

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**PADRÕES CORPORIFICADOS E A
TECNOLOGIA DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS INOVANDO A
QUALIFICAÇÃO GEOMÉTRICA DE CENTROS DE USINAGEM**

TESE SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE
SANTA CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA

ANDRÉ ROBERTO DE SOUSA

FLORIANÓPOLIS, JULHO DE 2000

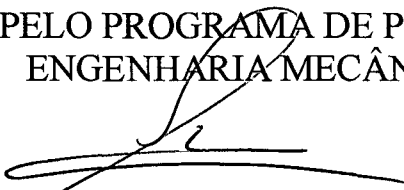
**PADRÕES CORPORIFICADOS E A
TECNOLOGIA DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS INOVANDO A
QUALIFICAÇÃO GEOMÉTRICA DE CENTROS DE USINAGEM**

ANDRÉ ROBERTO DE SOUSA

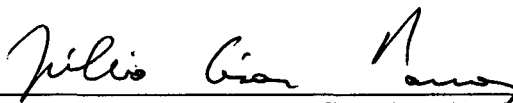
ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO
DO TÍTULO DE

DOUTOR EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA E APROVADA EM SUA
FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA

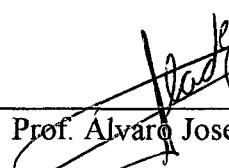


Prof. Carlos Alberto Schneider, Dr. Ing. – Orientador

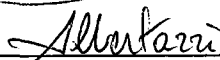


Prof. Júlio César Passos, Dr. Eng. – Coordenador do Curso

BANCA EXAMINADORA



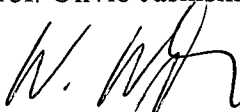
Prof. Alvaro José Abackerli, Dr. Eng.



Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng.



Prof. Olívio Jasinski Novaski, Dr. Eng.



Prof. Walter Lindolfo Weingaertner, Dr. Ing.

A Luciane, minha esposa.

Aos meus Pais e a Deus.

Aos milhões de Cientistas natos *inviabilizados* pelo trabalho infantil no Brasil.

Agradecimentos

À DIADUR Ind. e Com., subsidiária Brasileira da empresa Alemã *Dr. Johannes Heidenhain GmbH*, por acreditar e apoiar técnica e financeiramente a realização desta pesquisa.

Ao povo do Brasil, via Fundação CAPES, pelo apoio que possibilitou um estágio de 3 meses no exterior em várias instituições ligadas ao tema da qualificação geométrica de máquinas-ferramenta, quando foram obtidas muitas das informações descritas neste trabalho.

Ao Professor Carlos Alberto Schneider, pela orientação recebida e pelo empenho para disponibilizar todos os meios necessários à realização deste trabalho.

À Escola Técnica Federal de Santa Catarina, pela disponibilização de sua estrutura laboratorial, em particular, ao estagiário Wagner e aos Professores Felício José Gesser, Marcelo Martins e Manoel Pereira, pelo apoio operacional e pelas ricas discussões.

Ao Laboratório de Mecânica de Precisão – LMP/UFSC – pela disponibilização de sua estrutura física e de pessoal de apoio, em particular ao Estagiário Eduardo e ao Prof. Walter.

À Fundação CERTI, pelas informações privilegiadas de seus especialistas e contatos estratégicos viabilizados, em particular, aos Engenheiros Renato Scavone e Günther Pfeifer, e ao pessoal do Laboratório de Medição por Coordenadas.

Aos amigos do LABMETRO/UFSC pela amizade e pelo apoio recebido sempre que solicitado, em particular ao Eng. Gláucio Andrey Maas, aos Professores Armando Albertazzi e José Leonardo Noronha, Celso Veiga e às secretárias Rosana Magali Vieira e Olga Maria da Rosa.

RESUMO

Os ensaios geométricos de máquinas-ferramenta são fundamentais para a garantia da qualidade dimensional das peças usinadas, na medida em que permitem tomar várias ações preventivas e corretivas para otimizar a exatidão de trabalho das máquinas, inclusive com a correção de erros pelo CNC da máquina, que pode melhorar a sua exatidão de trabalho além de suas limitações mecânicas. No entanto, poucos usuários de máquinas-ferramenta CNC fazem uso desse recurso presente em seus equipamentos, e uma das principais razões para isso é que os ensaios necessários para determinar os erros da máquina apresentam dificuldades operacionais e econômicas que desmotivam a prática de ensaios geométricos periódicos.

Neste trabalho, foi pesquisada uma técnica alternativa para o ensaio geométrico de centros de usinagem de pequeno e médio portes, que superasse as dificuldades existentes com as técnicas clássicas de ensaio, com qualidades para motivar os usuários de máquinas-ferramenta a ensaios geométricos mais frequentes em seus equipamentos. Combinando a tecnologia de medição por coordenadas com a utilização de padrões corporificados, um sistema de ensaio foi idealizado e implementado. Um palpador de medição foi instalado em uma fresadora CNC, e padrões corporificados foram medidos na própria máquina. Ao se compararem as dimensões medidas com as dimensões calibradas, consegue-se determinar as principais componentes de erro da máquina-ferramenta.

Análises, simulações e uma forte experimentação foram conduzidas durante a pesquisa, de forma a se avaliar os desempenhos metrológico, operacional e econômico da técnica, comparativamente a técnicas de ensaio classicamente utilizadas para essa finalidade, e os resultados indicam que a estratégia de ensaio pesquisada se mostra promissora. Com 1/6 do custo e em 1/7 do tempo necessário para realizar os mesmos ensaios com técnicas clássicas, são obtidos resultados com uma confiabilidade metrológica da mesma ordem, e até melhor, ao se considerar certas características do procedimento de ensaio.

ABSTRACT

The geometric errors of the machine tools are transferred directly to the machined pieces, affecting their accuracy and process productivity. To overcome this problem, geometric tests should be undertaken frequently on the machine and, with the information obtained about its accuracy, the machine user could promote some preventive and corrective actions in order to assure the dimensional accuracy of the machined pieces.

The CNC development has made possible to correct electronically some of the mechanical errors of the machine, taking its accuracy beyond its mechanical limitations. To take advantage of this means, the users should periodically calibrate their machines but, in spite of most CNCs have these means available, most users don't test their machines and update the CNC error compensation table. One of the main reasons for this are some limitations of the geometrical test techniques used to verify the machine accuracy. Classical techniques usually are expensive or very time consuming. More, the results are usually not formatted for compensation at the CNC.

In this work, an alternative test technique for the geometric test of machining centres was researched, trying to congregate metrological reliability with operational and economical advantages, when comparing to methods classically used for such task. A system called QUALIMAQ was developed, where a touch probe is used on a 3-axis vertical machine centre to check against artefacts calibrated on a coordinate measuring machine (CMM). By comparing the results obtained from the machine tool and CMM, the main machine tool error components are measured, attesting the machine accuracy. The error values can be easily formatted to update the error compensation table at the CNC, enhancing the machine accuracy. The method was applied to the geometric test of a vertical machining centre and the experimental results showed that its uncertainty is comparable to well established techniques, with significant advantages in the other aspects. Its time efficiency is 7 times better and the costs involved with the operation are 6 times lower than the same geometric tests performed with classical techniques.

