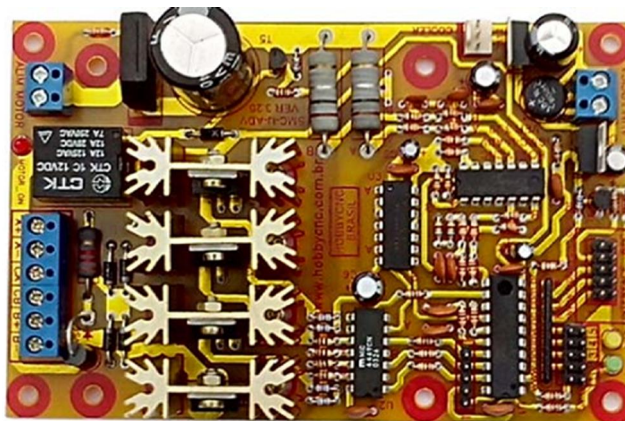


Figura 4.9: Driver SMC-U-ADV.
Fonte: Manual driver SMC-U-ADV.

4.4.2. Escolha dos motores

O kit CNC escolhido necessita de motores de passo unipolares para seu funcionamento. Foi necessária a aquisição de três novos motores para utilização na máquina. Para o eixo vertical e horizontal foram utilizados motores de passo com as especificações mostradas na Tabela 4.1.

Tabela 4. 1: Especificações dos motores do eixo vertical e horizontal

Ângulo do passo	1.8°
N° de passos	200
Topologia	UNIPOLAR
Resistência de isolamento	100 Ohm/DC500V
Tensão nominal	3 VDC
Corrente por fase	2,4 A
Resistência por fase	1,2 OHMs
Indutância	2,4 MH
Potencia por fase	7,2 WATTS
Holding Torque	7,5 Kgf/cm
Peso	600 gramas

Para o eixo com guias aerostáticas, foi necessário utilizar um motor menor devido à estrutura mais frágil. Foi selecionado um motor de passo com as especificações mostradas na Tabela 4.2.

Tabela 4. 2: Especificações do motor do eixo com guias aerostáticas.

Ângulo do passo	1.8°
N° de passos	200
Topologia	UNIPOLAR
Resistência de isolamento	100 Ohm/DC500V
Corrente por fase	0,1 A
Resistência por fase	70 OHMS
Indutância por fase	37 mH
Potencia por fase	7,2 WATTS
Holding Torque	0,77 Kgf.cm
Peso	220 gramas

4.4.3. Adaptações mecânicas necessárias na máquina

Devido às dimensões diferentes dos novos motores, em relação aos antigos, a máquina necessitou de novos acoplamentos para fixação dos motores.

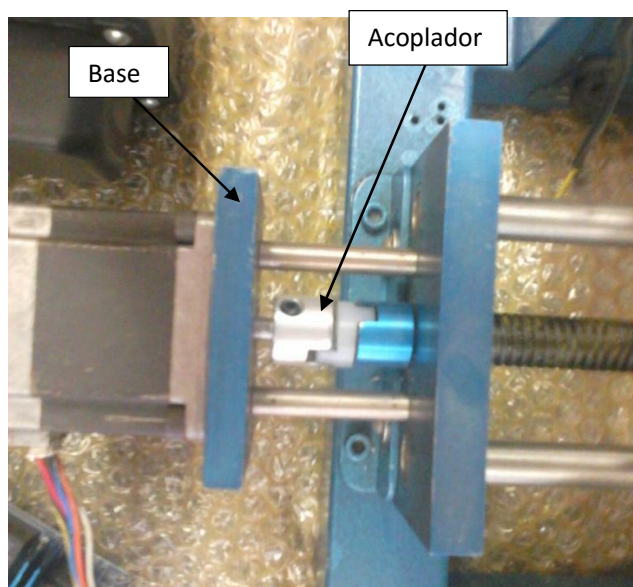


Figura 4.10: Modificações realizadas para acoplamento do motor no eixo horizontal.

Para acoplamento do motor no eixo horizontal original, ver Figura 4.10, foram necessárias realizar novas furações na base antiga para parafusar o novo motor, e foi usinado um novo acoplador para a conexão dos eixos.

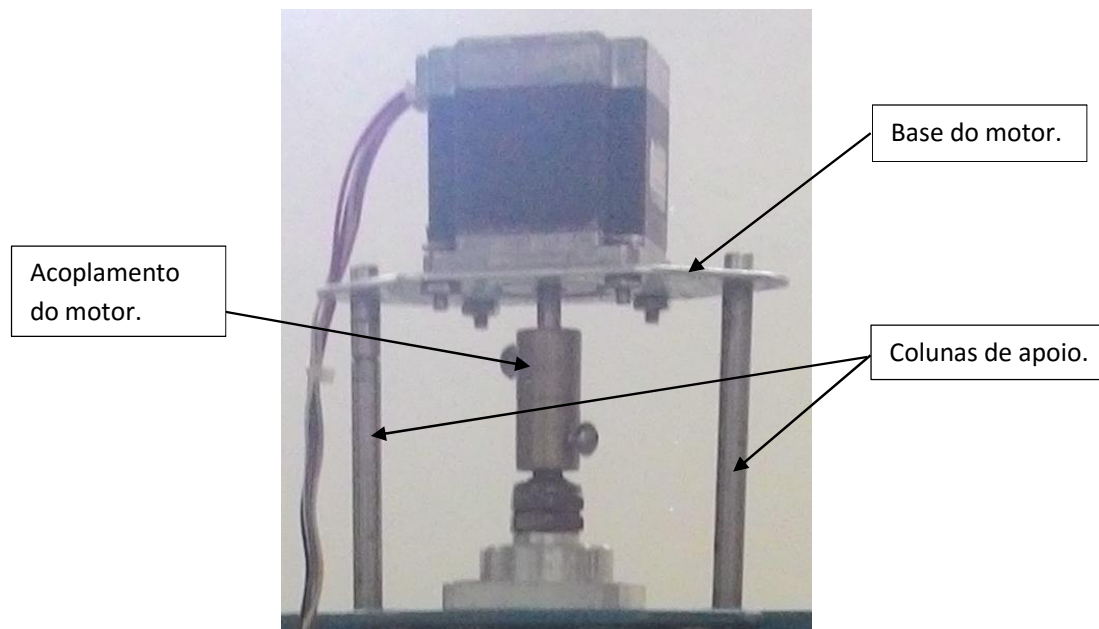


Figura 4.11: Modificações realizadas para acoplamento do motor no eixo vertical.

O motor do eixo vertical apresentava um eixo de comprimento maior que o antigo. Foi necessário aumentar as duas colunas de apoio e realizar furos na base, de forma que pudesse utilizar o mesmo acoplamento, ver Figura 4.11.

Para o motor fixado no eixo de guias aerostáticas, foi necessária a confecção de um novo acoplamento, colunas de apoio e base, ver Figura 4.12.

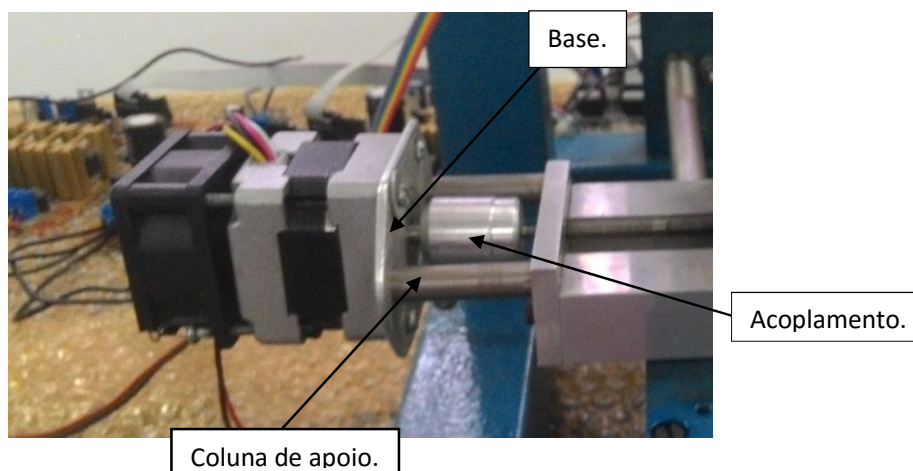


Figura 4.12: Modificações realizadas no eixo com guia aerostáticas.

4.4.4. Instalação do kit e conexão no computador

Neste tópico será retratado como foi feita a instalação e conexão dos circuitos, motores e computador.

4.4.4.a. Ligação elétrica dos drivers

Com os motores acoplados na máquina, foi feita a ligação dos motores com os drivers e a fonte. Os motores são ligados nos drivers de acordo com o esquema mostrado na Figura 4.13.

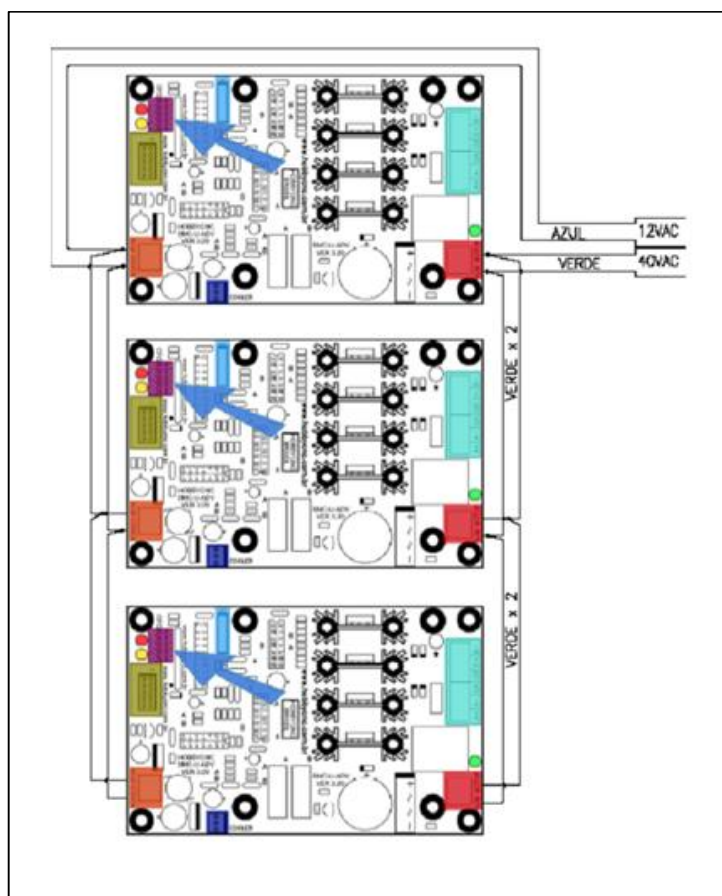


Figura 4.13: Esquema de ligação elétrica dos drivers.

Adaptado: Manual driver SMC-U-ADV

Os motores são alimentados pelos drivers, e os drivers são alimentados em paralelo em uma fonte. O driver apresenta dois Bornes de alimentação, um para os componentes de lógica do circuito e a outra para alimentação do motor. Esses bornes podem ser vistos na Figura 4.14.

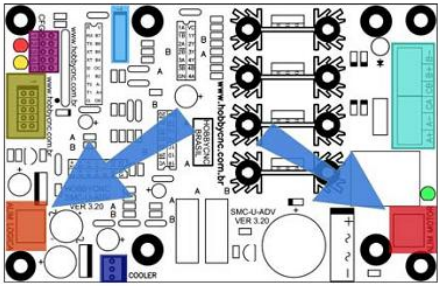
BORNES DE ALIMENTAÇÃO		ESPECIFICAÇÕES			
		MÍNIMO ABSOLUTO	TÍPICO RECOMENDADO	MÁXIMO ABSOLUTO	
	MOTOR	24VCC / 18VAC	55VCC / 35VAC	63VCC / 48VAC	
	LOGICA	9VAC / 12VCC	15VCC / 12 VAC	18VCC / 13VAC	

Figura 4.14: Localização dos bornes de alimentação dos drivers.
Adaptado: Manual driver SMC-U-ADV

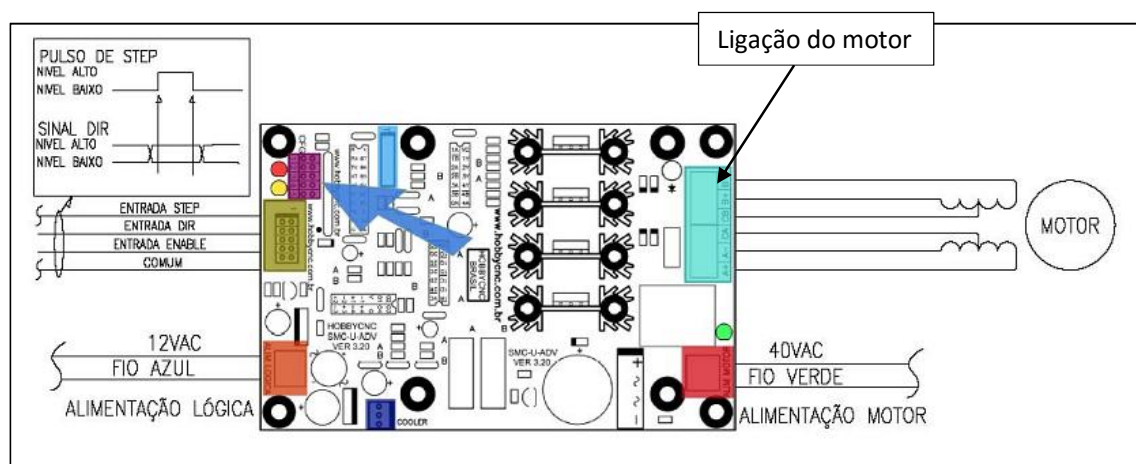
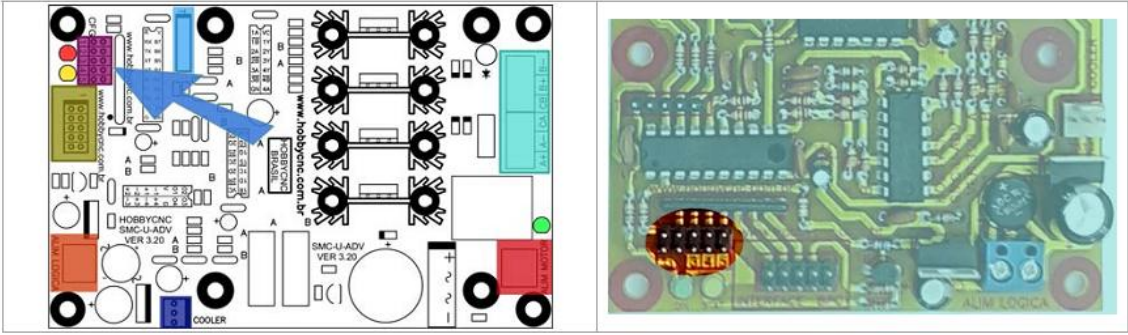


Figura 4.15: Local de ligação do motor no driver.
Fonte: Manual driver SMC-U-ADV

A ligação do motor no driver se dá por uma conexão para 6 fios, de acordo com a Figura 4.15. Além disso o circuito apresenta dois esquemas de ligação, para 220 VAC ou 110 VAC. Foi realizada a montagem para 220 VAC.

4.4.4.b. ConFiguração de resolução.

O circuito tem uma faixa de resolução de 1/2 até 1/60 de passo. Essa resolução é conFigurada via jumpers, como pode ser observado na Figura 4.16. O circuito apresenta um total de 5 jumpers, sendo os 3 primeiros determinam a resolução e os 2 últimos a corrente do motor.



(a) (b)

Figura 4.16: Localização dos jumpers em desenho (a) e foto (b).

Fonte: Manual driver SMC-U-ADV

Esses jumpers apresentam um total de 8 combinações de resolução, na Figura 4.17 tem-se as combinações possíveis:

	1/60 PASSO 12000 PASSOS GIRO		1/10 PASSO 2000 PASSOS GIRO
	1/30 PASSO 6000 PASSOS GIRO		1/5 PASSO 1000 PASSOS GIRO
	1/20 PASSO 4000 PASSOS GIRO		1/4 PASSO 800 PASSOS GIRO
	1/15 PASSO 3000 PASSOS GIRO		1/2 PASSO 400 PASSOS GIRO

(a)



(b)

Figura 4.17: ConFigurações de passo (a) e demonstração da ligação do jumper (b).

Fonte: Manual driver SMC-U-ADV

4.4.4.c. ConFiguração da corrente

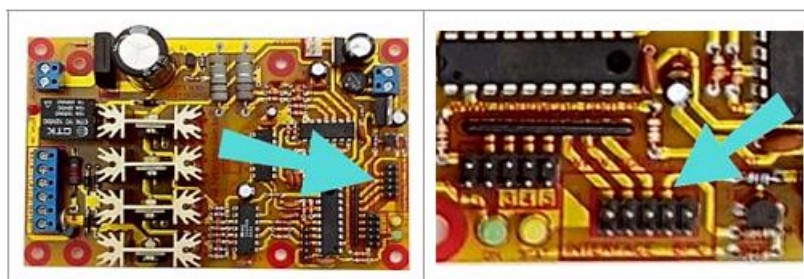
O driver possui compatibilidade com motores de passo unipolares de 6 fios até 4 Ampères. A corrente deve ser conFigurada para alimentação mínima necessária do motor. Essa conFiguração é feita através dos jumpers 4 e 5 da placa, consistindo num total de 4 conFigurações. Na Figura 4.18 pode ser observado um esquema de ligação dos jumpers para conFiguração de corrente.



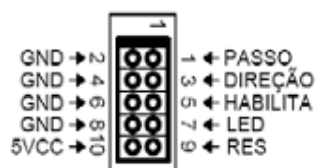
Figura 4. 18: ConFigurações de corrente de alimentação do motor.
Fonte: Manual driver SMC-U-ADV

4.4.4.d. Conexão dos drivers na interface E/S

Os drivers apresentam uma conexão do tipo Cabo Flat de 10 pinos. Na Figura 4.19 pode ser observada a localização dos pinos.



(a)



(b)

Figura 4. 19: Localização dos pinos para conexão do cabo (a) e descrição dos pinos (b).
Fonte: Manual driver SMC-U-ADV

Cada pino apresenta uma função específica para o controle dos drivers, na Tabela 4.3 encontra-se a função de cada pino:

Tabela 4.3: Funções dos pinos da conexão do driver com a interface.

Pinos	Sinal	Descrição
1	Passo	Dispara os procedimentos internos do programa do driver para executar um passo no motor, levando em conta os parâmetros de direção e resolução. Este sinal deverá ser um pulso positivo com uma duração mínima de 5 microssegundos e um intervalo mínimo de 5 microssegundos.
3	Direção	Determina o sentido no qual o motor irá executar o passo, este sinal deve estar estável pelo menos 1 microssegundo antes do pulso de passo ser gerado na entrada de PASSO. Na condição 0 o motor executará o passo em um sentido, na condição 1 o motor executará o passo no sentido inverso.
5	Habilita	Este sinal inibe ou habilita o motor, na condição 1 habilita o motor e na condição 0 inibe o motor.
7	LED	Sinal de saída indicador de status do driver.
9	---	Reservado para futuras expansões
10	5VCC	Saída +5VCC para alimentação de uma carga externa de até 100 miliampêres.
2,4,6,8	GND	Comum, é conectado ao comum do gerador de pulsos.

Fonte: Manual driver SMC-U-ADV

Esses pinos conectam os drivers com a interface através de um cabo FLAT. A interface possui um total de 3 conectores, uma para cada eixo da máquina, como pode ser visto na Figura 4.20.

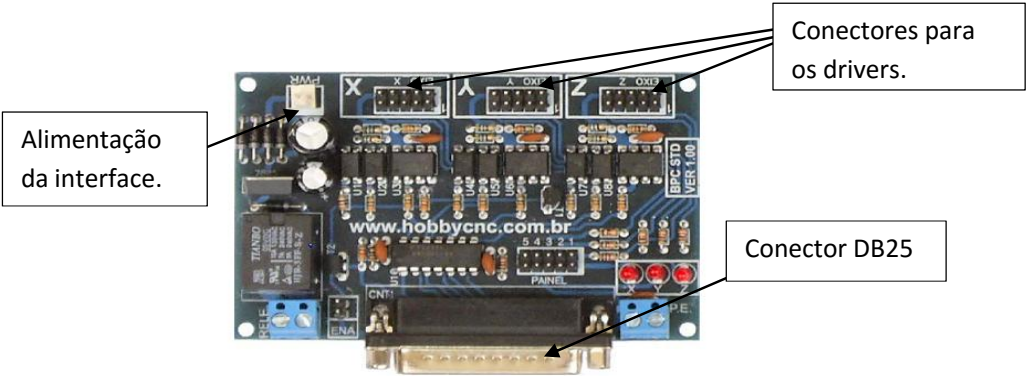
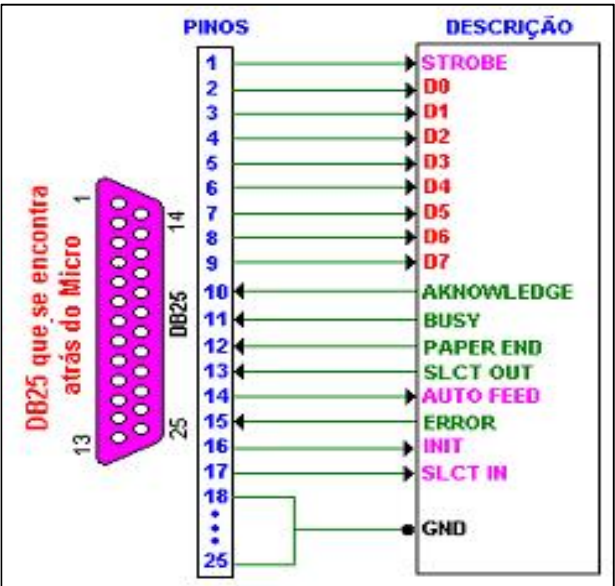


Figura 4. 20: Conexões da interface BPC-STD.
Fonte: Manual BPC-STD.

A interface apresenta um conector macho do tipo paralelo DB25 de 25 pinos. Esse conector é ligado ao computador por meio de um cabo específico. Cada um dos pinos desse

conector apresenta uma função. A alimentação da interface é feita por meio de uma fonte de 220 V, conectada em um conector de 2 pinos PWR. A Figura 4.21 apresenta a descrição dos pinos do conector da interface com o PC.



(a)



(b)

Figura 4. 21: Descrição dos pinos da conexão DB-25 (a) e direção dos dados em relação ao computador (b). Fonte: Manual BPC-STD.

Na Figura 4.22 apresenta a ligação elétrica de todos os circuitos com os respectivos motores.

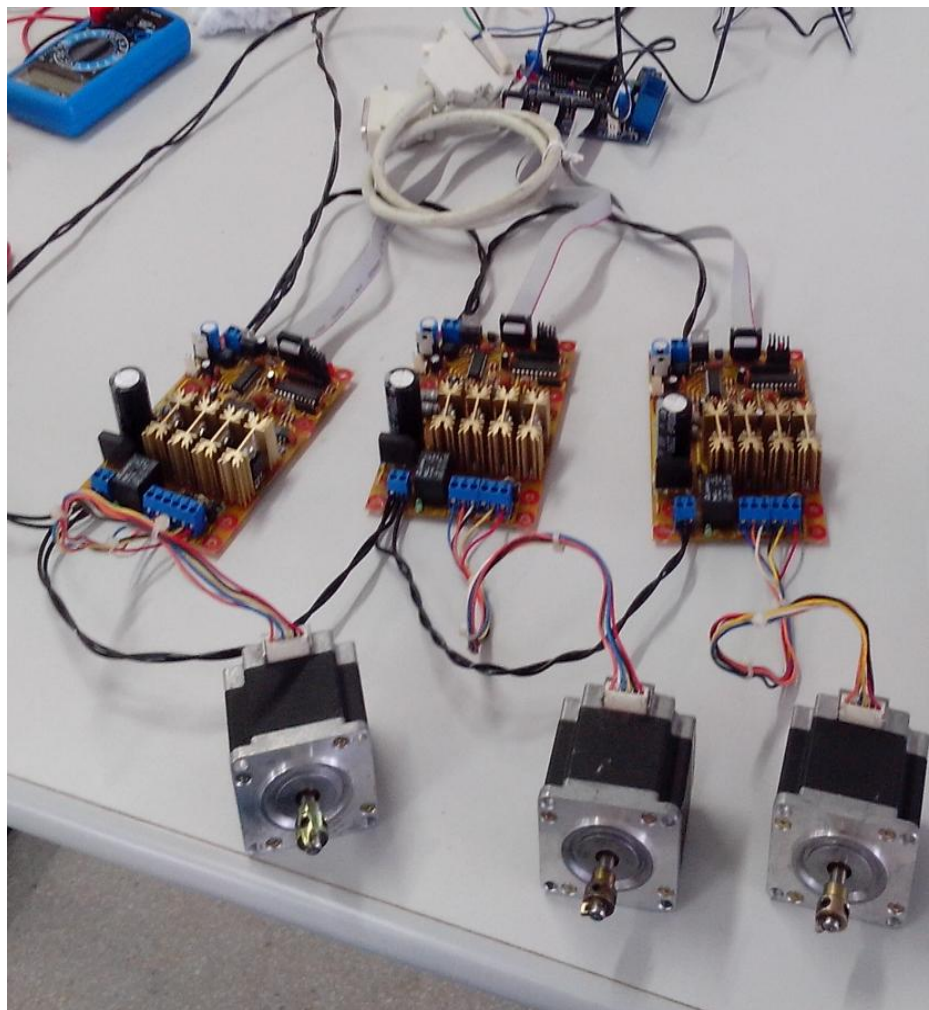


Figura 4. 22: Ligação de motores com drivers e interface.