SUMÁRIO

<u>CAPÍTULO 1 -</u>	<u>CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO DE PESQUISA</u>	<u>10</u>
1.1	UMA PROPOSTA DE SOLUÇÃO	16
1.2	ESTRUTURAÇÃO E CONDUÇÃO DO TRABALHO DE PESQUISA	18
<u>CAPÍTULO 2 -</u>	<u>OBTENÇÃO DA CONFORMIDADE GEOMÉTRICA NAS PECAS</u>	
	<u>USINADAS</u>	<u>22</u>
2.1	INFLUÊNCIA DA CONFORMIDADE GEOMÉTRICA NA PRODUTIVIDADE DO PROCESSO	22
2.2	REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DA CONFORMIDADE GEOMÉTRICA	27
2.3	COMPORTAMENTO GEOMÉTRICO DE MÁQUINAS-FERRAMENTA	30
2.3.1	EFEITOS TÉRMICOS	31
2.3.2	SISTEMA DE CONTROLE CNC	35
2.3.3	ESFORÇOS MECÂNICOS (RIGIDEZ FINITA)	39
2.3.4	ERROS GEOMÉTRICOS EM FUNÇÃO DOS COMPONENTES E DA MONTAGEM DA MÁQUINA-FERRAMENTA	41
2.3.5	COMPORTAMENTO RESULTANTE	42
2.4	EVOLUÇÃO NA EXATIDÃO DE TRABALHO DAS MÁQUINAS-FERRAMENTA	45
2.4.1	EVOLUÇÕES MECÂNICAS	45
2.4.2	EVOLUÇÕES ELETRÔNICAS	46
<u>CAPÍTULO 3 -</u>	<u>QUALIFICAÇÃO PERIÓDICA DA MÁQUINA-FERRAMENTA</u>	<u>52</u>
3.1	INFORMAÇÃO PARA MANUTENÇÃO	53
3.2	FORNECIMENTO DE DADOS PARA COMPATIBILIZAÇÃO DE USO	54
3.3	GERAÇÃO DE FATORES DE CORREÇÃO DE ERROS PELO CNC	54
3.3.1	RECURSOS DE CORREÇÃO DISPONÍVEIS NOS CONTROLADORES DE SÉRIE	57
3.3.2	INOVAÇÕES IMPLEMENTADAS EM CONTROLADORES CNC COM ARQUITETURA ABERTA	61
3.3.3	VERIFICAÇÃO EXPERIMENTAL DA EFICIÊNCIA DAS CORREÇÕES	62

3.4	FREQÜÊNCIA DA QUALIFICAÇÃO GEOMÉTRICA PELOS USUÁRIOS DE MÁQUINAS-FERRAMENTA	66
3.5	OS ENSAIOS GEOMÉTRICOS	68
3.5.1	LASER INTERFEROMÉTRICO	69
3.5.2	LASER DE ALINHAMENTO	70
3.5.3	RÉGUA/ESQUADRO E COMPARADOR	71
3.5.4	PEÇAS PADRÃO USINADAS	72
3.5.5	BALL BAR	72
3.5.6	GRID ENCODER	73
3.5.7	LASER BALL BAR	74
3.6	DESAFIOS A SEREM SUPERADOS PELAS TÉCNICAS DE ENSAIO	75

CAPÍTULO 4 - PROPOSIÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA QUALIMAQ **77**

4.1	TÉCNICAS QUE FUNDAMENTAM O SISTEMA QUALIMAQ	77
4.1.1	QUALIFICAÇÃO GEOMÉTRICA DE CMM COM PADRÕES CORPORIFICADOS	77
4.1.2	UTILIZAÇÃO DE APALPADORES DE MEDIÇÃO EM MÁQUINAS-FERRAMENTA	79
4.1.3	RECURSOS DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS EM CONTROLADORES CNC	80
4.2	O SISTEMA DE ENSAIO IDEALIZADO - QUALIMAQ	82
4.3	ELEMENTOS FÍSICOS INTEGRADOS AO SISTEMA	84
4.3.1	O APALPADOR DE MEDIÇÃO	84
4.3.2	PLACA DE FUROS	91
4.3.3	PADRÃO DESMONTÁVEL	95
4.3.4	PADRÕES PARA A MEDIÇÃO DA HISTERESE	99

CAPÍTULO 5 - ALGORITMOS DE PROCESSAMENTO PARA A OBTENÇÃO DOS ERROS GEOMÉTRICOS DA MÁQUINA-FERRAMENTA **106**

5.1	PLACA DE FUROS	107
5.1.1	ALINHAMENTO E COMPENSAÇÃO TÉRMICA DA PLACA MEDIDA	109
5.1.2	ERRO DE POSICIONAMENTO LINEAR NO EIXO X: XPX	113
5.1.3	DESVIO DE PERPENDICULARIDADE ENTRE EIXOS - XWY	114
5.1.4	ERRO DE POSICIONAMENTO LINEAR NO EIXO Y - YPY	116
5.1.5	DESVIOS DE RETILINEIDADE XTY E YTX	118

5.1.6	VERIFICAÇÃO DA EFICIÊNCIA DOS ALGORITMOS	124
5.2	PADRÃO DESMONTÁVEL	127
5.2.1	ALINHAMENTO E COMPENSAÇÃO TÉRMICA	129
5.2.2	POSICIONAMENTO ZPZ	134
5.2.3	RETILINEIDADES ZTX E ZTY	135
5.2.4	DESVIOS DE PERPENDICULARIDADE XWZ E YWZ	137

CAPÍTULO 6 - VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DO SISTEMA QUALIMAO 140

6.1	CARACTERIZAÇÃO GEOMÉTRICA DA MÁQUINA-FERRAMENTA UTILIZADA NOS ENSAIOS	140
6.1.1	ENSAIOS DE POSICIONAMENTO LINEAR	142
6.1.2	ENSAIOS DE RETILINEIDADE	148
6.1.3	ENSAIOS DE PERPENDICULARIDADE	151
6.2	ENSAIOS COM A PLACA DE FUROS	154
6.2.1	PLANO XY	155
6.2.2	PLANO XZ	161
6.3	ENSAIOS COM O PADRÃO VERTICAL	168
6.4	CORREÇÃO ELETRÔNICA DA MÁQUINA-FERRAMENTA TESTADA	176

CAPÍTULO 7 - ANÁLISES E CONSIDERAÇÕES FINAIS 179

7.1	ANÁLISE METROLÓGICA	179
7.2	ANÁLISES OPERACIONAL E ECONÔMICA	186
7.3	CONCLUSÕES	188

CAPÍTULO 8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 194

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.1 - Aumento do custo de um bloco de motor ao longo das etapas de produção</i>	11
<i>Figura 1.2 - Evolução performance/custo das Máquinas-ferramenta [11]</i>	13
<i>Figura 1.3 – Relatório de ensaio com laser interferométrico Renishaw evidenciando a redução no erro de posicionamento com a correção eletrônica de erros [18]</i>	14
<i>Figura 1.4 – Sistema de ensaio geométrico idealizado</i>	18
<i>Figura 1.5 – Instituições e eventos integrantes da viagem de estudos financiada pela CAPES</i>	20
<i>Figura 2.1 – Aumento do valor da esfera de rolamento ao longo do processo</i>	23
<i>Figura 2.2 - Probabilidade de rejeição de peças em função da tolerância, em processos capazes e não capazes</i>	24
<i>Figura 2.3 - Interdependência das Incertezas no processo de fabricação e no controle de qualidade</i>	26
<i>Figura 2.4 - Fatores de produção envolvidos na usinagem de peças geometricamente aceitáveis</i>	27
<i>Figura 2.5 - Ciclo de “try-out” para o estabelecimento das condições de fabricação</i>	28
<i>Figura 2.6 - Desperdício do “try-out” em relação ao número de peças do lote</i>	29
<i>Figura 2.7 - Fatores perturbadores do comportamento geométrico da máquina-ferramenta</i>	30
<i>Figura 2.8 - Erros geométricos para um eixo de movimentação [15]</i>	31
<i>Figura 2.9 – Medição dos deslocamentos entre peça e ferramenta, causados por variação térmica da máquina [51]</i>	32
<i>Figura 2.10 – Determinação do deslocamento vertical da ferramenta por elementos finitos [53]</i>	33
<i>Figura 2.11 - Sistemas de medição de posicionamento em máquinas-ferramenta [57]</i>	34
<i>Figura 2.12 - Análise termo gráfica do aquecimento no fuso de esferas [57]</i>	34
<i>Figura 2.13 - Erro de posicionamento com encoder e escala linear [57]</i>	35
<i>Figura 2.14 - Sistema de controle de Máquina-ferramenta CNC</i>	36
<i>Figura 2.15 - Ensaio dinâmico de trajetória com sistema Grid Encoder (Heidenhain)</i>	37
<i>Figura 2.16 - Problemas na peça durante a inversão dos eixos</i>	38
<i>Figura 2.17 - Rigidez prejudicada pela configuração da máquina</i>	39
<i>Figura 2.18 - Inclinações causadas pelo peso da peça [1 segundo = 4,8 $\mu\text{m}/\text{m}$]</i>	40

<i>Figura 2.19 - Estrutura de um centro de usinagem vertical com 3 eixos</i>	41
<i>Figura 2.20 – Desvios de posicionamento especificados e encontrados em máquinas em operação [68]</i>	43
<i>Figura 2.21 - Conseqüência de erros geométricos em peça hipotética</i>	44
<i>Figura 2.22 – Recursos de Compensação de alguns controladores</i>	47
<i>Figura 2.23 - Melhoria obtida com o uso de laser como escala de medição (Renishaw)</i>	48
<i>Figura 2.24 - Controle adaptativo em máquina-ferramenta com CNC aberto [114]</i>	49
<i>Figura 2.25 - Dispersão do processo sem controle adaptativo [28]</i>	49
<i>Figura 2.26 - Dispersão do processo com controle adaptativo [112]</i>	50
<i>Figura 2.27 – Correção de erros geométricos através de Pós-processador de sistemas CAD/CAM</i>	50
<i>Figura 3.1 - Erro de rolamento causado por apoio deficiente</i>	53
<i>Figura 3.2 - Evolução de desempenho dos controladores CNC</i>	56
<i>Figura 3.3 - Etapas do processo de correção de erros pelo CNC da Máquina-ferramenta [126]</i>	57
<i>Figura 3.4 - Formas de compensação de erros de posicionamento</i>	59
<i>Figura 3.5 - Compensação de histerese [128]</i>	60
<i>Figura 3.6 - Compensação de reticidade e perpendicularidade</i>	60
<i>Figura 3.7 - Correção de erros em controladores de arquitetura aberta</i>	62
<i>Figura 3.8 - Melhoria obtida no posicionamento em determinado eixo, com a correção eletrônica da Máquina</i>	63
<i>Figura 3.9 - Otimização da reticidade em torno de grande porte, através de ajustes mecânicos e eletrônicos [124]</i>	64
<i>Figura 3.10 - Usinagem e verificação da exatidão de trabalho de uma Máquina-ferramenta</i>	65
<i>Figura 3.11 - Melhoria na exatidão de trabalho dos eixos do centro de usinagem testado</i>	66
<i>Figura 3.12 - Otimização periódica da exatidão da máquina-ferramenta</i>	66
<i>Figura 3.13 - Crescimento nacional da base instalada de Máquinas-ferramenta CNC [135]</i>	67
<i>Figura 3.14 - Características metrológicas do laser interferométrico</i>	69
<i>Figura 3.15 - Aplicação do Laser de Alinhamento em ensaio de reticidade [147]</i>	70
<i>Figura 3.16 - Características de Padrões corporificados para o ensaio de reticidade e perpendicularidade</i>	71
<i>Figura 3.17 - Peças usinadas para verificar a exatidão da máquina</i>	72

<i>Figura 3.18 - Ensaio dinâmico de interpolação circular com o ball bar (Renishaw)</i>	73
<i>Figura 3.19 - Laser Ballbar para o ensaio de máquinas por trilateração</i>	74
<i>Figura 3.20 - Processamento matemático da trilateração</i>	75
<i>Figura 4.1 - Calibração de Máquina de Medir por Coordenadas com laser interferométrico</i>	78
<i>Figura 4.2 - Qualificação de Máquinas de Medir por Coordenadas com padrões corporificados</i>	78
<i>Figura 4.3 - Funções do apalpador na máquina-ferramenta</i>	80
<i>Figura 4.4 - Recursos de Medição por coordenadas presentes em controladores atuais</i>	81
<i>Figura 4.5 - Qualificação geométrica de Máquinas-ferramenta com padrão corporificado</i>	83
<i>Figura 4.6 - Apalpador de comutação óptica utilizada no desenvolvimento do trabalho</i>	86
<i>Figura 4.7 - Determinação 1D da incerteza de apalpação 1D</i>	87
<i>Figura 4.8 - Determinação da incerteza de apalpação 2D</i>	88
<i>Figura 4.9 - Determinação da incerteza de apalpação 3D</i>	89
<i>Figura 4.10 - Adaptação do apalpador para medir a placa de furos na vertical</i>	91
<i>Figura 4.11 - Protótipo desenvolvido: Placa de Furos como padrão corporificado bi-dimensional</i>	92
<i>Figura 4.12 - Calibração da Placa de Furos na Máquina de medir por coordenadas</i>	94
<i>Figura 4.13 - Padrão vertical desenvolvido para substituir a medição da placa de furos na vertical</i>	95
<i>Figura 4.14 - Escalonamento das colunas de suporte das bases triangulares</i>	96
<i>Figura 4.15 - Calibração do padrão vertical na Máquina de Medir por Coordenadas</i>	97
<i>Figura 4.16 - Desvios no reposicionamento das esferas em relação à posição média</i>	98
<i>Figura 4.17 - Balanço de Incerteza do padrão vertical</i>	99
<i>Figura 4.18 - Procedimento para a determinação da histerese utilizando anel padrão</i>	100
<i>Figura 4.19 - Balanço para a determinação da incerteza da medição da histerese com o anel padrão</i>	102
<i>Figura 4.20 - Procedimento para a determinação da histerese utilizando blocos-padrão</i>	102
<i>Figura 4.21 - Balanço para a determinação da incerteza da medição da histerese com os blocos-padrão</i>	105
<i>Figura 5.1 - Distribuição a alinhamento cartesiano dos furos na Placa padrão</i>	107
<i>Figura 5.2 - Transformações de coordenadas para o alinhamento da placa</i>	109

<i>Figura 5.3 - Diferença entre as posições calibradas e medidas dos centros furos da placa</i>	<i>112</i>
<i>Figura 5.4 - Determinação das melhores retas para a determinação do desvio de perpendicularidade xwy</i>	<i>115</i>
<i>Figura 5.5 - Compensação do desvio de perpendicularidade xwy para a determinação do erro de posicionamento linear ypy</i>	<i>116</i>
<i>Figura 5.6 - Determinação dos desvios de retilineidade em cada linha da placa, em relação às melhores retas</i>	<i>120</i>
<i>Figura 5.7 - Determinação dos desvios de retilineidade ytx, em relação às melhores retas</i>	<i>124</i>
<i>Figura 5.8 - Redução da dispersão dos resultados com a compensação térmica</i>	<i>125</i>
<i>Figura 5.9 - Comparação dos algoritmos desenvolvidos com software de referência</i>	<i>126</i>
<i>Figura 5.10 - Estrutura e configuração cartesiana do padrão vertical desmontável</i>	<i>128</i>
<i>Figura 5.11 - Transformações de coordenadas para o alinhamento do padrão vertical</i>	<i>131</i>
<i>Figura 5.12 - Determinação dos desvios de retilineidade ztx e zty</i>	<i>135</i>
<i>Figura 5.13 - Determinação do desvio de perpendicularidade xwz a partir do padrão vertical</i>	<i>138</i>
<i>Figura 6.1 - Máquina-ferramenta utilizada no desenvolvimento experimental do trabalho</i>	<i>141</i>
<i>Figura 6.2 - Ensaio de posicionamento com laser interferométrico e kit linear</i>	<i>142</i>
<i>Figura 6.3 - Balanço para o cálculo da Incerteza dos resultados do ensaio de posicionamento com o laser</i>	<i>143</i>
<i>Figura 6.4 - Resultados do ensaio de posicionamento no eixo X com o laser interferométrico</i>	<i>145</i>
<i>Figura 6.5 - Resultados do ensaio de posicionamento no eixo Y com o laser interferométrico</i>	<i>146</i>
<i>Figura 6.6 - Resultados do ensaio de posicionamento no eixo Z com o laser interferométrico</i>	<i>147</i>
<i>Figura 6.7 - Balanço de Incerteza para os ensaios de retilineidade com régua-padrão e apalpador</i>	<i>148</i>
<i>Figura 6.8 - Desvios de retilineidade medidos em todos os eixos da Máquina-ferramenta</i>	<i>149</i>
<i>Figura 6.9 - Metodologia para o cálculo de incerteza no ensaio de retilineidade</i>	<i>150</i>
<i>Figura 6.10 - Balanço de Incerteza para os ensaios de perpendicularidade com esquadro e apalpador</i>	<i>151</i>
<i>Figura 6.11 - Desvios de perpendicularidade medidos em todos os eixos da Máquina-ferramenta</i>	<i>152</i>
<i>Figura 6.12 - Metodologia para o cálculo de incerteza nos ensaios de perpendicularidade</i>	<i>153</i>
<i>Figura 6.13 - Ensaio geométrico com a placa de furos no plano XY</i>	<i>155</i>