4.4.4.e. Conexão no computador

Depois do KIT montado e conectado no computador por meio da porta DB25, é necessário realizar uma configuração na BIOS do PC para a comunicação da interface com o PC ficar funcional. Ao acessar a BIOS, a porta paralela deve ser modificada para o modo UNIDIRECIONAL, somente nesta configuração os programas CNC poderão enviar os sinais em tempo real para os drivers dos motores de passo. Nos computadores, o modo UNIDIRECIONAL costuma aparecer como MODE SPP ou MODE NORMAL. Após realizada essa modificação, pode-se realizar o controle via software CNC. Na Figura 4.23 encontra-se a tela de seleção de modo da porta paralela na BIOS.

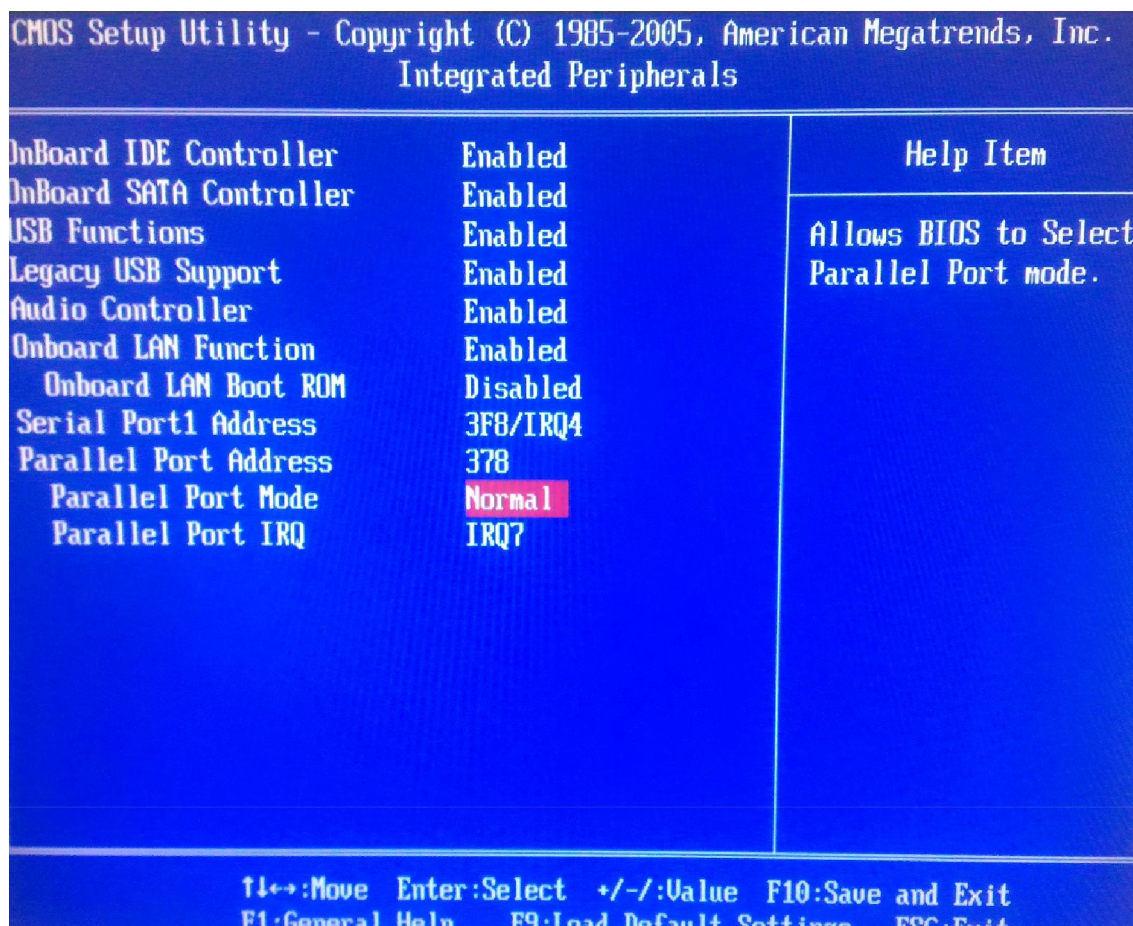


Figura 4. 23. ConFiguração da porta paralela na BIOS.

4.4.5. Escolha de setup do software CNC

O software escolhido para o controle da máquina foi o MACH3. O MACH3 é um software em ambiente Windows de fácil utilização e baixo custo. Uma licença do software custa \$175,00, mas foi utilizada uma versão de demonstração. A versão de demonstração apresenta como única limitação de 150 linhas de código permitido para leitura por programa. Como os testes nunca ultrapassaram esse limite, não houve problemas em utilizar o mesmo.

Na Figura 4.24 está a tela inicial do programa. Ele apresenta um display com as linhas de código na superior esquerda, uma tela para selecionar a movimentação dos eixos no centro e um display gráfico na superior direito demonstrando a movimentação da ferramenta. Na parte superior central pode-se zerar a posição de cada eixo nos botões Zero X, Zero Y, e Zero Z.

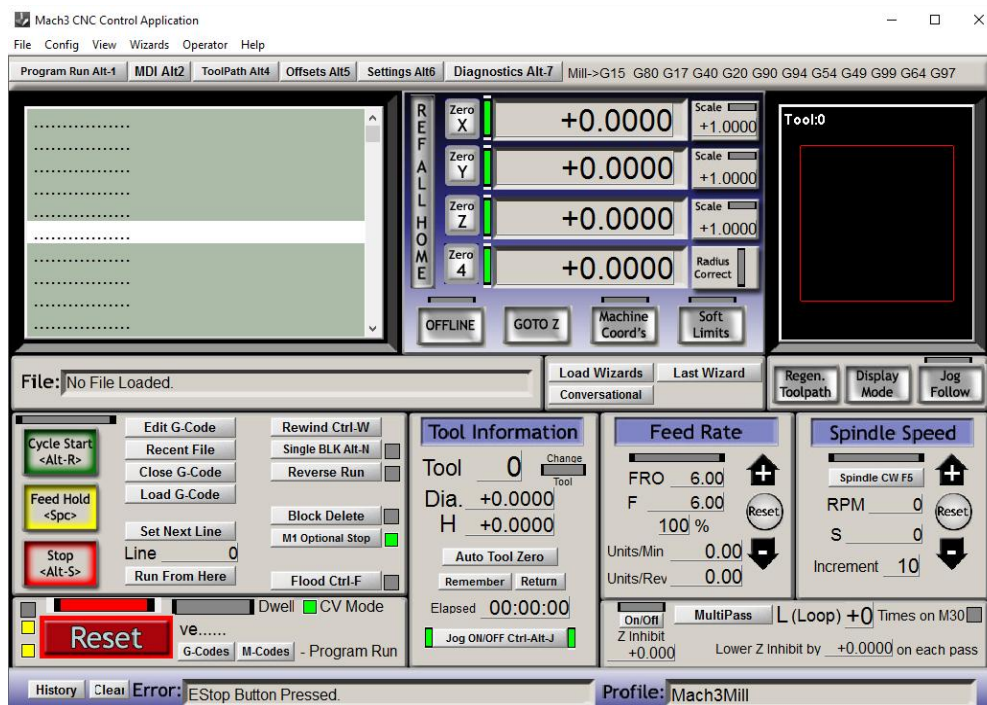


Figura 4. 24: Tela inicial do software MACH3.

Deve ser feito o setup inicial do programa para funcionar em coerência com os pinos do conector DB25. A configuração dos pinos é feita acessando “Config” e “Ports and Pins”, Figura 4.25.

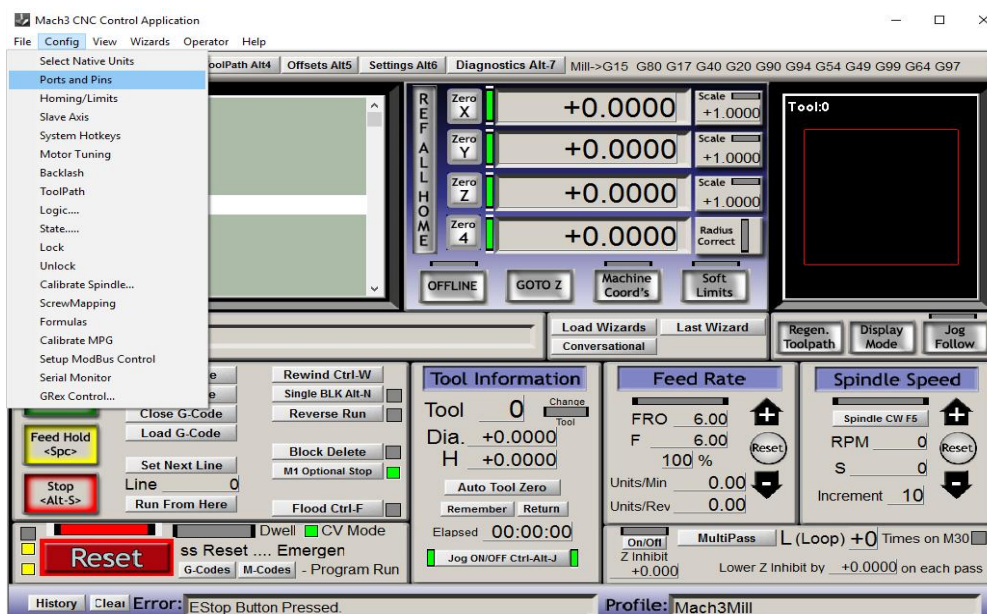


Figura 4. 25: Seleção para configuração das portas e pinos.

Em “Motor Outputs”, modifica-se os valores de “Step Pin#” e “Dir Pin#” dos eixos X, Y e Z, ver Figura 4.26.

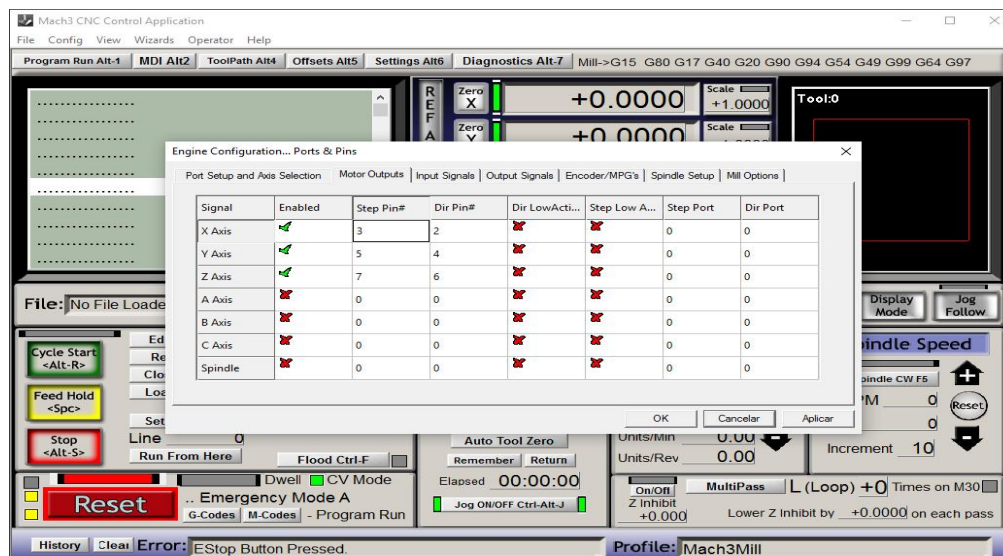


Figura 4. 26: ConFiguração das portas e pinos.

Na aba “Input Signals” podem ser conFigurados outros pinos de entrada, como o fim de curso. Ainda podem ser utilizados outros sinais de saída para outros pinos do DB25 em caso de modificação do circuito. Após a conFiguração dos pinos, deve-se conFigurar o passo dos motores e velocidade. Isso é realizado em “Config” e “Motor Tuning”, Figura 4.27.

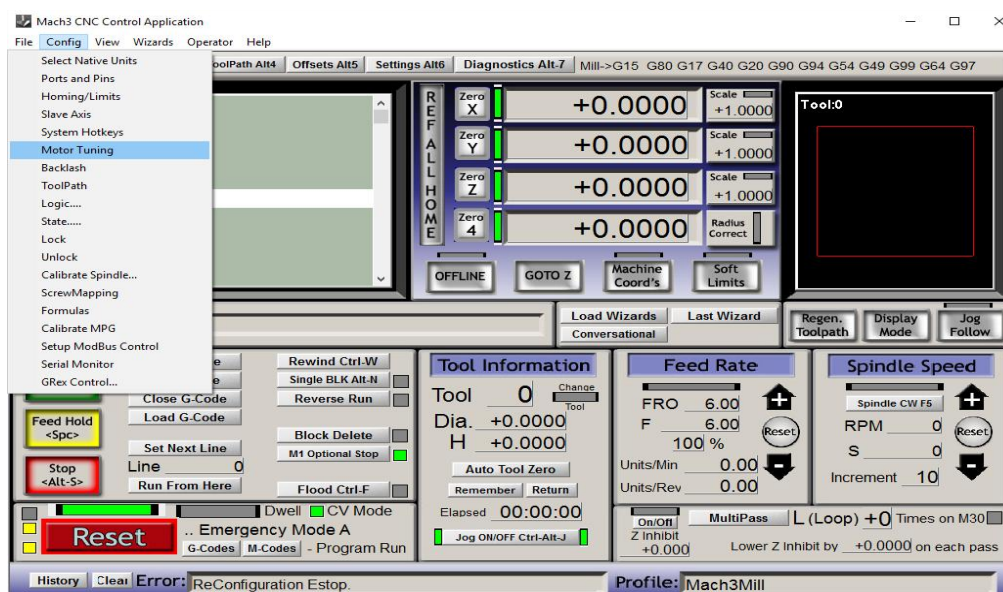


Figura 4. 27: Seleção para conFiguração dos motores.

Na próxima tela é feita as conFigurações para cada eixo, de acordo com a Figura 4.28:

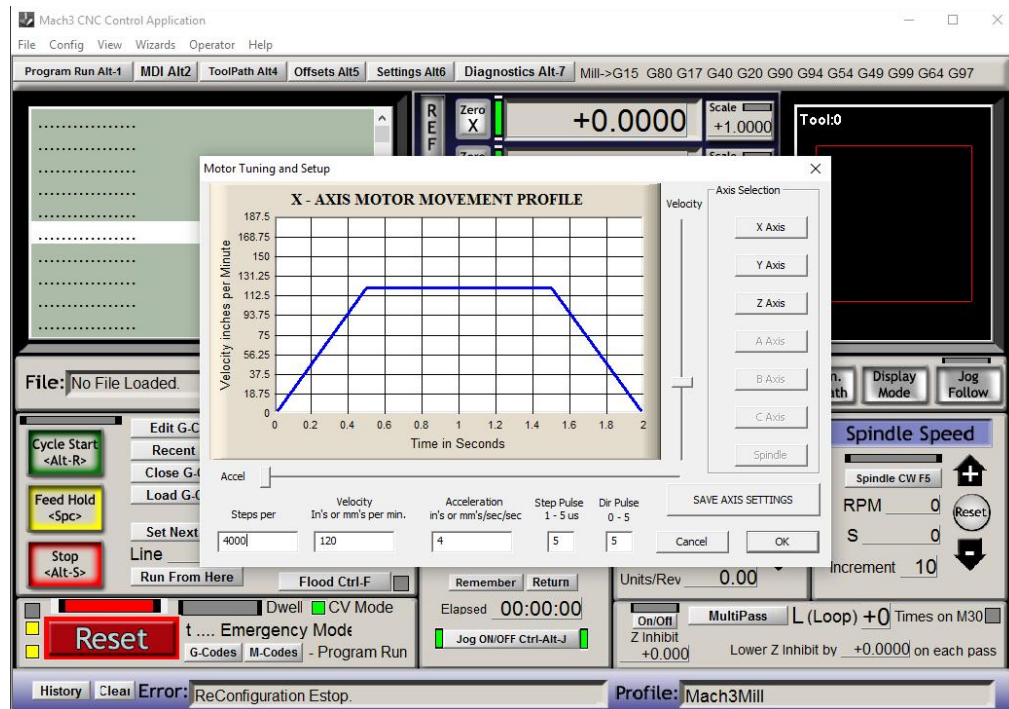


Figura 4. 28: Tela de conFiguração dos eixos e motores.

Em “*Axis Selection*”, é feita a seleção do eixo a ser conFigurado. Em “*Steps per*” deve ser informado o número de passos necessários no motor para se movimentar 1 mm. No caso de um eixo com passo de 3 mm e conFigurado para resolução de 1/60 de passo, com motor de incremento 1,8° serão necessários:

$$\frac{360^\circ}{1,8^\circ} = 200 \text{ passos para 1 volta} \quad (4.1)$$

No caso de uma resolução de 1/60:

$$\frac{200}{1/60} = 12000 \text{ passos para 1 volta} \quad (4.2)$$

Para um fuso de 3 mm:

$$\frac{12000}{3} = 4000 \text{ passos por milimetro} \quad (4.3)$$

Esse cálculo é realizado para todos os eixos. Após a determinação dos passos, pode-se determinar a velocidade, aceleração e duração dos sinais de passo e direção. A duração dos sinais de passo e direção são, respectivamente, 5 μ s e 1 μ s. A velocidade e aceleração podem ser definidos pelo operador, desde que não ultrapassem o limite permitido pelo motor de passo para dado esforço. Para esses motores e drivers o máximo conseguido foi uma velocidade de 240 mm por minuto em vazio, ou 4 mm por segundo. Para uma máquina pequena e com perfil de uso acadêmico não houve problema, porém isso é uma séria desvantagem para utilização em alguma máquina robusta com perfil industrial.

A partir desse momento a máquina se encontra totalmente operacional, bastando carregar um código G via arquivo .txt. Na Tabela A.1, do apêndice., tem-se uma lista dos códigos que o software consegue interpretar.

Com essa adaptação, se tornou muito mais fácil realizar vários tipos de movimentação na máquina, pois só é necessário escrever o movimento no código G. Além disso, as máquinas de medição por coordenadas (MMCs) utilizam essa mesma linguagem em sua programação e a máquina em estudo foi projetada e desenvolvida com esse propósito.

4.5. CONCLUSÕES

Como pode ser observado, o processo de *retrofitting* é parcialmente simples, porém é necessário conhecer as características da máquina a ser aplicado o *retrofitting*. A principal dificuldade encontrada é a aquisição do Kit CNC e adaptação mecânica da máquina. No caso da aquisição do Kit CNC, existem alternativas nacionais que facilitam sua compra, além da possibilidade de importação.

As adaptações mecânicas consistem, em grande parte, na confecção de acoplamentos para novos motores. Caso seja necessária uma exatidão maior, podem ser trocados os fusos e mancais, por alguns com maior exatidão. Outra dificuldade é a velocidade máxima do motor de passo com carga. Nesse trabalho foram utilizados motores de correntes menores que a mínima que o circuito oferece 2,5 A. Um motor de passo de 4 A com certeza suportaria velocidades mais altas, com carga, do que os utilizados.

O *retrofitting* atingiu um dos seus objetivos básicos, de permitir a máquina a realizar movimentos mais complexos com maior facilidade, além de deixar a máquina no padrão de linguagem G utilizado em grande parte das Máquinas de Medições por Coordenadas.

CAPÍTULO 5

TESTES EXPERIMENTAIS, RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1. INTRODUÇÃO

É ideal que uma máquina-ferramenta CNC apresente uma ótima exatidão e precisão, porém, na prática, qualquer máquina está suscetível a erros, sejam eles de causas mecânicas, estruturais, ambientais, eletrônicas dentre outras. Este capítulo tem como objetivo realizar testes experimentais para medir erros de posicionamento, angulares e histerese dos eixos de movimento da máquina, descrita no capítulo 4, na qual foi aplicado o retrofitting.

5.2. MEDIÇÃO DE POSICIONAMENTO

Nesse teste é feita a movimentação dos eixos da máquina para determinados pontos e realizada a medição nesses pontos, de forma a se avaliar, com um equipamento de medição mais preciso e exato, qual a posição verdadeira convencional que o eixo atinge. Inicialmente será apresentado os equipamentos utilizados, para em seguida se abordar a metodologia e resultados para cada eixo.

5.2.1. Equipamentos e materiais

O sistema utilizado para medição do posicionamento foi um laser, baseando-se no princípio da interferometria. O princípio da interferometria funciona dividindo-se uma luz em dois raios de intensidades iguais, dirigindo-se um raio para um espelho de referência e o outro para o objeto a ser medido. Mede-se a diferença ótica de percurso (diferença nas distâncias óticas) entre as duas ondas resultantes de luz refletidas. No sentido de implementar esse método, vários tipos de instrumentos já foram concebidos, aplicando variados mecanismos para dividir a onda de luz e providenciando os percursos óticos apropriados. (Komatsu, 1991)

Na Figura 5.1 pode ser observado uma ilustração do princípio de funcionamento da interferometria a laser.

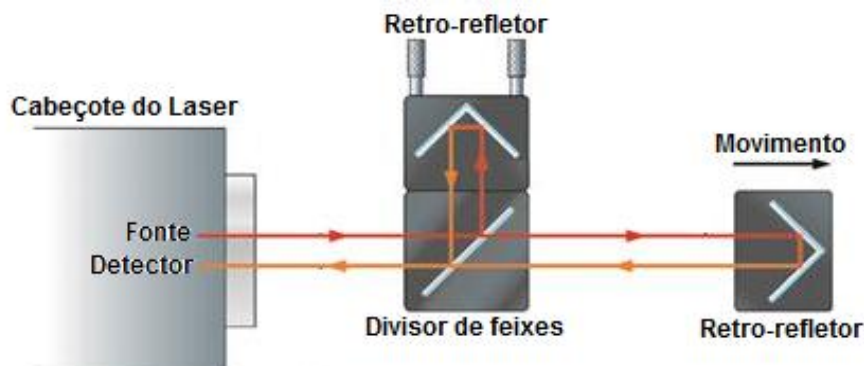


Figura 5. 1: Princípio de funcionamento da interferometria a laser.

Nesse teste foi utilizado um sistema de medição a Laser XL-80 da Renishaw. O sistema de medição laser XL-80 da Renishaw consiste em um conjunto de espelhos de medição, o laser XL-80, um compensador XC-80 e sensores de temperatura. Uma ilustração desse conjunto pode ser vista na Figura 5.2.

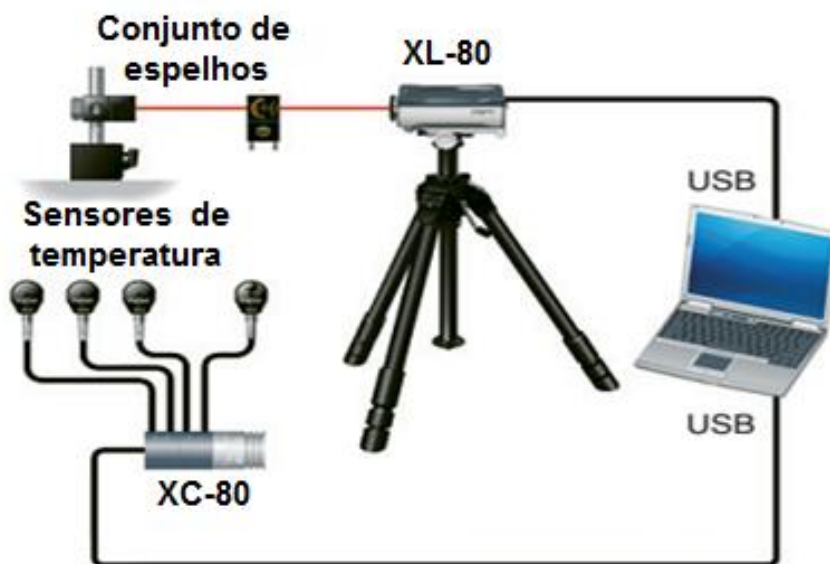


Figura 5. 2: Sistema de medição a laser XL-80.
Fonte: Renishaw, 2007.

5.2.1.a. Laser XL-80

O laser XL-80 (Figura 5.3) produz um raio extremamente estável e é rastreável para padrões nacionais e internacionais. A precisão de medição linear é assegurada em $\pm 0,5$ ppm sobre todo o alcance ambiental, de $0^{\circ}\text{C} - 40^{\circ}\text{C}$ (32°F - 104°F) e 650 mbar – 1150 mbar. As leituras são feitas a 50kHz, com uma velocidade máxima de medição linear de 4 m/s e uma resolução de 1 μm , mesmo na velocidade máxima.



Figura 5. 3: Foto do Laser XL-80 do Laboratório de Engenharia de Precisão.
Fonte: Renishaw, 2007.

5.2.1.b. Compensador XC-80 e sensores de temperatura

O compensador XC-80 (Figura 5.4) é essencial para a exatidão da medição do sistema de laser XL-80. O compensador mede com grande exatidão a temperatura do ar, pressão atmosférica e umidade relativa. Em seguida, modifica o valor nominal do comprimento de onda do laser para dar um valor real, utilizados em cálculos de deslocamento, que praticamente elimina erros de medição resultantes destas variações. Isso pode ser feito automaticamente, cada 7 segundos, conforme indicado pelo LED luzes de status na unidade XC-80.



Figura 5. 4: Compensador XC-80 e sensores de temperatura.
Fonte: Renishaw, 2007.

5.2.1.c. Conjunto de espelhos

Os conjuntos de espelhos são responsáveis pela divisão, reflexão e direcionamento dos feixes de luz. São essenciais para o funcionamento do sistema. O conjunto é formado por 2 espelhos refletores, 1 espelho separador, 2 acoplamentos e 2 eixos de fixação. Na Figura 5.5 podem ser observados os componentes do conjunto de espelhos.