<i>Figura 6.14 - Balanço de Incertezas para os resultados de erro de posicionamento linear nos eixos X e Y</i>	156
<i>Figura 6.15 - Comparação dos resultados obtidos com a placa (plano XY) e com o laser, nos ensaios de posicionamento</i>	157
<i>Figura 6.16 - Balanço de Incertezas para os resultados de retilineidade nos eixos X e Y</i>	158
<i>Figura 6.17 - Comparação dos resultados obtidos com a placa (plano XY) e com a régua, nos ensaios de retilineidade</i>	159
<i>Figura 6.18 - Balanço de Incertezas para os resultados de perpendicularidade entre X e Y</i>	160
<i>Figura 6.19 - Comparação dos resultados obtidos com a placa (plano XY) e com o esquadro, nos ensaios de perpendicularidade</i>	160
<i>Figura 6.20 - Ensaio geométrico com a placa de furos no plano XZ</i>	162
<i>Figura 6.21 - Balanço de Incertezas para os resultados de erro de posicionamento linear nos eixos X e Z</i>	163
<i>Figura 6.22 - Comparação dos resultados obtidos com a placa (plano XZ) e com o laser para os ensaios de posicionamento</i>	164
<i>Figura 6.23 - Balanço de Incertezas para os resultados de retilineidade nos eixos X e Z</i>	165
<i>Figura 6.24 - Comparação dos resultados obtidos com a placa (plano XZ) e com a régua, para os ensaios de retilineidade</i>	166
<i>Figura 6.25 - Balanço de Incertezas para os resultados de perpendicularidade entre X e Z</i>	167
<i>Figura 6.26 - Comparação dos resultados obtidos com a placa (plano XZ) e com o esquadro, para os ensaios de perpendicularidade</i>	167
<i>Figura 6.27 - Ensaio geométrico com o padrão vertical desmontável</i>	169
<i>Figura 6.28 - Cálculo da Incerteza de posicionamento no ensaio com o padrão vertical</i>	170
<i>Figura 6.29 - Comparação dos resultados obtidos com padrão vertical e com o laser, nos ensaios de posicionamento</i>	171
<i>Figura 6.30 - Cálculo da incerteza nos ensaios de retilineidade com o padrão vertical</i>	172
<i>Figura 6.31 - Influência da incerteza de medição das esferas de alinhamento, no erro de posicionamento</i>	172
<i>Figura 6.32 - Comparação dos resultados obtidos com padrão vertical e com a régua, nos ensaios de retilineidade</i>	173
<i>Figura 6.33 - Influência da incerteza de medição das esferas de alinhamento, no erro de perpendicularidade</i>	174
<i>Figura 6.34 - Cálculo da incerteza nos ensaios de perpendicularidade com o padrão vertical</i>	175
<i>Figura 6.35 - Comparação dos resultados obtidos com padrão vertical e com o esquadro, nos</i>	

<i>ensaios de perpendicularidade</i>	176
<i>Figura 6.36 - Usinagem e Medição de uma placa de furos para a verificação da eficiência da correção eletrônica da máquina-ferramenta</i>	177
<i>Figura 6.37 – Melhoria na posição dos furos obtida com a correção eletrônica do eixo X da Máquina-ferramenta</i>	177
<i>Figura 7.1 – Comparação dos resultados do ensaio de posicionamento realizados com o laser interferométrico e com a placa de furos, considerando as linhas de furos centrais da placa</i>	181
<i>Figura 7.2 – Determinação da histerese estática utilizando medidor de deslocamento</i>	185
<i>Figura 7.3 – Comparação entre tempos de ensaio com técnicas clássicas e com o método pesquisado</i>	187
<i>Figura 7.4 – Comparação entre custos de aquisição de sistemas de ensaio geométrico</i>	187
<i>Figura 7.5 – Comparação entre custos do ensaio para usuários com sistema próprio, realizando 100 ensaios/ano</i>	188
<i>Figura 7.6 – Comparação metrológica entre técnicas clássicas e a Placa de furos no plano principal da máquina-ferramenta</i>	190
<i>Figura 7.7 – Comparação metrológica entre técnicas clássicas e o Padrão vertical nos planos verticais da máquina-ferramenta</i>	191
<i>Figura 7.8 – Comparação operacional e econômica entre os métodos de ensaio</i>	191

CAPÍTULO 1 - CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO DE PESQUISA

O desenvolvimento tecnológico atual requer que os sistemas mecânicos apresentem performance e confiabilidade cada vez maiores e, ao mesmo tempo, a competitividade entre as empresas exige que este avanço tecnológico seja acompanhado de redução nos custos de produção [1-4]. Este desafio de agregar qualidade reduzindo custos requer, dentre outros fatores, uma boa produtividade na fabricação de seus diversos componentes, exigindo dos sistemas de manufatura rapidez, flexibilidade e confiabilidade (qualidade ao longo do tempo) [5-8].

No entanto, a realidade encontrada em muitos sistemas de fabricação contraria esse objetivo. São muitas as situações em que o processo opera de forma ineficiente por não atingir, para boa parte das peças fabricadas, os níveis de precisão especificados. As perdas de tempo e material com o refugo e retrabalho dessas peças elevam os tempos e custos do processo, prejudicando sua produtividade. Existem casos em que somente 50% das peças são aprovadas na primeira tentativa. A outra metade é refugada ou retorna às estações de trabalho para serem retrabalhadas [9].

Na área de usinagem esse problema é mais crítico do que em outros processos de fabricação, como a fundição ou a conformação mecânica. Quando comparada a esses outros processos, a usinagem é um processo lento e com grande perda de material e, dessa forma, sempre se procuram alternativas à sua utilização. No entanto, nenhum outro processo é capaz de atingir os níveis de precisão macro e microgeométrica que a usinagem permite, e assim esta é normalmente utilizada em operações de acabamento, especialmente em peças com maior precisão dimensional.

Nessas operações de acabamento, os cuidados com o processo devem ser maiores não somente em função da maior precisão e acabamento exigidos, mas também porque um insucesso na operação pode inviabilizar o produto, e com ele todo o investimento realizado em etapas de produção anteriores. Ou seja, na operação de acabamento a peça já possui quase o seu valor financeiro máximo. O valor agregado em caso de sucesso é normalmente bem menor do que o prejuízo em caso de insucesso. A figura 1.1 ilustra uma situação típica, mostrando a evolução de custo acumulado de um bloco de motor ao longo das etapas de fabricação. Percebe-se que a peça fundida já possui um alto valor ao ser colocada para as operações de acabamento.

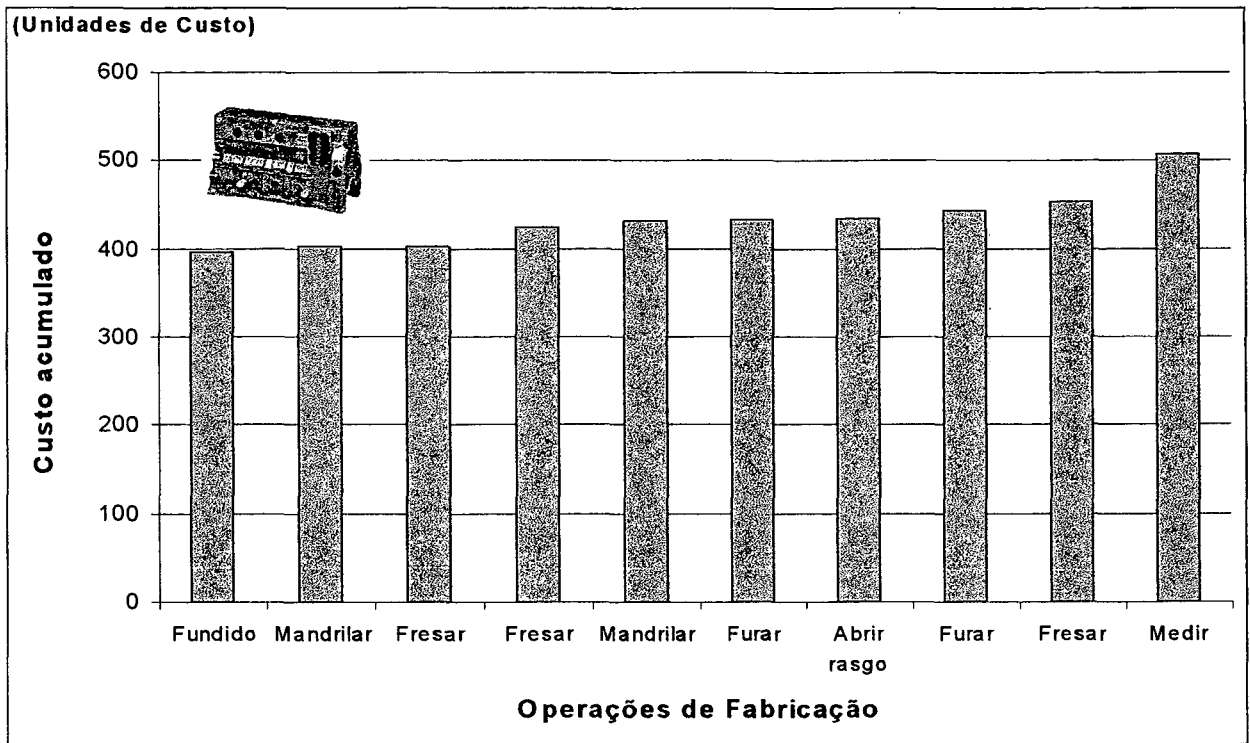


Figura 1.1 - Aumento do custo de um bloco de motor ao longo das etapas de produção

Para atender esses desafios, grandes evoluções têm ocorrido em todos os fatores de produção envolvidos no processo de usinagem. Dentre outros avanços, otimizações no projeto e material da peça e novos materiais de ferramenta de corte têm permitido processos cada vez mais rentáveis, ao mesmo tempo que softwares de apoio à usinagem têm sido crescentemente aplicados e auxiliam desde a seleção de ferramentas e parâmetros de corte, até a geração de programas CNC para a usinagem [10-14], com simulações prévias ao processo.

No entanto, para que estes novos recursos tecnológicos traduzam-se em maior qualidade das peças usinadas e produtividade para as empresas, é necessária a exploração adequada de suas potencialidades, e somente com o adequado conhecimento de seus recursos chega-se a uma utilização plena das potencialidades de um sistema de fabricação. Do contrário tem-se um sistema sub-utilizado, situação facilmente encontrada nos parques fabris, já que muitas indústrias não dão a devida atenção a certos aspectos nos processos de usinagem, e o resultado são processos com um rendimento bem abaixo do possível, com um potencial ganho de produtividade inexplorado.

Como principal equipamento do processo de usinagem, diversas otimizações têm sido pesquisadas e implementadas às máquinas-ferramenta como forma de melhorar, dentre outros

aspectos, a sua exatidão de trabalho. Essa exatidão é prejudicada por diversas não idealidades que atuam sobre as máquinas e provocam alterações indesejadas nas trajetórias programadas para a peça e a ferramenta de corte, que se transferem de forma direta à geometria das peças usinadas [15].

O desenvolvimento tecnológico para minimizar estas deficiências ocorreu, em um primeiro momento, através de inovações e otimizações na parte mecânica da máquina, com o emprego de novos materiais, otimização no projeto estrutural, na fabricação e na montagem dos componentes mecânicos. Essa estratégia durante certo período permitiu melhorias significativas na exatidão das máquina-ferramenta mas, progressivamente, percebeu-se que os avanços conseguidos ficavam cada vez menores, para investimentos cada vez maiores, indicando que as melhorias na exatidão da máquina-ferramenta obtida por otimizações puramente mecânicas já não justificavam o custo de obtê-las [16].

Paralelamente, os avanços da micro-eletrônica iam se incorporando às máquinas-ferramenta e, em um segundo momento, a otimização na exatidão de trabalho das máquinas foi grandemente impulsionada pela micro-eletrônica, complementando a otimização mecânica mas a custos bem inferiores. Com o aumento de sua capacidade de processamento matemático, a partir da década de 80 alguns controladores CNC para máquinas-ferramenta passaram a oferecer, dentre outros, recursos para a compensação eletrônica de deficiências mecânicas, no que se convencionou chamar de *Computer Aided Accuracy (CAA)*, comum nas Máquinas de Medir por Coordenadas [17]. Esses e outros desenvolvimentos são responsáveis pela melhoria da performance das máquinas ao longo do tempo, que se tornam cada vez mais rápidas e precisas, como bem ilustra a figura 1.2.

A compensação de erros pelo CNC é possível em função de **ensaios geométricos** da máquina, quando os erros de trajetória e posicionamento da máquina-ferramenta são determinados e introduzidos no CNC da máquina, que os utiliza como fatores de compensação para corrigir desvios que alteravam sistematicamente as trajetórias ferramenta/peça durante a usinagem. Com isso, consegue-se levar a exatidão da máquina além de suas limitações mecânicas, e a melhoria da exatidão geométrica da máquina é direta. A figura 1.3 apresenta um relatório de ensaio geométrico com laser interferométrico que permite comparar os erros de posicionamento linear no eixo Z de um centro de usinagem vertical, antes e após um ensaio geométrico e a correção de erros no CNC. A máquina pertence a um fabricante de moldes para injeção de plástico, e possui apenas 2 anos de uso.