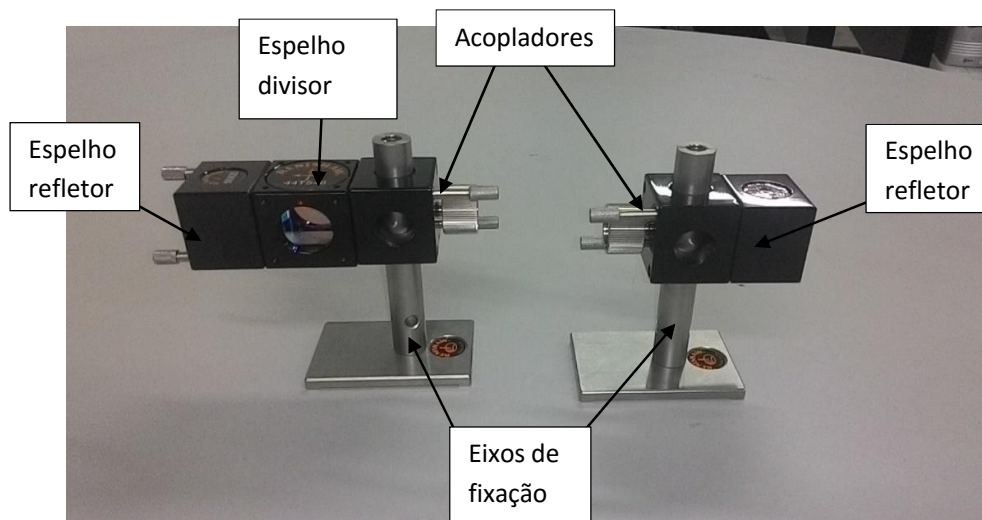


Figura 5. 5: Foto do conjunto de espelhos e acopladores.

5.2.1.d. Adaptadores para fixação dos espelhos

Para realizar os testes, surgiu a necessidade de fixar os eixos dos espelhos nas bases da máquina. Para garantir essa fixação foram usinadas duas chapas de aço com rosca central M8

para fixação dos eixos. Uma vantagem desses adaptadores é a possibilidade de utilização de base magnética, pois as bases da máquina são de alumínio, o que não possibilitava esse uso.



Figura 5. 6: Foto dos adaptadores para fixação dos espelhos.

5.2.2. Metodologia do teste

Esse teste tem como objetivo comandar a máquina a mover o espelho refletor para n posições específicas $P_0, P_1, P_2, P_3 \dots P_n$. Para cada uma dessas posições, é medido, através do sistema Laser XL-80, qual a posição real atingida.

Depois que o espelho refletor se encontra na posição P_n , é realizado o teste no sentido inverso. Comanda-se a máquina a mover o espelho refletor para n posições específicas $P_n \dots P_3, P_2, P_1, P_0$. Para cada uma dessas posições, é medido, através do sistema Laser XL-80, qual a posição real atingida. Esse teste foi realizado 5 vezes nos eixos X, Y e Z da máquina. Na Figura 5.7 pode ser observado um esquema de funcionamento da medição de posicionamento.

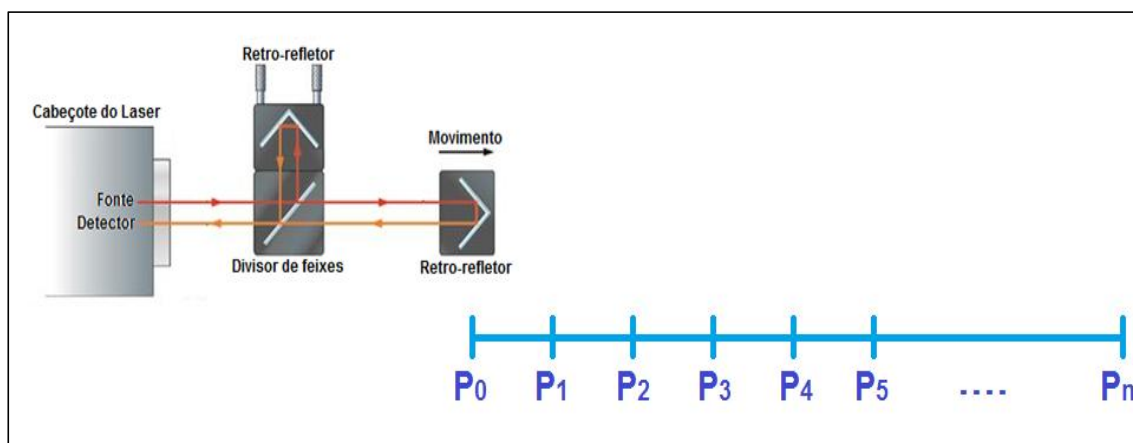


Figura 5. 7: Esquema de funcionamento da medição de posicionamento.

5.2.3. Teste no eixo X

O eixo X foi definido como sendo o eixo de guias feitas de alumínio, como pode ser observado na Figura 5.8. Para o teste poder ser realizado, foi necessário montar os espelhos de forma que ficasse um espelho fixo com o espelho separador na frente e o outro espelho refletor ficasse na base móvel do eixo, como no esquema da Figura 5.9.

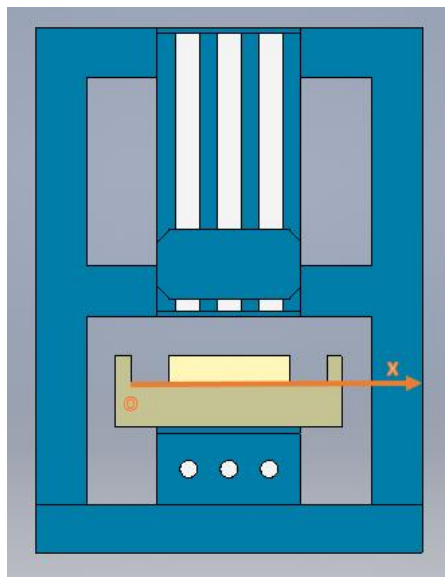


Figura 5. 8: Localização do eixo X.

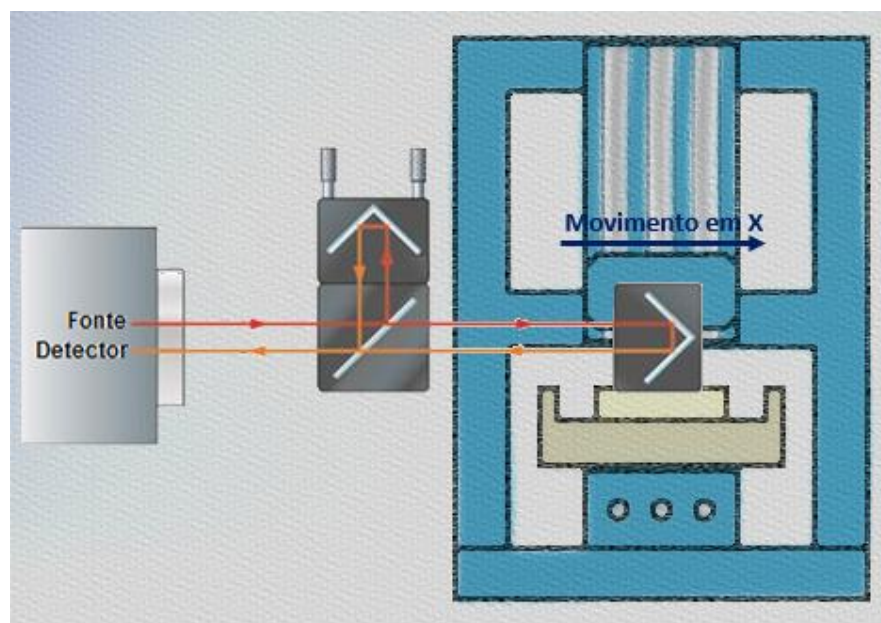


Figura 5. 9: Esquema de montagem do laser no eixo X.

Na Figura 5.1 encontra-se uma foto dos espelhos montados na máquina:



Figura 5. 10: Espelhos montados no eixo X.

Utilizou-se um adaptador para prender o eixo com um espelho na base da coordenada X. O outro espelho separador de feixe e de referência ficou alinhado na frente, apoiado na mesa metrológica sem qualquer conexão com a máquina.

Para realizar esse teste, inicialmente foi preciso decidir o número de posições a serem mensuradas e seus intervalos. Esse eixo apresentava um percurso disponível de 65 mm, devido a essa limitação decidiu-se usar um percurso de 50 mm e intervalos de 10 mm. As posições a serem medidas foram: $P_0 = 0 \text{ mm}$, $P_1 = 10 \text{ mm}$, $P_2 = 20 \text{ mm}$, $P_3 = 30 \text{ mm}$, $P_4 = 40 \text{ mm}$, $P_5 = 50 \text{ mm}$. Foi utilizado o código G do Anexo A.1, do apêndice. Na Tabela 5.1 encontram-se os valores medidos para cada posição no eixo X:

Tabela 5. 1: Valores medidos nas posições do eixo X, em mm.

Teste Eixo X		Teste 01		Teste 02		Teste 03		Teste 04		Teste 05	
Posição Nominal		Ida	Retorno	Ida	Retorno	Ida	Retorno	Ida	Retorno	Ida	Retorno
P0	0	0,0000	-0,0020	0,0000	0,0630	0,0000	-0,0280	0,0000	0,0690	0,0000	0,0560
P1	10	10,0250	10,4450	10,0190	10,5160	9,9850	10,4140	10,0130	10,5180	10,0120	10,5140
P2	20	20,4180	20,8210	20,4020	20,8970	20,3650	20,7990	20,3970	20,8790	20,4020	20,8900
P3	30	30,8100	31,1970	30,8000	31,2110	30,7600	31,1790	30,7870	31,1900	30,7870	31,2240
P4	40	41,1710	41,5740	41,1560	41,5710	41,1370	41,5550	41,1470	41,5620	41,1650	41,5990
P5	50	51,5380	51,5380	51,4960	51,4960	51,4820	51,4820	51,5170	51,5170	51,5350	51,5350

Com esses valores, pode-se calcular as médias para cada posição. Esses valores calculados podem ser observados na Tabela 5.2.

Tabela 5. 2: Valores de média das posições no eixo X, em mm.

Teste Eixo X		MÉDIA	
Posição		Ida	Retorno
P0	0	0,0000	0,1558
P1	10	10,0108	10,4814
P2	20	20,3968	20,8572
P3	30	30,7888	31,2002
P4	40	41,1552	41,5722
P5	50	51,5136	51,5136

Pode-se calcular o valor da tendência, também chamada de erro sistemático, para cada posição, de acordo com a equação:

$$Td = \bar{I} - VVC \quad (5.1)$$

Neste caso, basta subtrair o valor da média de cada posição pelo valor desejado na posição, para a posição P1 tem-se a seguinte tendência na ida:

$$Td = 10,0108 - 10 = +0,0108 \quad (5.2)$$

Nessa posição existe uma tendência de o sistema atingir um valor maior em 0,0108 mm. A seguir tem-se o valor de tendência para todas as posições:

Tabela 5. 3: Valores de tendência calculados no eixo X, em mm.

Teste Eixo X		MÉDIA		TENDÊNCIA	
Posição		Ida	Retorno	Ida	Retorno
P0	0	0,0000	0,1558	0,0000	0,1558
P1	10	10,0108	10,4814	0,0108	0,4814
P2	20	20,3968	20,8572	0,3968	0,8572
P3	30	30,7888	31,2002	0,7888	1,2002
P4	40	41,1552	41,5722	1,1552	1,5722
P5	50	51,5136	51,5136	1,5136	1,5136

A partir desses dados pode-se calcular os valores médios de histerese (Tabela 5.4) e gerar o gráfico de tendência por posição para o eixo X (Figura 5.11):

Tabela 5. 4: Valores de histerese obtidos no eixo X, em mm.

Teste Eixo X		Média		
	Posição	Ida	Retorno	Histerese
P0	0	0,0000	0,0316	0,0316
P1	10	10,0108	10,4814	0,4706
P2	20	20,3968	20,8572	0,4604
P3	30	30,7888	31,2002	0,4114
P4	40	41,1552	41,5722	0,4170
P5	50	51,5136	51,5136	0,0000

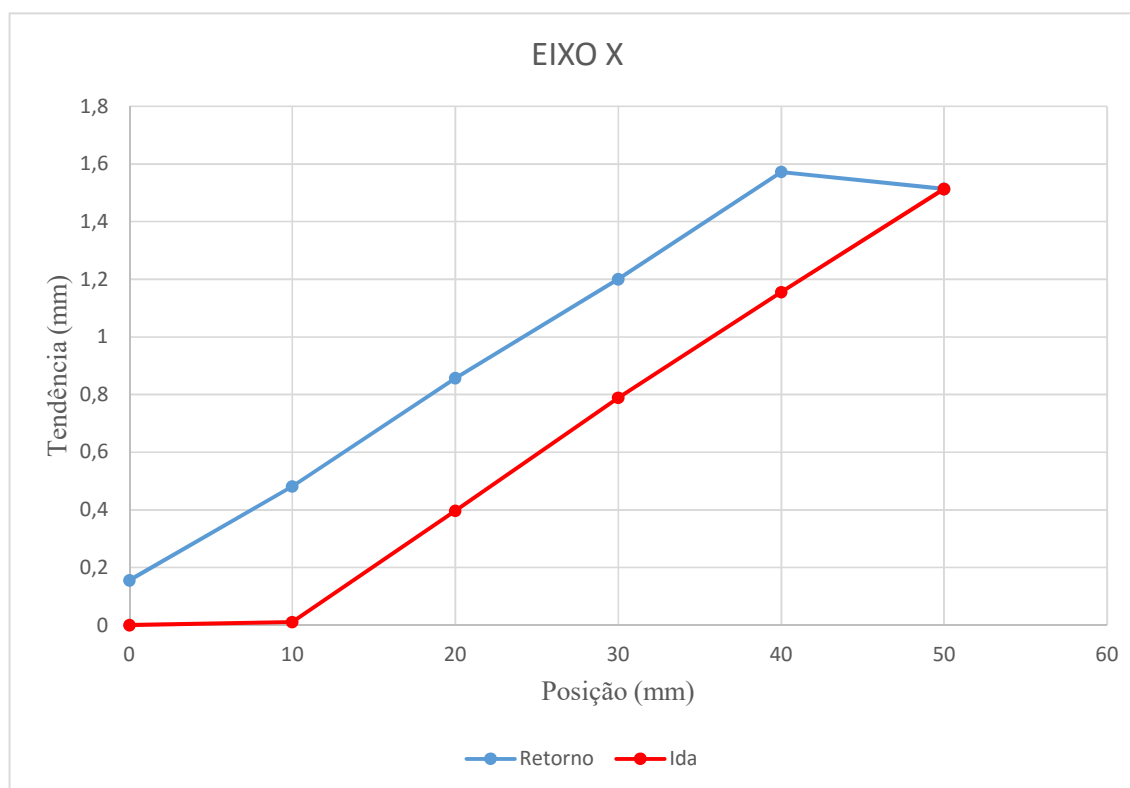


Figura 5. 11: Gráfico de Tendência Média por Posição no eixo X.

Com esses dados, foi calculada a incerteza padrão e a repetitividade para 95,45%, usando um t de Student de 2,869 para 4 graus de liberdade, segundo as equações (3.8) e (3.10). Os valores obtidos podem ser observados na Tabela 5.5.

Tabela 5. 5: Valores obtidos de Incerteza Padrão e Repetitividade no eixo X, em mm.

Teste Eixo X		MÉDIA		TENDÊNCIA		Incerteza Padrão		Repetitividade	
Posição		Ida	Retorno	Ida	Retorno	Ida	Retorno	Ida	Retorno
P0	0	0,0000	0,1558	0,0000	0,1558	0,0000	0,301092	0,0000	0,863832
P1	10	10,0108	10,4814	0,0108	0,4814	0,0153	0,04865	0,0440	0,139576
P2	20	20,3968	20,8572	0,3968	0,8572	0,0195	0,044252	0,0558	0,126958
P3	30	30,7888	31,2002	0,7888	1,2002	0,0188	0,017655	0,0539	0,050652
P4	40	41,1552	41,5722	1,1552	1,5722	0,0136	0,016754	0,0391	0,048068
P5	50	51,5136	51,5136	1,5136	1,5136	0,0244	0,024358	0,0699	0,069882

Com os valores de repetitividade, plota-se os gráficos de tendências médias e repetitividade unidirecional na ida (Figura 5.13), unidirecional no retorno (Figura 5.14) e bidirecional (Figura 5.12) de acordo com a norma ISO 230-2 (1997):

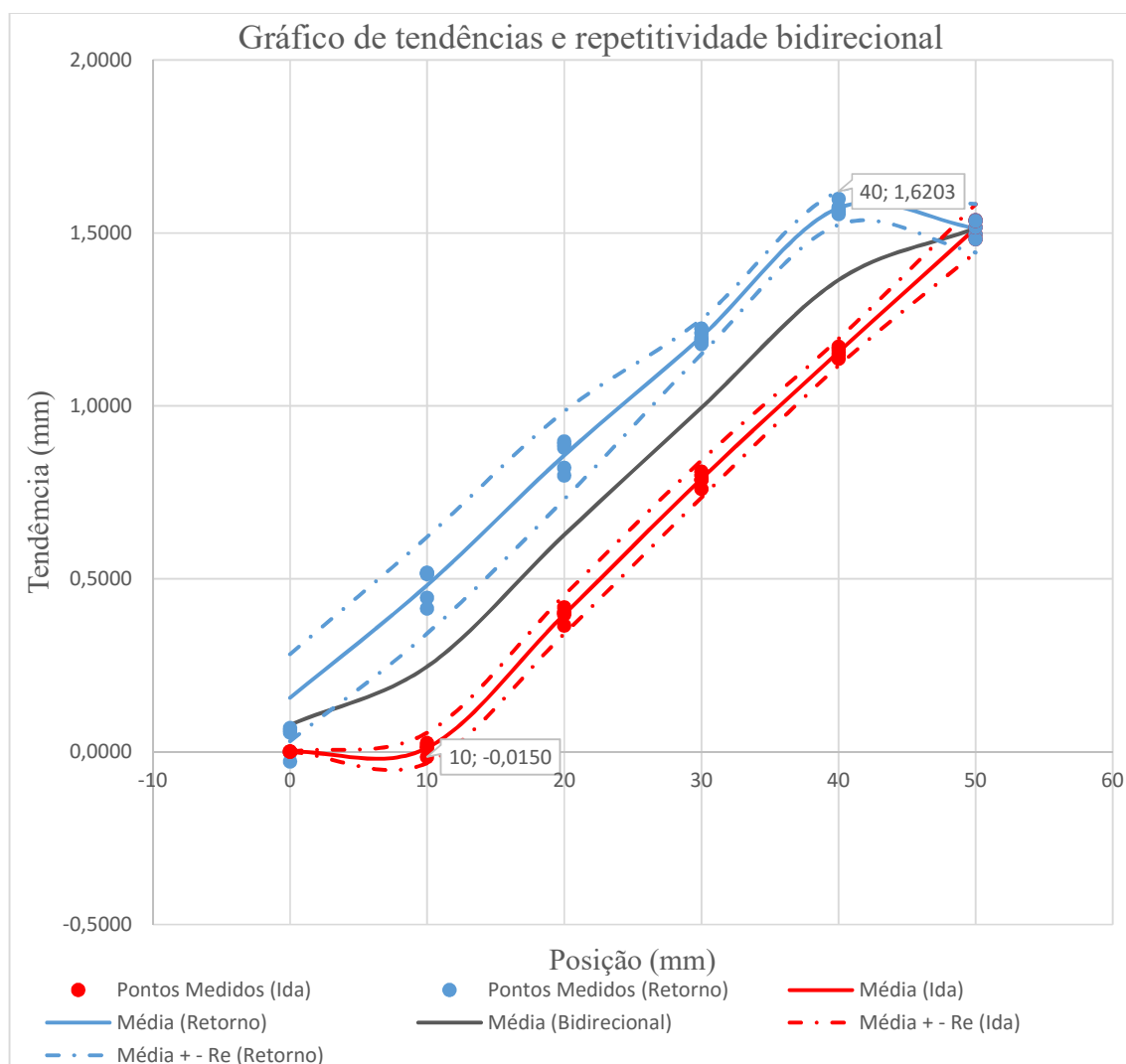


Figura 5. 12: Gráfico de tendências e repetitividade bidirecional no eixo X.

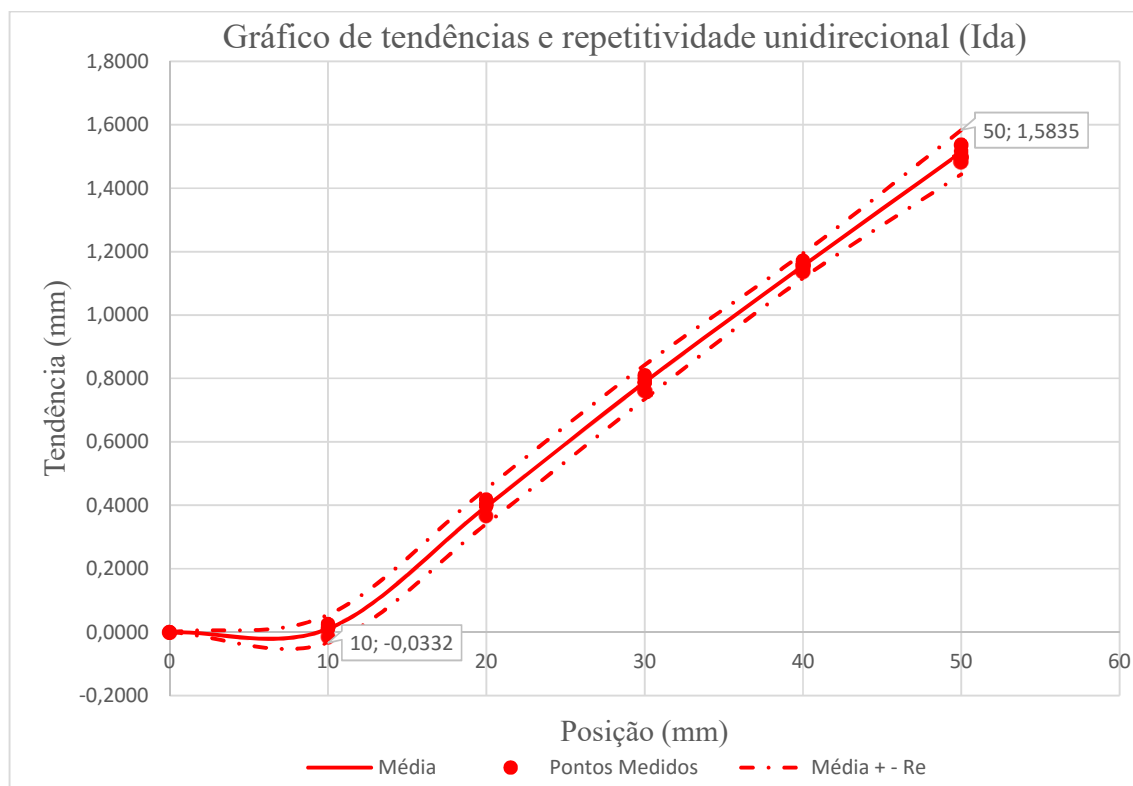


Figura 5. 13: Gráfico de tendências e repetitividade unidirecional na Ida do eixo X.

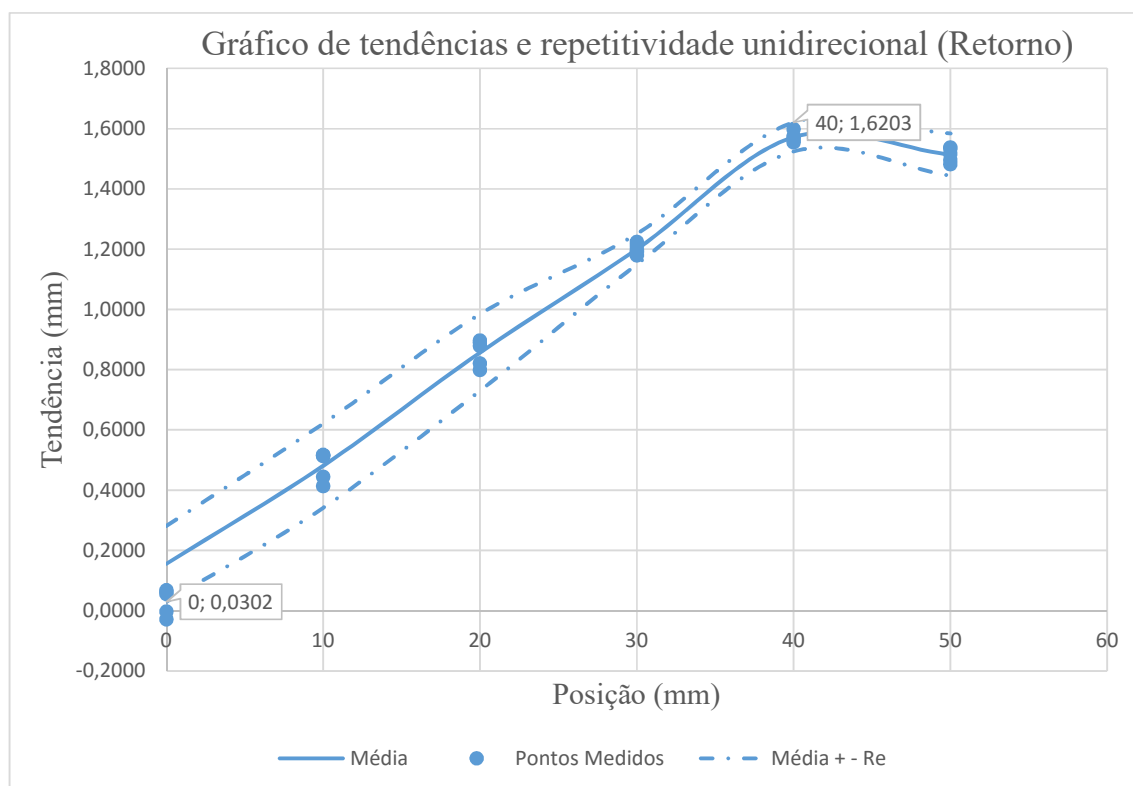


Figura 5. 14: Gráfico de tendências e repetitividade unidirecional no Retorno do eixo X.

Dessas medições e gráficos pode-se concluir:

Na ida houve um pico de incerteza padrão de 0,0244 mm na posição de 50 mm. Essa incerteza gerou uma repetitividade de $\pm 0,0699$ mm no mesmo ponto. Devido a isso, o erro aleatório do sistema é baixo se comparado com a tendência (erro sistemático) do sistema, que tem o maior valor de 1,5136 mm na ida, uma compensação via software trará uma melhora significativa na exatidão, já que a incerteza está muito abaixo que o valor de correção. A faixa de exatidão para esse sistema é de 1,6167 mm, esse valor corresponde a subtração do valor no pico máximo na curva da repetitividade menos o valor do pico mínimo da curva de repetitividade ($1,5835 - (-0,0332)$), de acordo com a norma ISO 230-2(1997):

No retorno houve um pico de incerteza padrão de 0,301092 mm na posição de 50 mm. Essa incerteza gerou uma repetitividade de $\pm 0,863832$ mm no mesmo ponto. Devido a isso, o erro aleatório do sistema é baixo se comparado com a tendência do sistema, que tem o valor máximo de 1,5722 mm, uma compensação via software pode trazer uma melhora significativa na exatidão. A faixa de exatidão para esse sistema é de 1,5901 mm, esse valor corresponde a subtração do valor no pico máximo na curva da repetitividade menos o valor do pico mínimo da curva de repetitividade ($1,6203 - (0,0302)$), de acordo com a norma ISO 230-2(1997).

Avaliando o sistema nas duas direções, a faixa de exatidão para esse sistema é de 1,6353 mm, esse valor corresponde a subtração do valor no pico máximo na curva da repetitividade menos o valor do pico mínimo da curva de repetitividade ($1,6203 - (-0,015)$), de acordo com a norma ISO 230-2(1997).

5.2.4. Teste no eixo Z

O eixo Z foi definido como sendo o eixo vertical. Na Figura 5.15 pode-se observar a posição e origem do eixo na máquina:

Para o teste poder ser realizado, foi necessário montar os espelhos de forma que ficasse um espelho divisor e um de referência fixo na base horizontal e o outro espelho refletor ficasse na base móvel do eixo vertical, como pode ser visto na Figura 5.16:

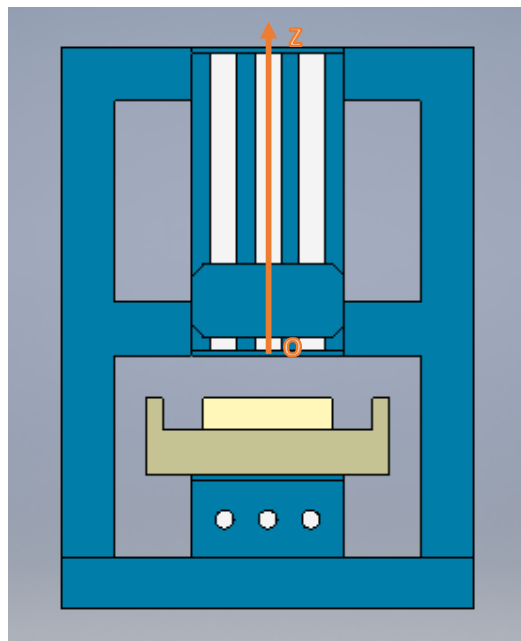


Figura 5. 15: Localização do eixo Z.

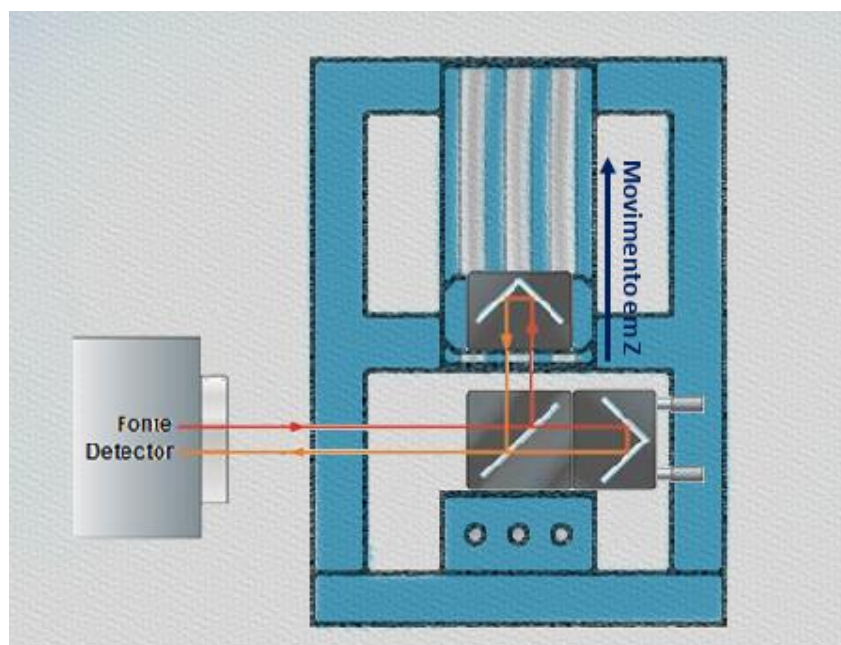


Figura 5. 16: Esquema de montagem do laser no eixo Z.

Na Figura 5.17 encontra-se uma foto dos espelhos montados na máquina:

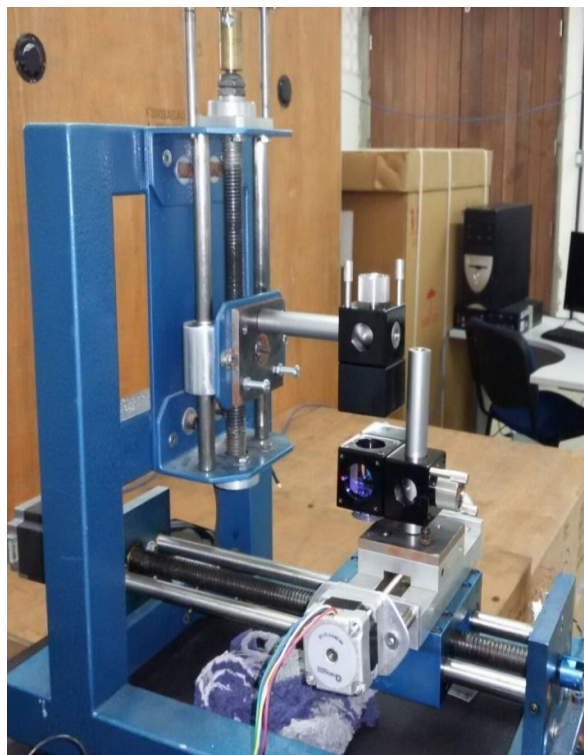


Figura 5. 17: Espelhos montados no eixo Z.

Utilizou-se um adaptador para prender o eixo com um espelho na base da coordenada Z. O outro espelho separador de feixe e de referência ficou alinhado na base do eixo vertical.

Para realizar esse teste, inicialmente foi preciso decidir o número de posições a serem mensuradas e seus intervalos. Para se padronizar as medições em todos os eixos, decidiu-se por realizar medições em intervalos de 10 mm, num percurso total de 50 mm. As posições a serem medidas foram: $P_0 = 0 \text{ mm}$, $P_1 = 10 \text{ mm}$, $P_2 = 20 \text{ mm}$, $P_3 = 30 \text{ mm}$, $P_4 = 40 \text{ mm}$, $P_5 = 50 \text{ mm}$. Foi utilizado o código G do Anexo A.2, do apêndice.

Na Tabela 5.6 encontram-se os valores medidos para cada posição no eixo Z:

Tabela 5. 6: Valores medidos nas posições do eixo Z, em mm.

Teste Eixo Z		Teste 01		Teste 02		Teste 03		Teste 04		Teste 05	
Posição		Ida	Retorno	Ida	Retorno	Ida	Retorno	Ida	Retorno	Ida	Retorno
P0	0	0,0000	0,3170	0,0000	1,0090	0,0000	0,0970	0,0000	0,2770	0,0000	0,1160
P1	10	9,9550	10,7090	9,7630	11,4410	8,7280	10,5030	8,5960	10,6590	10,0210	10,4900
P2	20	20,3590	21,0680	20,1670	21,8270	19,1240	20,8970	18,9850	20,9920	18,7790	20,9320
P3	30	30,8050	31,4980	30,6090	31,2460	29,5700	31,3160	29,4330	31,3580	29,1260	31,2980
P4	40	41,2160	41,8440	41,0130	41,1780	39,9680	41,7210	39,8230	40,9220	39,5040	41,6380
P5	50	51,6690	51,6690	51,4660	51,4660	50,4260	50,4260	50,2870	50,2870	49,9630	49,9630

Com esses valores, pode-se calcular as médias para cada posição. Os valores calculados encontram-se na Tabela 5.7:

Tabela 5. 7: Valores de média das posições no eixo Z, em mm.

Teste Eixo Z		MÉDIA	
Posição		Ida	Retorno
P0	0	0,0000	0,3632
P1	10	9,4126	10,7604
P2	20	19,4828	21,1432
P3	30	29,9086	31,3432
P4	40	40,3048	41,4606
P5	50	50,7622	50,7622

Na Tabela 5.8 tem-se o valor de tendência para todas as posições:

Tabela 5. 8: Valores de tendência calculados no eixo Z, em mm.

Teste Eixo Z		MÉDIA		TENDÊNCIA	
Posição		Ida	Retorno	Ida	Retorno
P0	0	0,0000	0,3632	0,0000	0,3632
P1	10	9,4126	10,7604	-0,5874	0,7604
P2	20	19,4828	21,1432	-0,5172	1,1432
P3	30	29,9086	31,3432	-0,0914	1,3432
P4	40	40,3048	41,4606	0,3048	1,4606
P5	50	50,7622	50,7622	0,7622	0,7622

A partir desses dados pode-se calcular os valores médios de histerese (Tabela 5.9) e gerar o gráfico de tendência por posição para o eixo Z (Figura 5.18):

Tabela 5. 9: Valores de histerese obtidos no eixo Z, em mm.

Teste Eixo Z		Média		
Posição		Ida	Retorno	Histerese
P0	0	0,0000	0,3632	0,3632
P1	10	9,4126	10,7604	1,3478
P2	20	19,4828	21,1432	1,6604
P3	30	29,9086	31,3432	1,4346
P4	40	40,3048	41,4606	1,1558
P5	50	50,7622	50,7622	0,0000

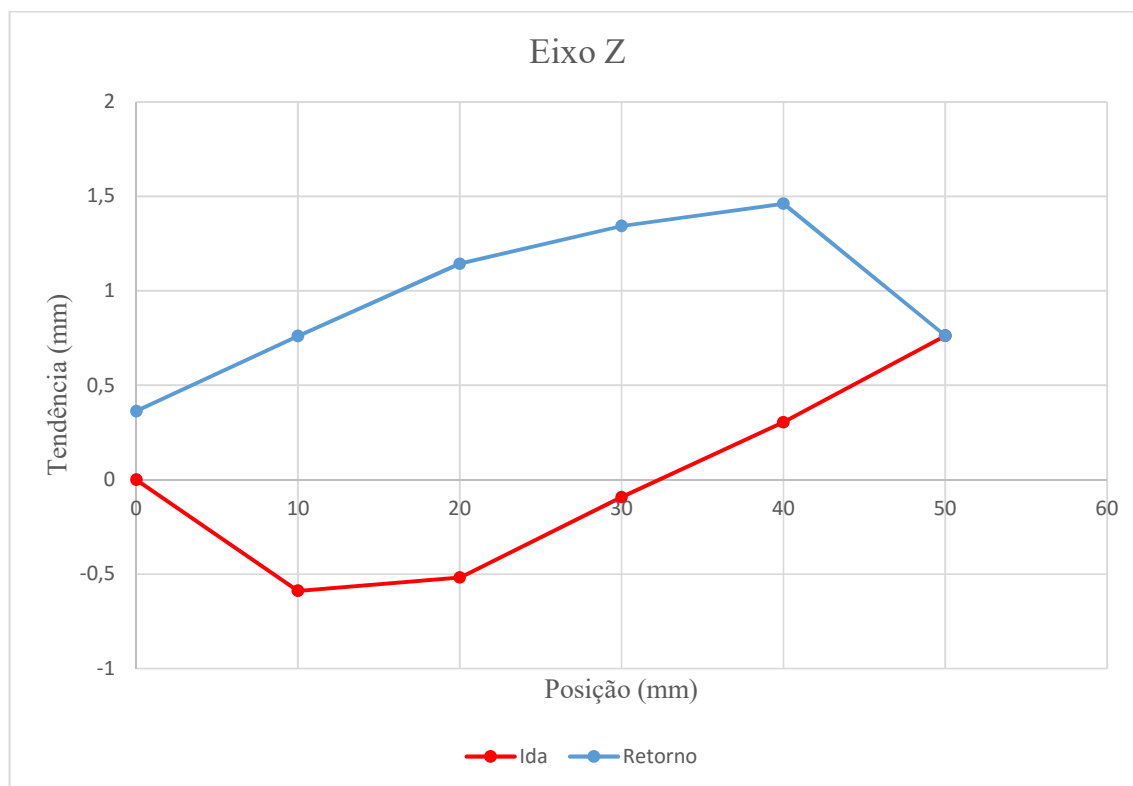


Figura 5. 18: Gráfico de Tendência Média por Posição no eixo Z.

Com esses dados, foi calculada a incerteza padrão e a repetitividade para 95,45%, usando um t de Student de 2,869 para 4 graus de liberdade, segundo as equações (3.8) e (3.10). Os valores obtidos podem ser observados na Tabela 5.10:

Tabela 5. 10: Valores obtidos de Incerteza Padrão e Repetitividade no eixo Z, em mm.

Teste Eixo Z		MÉDIA		TENDÊNCIA		Incerteza Padrão		Repetitividade	
Posição		Ida	Retorno	Ida	Retorno	Ida	Retorno	Ida	Retorno
P0	0	0,0000	0,3632	0,0000	0,3632	0,0000	0,3737	0,0000	1,0721
P1	10	9,4126	10,7604	-0,5874	0,7604	0,6933	0,3923	1,9891	1,1254
P2	20	19,4828	21,1432	-0,5172	1,1432	0,7259	0,3877	2,0826	1,1124
P3	30	29,9086	31,3432	-0,0914	1,3432	0,7496	0,0954	2,1505	0,2737
P4	40	40,3048	41,4606	0,3048	1,4606	0,7614	0,3925	2,1843	1,1261
P5	50	50,7622	50,7622	0,7622	0,7622	0,7575	0,7575	2,1732	2,1732

Com os valores de repetitividade, plota-se os gráficos de tendências médias e repetitividade unidirecional na ida (Figura 5.19), unidirecional no retorno (Figura 5.20) e bidirecional (Figura 5.21) de acordo com a norma ISO 230-2(1997).

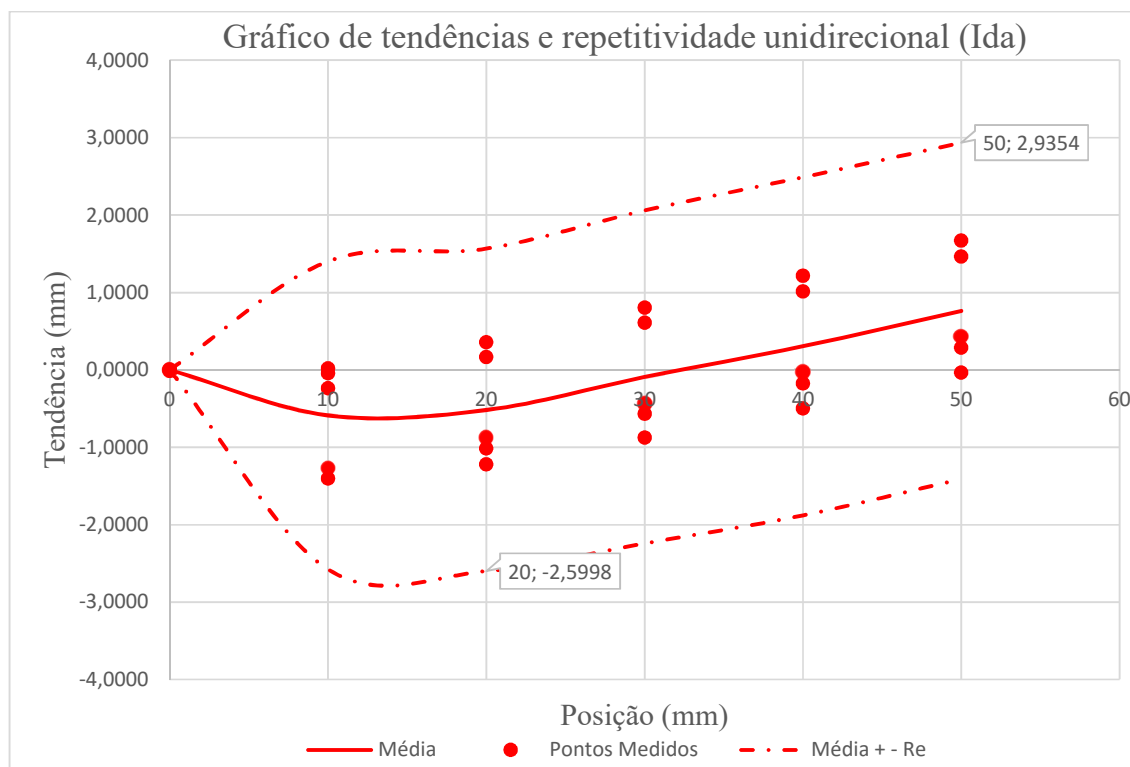


Figura 5. 19: Gráfico de tendências e repetitividade unidirecional na Ida do eixo Z.

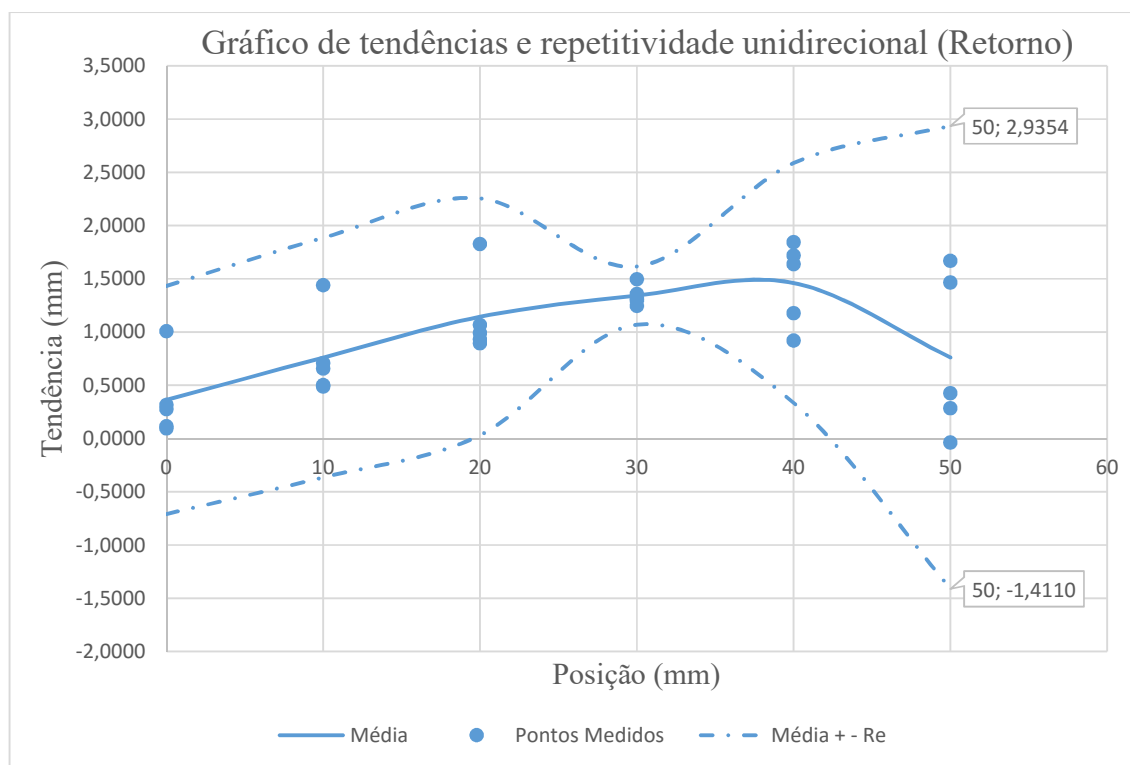


Figura 5. 20: Gráfico de tendências e repetitividade unidirecional no Retorno do eixo Z.

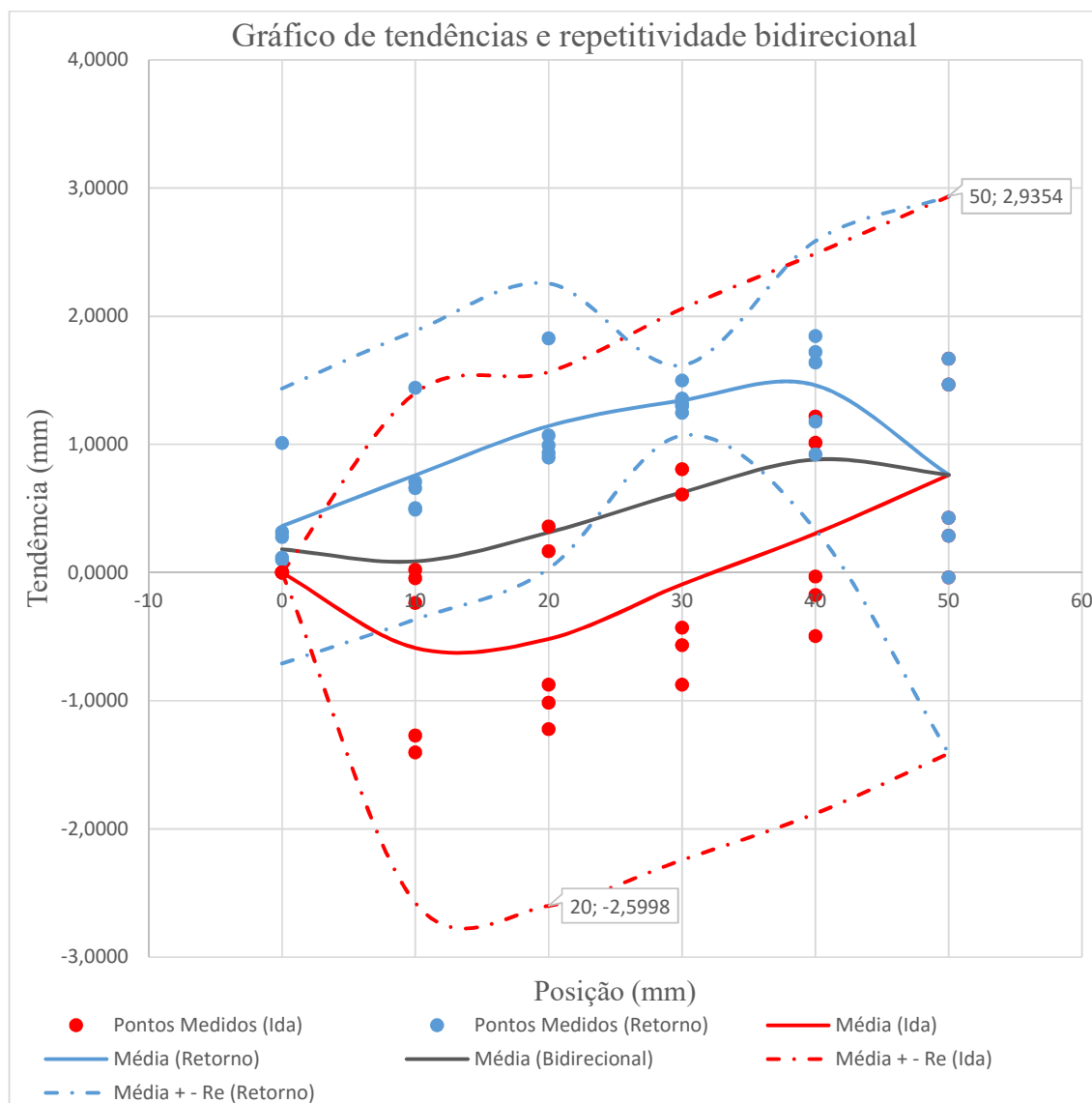


Figura 5. 21: Gráfico de tendências e repetitividade bidirecional no eixo Z.

Dessas medições e gráficos pode-se concluir:

Na ida houve um pico de incerteza padrão de 0,7614 mm na posição de 40 mm. Essa incerteza gerou uma repetitividade de $\pm 2,1843$ mm no mesmo ponto. Devido a isso, o erro aleatório do sistema é alto se comparado com a tendência (erro sistemático) do sistema, que tem o maior valor de 0,7622 mm na ida, uma compensação via software dificilmente trará uma melhora significativa na exatidão, já que a incerteza está na mesma faixa que o valor de correção. A faixa de exatidão para esse sistema é de 5,5352 mm, esse valor corresponde a

subtração do valor no pico máximo na curva da repetitividade menos o valor do pico mínimo da curva de repetitividade ($2,9354 - (-2,5998)$), de acordo com a norma ISO 230-2(1997).

No retorno houve um pico de incerteza padrão de 0,7575 mm na posição de 50 mm. Essa incerteza gerou uma repetitividade de $\pm 2,1732$ mm no mesmo ponto. Devido a isso, o erro aleatório do sistema é moderado se comparado com a tendência do sistema, que tem o valor máximo de 1,4606 mm, uma compensação via software pode trazer uma melhora na exatidão. A faixa de exatidão para esse sistema é de 4,3464 mm, esse valor corresponde a subtração do valor no pico máximo na curva da repetitividade menos o valor do pico mínimo da curva de repetitividade ($2,9354 - (-1,4110)$).

Avaliando o sistema nas duas direções, a faixa de exatidão para esse sistema é de 5,5352 mm, esse valor corresponde a subtração do valor no pico máximo na curva da repetitividade menos o valor do pico mínimo da curva de repetitividade ($2,9354 - (-2,5998)$), de acordo com a norma ISO 230-2(1997).