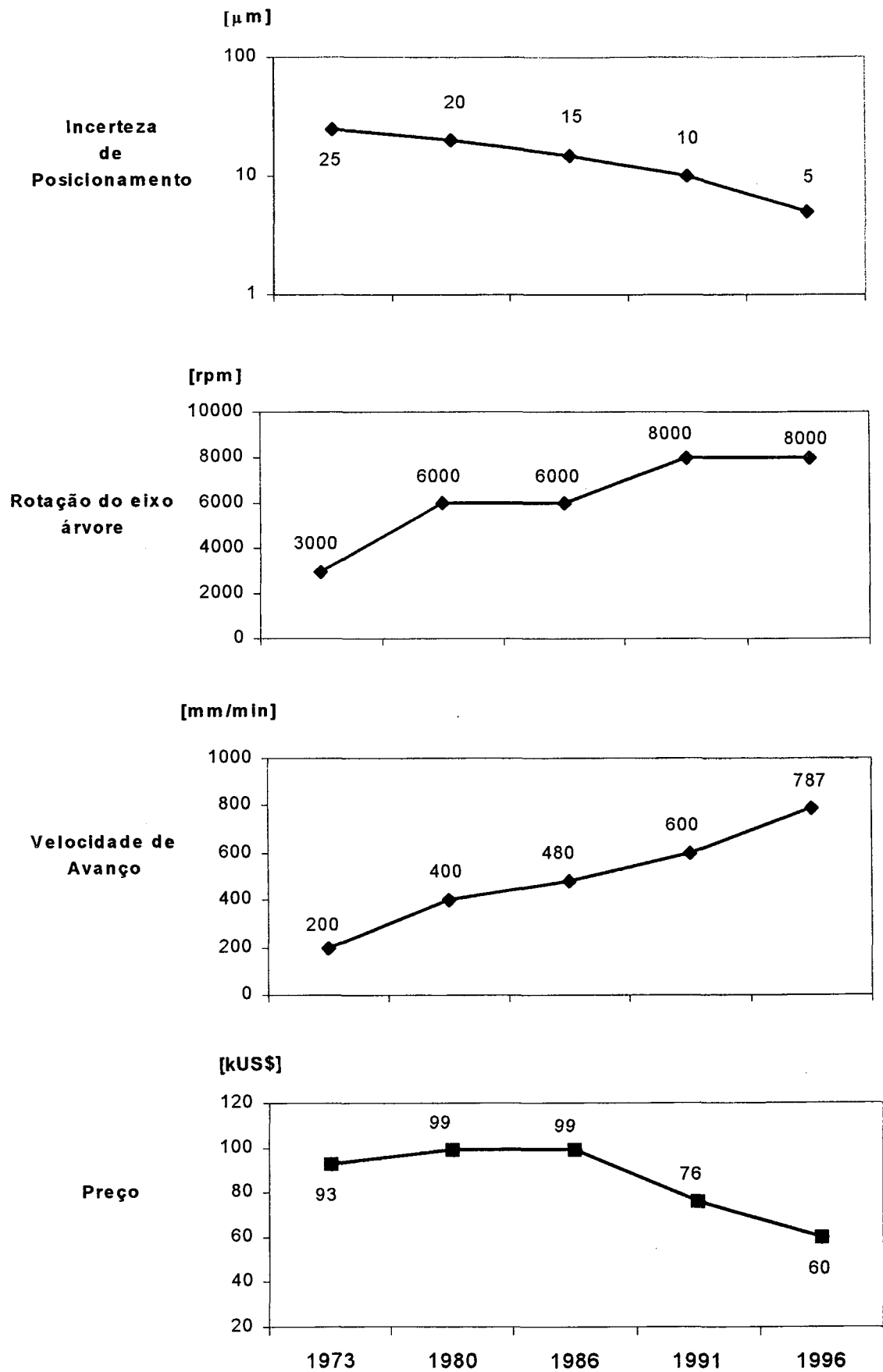


Figura 1.2 - Evolução performance/custo das Máquinas-ferramenta [11]

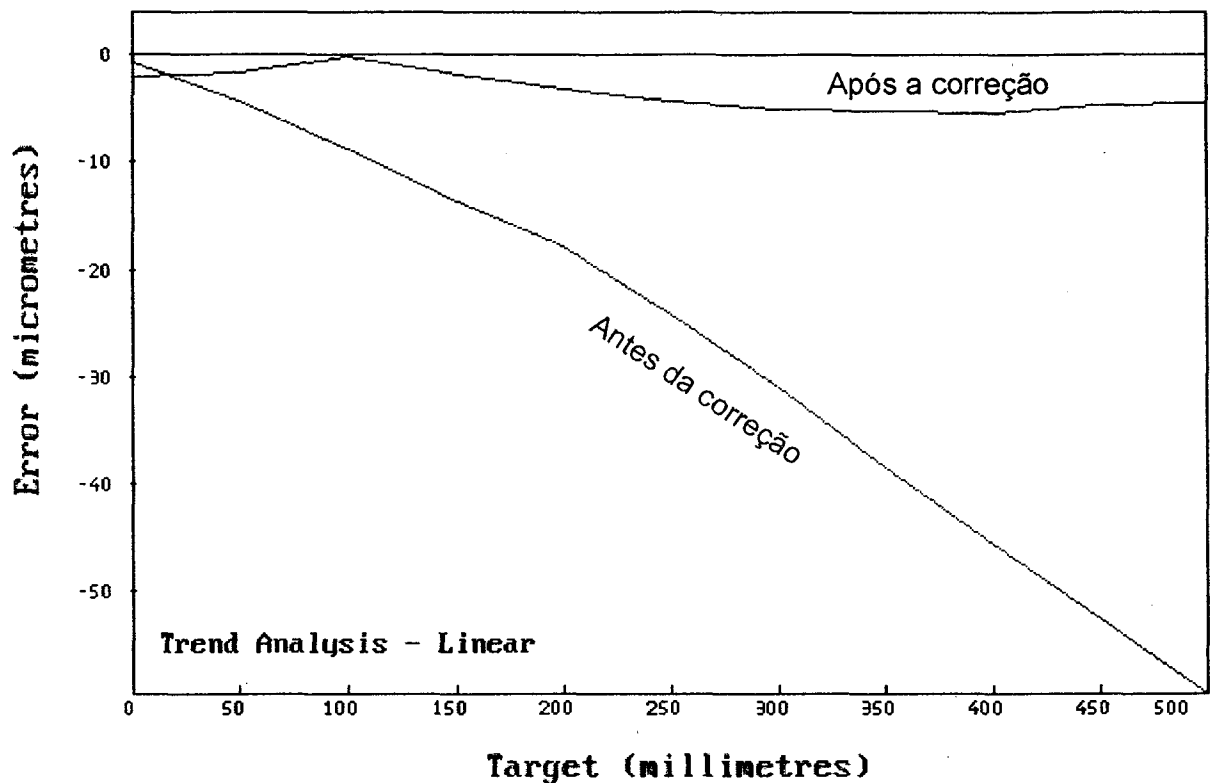


Figura 1.3 – Relatório de ensaio com laser interferométrico *Renishaw* evidenciando a redução no erro de posicionamento com a correção eletrônica de erros [18]

Atualmente, todos os controladores CNC presentes no mercado apresentam, em maior ou menor grau, recursos para a compensação de erros mas, paradoxalmente, apesar de terem essa disponibilidade e serem bastante acessíveis, estes recursos permanecem inexplorados pela grande maioria dos usuários [17].

Quando muito, esses ensaios e correções são implementados durante a instalação de uma máquina nova, como parte dos ensaios de aceitação. Os ensaios geométricos durante a instalação da máquina, embora indispensáveis, são insuficientes para garantir um bom comportamento geométrico da máquina por tempo indefinido, em função de alterações provocadas pelo uso normal da máquina (desgastes, modificações estruturais com o tempo, ...) ou por eventuais problemas (má lubrificação, superaquecimento, colisões, ...).

Para que os recursos de correção eletrônica de erros sejam explorados eficientemente, se faz necessária uma atualização periódica dos fatores de compensação, o que requer ensaios

periódicos na máquina. Ao não ensaiarem suas máquinas nem atualizarem os fatores de compensação, os usuários desperdiçam parte da exatidão possível, com consequência direta sobre a qualidade das peças produzidas. Além de fornecer resultados para a correção eletrônica de erros, os ensaios geométricos permitem, ainda, direcionar a utilização da máquina-ferramenta de acordo com a tolerância das peças usinadas e/ou afastá-la preventivamente de serviço, antes que produza peças fora de tolerância [19].

Percebe-se já, em alguns países, a tendência de verificação periódica da exatidão de trabalho de máquinas-ferramenta e da utilização dos recursos disponíveis para correção de erros via CNC. Embora esta tendência seja crescente, o volume de ensaios ainda é muito pequeno e o crescimento não é expressivo [20]. O desconhecimento da exatidão geométrica da máquina-ferramenta leva a perdas de tempo e material com a ocorrência de refugo e retrabalho nas peças usinadas, e as causas mais prováveis para essa desconsideração dos usuários, a nível de Brasil, apontam para: [17;21]

- Desinformação dos usuários sobre as limitações geométricas de seus equipamentos e das possibilidades de otimização;
- Dificuldades operacionais e econômicas com as técnicas de ensaio utilizadas para determinar os erros geométricos da máquina.