5.2.5. Teste no eixo Y

O eixo Y foi definido como sendo o eixo horizontal, como mostrado na Figura 5.22.

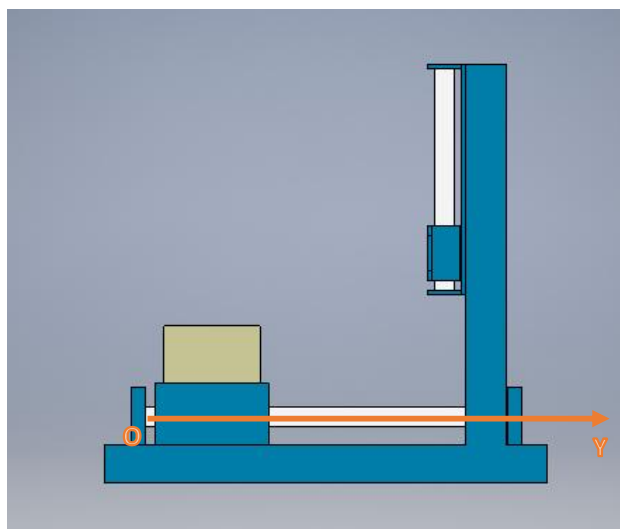


Figura 5. 22: Localização do eixo Y.

Para o teste poder ser realizado, foi necessário montar os espelhos de forma que ficasse um espelho divisor e um de referência fixo na frente da máquina e o outro espelho refletor ficasse na base móvel do eixo horizontal, como pode ser visto na Figura 5.23.

Na Figura 5.24 encontra-se uma foto dos espelhos montados na máquina:

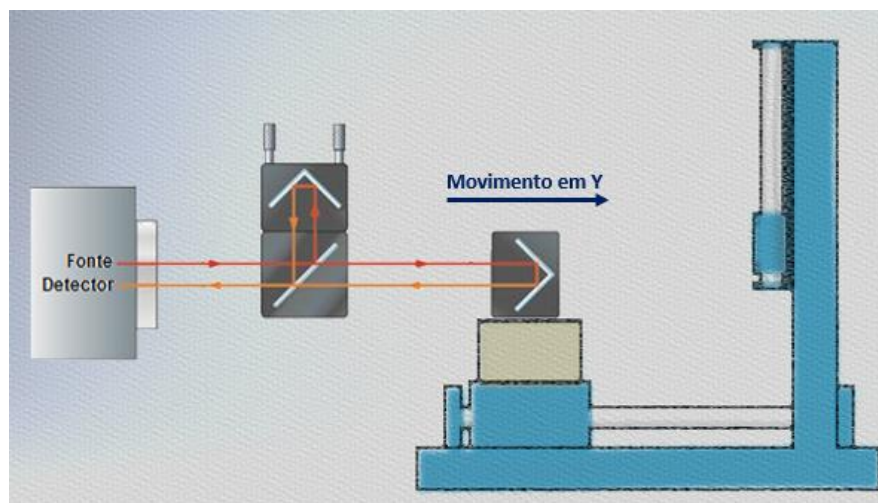


Figura 5. 23: Esquema de montagem do laser no eixo Y.



Figura 5. 24: Espelhos montados no eixo Y.

Esse eixo apresenta um fuso com passo de 3 mm. O eixo foi configurado no programa para realizar 4026 passos por mm. Para realizar esse teste, inicialmente foi preciso decidir o número de posições a serem mensuradas e seus intervalos. Para se padronizar as medições em todos os eixos, decidiu-se por realizar medições em intervalos de 10 mm, num percurso total

de 50 mm. As posições a serem medidas foram: $P_0 = 0 \text{ mm}$, $P_1 = 10 \text{ mm}$, $P_2 = 20 \text{ mm}$, $P_3 = 30 \text{ mm}$, $P_4 = 40 \text{ mm}$, $P_5 = 50 \text{ mm}$. Foi utilizado o código G do Anexo A.3, do apêndice.

Na Tabela 5.11 encontram-se os valores medidos para cada posição no eixo Y:

Tabela 5. 11: Valores medidos nas posições do eixo Y, em mm.

Teste Eixo Y		Teste 01		Teste 02		Teste 03		Teste 04		Teste 05	
Posição		Ida	Retorno	Ida	Retorno	Ida	Retorno	Ida	Retorno	Ida	Retorno
P0	0	0,0000	0,0036	-0,0002	0,0067	0,0000	-0,0090	0,0000	0,0111	0,0001	0,0021
P1	10	10,1119	10,2708	10,1071	10,2676	10,1055	10,2610	10,1107	10,2809	10,1110	10,2482
P2	20	20,3680	20,5432	20,3688	20,5475	20,3641	20,5534	20,3769	20,5655	20,3679	20,5604
P3	30	30,6416	30,8132	30,6411	30,8119	30,6357	30,8132	30,6525	30,8223	30,6481	30,8155
P4	40	40,9091	41,0775	40,9164	41,0752	40,9092	41,0590	40,9300	41,0843	40,9142	41,0669
P5	50	51,1064	51,2839	51,1100	51,2677	51,0936	51,2712	51,1288	51,2876	51,1069	51,2816

Com esses valores, pode-se calcular as médias para cada posição. Os valores obtidos podem ser observados na Tabela 5.12.

Tabela 5. 12: Valores de média das posições no eixo Y, em mm.

Teste Eixo Y		MÉDIA	
Posição		Ida	Retorno
P0	0	0,0000	0,0029
P1	10	10,1092	10,2657
P2	20	20,3691	20,5540
P3	30	30,6438	30,8152
P4	40	40,9158	41,0726
P5	50	51,1091	51,2784

Na Tabela 5.13 tem-se o valor de tendência para todas as posições:

Tabela 5. 13: Valores de tendência calculados no eixo Y, em mm.

Teste Eixo Y		MÉDIA		TENDÊNCIA	
Posição		Ida	Retorno	Ida	Retorno
P0	0	0,0000	0,0029	0,0000	0,0029
P1	10	10,1092	10,2657	0,1092	0,2657
P2	20	20,3691	20,5540	0,3691	0,5540
P3	30	30,6438	30,8152	0,6438	0,8152
P4	40	40,9158	41,0726	0,9158	1,0726
P5	50	51,1091	51,2784	1,1091	1,2784

A partir desses dados pode-se calcular os valores médios de histerese (Tabela 5.14) e gerar o gráfico de tendência por posição para o eixo Y (Figura 5.25):

Tabela 5. 14: Valores de histerese obtidos no eixo Y, em mm.

Teste Eixo Y		Média		
Posição		Ida	Retorno	Histerese
P0	0	0,0000	0,0029	0,0029
P1	10	10,1092	10,2657	0,1565
P2	20	20,3691	20,5540	0,1849
P3	30	30,6438	30,8152	0,1714
P4	40	40,9158	41,0726	0,1568
P5	50	51,1091	51,2784	0,1693

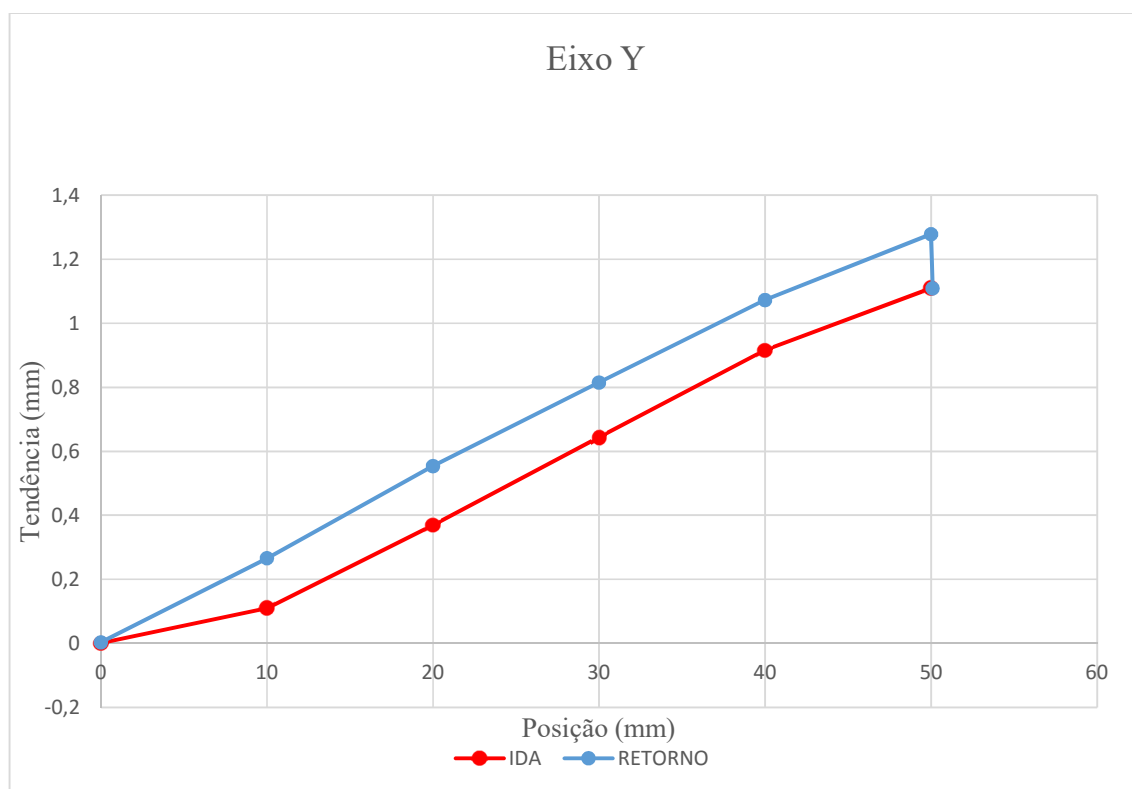


Figura 5. 25: Gráfico de Tendência Média por Posição no eixo Y.

Com esses dados, foi calculada a incerteza padrão e a repetitividade para 95,45%, usando um t de Student de 2,869 para 4 graus de liberdade, segundo as equações (3.8) e (3.10). Os valores obtidos podem ser observados na Tabela 5.15.

Tabela 5. 15: Valores obtidos de Incerteza Padrão e Repetitividade no eixo Y, em mm.

Teste Eixo Y		MÉDIA		TENDÊNCIA		Incerteza Padrão		Repetitividade	
Posição		Ida	Retorno	Ida	Retorno	Ida	Retorno	Ida	Retorno
P0	0	0,0000	0,0029	0,0000	0,0029	0,0001	0,0075	0,0003	0,0215
P1	10	10,1092	10,2657	0,1092	0,2657	0,0028	0,0121	0,0080	0,0348
P2	20	20,3691	20,5540	0,3691	0,5540	0,0047	0,0091	0,0135	0,0262
P3	30	30,6438	30,8152	0,6438	0,8152	0,0066	0,0042	0,0188	0,0120
P4	40	40,9158	41,0726	0,9158	1,0726	0,0086	0,0098	0,0246	0,0282
P5	50	51,1091	51,2784	1,1091	1,2784	0,0127	0,0085	0,0363	0,0245

Com os valores de repetitividade, plotam-se os gráficos de tendências médias e repetitividade bidirecional (Figura 5.26), unidirecional na ida (Figura 5.27) e unidirecional no retorno (Figura 5.28) de acordo com a norma ISO 230-2(1997):

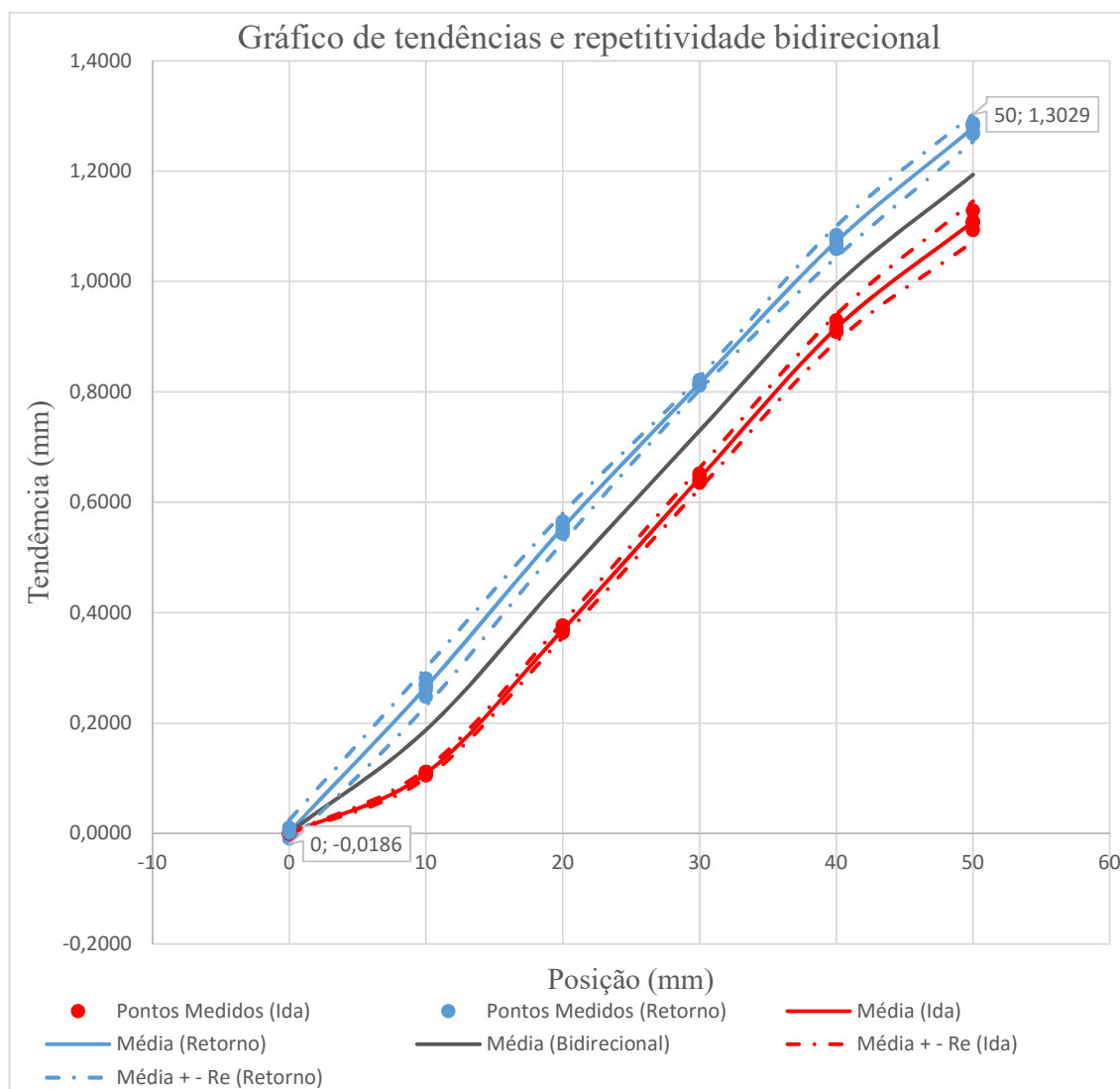


Figura 5. 26: Gráfico de tendências e repetitividade bidirecional no eixo Y.

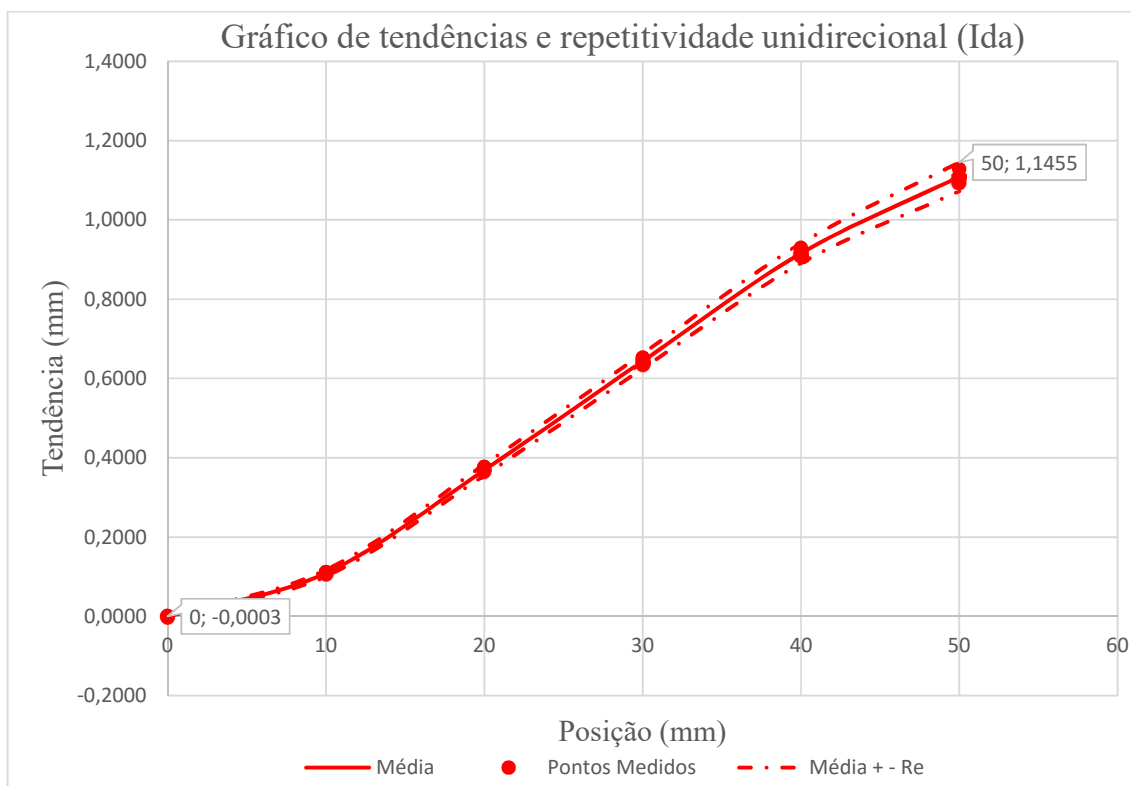


Figura 5. 27: Gráfico de tendências e repetitividade unidirecional na Ida do eixo Y.

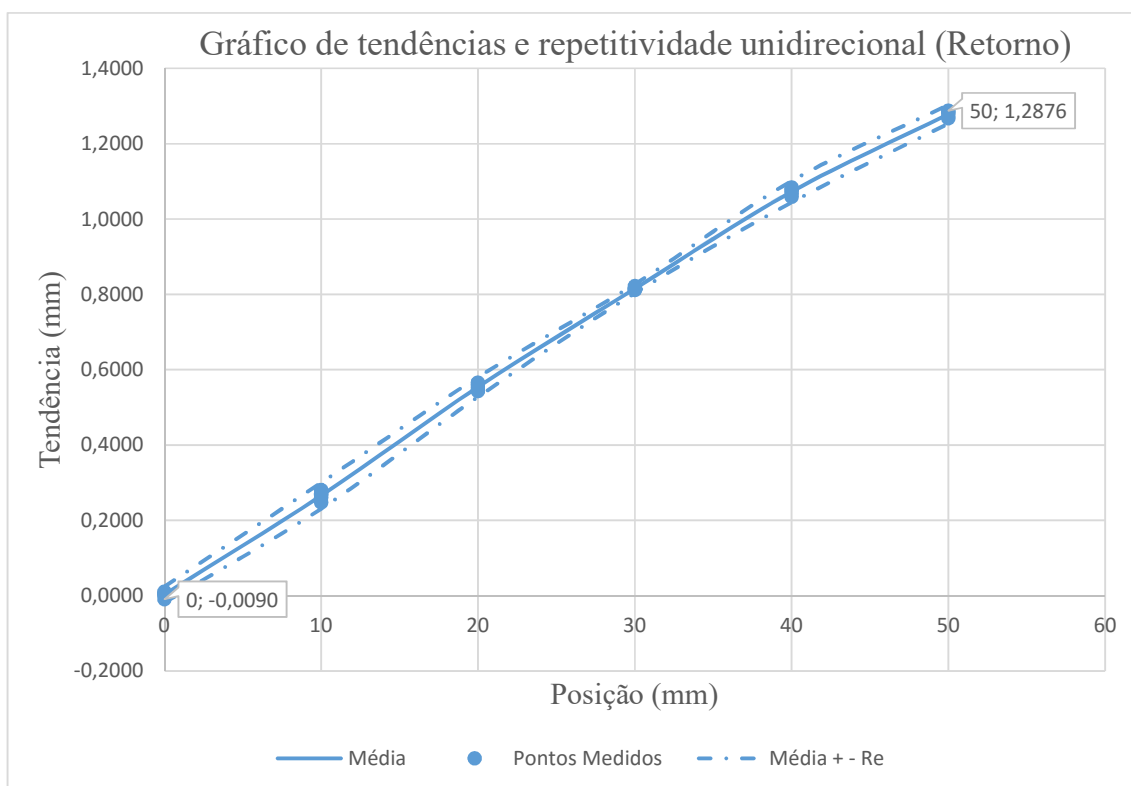


Figura 5. 28: Gráfico de tendências e repetitividade unidirecional no Retorno do eixo Y.

Dessas medições e gráficos pode-se concluir:

Na ida houve um pico de incerteza padrão de 0,0127 mm na posição de 50 mm. Essa incerteza gerou uma repetitividade de $\pm 0,0363$ mm no mesmo ponto. Devido a isso, o erro aleatório do sistema é baixo se comparado com a tendência (erro sistemático) do sistema, que é de 1,1091 mm no mesmo ponto, uma compensação via software trará uma melhora significativa na exatidão, já que a incerteza é muito menor que o valor de correção. A faixa de exatidão para esse sistema é de 1,1458 mm, esse valor corresponde a subtração do valor no pico máximo na curva da repetitividade menos o valor do pico mínimo da curva de repetitividade ($1,1455 - (-0,0003)$).

No retorno houve um pico de incerteza padrão de 0,0121 mm na posição de 10 mm. Essa incerteza gerou uma repetitividade de $\pm 0,034814$ mm no mesmo ponto. Devido a isso, o erro aleatório do sistema baixo se comparado com a tendência do sistema, que tem o valor máximo de 1,2784 mm, uma compensação via software pode trazer uma melhora significativa na exatidão. A faixa de exatidão para esse sistema é de 1,3215 mm, esse valor corresponde a subtração do valor no pico máximo na curva da repetitividade menos o valor do pico mínimo da curva de repetitividade ($1,3029 - (-0,0186)$), de acordo com a norma ISO 230-2(1997).

Avaliando o sistema nas duas direções, a faixa de exatidão para esse sistema é de 1,3215 mm, esse valor corresponde a subtração do valor no pico máximo na curva da repetitividade menos o valor do pico mínimo da curva de repetitividade ($1,3029 - (-0,0186)$), de acordo com a norma ISO 230-2(1997).

5.3. COMPENSAÇÃO DO EIXO Y

O objetivo desse teste é avaliar a possibilidade de fazer uma compensação dos erros da máquina por meio de software. Segundo Rolim (2003), erros geométricos, sendo de origem sistemática, permitem a realização da sua correção através de programas computacionais, melhorando de modo expressivo a exatidão da máquina.

5.3.1 Equipamentos e materiais

Nesse teste, foram utilizados os mesmos materiais relatados no tópico 5.2.1.

5.3.2. Metodologia

Nesse teste, serão utilizados os valores de tendência média obtidos no tópico 5.2.5. para o eixo Y. A partir desses valores, serão determinados valores de correção para cada posicionamento $C_0, C_1, C_2, C_3 \dots C_n$. Em seguida, comanda-se a máquina para se mover para n posições corrigidas $P_0 + C_0, P_1 + C_1, P_2 + C_2, P_3 + C_3 \dots P_n + C_n$. Para cada uma dessas posições, é medido através do sistema Laser XL-80, qual a posição real atingida.

Depois que o espelho refletor se encontra na posição P_n , é realizado o teste no sentido inverso. Comanda-se a máquina a mover o espelho refletor para n posições específicas $P_n + C_n \dots P_3 + C_3, P_2 + C_2, P_1 + C_1, P_0 + C_0$. Para cada uma dessas posições, é medido, através do sistema Laser XL-80, qual a posição real atingida.

5.3.3 Teste de compensação do eixo Y

Para determinar os valores de correção, é necessário utilizar os valores de tendência médios para o eixo Y. Esses valores foram obtidos no teste de medição de posicionamento do eixo Y, tópico 5.2.5. A seguir encontram-se os valores obtidos:

Tabela 5. 16: Valores médios de posições medidas no eixo Y, em mm.

Teste Eixo Y		MÉDIA	
Posição		Ida	Retorno
P0	0	0,0000	0,0029
P1	10	10,1092	10,2657
P2	20	20,3691	20,5540
P3	30	30,6438	30,8152
P4	40	40,9158	41,0726
P5	50	51,1091	51,2784

O valor de correção pode ser definido pela equação 3.7. Foi determinado os valores de correção para cada posição de acordo com os dados do teste 5.2.5. Na Tabela 5.17, pode-se observar os valores de correção obtidos.

Tabela 5. 17: Valores de correção calculados para o eixo Y, em mm.

Teste Eixo Y		MÉDIA		CORREÇÃO	
Posição		Ida	Retorno	Ida	Retorno
P0	0	0,0000	0,0029	0,0000	-0,0029
P1	10	10,1092	10,2657	-0,1092	-0,2657
P2	20	20,3691	20,5540	-0,3691	-0,5540
P3	30	30,6438	30,8152	-0,6438	-0,8152
P4	40	40,9158	41,0726	-0,9158	-1,0726
P5	50	51,1091	51,2784	-1,1091	-1,2784

A partir dos valores de correção, foram determinados os valores das posições corrigidas $P_n + C_n$ para o qual vai ser comandado o movimento do eixo. Esses valores podem ser observados na Tabela 5.18.

Tabela 5. 18: Valores compensados de posicionamento no eixo Y, em mm.