A primeira causa é fundamental e só será minimizada com a conscientização do usuário através de sua capacitação tecnológica e visão de competitividade. Os próprios fabricantes de máquinas-ferramenta poderiam motivar esta conscientização através de um apoio mais expressivo aos seus clientes.

A outra dificuldade apontada está relacionada às próprias técnicas de ensaio. As técnicas clássicas de ensaio de máquinas apresentam dificuldades quanto ao tempo de ensaio e/ou apresentam custo elevado e/ou não fornecem resultados confiáveis sobre o estado da máquina. Certas técnicas de ensaio fornecem resultados bastante completos e confiáveis mas são pouco práticas de aplicação e de custo elevado. Por outro lado, existem técnicas de baixo custo e aplicação fácil e rápida, mas que fornecem somente uma avaliação geral do estado da máquina,

sem conseguir chegar aos erros individuais. Diversas pesquisas têm sido desenvolvidas e várias técnicas de ensaio têm sido lançadas no mercado buscando superar esta limitação [16;22;23]. Embora avanços inegáveis tenham ocorrido, o desafio tecnológico de desenvolver uma técnica confiável, prática e de baixo custo permanece, e a sua solução deve ser perseguida, pois os efeitos multiplicadores são bastante significativos.

A existência de uma técnica de ensaio com estas características seria, por si só, um motivador para a criação de uma cultura de ensaios periódicos pelos usuários. O desenvolvimento dos controladores CNC das máquinas-ferramenta criou possibilidades ainda inexploradas por falta de ferramentas eficientes. Paralelo ao desenvolvimento de recursos tecnológicos para a máquina-ferramenta, é necessário que também se desenvolvam tecnologias que facilitem a exploração desses recursos.

1.1 Uma Proposta de Solução

Diante do contexto descrito anteriormente, procurou-se estabelecer uma sistemática alternativa para o ensaio geométrico de máquinas-ferramenta, que congregasse vantagens nos aspectos de confiabilidade metrológica, praticidade operacional e baixo custo de ensaio. Adicionalmente, o método deveria apresentar resultados de fácil compreensão ao usuário, e com formatação configurada para a correção de parâmetros no controlador CNC da máquina.

Como já afirmado, a existência de uma técnica de ensaio com tais qualidades seria um forte motivador para minimizar as dificuldades citadas para a pouca ou nenhuma prática de ensaios geométricos periódicos e, dessa forma, criar uma cultura de verificação periódica das máquinas como uma estratégia para a garantia da qualidade nas peças usinadas.

Após analisar o contexto e estudar algumas estratégias de ensaio, visualizou-se a possibilidade de utilizar a Tecnologia de Medição por Coordenadas para o ensaio geométrico de centros de usinagem de pequeno e médio porte. Máquinas-ferramenta CNC equipadas com apalpadores de medição estão aptas a localizar pontos dentro do seu volume de trabalho, e os sistemas de medição (encoders e escalas lineares) utilizados para o controle dos eixos da máquina,

determinam a posição desses pontos. Essa possibilidade tem sido crescentemente utilizada para a localização e alinhamento automático das peças a usinar, digitalização de formas e medição em processo.

As vantagens em relação a operações antes realizadas manualmente e as novas aplicações têm impulsionado a utilização de apalpadores de medição nas máquinas-ferramenta e, motivados por essa demanda, os fabricantes de apalpadores têm desenvolvido sistemas cada vez mais sofisticados e com incertezas de medição cada vez menores [24]. Da mesma forma, os fabricantes de CNC têm incorporado aos controladores diversas funções de alinhamento e medição, antes disponíveis somente em softwares de Máquinas de Medir por Coordenadas. Estes fatos indicam que, cada vez mais, a tecnologia de medição por coordenadas tem sido incorporada às máquinas-ferramenta. No entanto, as estratégias utilizadas para a calibração das Máquinas de Medir ainda não têm sido observadas para o ensaio geométrico de máquinas-ferramenta.

Diante disso, pesquisou-se uma estratégia para o ensaio geométrico de centros de usinagem, fundamentada na tecnologia de medição por coordenadas. O sistema idealizado pode ser visualizado na figura 1.4, onde padrões corporificados¹ com geometrias específicas e previamente calibrados são medidos na máquina-ferramenta equipada com um apalpador de medição. As coordenadas dos pontos apalpados sobre os padrões são adquiridas, processadas e comparadas com as posições calibradas dos padrões. Como resultado, são obtidas algumas componentes de erro da máquina-ferramenta, já formatadas para a correção eletrônica no CNC da máquina.

Para verificar se o sistema idealizado é confiável metrologicamente e vantajoso operacional e economicamente, um intenso desenvolvimento teórico e experimental foi empreendido, e os resultados obtidos indicam que o método mostra-se promissor para atender a esses requisitos, superando de forma significativa certos aspectos de técnicas classicamente utilizadas para o ensaio geométrico de centros de usinagem de pequeno e médio porte.

¹ O termo *Padrão Corporificado*, utilizado neste trabalho, é sinônimo da terminologia *Media Materializada*, contida no Vocabulário Internacional de Metrologia.

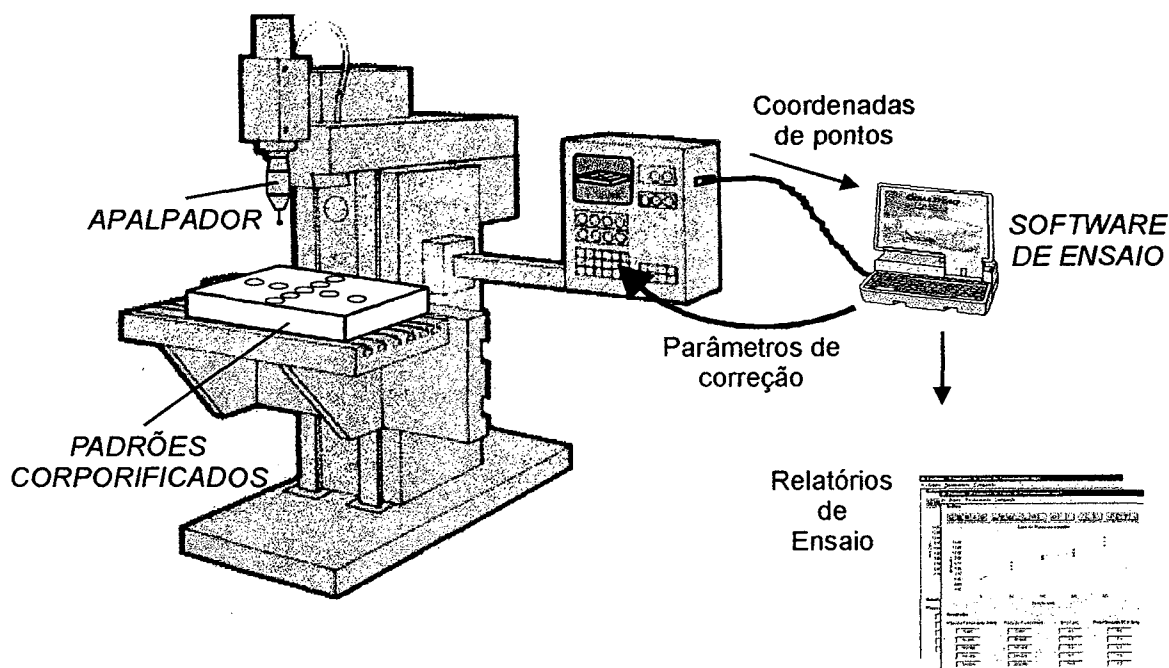


Figura 1.4 – Sistema de ensaio geométrico idealizado

1.2 Estruturação e Condução do Trabalho de Pesquisa

Como o tema da tese situa-se próximo à interface e envolve conhecimentos das áreas de metrologia e fabricação, a quantidade de informações necessárias para a sua contextualização e um correto direcionamento do trabalho, além de ser muito grande, está contida em locais tão diversos como universidades e centros de pesquisa, fabricantes e usuários de máquinas-ferramenta, fabricantes de controladores CNC, prestadores de serviço de ensaios geométricos e fabricantes de sistemas de medição para ensaios geométricos. Da mesma forma, o desenvolvimento experimental do trabalho requereria a concepção, fabricação e calibração de diversos padrões e dispositivos, aquisição de vários sistemas de medição e o uso intenso de máquinas-ferramenta CNC para os ensaios. Tais necessidades extrapolavam em muito as possibilidades existentes, se não fossem buscadas cooperações com instituições e empresas, que viabilizassem muitas dessas necessidades.