Teste Eixo Y		CORREÇÃO		$P_n + C_n$	
Posição		Ida	Retorno	Ida	Retorno
P0	0	0,0000	-0,0029	0,0000	-0,0029
P1	10	-0,1092	-0,2657	9,8908	9,7343
P2	20	-0,3691	-0,5540	19,6309	19,4460
P3	30	-0,6438	-0,8152	29,3562	29,1848
P4	40	-0,9158	-1,0726	39,0842	38,9274
P5	50	-1,1091	-1,2784	48,8909	48,7216

O significado dessa correção é, que, para se atingir a posição 10 mm na ida do eixo Y, será comandado na máquina para se movimentar ao ponto 9,8908 mm. Dessa forma, será corrigida a tendência que a máquina tem de ultrapassar 0,1092 mm na ida para a posição 10mm. Como foi feita essa correção para todos os pontos na ida e na volta, espera-se eliminar os erros sistemáticos nessas posições, aumentando a exatidão do sistema.

A máquina foi comandada a se movimentar aos pontos $P_n + C_n$ de acordo com o código G no apêndice Anexo A.4. Em cada ponto foi realizada a medição do valor de deslocamento pelo Laser XL-80. Tabela 5.19 encontram-se os resultados das medições:

Tabela 5. 19: Valores medidos nas posições do eixo Y após a compensação, em mm.

Compensação em Y		Teste 01		Teste 02		Teste 03		Teste 04		Teste 05	
Posição		Ida	Retorno	Ida	Retorno	Ida	Retorno	Ida	Retorno	Ida	Retorno
P0	0	0,0000	-0,0057	0,0000	-0,0046	0,0000	-0,0146	0,0000	0,0022	0,0000	-0,0031
P1	10	9,9929	9,9854	9,9922	9,9877	9,9963	9,9906	10,0369	10,0015	10,0478	9,9956
P2	20	19,9841	19,9841	20,0220	19,9824	20,0002	19,9865	20,0018	19,9948	19,9979	19,9870
P3	30	29,9637	29,9647	29,9701	29,9663	29,9774	29,9683	29,9761	29,9738	29,9752	29,9715
P4	40	39,9592	39,9678	39,9704	39,9680	39,9685	39,9613	39,9742	39,9846	39,9699	39,9673
P5	50	50,0016	49,9869	49,9690	49,9792	49,9827	49,9818	49,9870	49,9957	49,9733	49,9786

A partir desses valores pode-se calcular a média para cada posição. Os valores de média calculados podem ser observados na Tabela 5.20.

Tabela 5. 20: Valores de média das posições no eixo Y após a compensação, em mm.

Compensação em Y		MÉDIA	
Posição		Ida	Retorno
P0	0	0,0000	-0,0052
P1	10	10,0132	9,9922
P2	20	20,0012	19,9870
P3	30	29,9725	29,9689
P4	40	39,9684	39,9698
P5	50	49,9827	49,9844

Após o cálculo das médias, é calculado os valores de tendência. Esses valores podem ser observados na Tabela 5.21:

Tabela 5. 21: Valores de tendência calculados no eixo Y após a compensação, em mm.

Compensação em Y		MÉDIA		TENDÊNCIA	
Posição		Ida	Retorno	Ida	Retorno
P0	0	0,0000	-0,0052	0,0000	-0,0052
P1	10	10,0132	9,9922	0,0132	-0,0078
P2	20	20,0012	19,9870	0,0012	-0,0130
P3	30	29,9725	29,9689	-0,0275	-0,0311
P4	40	39,9684	39,9698	-0,0316	-0,0302
P5	50	49,9827	49,9844	-0,0173	-0,0156

A partir desses dados pode-se calcular os valores médios de histerese (Tabela 5.22) e gerar o gráfico de tendência por posição para o eixo Y após a compensação (Figura 5.29):

Tabela 5. 22: Valores de histerese obtidos no eixo Y após a compensação, em mm.

Compensação em Y		Valores médios		
Posição		Ida	Volta	Histerese
P0	0	0,0000	-0,0052	-0,0052
P1	10	10,0132	9,9922	-0,0211
P2	20	20,0012	19,9870	-0,0142
P3	30	29,9725	29,9689	-0,0036
P4	40	39,9684	39,9698	0,0014
P5	50	49,9827	49,9844	0,0017

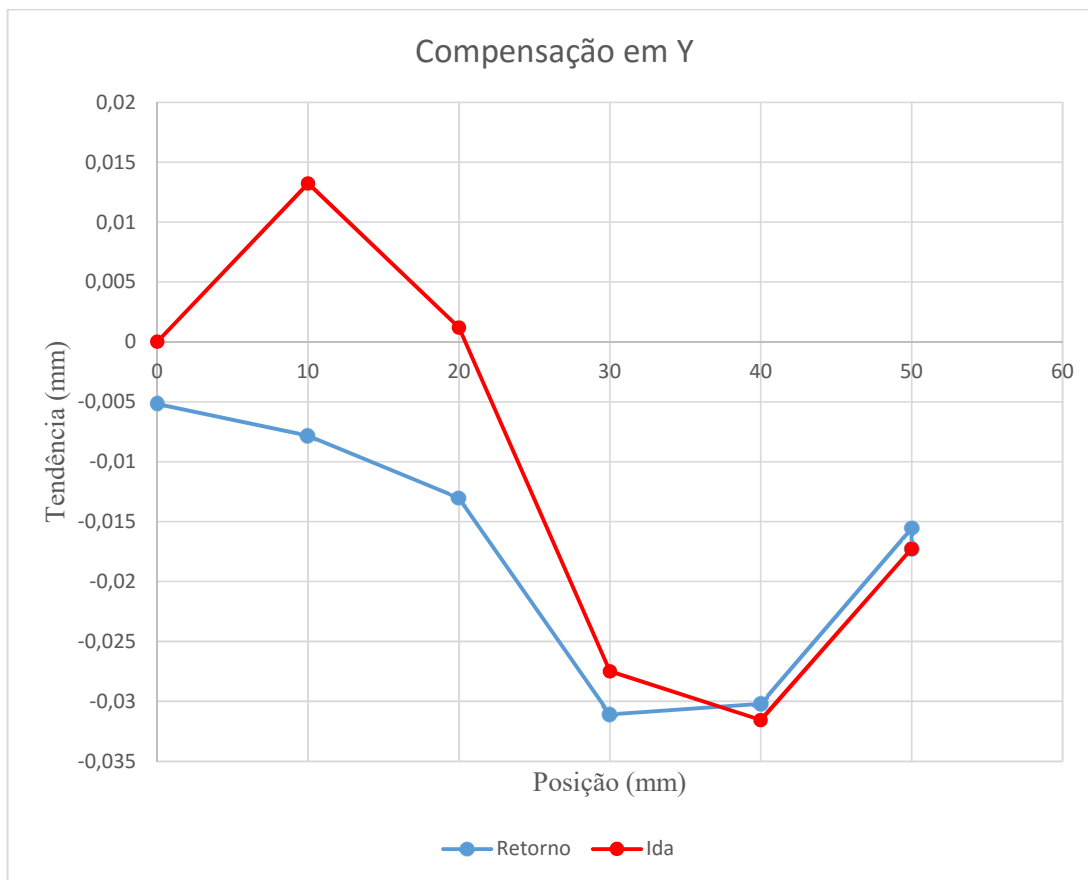


Figura 5. 29: Gráfico de Tendência Média por Posição no eixo Y após a compensação.

Com esses dados, foi calculada a incerteza padrão e a repetitividade para 95,45%, usando um t de Student de 2,869 para 4 graus de liberdade, segundo as equações (3.8) e (3.10). Os valores obtidos podem ser observados na Tabela 5.23.

Tabela 5. 23: Valores obtidos de Incerteza Padrão e Repetitividade no eixo Y após a compensação, em mm.

Compensação em Y		MÉDIA		TENDÊNCIA		Incerteza Padrão		Repetitividade	
Posição		Ida	Retorno	Ida	Retorno	Ida	Retorno	Ida	Retorno
P0	0	0,0000	-0,0052	0,0000	-0,0052	0,0000	0,006085	0,0000	0,0175
P1	10	10,0132	9,9922	0,0132	-0,0078	0,0269	0,006463	0,0772	0,0185
P2	20	20,0012	19,9870	0,0012	-0,0130	0,0136	0,004761	0,0390	0,0137
P3	30	29,9725	29,9689	-0,0275	-0,0311	0,0056	0,003726	0,0162	0,0107
P4	40	39,9684	39,9698	-0,0316	-0,0302	0,0056	0,008729	0,0160	0,0250
P5	50	49,9827	49,9844	-0,0173	-0,0156	0,0128	0,007095	0,0366	0,0204

Com os valores de repetitividade, plota-se os gráficos de tendências médias e repetitividade unidirecional na ida (Figura 5.30), unidirecional no retorno (Figura 5.31) e bidirecional (Figura 5.32) de acordo com a norma ISO 230-2(1997)

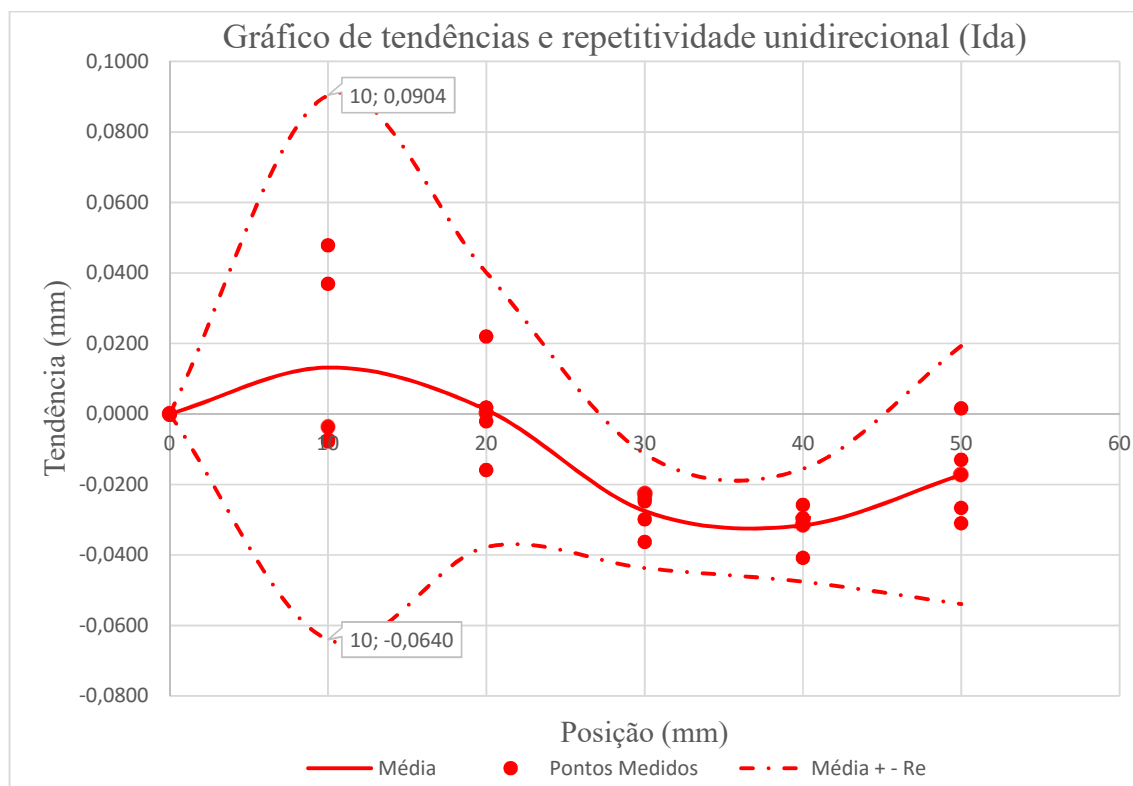


Figura 5. 30: Gráfico de tendências e repetitividade unidirecional na Ida do eixo Y após a compensação.

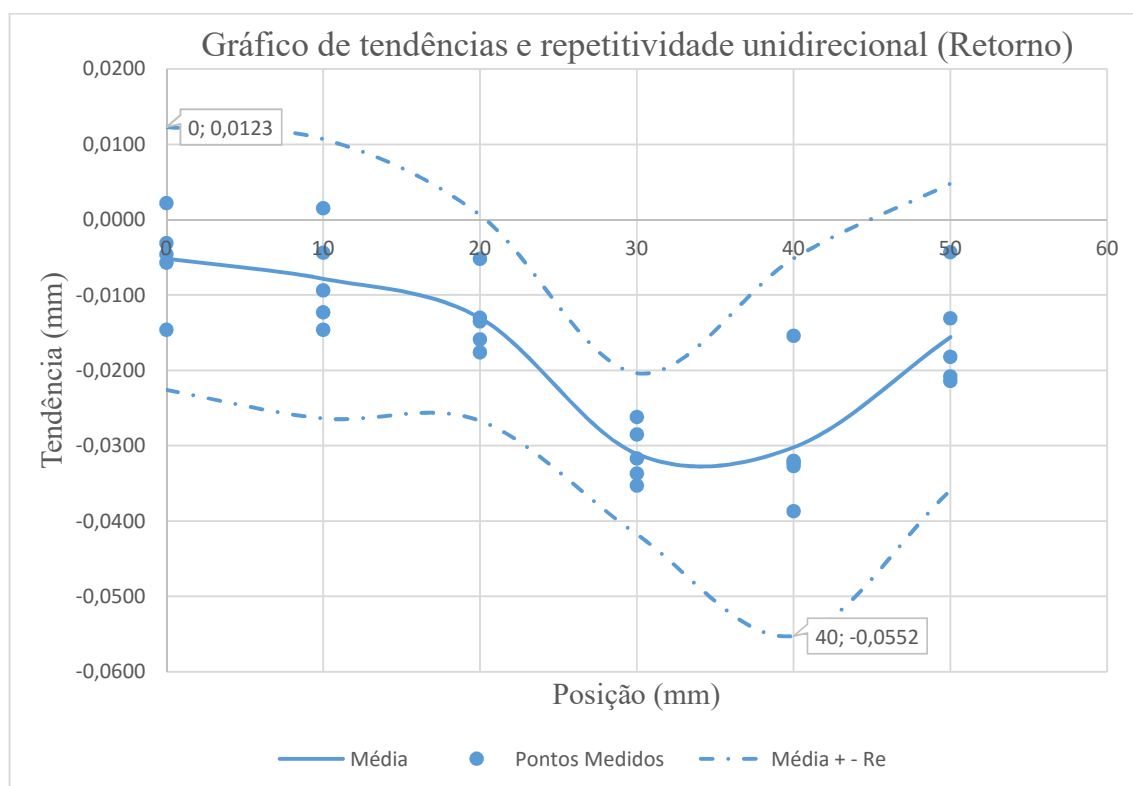


Figura 5. 31: Gráfico de tendências e repetitividade unidirecional no Retorno do eixo Y após a compensação.

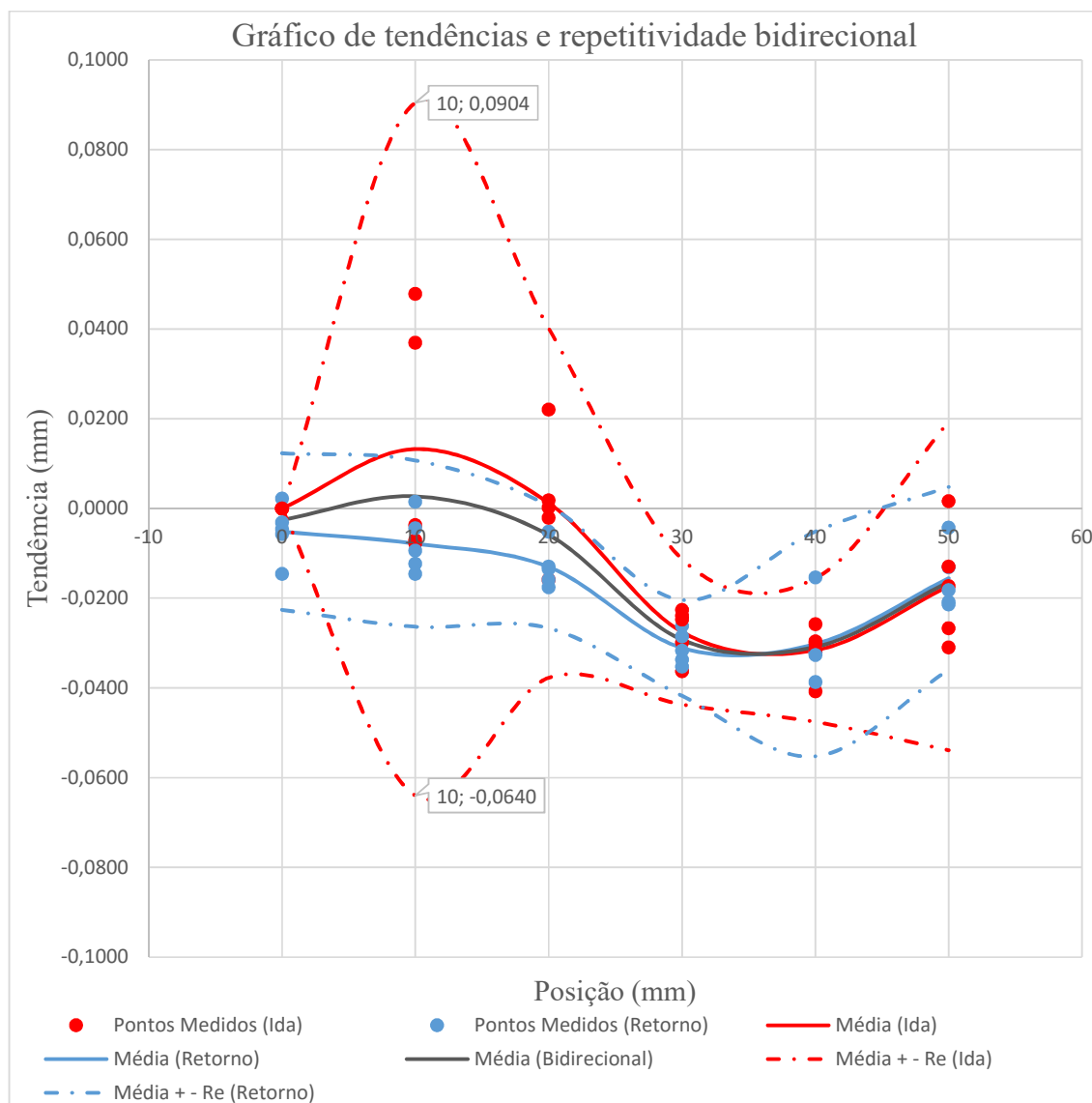


Figura 5. 32: Gráfico de tendências e repetitividade bidirecional no eixo Y após a compensação.

Dessas medições e gráficos pode-se concluir:

Na ida houve um pico de incerteza padrão de 0,0269 mm na posição de 10 mm. Essa incerteza gerou uma repetitividade de $\pm 0,0772$ mm no mesmo ponto. Devido a isso, o erro aleatório do sistema é moderado se comparado com a tendência do sistema, que é de 0,0132 no mesmo ponto, uma compensação via software não trará uma melhora significativa na exatidão, já que a incerteza é o dobro da correção. A faixa de exatidão para esse sistema é de 0,1544 mm, esse valor corresponde a subtração do valor no pico máximo na curva da repetitividade menos o valor do pico mínimo da curva de repetitividade ($0,0904 - (-0,0640)$).

No retorno houve um pico de incerteza padrão de 0,008729 mm na posição de 40 mm. Essa incerteza gerou uma repetitividade de $\pm 0,0250$ mm no mesmo ponto. Devido a isso, o erro aleatório do sistema baixo se comparado com a tendência do sistema, que é de -0,0302 no mesmo ponto, uma compensação via software ainda pode trazer uma melhora significativa na exatidão. A faixa de exatidão para esse sistema é de 0,0675 mm, esse valor corresponde a subtração do valor no pico máximo na curva da repetitividade menos o valor do pico mínimo da curva de repetitividade ($0,0123 - (-0,0552)$).

Avaliando o sistema nas duas direções, a faixa de exatidão para esse sistema é de 0,1544 mm, esse valor corresponde a subtração do valor no pico máximo na curva da repetitividade menos o valor do pico mínimo da curva de repetitividade ($0,0904 - (-0,0640)$).

Para se observar a diferença de erros entre os 4 testes, foi plotado um gráfico com as respectivas tendências (Figura 5.33).

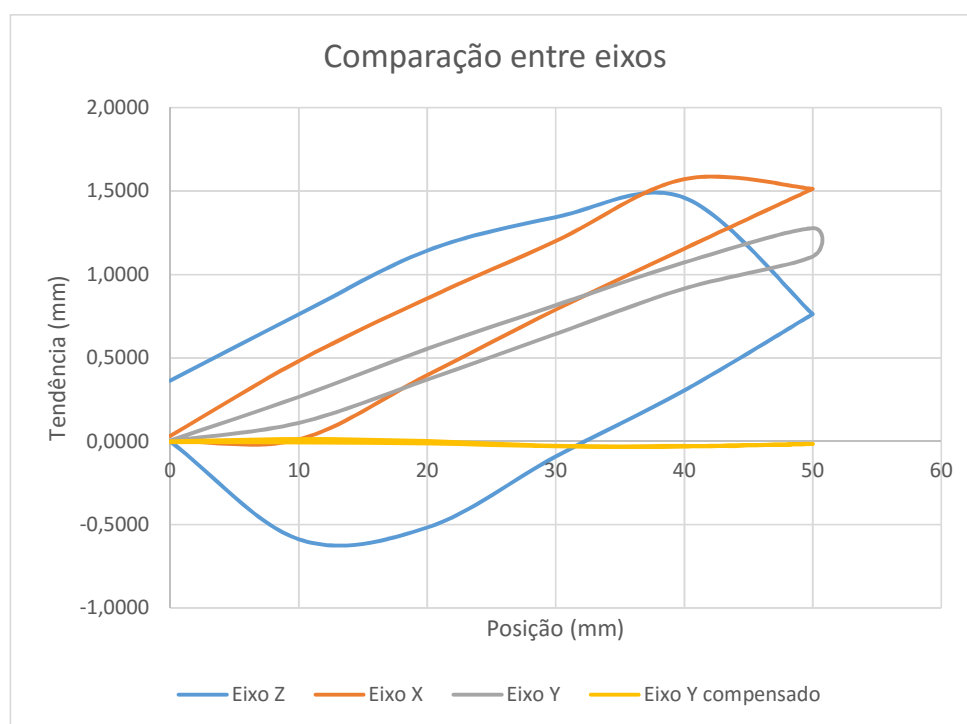


Figura 5. 33: Gráfico comparativos entres os testes de posicionamento.

Pode-se observar que os maiores erros estão no eixo Z, e o eixo Y após a compensação tem erros próximos de zero em comparação com os outros testes.

Na Figura 5.34 tem-se o gráfico comparativo do eixo Y antes de depois da compensação:

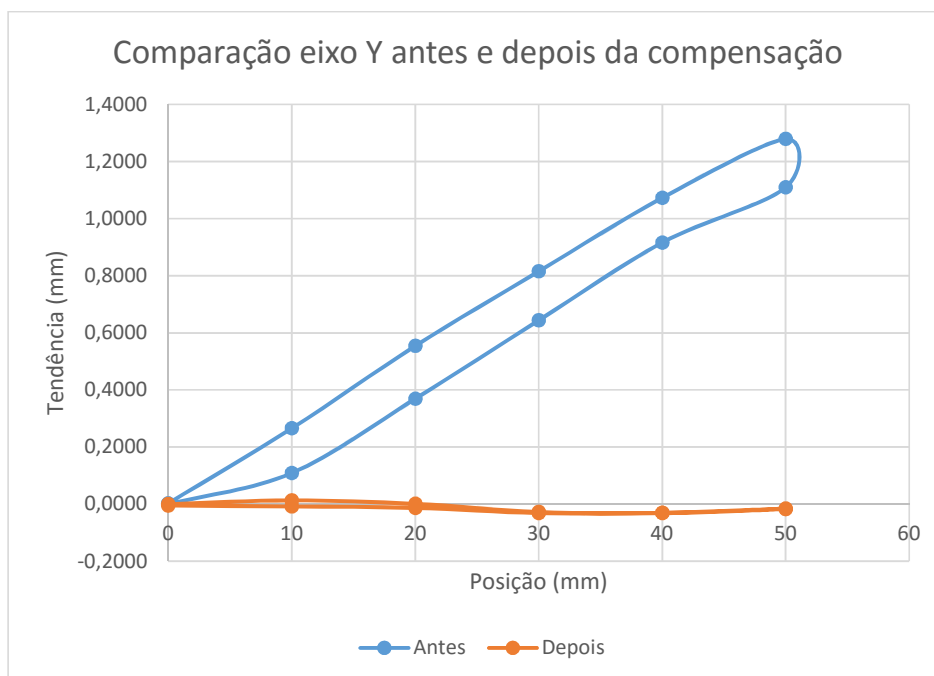


Figura 5. 34: Gráfico comparativo do eixo Y antes e depois da compensação.

5.4 MEDIÇÃO DE ERRO DE ROLAMENTO (ROLL) EM Y

Como foi visto no capítulo 3, os erros de rolamento são uma fonte de incerteza para máquinas ferramentas. Esse erro é medido como a variação angular em torno do eixo X à medida que se movimenta na direção do mesmo eixo. Nesse tópico será feita a medição dessa variação angular.

5.4.1 Equipamentos e materiais

Para realização dessa medição foi utilizado um nível eletrônico Talyvel 5. O sistema de nível eletrônico é constituído por um pêndulo e sistema elétrico capaz de detectar o seu movimento. Segundo Magalhães (2006), o sistema de nível eletrônico é composto por um pêndulo e um transdutor elétrico sensível à posição do pêndulo. O sinal elétrico gerado pelos transdutores é amplificado e usados para operar um display LCD. A Figura 5.35 apresenta um esquema de funcionamento do nível. O instrumento pode ser utilizado para fazer medidas absolutas ou pode funcionar como um comparador. Possui duas unidades: unidade de nível e unidade de display.

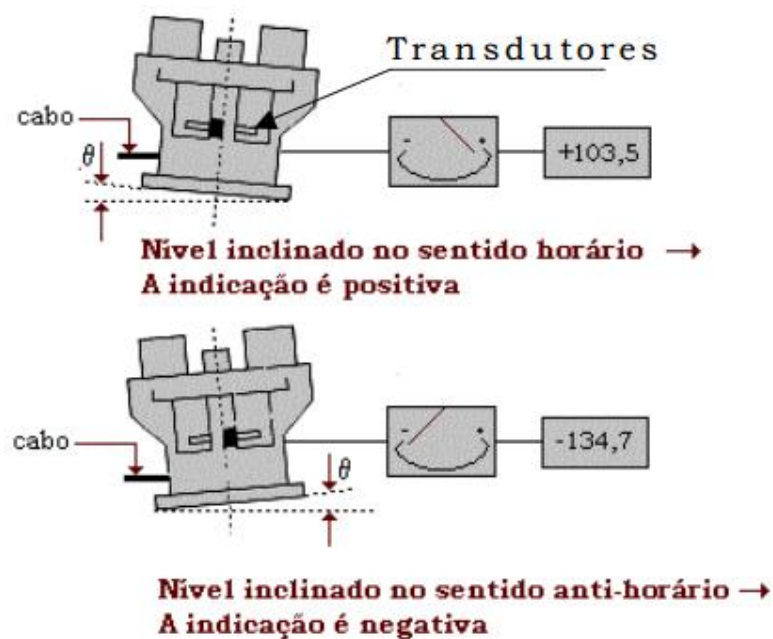


Figura 5. 35: Esquema de funcionamento do nível eletrônico.

5.4.1.a. Talyvel 5

O nível eletrônico Talyvel 5 é composto por uma unidade de nível e uma de display, como pode ser observado na Figura 5.36.



Figura 5. 36: Conjunto do nível Talyvel 5.
Fonte: Taylor Hobson, 2005

De acordo com a fabricante, o Talyvel da Taylor Hobson fornece uma medição versátil e precisa para uma ampla variedade de aplicações industriais, ótica (quando usado com o telescópio de alinhamento Taylor Hobson Micro), civil, marinha e aplicações de engenharia de construção. Eles combinam elevada precisão, estabilidade e repetibilidade com resposta rápida e conveniência operacional. Incorporando seu, compacto e altamente estável, transdutor de pêndulo na Unidade de Nível e sua Unidade de Display, Talyvel 5 fornece leitura rápida e simples do ângulo de inclinação e medição relativa à gravidade. É características principais são (Taylor Hobson, 2005):

- ConFiguração rápida, precisa e simples de gravidade, ou medição de nível;
- Faixa de ajuste de ± 10 segundos disponível no medidor analógico interno
- Estabilidade de medições;
- Precisão de 0,2 arcos de segundo sobre o centro região de medição;
- Leitura em gradiente (mm / m ou 0.001in / in) ou arcos de segundo;
- Unidade de pequeno tamanho, permitindo que o sistema seja usado em locais de difícil acesso;
- RS232 e analógica como saídas padrão da Unidade de Display;
- Botão de amortecimento;

5.4.2. Método de medição de ângulos roll - yry

Nesta medição, o nível eletrônico Talyvel 5 foi montada no eixo Y. O nível foi fixado de modo a ficar na direção do eixo X, dessa forma o ângulo medido será em torno do eixo Y. Como o eixo vai se movimentar na direção de Y, e o ângulo medido vai ser na direção de Y, será medido o ângulo de rotação yry, que é denominado de rolamento. Foi inserido um programa para movimentar o eixo nas posições $P_0 = 0 \text{ mm}$, $P_1 = 5 \text{ mm}$, $P_2 = 10 \text{ mm}$, $P_3 = 15 \text{ mm}$, $P_4 = 20 \text{ mm}$, $P_5 = 25 \text{ mm}$, $P_7 = 30 \text{ mm}$, $P_8 = 35 \text{ mm}$, $P_9 = 40 \text{ mm}$, $P_{10} = 45 \text{ mm}$, $P_{11} = 50 \text{ mm}$, $P_{12} = 55 \text{ mm}$, $P_{13} = 60 \text{ mm}$, $P_{14} = 65 \text{ mm}$, $P_{15} = 70 \text{ mm}$. Na posição 0 o nível foi zerado. Para cada posição que o eixo se movia foi medido o valor do ângulo correspondente na unidade de display. Após o eixo atingir a última posição, o sistema foi retornado a posição inicial e repetido o procedimento de teste. Esse teste foi realizado num total de 5 vezes. Na Figura 5.37, pode-se observar o nível montado de forma que permita a medição dos ângulos roll.

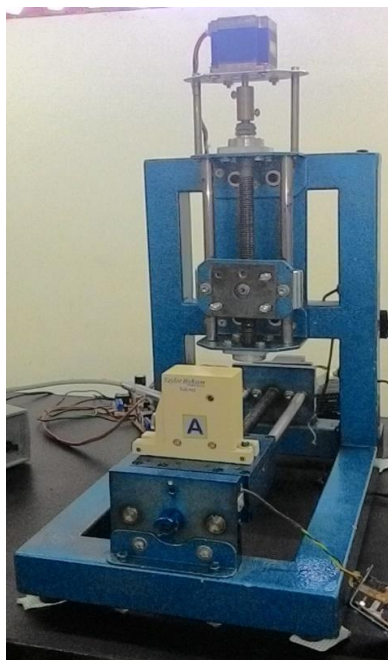


Figura 5. 37: Montagem do nível para medição dos ângulos roll.

Na Tabela 5.24, encontram-se os resultados das medições e as correspondentes médias:

Tabela 5. 24: Ângulos de rolamento medidos.

Ângulos de Rolamento γ_{ry} (arcseg)							
Posição (mm)		Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Média
P1	0	0	-8	-11	11	13	1
P2	5	-20	-15	-12	-12	-8	-13,4
P3	10	-3	3	15	6	13	6,8
P4	15	-1	1	2	25	20	9,4
P5	20	39	29	10	81	-4	31
P6	25	108	112	89	114	-31	78,4
P7	30	-79	-17	70	100	-76	-0,4
P8	35	-10	46	52	23	-64	9,4
P9	40	-88	16	-77	41	-102	-42
P10	45	-6	4	-57	12	-153	-40
P11	50	-118	-72	-92	-87	-63	-86,4
P12	55	-63	-81	-45	-25	-83	-59,4
P13	60	-42	-44	-48	-41	-42	-43,4
P14	65	-68	-72	-60	-60	-67	-65,4
P15	70	-85	-66	-75	-81	-82	-77,8

A partir da média, plotou-se o gráfico (Figura 5.38) de desvios angulares pela posição:



Figura 5. 38: Gráfico de desvios angulares yry.

Com os valores de média e dos pontos, pode-se determinar a incerteza padrão e repetitividade, considerando que o valor ideal do ângulo para cada ponto seja igual a 0 arcseg, e utilizando um t de student de 2,869 para 4 graus de liberdade e probabilidade de 95,45%. Na Tabela 5.25 pode-se observar os valores obtidos:

Tabela 5. 25: Valores de Incerteza Padrão e Repetitividade para os ângulos de rolamento.

Ângulos de Rolamento yry (arcseg)				
Posição (mm)	Média	Incerteza Padrão	Repetitividade	
P1	0	1	10,8	31,1
P2	5	-13,4	4,4	12,8
P3	10	6,8	7,4	21,1
P4	15	9,4	12,1	34,8
P5	20	31	32,5	93,3
P6	25	78,4	62,0	177,7
P7	30	-0,4	82,5	236,6
P8	35	9,4	47,7	136,9
P9	40	-42	65,6	188,1
P10	45	-40	68,7	197,0
P11	50	-86,4	21,1	60,6
P12	55	-59,4	24,6	70,7
P13	60	-43,4	2,8	8,0
P14	65	-65,4	5,3	15,1
P15	70	-77,8	7,5	21,6

A partir desses dados, pode-se plotar o gráfico de repetitividade para os desvios angulares de rolamento (Figura 5.39).

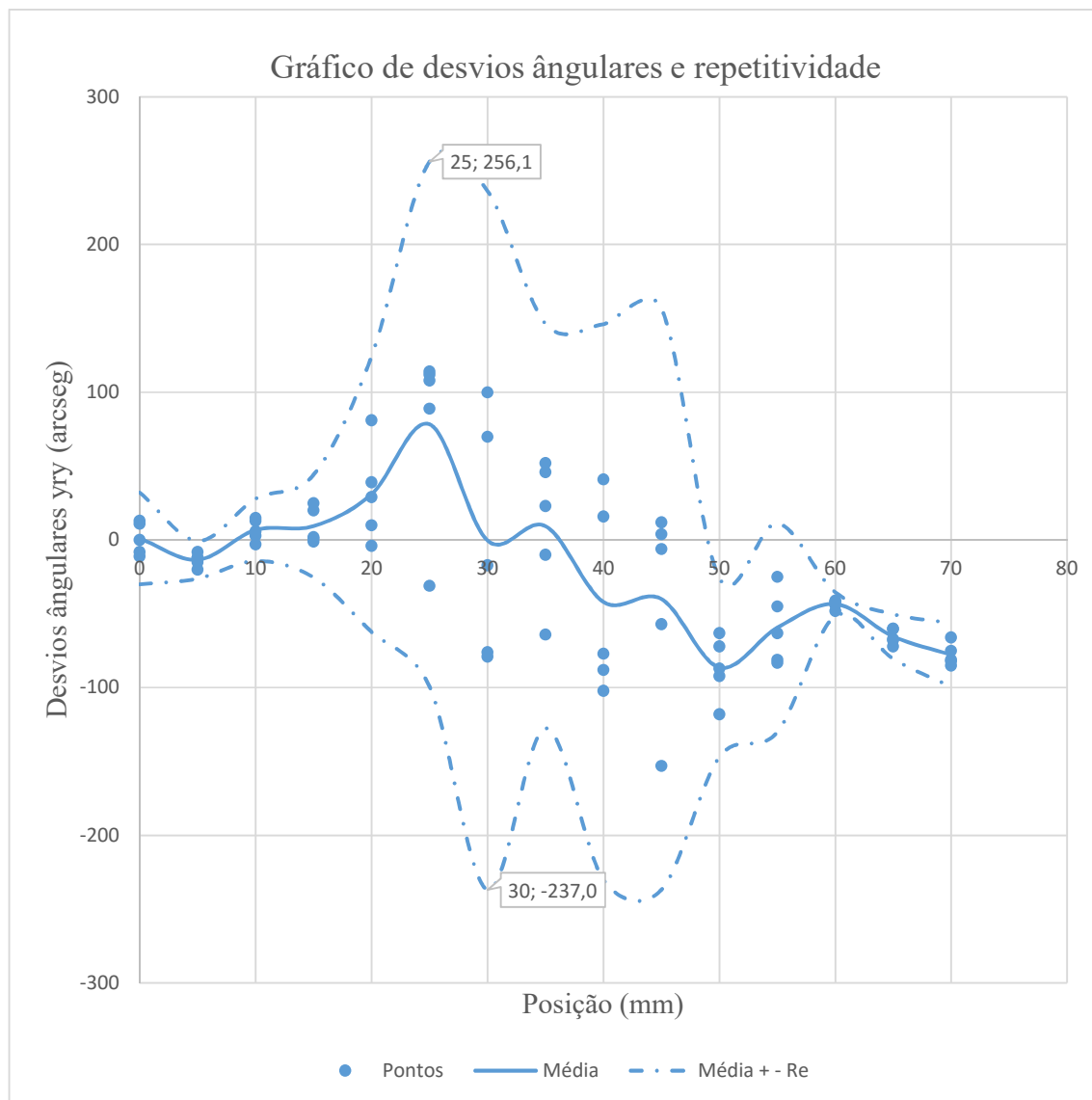


Figura 5. 39: Gráfico de repetitividade para os ângulos de rolamento.

Dessas medições e gráficos pode-se concluir:

Certos pontos apresentam um valor alto de incerteza padrão, chegando ao pico de 82,5 arcseg na posição de 30 mm. Essa incerteza gerou uma repetitividade de $\pm 236,6$ arcseg no mesmo ponto. Devido a isso, o erro aleatório do sistema é altíssimo se comparado com a tendência do sistema, dificilmente pode-se corrigir esses erros através de compensação via

software. A faixa de exatidão para esse sistema é de 493,1 arcseg, esse valor corresponde a subtração do valor no pico máximo na curva da repetitividade menos o valor do pico mínimo da curva de repetitividade ($256,1 - (-237,0)$).

5.5 MEDIÇÃO DE TOMBAMENTO (PITCH) EM Y

Como foi visto no capítulo 3, os erros de tombamento são uma fonte incerteza para máquinas-ferramenta. Esse erro é medido como a variação angular em torno do eixo x a medida que se movimenta na direção eixo y, yrx. Nesse tópico será feita a medição dessa variação angular.

5.5.1 Equipamentos e materiais

Para esse teste foi utilizado o mesmo equipamento relatado no tópico 5.4.1.

5.5.2. Método de medição de ângulos pitch - yrx

Nesta medição, o nível eletrônico Talyvel 5 foi montada no eixo Y. O nível foi fixado de modo a ficar na direção do eixo Y, dessa forma o ângulo medido será em torno do eixo X. Como o eixo vai se movimentar na direção de Y, e o ângulo medido vai ser na direção de X, será medido o ângulo de rotação yrx, que pode ser denominado de tombamento. Foi inserido um programa para movimentar o eixo nas posições $P_0 = 0\text{ mm}$, $P_1 = 5\text{ mm}$, $P_2 = 10\text{ mm}$, $P_3 = 15\text{ mm}$, $P_4 = 20\text{ mm}$, $P_5 = 25\text{ mm}$, $P_7 = 30\text{ mm}$, $P_8 = 35\text{ mm}$, $P_9 = 40\text{ mm}$, $P_{10} = 45\text{ mm}$, $P_{11} = 50\text{ mm}$, $P_{12} = 55\text{ mm}$, $P_{13} = 60\text{ mm}$, $P_{14} = 65\text{ mm}$, $P_{15} = 70\text{ mm}$. Na posição 0 o nível foi zerado. Para cada posição que o eixo se movia foi medido o valor do ângulo correspondente na unidade de display. Após o eixo atingir a última posição, o sistema foi retornado à posição inicial e repetido o procedimento de teste. Esse teste foi realizado num total de 5 vezes.

Na Figura 5.40 pode ser observado a montagem do nível para medição dos erros angulares de tombamento.



Figura 5. 40: Montagem do nível na máquina para medição de erros angulares de tombamento.

Na Tabela 5.26 encontram-se os resultados das medições com suas médias:

Tabela 5. 26: Valores medidos de ângulos pitch.

Ângulos de Tombamento γ_{rx} (arcseg)							
Posição (mm)	Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Média	
P1	0	0	-12	-4	-7	-15	-7,6
P2	5	-20	-6	-28	-26	-21	-20,2
P3	10	-3	0	-1	3	-2	-0,6
P4	15	6	-11	14	-12	-17	-4
P5	20	-30	-36	8	-37	-27	-24,4
P6	25	-78	-75	-73	-74	-76	-75,2
P7	30	-54	-48	-58	-53	-48	-52,2
P8	35	-47	-44	-40	-34	-42	-41,4
P9	40	-52	-43	-41	-37	-39	-42,4
P10	45	-36	-30	-25	-42	-54	-37,4
P11	50	3	-16	-29	-38	-2	-16,4
P12	55	48	22	64	20	61	43
P13	60	61	62	62	54	62	60,2
P14	65	85	86	82	86	88	85,4
P15	70	108	106	102	97	95	101,6

A partir da média, plotou-se o gráfico de desvios angulares pela posição (Figura 5.41):

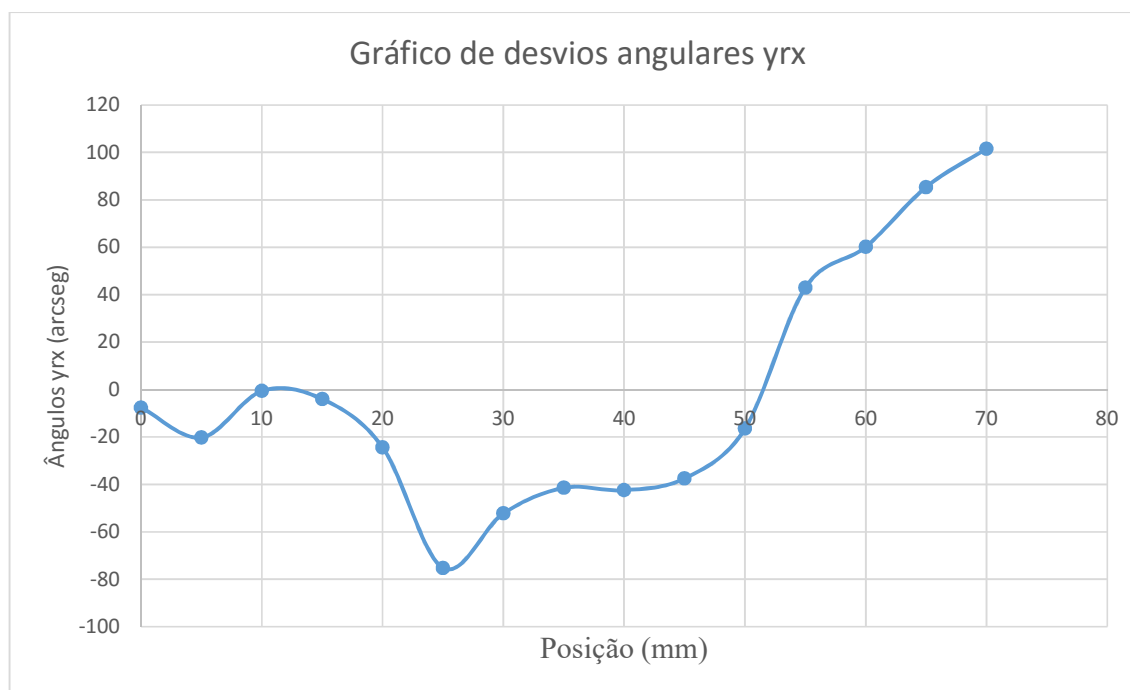


Figura 5. 41: Gráfico de desvios angulares yrx.

Com os valores de média e dos pontos, pode-se determinar a incerteza padrão e repetitividade, considerando que o valor ideal do ângulo para cada ponto seja igual a 0 arcseg, e utilizando um t de student de 2,869 para 4 graus de liberdade e probabilidade de 95,45%. Os valores calculados podem ser observados na Tabela 5.27:

Tabela 5. 27: Valores de Incerteza Padrão e Repetitividade para os ângulos pitch.

Ângulos de Tombamento yrx (arcseg)				
Posição (mm)	Média	Incerteza Padrão	Repetitividade	
P1	0	-7,6	6,0	17,3
P2	5	-20,2	8,6	24,7
P3	10	-0,6	2,3	6,6
P4	15	-4	13,3	38,1
P5	20	-24,4	18,6	53,3
P6	25	-75,2	1,9	5,5
P7	30	-52,2	4,3	12,2
P8	35	-41,4	4,9	14,0
P9	40	-42,4	5,8	16,7
P10	45	-37,4	11,3	32,3
P11	50	-16,4	17,4	49,9
P12	55	43	21,0	60,2
P13	60	60,2	3,5	10,0
P14	65	85,4	2,2	6,3
P15	70	101,6	5,6	16,1

A partir desses dados, pode-se plotar o gráfico de repetitividade para os desvios angulares de tombamento (Figura 5.42).

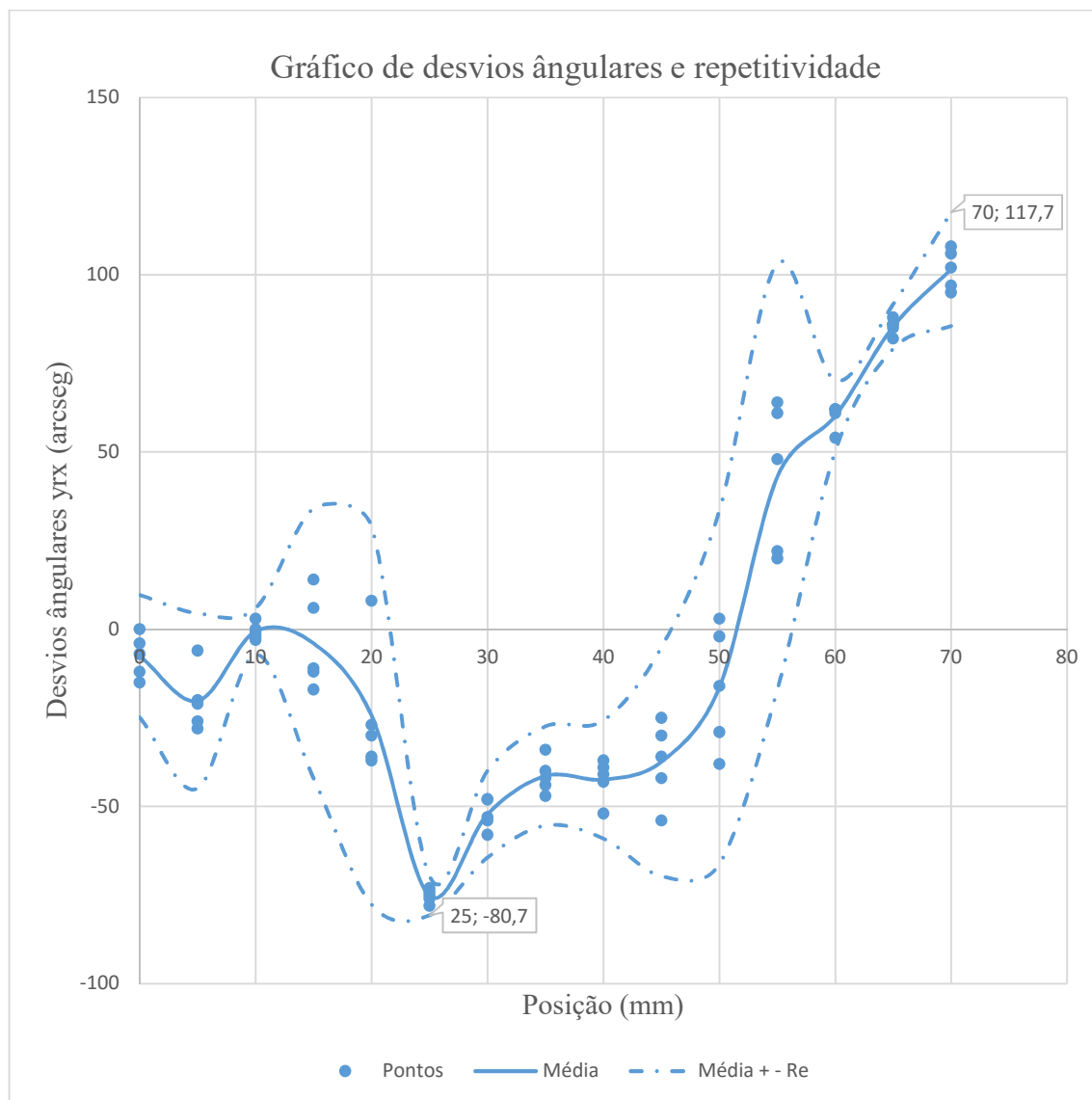


Figura 5. 42: Gráfico de Repetitividade para os ângulos de tombamento.

Dessas medições e gráficos pode-se concluir:

Nesse caso os valores de incerteza padrão foram menores do que no rolamento, chegando ao pico de 21,0 arcseg na posição de 55 mm. Essa incerteza gerou uma repetitividade de $\pm 60,2$ arcseg no mesmo ponto. Devido a isso, o erro aleatório do sistema é moderado se comparado com a tendência do sistema, dificilmente pode-se corrigir esses erros através de

compensação via software. A faixa de exatidão para esse sistema é de 198,4 arcseg, esse valor corresponde a subtração do valor no pico máximo na curva da repetitividade menos o valor do pico mínimo da curva de repetitividade $(117,7 - (-80,7))$, de acordo com a norma ISO 230-2(1997).

5.6 MEDIÇÃO DE RETILINEIDADE (RETITUDE) EM Y

Outra fonte de incerteza para máquinas ferramentas são os erros de retilineidade (retitude). Neste trabalho foi utilizado o nível eletrônico para determinar o erro de retilineidade (retitude) no eixo z com movimentação no eixo y, ytz. Na Figura 5.43 pode ser observado um esquema da variação de retitude.

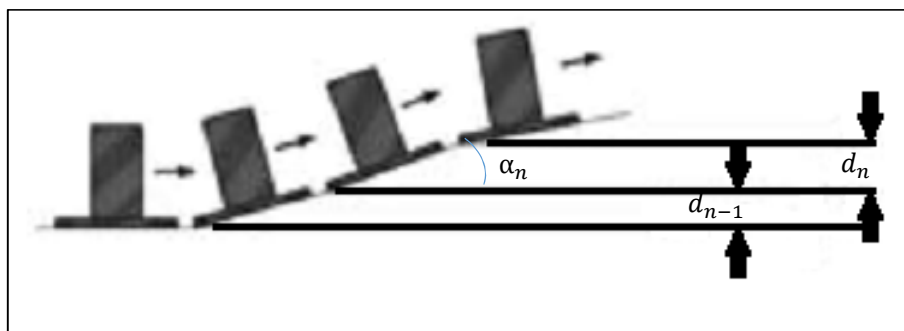


Figura 5. 43: Esquema da variação de retitude.

Pode-se medir o erro de retilineidade pela seguinte equação:

$$d_n = d_{n-1} + L \cdot \text{sen } \alpha_n \quad (5. 3)$$

Sendo:

d_n erro de retilineidade em um ponto n.

d_{n-1} erro de retilineidade no ponto anterior

L distância entre as medições

α_n desvio angular medido

Para o erro de retilidade em ytz, o ângulo α_n é o mesmo ângulo do desvio de tombamento em yrx. Como os ângulos de yrx já foram medidos, não será necessária nenhuma medição para o cálculo da retilidade.

5.6.1. Método de cálculo da retilidade em ytz

O cálculo da retilidade será feito utilizando os valores de yrx e convertendo esses valores para o erro de retilidade em cada ponto, de acordo com a equação (5.1) usando a primeira posição $P_0 = 0$ mm como tendo um erro $d_0 = 0$ mm. Na Tabela 5.28 encontram-se os valores calculados de retilidade para cada posição:

Tabela 5. 28: Valores calculados de retitude.

Retilidade ytz							
Posição		Teste 1	Teste 2	Teste 3	Teste 4	Teste 5	Média
P1	0	0,00000	-0,01667	-0,00556	-0,00972	-0,02083	-0,01056
P2	5	-0,02778	-0,02500	-0,04445	-0,04584	-0,05000	-0,03861
P3	10	-0,03195	-0,02500	-0,04584	-0,04167	-0,05278	-0,03945
P4	15	-0,02361	-0,04028	-0,02639	-0,05834	-0,07639	-0,04500
P5	20	-0,06528	-0,09028	-0,01528	-0,10973	-0,11390	-0,07889
P6	25	-0,17362	-0,19445	-0,11667	-0,21251	-0,21945	-0,18334
P7	30	-0,24862	-0,26112	-0,19723	-0,28612	-0,28612	-0,25584
P8	35	-0,31390	-0,32224	-0,25279	-0,33335	-0,34446	-0,31335
P9	40	-0,38613	-0,38196	-0,30973	-0,38474	-0,39863	-0,37224
P10	45	-0,43613	-0,42363	-0,34446	-0,44308	-0,47363	-0,42419
P11	50	-0,43196	-0,44586	-0,38474	-0,49586	-0,47641	-0,44697
P12	55	-0,36529	-0,41530	-0,29585	-0,46808	-0,39169	-0,38724
P13	60	-0,28057	-0,32918	-0,20973	-0,39307	-0,30557	-0,30363
P14	65	-0,16251	-0,20974	-0,09585	-0,27363	-0,18335	-0,18502
P15	70	-0,01252	-0,06253	0,04581	-0,13892	-0,05141	-0,04391

A partir da média, plotou-se o gráfico de desvios angulares pela posição. O gráfico pode ser observado na Figura 5.44.



Figura 5. 44: Gráfico de retilidade ytz.

Com os valores de média e dos pontos, pode-se determinar a incerteza padrão e repetitividade, considerando que o valor ideal do ângulo para cada ponto seja igual a 0 arcseg, e utilizando um t de student de 2,869 para 4 graus de liberdade e probabilidade de 95,45%. Na Tabela 5.29 podem ser visto os valores calculados.

Tabela 5. 29: Valores de Incerteza Padrão e Repetitividade para a retilidade.

Erros de retilidade ytz				
Posição		Média	Incerteza Padrão	Repetitividade
P1	0	-0,0106	0,0084	0,0240
P2	5	-0,0386	0,0114	0,0327
P3	10	-0,0394	0,0111	0,0317
P4	15	-0,0450	0,0223	0,0640
P5	20	-0,0789	0,0404	0,1160
P6	25	-0,1833	0,0413	0,1184
P7	30	-0,2558	0,0366	0,1049
P8	35	-0,3133	0,0358	0,1026
P9	40	-0,3722	0,0355	0,1019
P10	45	-0,4242	0,0482	0,1383
P11	50	-0,4470	0,0429	0,1230
P12	55	-0,3872	0,0636	0,1824
P13	60	-0,3036	0,0671	0,1925
P14	65	-0,1850	0,0650	0,1866
P15	70	-0,0439	0,0679	0,1949

Na Figura 5.45 pode ser observado o gráfico de repetitividade para a retilidade calculada:

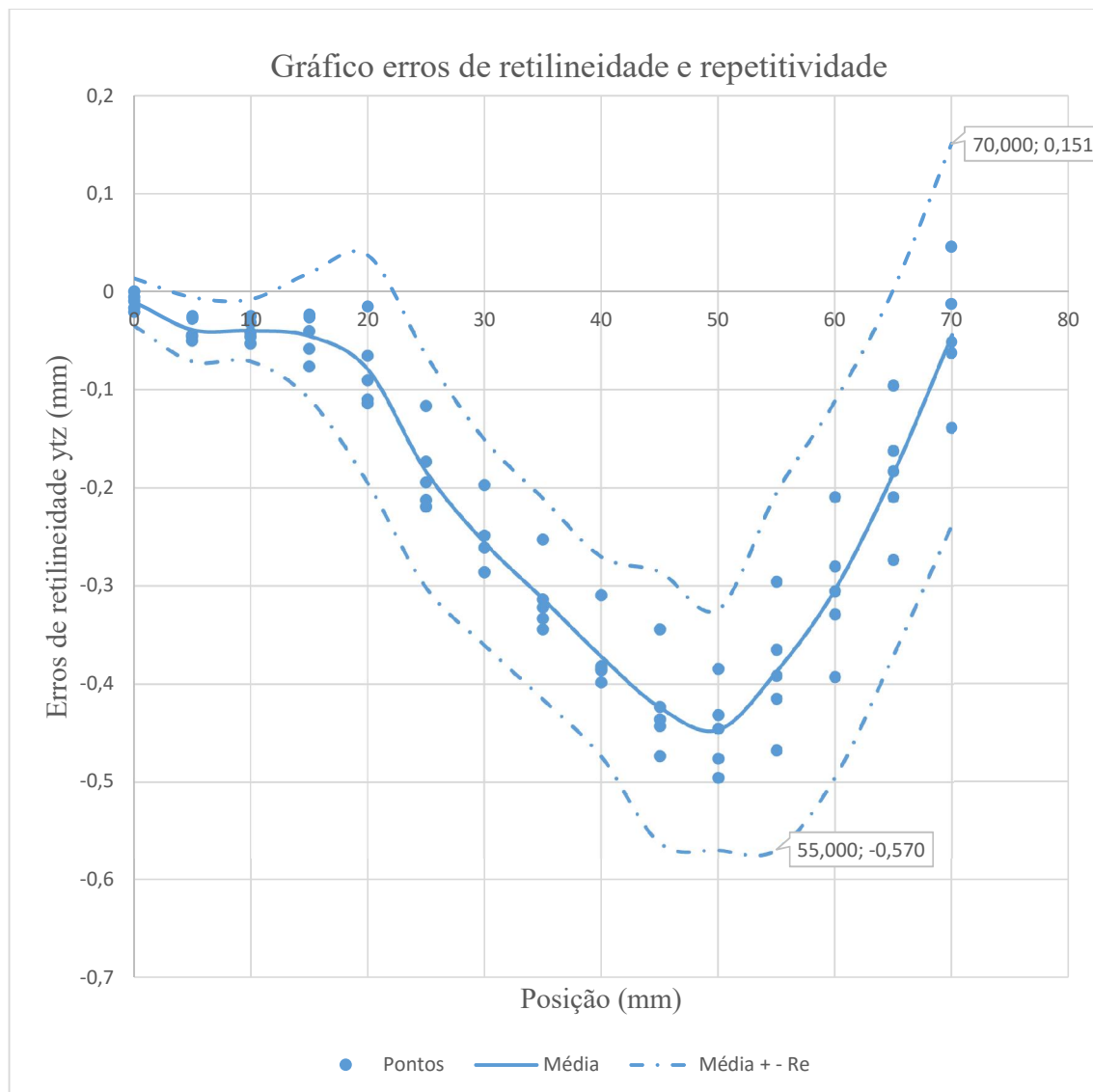


Figura 5. 45: Gráfico de repetitividade para retilineidade.

Dessas medições e gráficos pode-se concluir:

O maior valor de incerteza padrão foi de 0,0679 mm na posição de 70 mm. Essa incerteza gerou uma repetitividade de $\pm 0,1949$ mm no mesmo ponto. Devido a isso, o erro aleatório do sistema é moderado se comparado com a média do sistema, é possível que uma compensação por software consiga uma melhora na significativa na exatidão. A faixa de exatidão para esse sistema é de 0,721 mm, esse valor corresponde a subtração do valor no pico máximo na curva da repetitividade menos o valor do pico mínimo da curva de repetitividade ($0,151 - (-0,570)$). Pode-se observar que a medida que o eixo avança, a retilineidade vai ficando

mais negativa, porém na posição 50 mm a retilidade volta a ficar positiva. O comportamento se assemelha a curva de deformação de uma viga simplesmente apoiada com carga no centro. Esse comportamento deve ser devido a deformação no eixo a medida que a carga se aproxima do seu centro.

5.7 CONCLUSÕES

Com os testes realizados nesse capítulo, pode-se observar que o kit CNC apesar de ter uma boa eficiência, não consegue reconhecer os erros internos da máquina e corrigi-los, devido a não possuir um circuito de malha fechada. Portanto, para conseguir uma boa exatidão nesse kit, é necessária uma máquina construída com ótima precisão, algo difícil de se conseguir caso seja requerido um equipamento de baixo custo, que é o objetivo desse sistema. Outra alternativa é fazer uma compensação dos erros internos da máquina via software, porém isso necessita de equipamentos de medição precisos e também caros.

Para um objetivo acadêmico de avaliar os erros na máquina, esse kit foi excelente. Pode-se observar que no eixo Y conseguiu melhorar a exatidão do sistema de 1,3215 mm para 0,1544 mm, após a compensação. Também pode-se observar a possibilidade de realizar a mesma compensação no eixo X, pois apresenta erros sistemáticos muito maiores que os aleatórios. No eixo Z, foram constatados que os erros aleatórios e incerteza padrão estão muito altos. Uma hipótese para isso, é que as colunas que apoiam o motor em cima do eixo estão se deformando muito a medida que o motor se move, e o seu acoplamento não se encontra muito bom. Seria interessante mudar o acoplamento do motor, de modo que se consiga uma melhor fixação. Outra hipótese é o tipo de fuso utilizado, do tipo triangular, o qual é mais susceptível a folgas e deformações mecânicas.

Na medida dos ângulos de rolamento e tombamento, observou-se que o rolamento possui um comportamento mais aleatório do que o tombamento. Isto indica a existência de folgas nas guias o que indica a necessidade de uma melhoria no projeto e na fabricação dos componentes das guias da máquina. Diferentemente dos erros de posicionamento, as compensações dos erros angulares, por exemplo erro de tombamento, não são fáceis de serem compensados. Para isso, é necessária a medição de todos os erros paramétricos e utilizar a cinemática de corpo rígido para determinar o mapeamento dos erros volumétricos da máquina, como destacado por Silva (2002).

Esses testes tiveram o resultado acadêmico esperado, de se avaliar a performance de uma máquina após a realização de um *retrofitting* utilizando um Kit de baixo custo.

CAPÍTULO VI

CONCLUSÃO

6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nesse trabalho foi realizado o *retrofitting* de uma máquina de três eixos a partir de um Kit CNC de baixo custo comercializado no Brasil. Foi observado que o motor acoplado no eixo Z não apresentou uma boa rigidez, o motor apresentou vibração nas colunas de apoio, que podem ser observadas na Figura 4.11. Outro problema é que os motores de passo esquentam muito e necessitam utilizar algum sistema de refrigeração.

Após a realização do *retrofitting*, foram realizados os testes experimentais para medir os erros de posicionamento, angulares e histerese dos eixos de movimento da máquina. Os testes foram realizados utilizando-se um sistema Laser XL-80 e um nível Talyvel 5.

Pode notar-se que o eixo Z tem a maior gama de incerteza padrão e repetitividade nos pontos medidos. Em contraste, o eixo Y foi o único com a menor faixa de valores para a incerteza padrão e repetitividade e menor erro médio. Isto pode ser explicada por vários fatores tais como o tipo de fuso, o alinhamento do eixo, a qualidade de fabricação, o desgaste, a folga, a deformação ao longo do movimento.

Outro teste realizado foi a compensação de erros no eixo Y, para verificar a possibilidade de redução dos erros sistemáticos no sistema. Neste teste, houve uma diminuição significativa nos erros de posicionamento, incerteza padrão e repetitividade. Antes do ensaio o maior erro foi 1,2784 mm, após a compensação o maior erro diminuiu para uma faixa de -0,0316 mm. Pode ser visto a partir do gráfico mostrado no capítulo 5, que o sistema deixou o comportamento linear visto antes, e começou a comportar-se de forma mais aleatória. Isto pode ser explicado pela redução de erros sistemáticos, deixando uma maior influência de erros aleatórios no sistema. Provavelmente seria difícil fazer outra compensação, sendo possível melhorar a precisão apenas com mudanças estruturais na máquina.

Ao longo dessas medições, houve uma incerteza padrão muito alta no eixo Z, é necessário investigar as possíveis causas. Talvez seja devido ao tipo de acoplamento, que não esteja bem fixo. Novos testes seriam necessários para identificar a causa e corrigi-los. É importante ressaltar que a temperatura dos motores não foi verificada ao longo dos testes, e

talvez essa temperatura alta cause deformações térmicas e afete os resultados durante um tempo maior de testes.

No caso da medição dos ângulos de tombamento e retilineidade, é observado a partir do gráfico, mostrado no capítulo 5, um comportamento semelhante a uma deformação em uma viga simplesmente apoiada com carga central. Uma hipótese, é que está se medindo a deformação no eixo ao longo da movimentação da base. Na posição de 50 mm, ocorreu uma deformação no eixo de aproximadamente -0,45 mm. Em uma máquina de precisão, esse erro é consideravelmente significativo, portanto é necessário verificar se a estrutura deveria apresentar uma maior rigidez.

No caso de ângulos rolamento, os valores de ângulos variam entre cerca de -90 e 80 arcos de segundo. Isto implica uma variação máxima de 0.025 °. O comportamento dos erros de rolamento foi variável, e devem ter sido afetados pela qualidade superficial do fuso e das guias. As variações dos ângulos são determinadas apenas pela estrutura da máquina, não sendo afetadas pelo controle CNC. Mas o CNC serve para medir esses erros em pontos específicos com mais precisão.

É importante ressaltar que esses testes não foram realizados utilizando-se diferentes velocidades dos motores, e isso pode afetar no resultado.

Por fim, pode-se concluir que essa adaptação da máquina atendeu as expectativas, pois possibilitou a realização de diversos testes metroológicos e constatou-se que existem muitos aspectos para serem investigados em trabalhos de pesquisa futuros. Pode-se investigar tanto como as modificações implementadas na máquina afetaram os parâmetros medidos, como também, investir na compensação dos erros nos demais eixos da máquina. Este projeto também tem a vantagem de cobrir várias disciplinas, tais como automação e controle, a linguagem de usinagem CNC, metrologia, instrumentação e elementos de máquinas. Isso tudo foi realizado com baixo custo e facilidade, e a máquina pode ser utilizada em aulas de metrologia para demonstrar conceitos como exatidão, precisão, repetitividade e compensação de erros ou em aulas de usinagem para demonstração da linguagem CNC. Em outra época, os custos para realizar pesquisas desse tipo seriam proibitivos. A seguir estão sugestões para futuros trabalhos:

6.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realização da compensação dos erros de posicionamento nos eixos X e Z;

- Realização dos testes em mais pontos;
- Realização dos testes em dias diferentes;
- Realização dos testes para diferentes valores de velocidades dos eixos, para se verificar a variação da exatidão do sistema em relação as velocidades.
- Realização de testes medindo-se a temperatura dos motores, para se verificar a variação da exatidão do sistema em relação a temperatura.
- Tentar encontrar a possível fonte de incerteza no eixo Z;
- Realizar teste de planeza no plano XY;
- Realizar teste de retilidade (retitude) no eixo X;
- Realizar testes no eixo X utilizando ar comprimido nas guias, e comparar com os resultados anteriores;
- Verificar a possibilidade de realização da compensação dos erros automaticamente via o software MACH3 ou outro software próprio;
- Verificar a possibilidade de compensação de erros encontrados de acordo com a variação de temperatura;
- Verificar a possibilidade de aumento do comprimento do eixo X, de forma a possibilitar testes de circularidade com Ball Bar;
- Confecção de um sistema de encoders lineares para medição de posicionamento;
- Verificar a possibilidade de modificação do controle para malha fechada com o auxílio dos encoders, se possível utilizando a mesma interface ou trocando apenas a interface;
- Testes com motores de passo mais potentes, de até 4 A;
- Testar utilização do Probe projetado por Nóbrega (2011);
- Utilizar alguma ferramenta de usinagem no eixo Z, como uma furadeira, realizar furos em um corpo de prova para distâncias definidas ao longo do eixo Y e medir a exatidão e precisão da usinagem na MMC.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Albertazzi, A; Souza, A. R. 2008 “Fundamentos de metrologia científica e industrial”. Manole. Barueri, SP.

Brenes, Luis A. R. 1994. Modernização e análise dinâmica de uma máquina-ferramenta NC. *Dissertação de mestrado*. Florianópolis : UFSC, 1994.

Cavalcanti, Washington M; Soares, Christianne L. 2013. Micro e nano manufatura: uma revisão de literatura. *Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia*. 2013.

Duan, Tie; et al. 2008. Real-Time, CNC Machine Tool Control with Linux: A Senior Design Project at MUSE. *ASEE*. 2008.

GUM; 1995, “*Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*”. ISO Guide, First Edition, Switzerland.

Guo, Qianjian; et al. 2014. Application of information fusion to volumetric error modeling of CNC machine tools. *International Journal of Advance Manufactory Technology*. London : Springer, 2014.

Gupta, Pradeep K; Sharma, Kunal; Tripathi, Vibhu. 2013. Economical Analysis and Upgradations of existing machine tools through *retrofitting*. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*. s.l. : IJMERR, 2013. Vol. 4.

Groover, Mikell P. 2010. "Automação industrial e sistemas de manufatura". *Pearson*. São Paulo, SP

Hobbycnc. 2016 ”Manual Driver SMC-U-ADV”.
<<http://www.hobbycnc.com.br/site/index.php?aid=65>>. Acessado em 10 de janeiro de 2016

Hobbycnc. 2016 “Manual Interface BPC-STD”.

<<http://www.hobbycnc.com.br/site/index.php?aid=81> >. Acessado em 10 de janeiro de 2016

ISO. 1997. Test code for machine tools-Part 2: Determination of accuracy and repeatability of numerically controlled axes. 1997. Vols. ISO 230-2.

Jiang, Zhouxiang; et al. 2015. On-machine measurement of location errors on five-axis machine tools by machining tests and a laser displacement sensor. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. s.l. : Elsevier, 2015. Vol. 95.

Khan, Abdul W; Chen, Wuyi. 2010. *A methodology for systematic geometric error compensation in five-axis machine tools*. Londres : Springer, 2010.

Komatsu, H. 1991 “Interferometry: principles and applications of two-beam and multiplebeam interferometry”. Institute for Materials Research. Tohoku University. Sendai, Japan

Lee, Kwang-II; Lee, Jae-Chang; Yang, Seung-Han. 2013. Volumetric compensation for precision manufacture through a standard CNC controller. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 2013. Vol. 66.

Longstaff, Andrew P; Fletcher, Simon; Myers, Alan. 2001. The optimal design of a measurement system to measure the geometric errors of linear axes. *Centre for Precision Technologies*. University of Huddersfield. UK.

Magalhães, R. C. A. de. 2006, “Sistema para medição de erro de planicidade”. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Paulo. USP, São Paulo, SP, Brasil.

Maeder, Willy; et al. 2002. Standardisation of the Manufacturing Process: the IMS STEP-NC project. *Proceedings of the IPLnet Workshop*. Saas-Fee : s.n., 2002.

Minhat, M.; et al. 2014. *Retrofitting a conventional lathe to a digital intelligence system*. AICS. Bandung : s.n., 2014.

Mishra, Bhupendra. 2011. Neural Network for the Prediction of Retrofitting/Reconditioning/Upgradation cost of CNC Machines. *International Journal of Engineering Science and Technology*. 2011. Vol. 3.

Nóbrega, Luiz H. M. S. 2011. Projeto e desenvolvimento de um apalpador touch trigger de baixo custo para medição por coordenadas. *Dissertação de mestrado*. UFPB. João Pessoa.

Orrego, Roxana M. M; Giacomo, Benedito D; Abackerli, Alvaro J. 2000. Fontes de Erros em Metrologia a Três Coordenadas: Considerações Gerais. *Revista de Ciência e Tecnologia*. Piracicaba : Editora UNIMEP, 2000. Vol. 8, 16.

Parmar, Prakash N; Gondalia, Vikas R; Mehta, Niraj C. 2014. Review on Advance Automation of Convetional Lathe Machine. *IJEDR*. 2014. Vol. 2.

Rolim, Tiago L. 2003. *SISTEMATICA INDICADORA DE MÉTODO PARA CALIBRAÇÃO DE MÁQUINA DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS*. João Pessoa : Tese (doutorado) - UFPB/CT, 2003.

Renishaw, 2007. “XL-80 laser system brochure”
<<http://resources.renishaw.com/en/details/brochure-xl-80-lasersystem--59031>>.

Silva, Verilton N. 2011. Projeto em guias aerostáticas usadas em engenharia de precisão. *Dissertação de mestrado*. João Pessoa : UFPB, 2011.

Staroveski, Tomislav; et al. 2011. Experimental Machine Tool for Process Monitoring and Control Systems Reserach. *DAAM*. Vienna : s.n., 2011. Vol. 22.

Taylor Hobson. 2005. “Talyvel 5, Operator’s Handbook.” Spectrum Metrology Ltd.

Xiang, Sitong; Altintas, Yusuf. 2016. Modeling and compesation of volumetric errors for five-axis machine tools. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. s.l. : Elsevier, 2016. Vol. 101.

Xiang, Sitong; Yang, Jianguo. 2014. Using a double ball bar to measure 10 position-dependent geometric errors for rotatory axes on five-axes machine tools. *Internacional Journal of Advance Manufactory Technology*. London : Springer, 2014. Vol. 75.

Xu, Yanwei; et al. 2015. Active precision design for complex machine tools: methodology and case study. *International Journal of Advance Manufactory Technology*. London : Springer, 2015. Vol. 80.

APÊNDICE

Tabela A. 1: Códigos G interpretados pelo MACH3:

G-code	Functions	G-code	Functions
G0	Posicionamento rápido	G53	Movimento da máquina no sistema de coordenadas absolutas
G1	Interpolação linear	G54 a G59	Zeragem dos eixos fora do zero fixo de 1(G54) a 6(G59).
G2	Interpolação circular no sentido horário	G61	Posicionamento exato
G3	Interpolação circular no sentido anti-horário	G64	Modo de velocidade constante
G4	Temporização (Dwell)	G73	Ciclo de furação com quebra cavaco
G10	Determinação da origem do sistema de coordenadas	G80	Cancela ciclo com quebra cavaco
G12	Furo circular no sentido horário	G81	Ciclo de furação contínua
G13	Furo circular no sentido anti-horário	G82	Ciclo de furação contínua com tempo de permanência
G15	Define movimento em coordenadas polares em G1 e G0	G83	Ciclo de furação com descarga de cavaco
G16	Cancela movimento em coordenadas polares em G1 e G0	G84	Ciclo de roscamento com Macho (rosca a direita)
G17	Seleciona plano XY	G85	Ciclo de mandrilamento com retração em avanço programado
G18	Seleciona plano XZ	G86	Ciclo de mandrilamento com retração em avanço rápido
G19	Seleciona Plano YZ	G87	Ciclo de mandrilamento para rebaixo interno
G20	Unidades em polegadas	G88	Ciclo de mandrilamento com retorno manual
G21	Unidades em milímetros	G89	Ciclo de mandrilamento com Dwell e retração em avanço programado
G28	Retorna a posição zero máquina	G90	Sistema de coordenadas absolutas
G30	Retorna a posição zero máquina	G91	Sistema de coordenadas incrementais
G28.1	Eixo de referência	G92	Compensação das coordenadas e conFigura parâmetros
G31	Straight Probe	G92.1	Reinicia a compensação e conFiguração dos parâmetros G92
G40	Cancelamento da compensação do raio da ferramenta	G92.2	Reinicia a compensação G92 mas deixa os parâmetros iguais
G41	Compensação do raio da ferramenta (esquerda)	G92.3	Retorna G92 dos parâmetros
G42	Compensação do raio da ferramenta (direita)	G93	Avanço dado em tempo inverso
G43	Compensação do comprimento da ferramenta (positivo)	G94	Avanço dado em minutos
G49	Cancela compensação do comprimento da ferramenta	G95	Avanço por revolução
G50	Retorna todos os fatores de escalas para 1.0	G98	Retorno ao posicionamento inicial durante os ciclos fixos
G51	ConFigura os fatores de escala para entrada de dados	G99	Retorno ao plano R durante os ciclos fixos

Anexo A.1

Programa movimentação eixo X:

G1 X10

P5

G1 X20

P5

G1 X30

P5

G1 X40

P5

G1 X50

P5

G1 X40

P5

G1 X30

P5

G1 X20

P5

G1 X10

P5

G1 X00

Anexo A.2

Programa movimentação eixo Z:

G1 Z10

P5

G1 Z20

P5

G1 Z30

P5

G1 Z40

P5

G1 Z50

P5

G1 Z40

P5

G1 Z30

P5

G1 Z20

P5

G1 Z10

P5

G1 Z00

Anexo A.3

Programa movimentação eixo Y:

G1 Y10

P5

G1 Y20

P5

G1 Y30

P5

G1 Y40

P5

G1 Y50

P5

G1 Y55

P5

G1 Y50

P5

G1 Y40

P5

G1 Y30

P5

G1 Y20

P5

G1 Y10

P5

G1 Y00

Anexo A.4

Programa movimentação eixo Y Compensado:

G1 Y9,89

P5

G1 Y19,63

P5

G1 Y29,36

P5

G1 Y39,08

P5

G1 Y48,89

P5

G1 Y55

P5

G1 Y48,72

P5

G1 Y38,72

P5

G1 Y29,18

P5

G1 Y19,45

P5

G1 Y19,73

P5

G1 Y-0,003