Diante dessa realidade, na estruturação e no desenvolvimento de todo o trabalho, além do forte apoio do LABMETRO, procurou-se envolver várias outras instituições e empresas que pudessem contribuir com informações estratégicas e privilegiadas, bem como fornecer apoio material e

operacional para a fase experimental do trabalho. Isso ocorreu de forma enfática com a empresa DIADUR Ind. e Com., subsidiária da empresa alemã Dr. Johannes Heidenhain, fabricante de sistemas de controle para máquinas-ferramenta (CNC, encoders, ...) e de sistemas de medição para aplicações industriais, dentre outros produtos. Durante todo o desenvolvimento teórico foram fornecidas informações indispensáveis para as formulações e análises de viabilidade, e durante a fase experimental a empresa continuou apoiando o trabalho também de forma material, com a doação de um apalpador de medição para Centro de Usinagem. A participação da empresa na pesquisa foi motivada pela possibilidade de agregar mais uma função ao uso do apalpador nas máquinas-ferramenta: verificar a exatidão geométrica da própria máquina onde está instalado. Várias outras empresas, usuários nacionais e estrangeiros de máquinas-ferramenta CNC, colaboraram com a descrição de problemas enfrentados no chão de fábrica e dos desdobramentos que essas não idealidades provocavam em seus processos. Sempre nos foi solicitado a não divulgação dessas informações e, dessa forma, não citaremos os nomes das empresas.

A proximidade com a Fundação CERTI e a troca de informações com seus especialistas na área de Tecnologia de Medição por Coordenadas e Ensaio de Máquinas-ferramenta foi fundamental e, através dessa proximidade, foi possível manter um constante intercâmbio de informações com o PTB – *Physicalisch Technische Bundesanstalt* – Laboratório de Metrologia Primário da Alemanha e um centro de referência mundial na área de Medição por Coordenadas.

O LMP – Laboratório de Mecânica de Precisão – UFSC – possibilitou a verificação experimental das técnicas de ensaio desenvolvidas, ao disponibilizar seus especialistas e máquinas para os diversos ensaios geométricos. Da mesma forma, o projeto, a fabricação e os teste de dispositivos e padrões foram grandemente facilitados com a participação do CMPJ – Centro de Mecânica de Precisão de Joinville – e da ETFSC – Escola Técnica Federal de Santa Catarina.

O Pós-MCI, Curso de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial – UFSC, tornou possível através da CAPES, uma permanência de 3 meses no exterior, quando foram obtidas informações fundamentais para o desenvolvimento teórico e experimental do trabalho (figura 1.5). Durante esse período, foram visitadas diversas instituições, entre empresas, centros de pesquisa e universidades, além da participação em eventos em vários países da Europa e Estados Unidos. Muitas das informações contidas neste trabalho foram obtidas durante essa permanência no exterior e o contato com alguns dos centros e pesquisadores mais produtivos na área possibilitou vivenciar experiências enriquecedoras. Essa permanência do trabalho ajudou também a consolidar a importância e complexidade do tema a ser pesquisado e permitiu verificar o seu grau de inovação e as contribuições técnico-científicas consequentes.

Roteiro da viagem de estudos sobre tecnologias de ensaio de Máquinas-ferramenta		
PAÍS	CIDADE	INSTITUIÇÃO/EVENTO
Suíça	Zurique	Swiss Federal Institute of Technology Institute of Machine Tools and Manufacturing
Austria	Viena	IMEKO Symposium Metrology for Quality Control in Production
Alemanha	Aachen	RWTH – Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule WZL – Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre
	Braunschweig	PTB – Physikalisch-Technische Bundesanstalt
	Magdeburg	GMQ – Gesellschaft für Machinendiagnose und Qualitätssicherung
	Ilmenau	Technische Universität Ilmenau Fakultät für Maschinenbau
	Stuttgart	IWF – Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik
	Stuttgart	IPA – Fraunhofer Institute for Manufacturing Engineering and Automation
Espanha	Zaragoza	E.T.S. Ingenieros Industriales Laboratorio de Metrologia de Fabricación
	Eibar	Fundación Tekniker
Inglaterra	Cranfield	Cranfield University School of Industrial and Manufacturing Science
	Cranfield	Cranfield Precision
	Gloucester	RENISHAW plc
Estados Unidos	St. Louis	13th Annual Meeting of American Society for Precision Engineering
	Los Angeles	Optodyne Inc.
	Gainesville	Tetra Precision Inc.
	Gainesville	University of Florida Machine Tool Research Center

Figura 1.5 – Instituições e eventos integrantes da viagem de estudos financiada pela CAPES

Estabelecido o direcionamento do trabalho a partir das informações técnico-científicas obtidas e com o apoio material e operacional obtidos junto às instituições, técnicas clássicas de ensaio geométrico foram analisadas e testadas, novas estratégias de ensaio foram estabelecidas e verificadas, padrões corporificados foram concebidos, algoritmos matemáticos foram desenvolvidos, sistemas foram calibrados e máquinas-ferramenta foram testadas.

Tais ações para a comprovação da tese proposta e os respectivos resultados podem ser verificados ao longo deste trabalho que descreve, no **Capítulo 2**, os desafios enfrentados pelos sistemas de fabricação para a produção de peças dentro das tolerâncias com um mínimo de desperdício e analisa as limitações da máquina-ferramenta que dificultam esse objetivo. No **Capítulo 3** são descritos procedimentos para diminuir a influência das limitações das máquinas-ferramenta na produção de peças fora das tolerâncias, enfatizando a possibilidade de corrigir eletronicamente erros mecânicos da máquina e finalizando com a descrição de técnicas clássicas de ensaio geométrico, e as suas limitações que desmotivam os usuários a práticas de correções periódicas nas máquinas.

O **Capítulo 4** propõe o uso da Tecnologia de Medição por Coordenadas nas Máquinas-ferramenta, como uma estratégia para verificar a sua exatidão geométrica. Um sistema idealizado é proposto e os dispositivos e padrões corporificados utilizados no desenvolvimento do sistema são caracterizados metrologicamente. No **Capítulo 5** são apresentados os algoritmos matemáticos desenvolvidos para o processamento de coordenadas e obtenção dos erros geométricos da máquina-ferramenta, a partir da medição dos padrões corporificados.

O **Capítulo 6** traz toda a verificação experimental realizada no trabalho, com a descrição dos ensaios, determinação de Incertezas de Medição e comparação metrológica dos métodos pesquisados com técnicas classicamente utilizadas para o ensaio geométrico de máquinas-ferramenta. O **Capítulo 7** faz as considerações finais sobre o trabalho e sobre os resultados, comparando metrológica, operacional e economicamente os métodos desenvolvidos com técnicas clássicas, indicando limitações dos métodos e sugerindo o alternativas para a minimização dessas limitações, bem como aplicações futuras para o trabalho desenvolvido.

CAPÍTULO 2 - OBTENÇÃO DA CONFORMIDADE GEOMÉTRICA NAS PEÇAS USINADAS

Neste capítulo são discutidos os requisitos necessários à obtenção da conformidade geométrica nas peças usinadas e por consequência, de uma boa produtividade no processo de usinagem. A exatidão de trabalho das máquinas-ferramenta é destacada como um dos principais pressupostos para a obtenção dessa conformidade, e os fatores perturbadores que atuam sobre o comportamento geométrico da máquina são analisados, bem como as evoluções tecnológicas ocorridas para a minimização de seus efeitos.

2.1 Influência da Conformidade Geométrica na Produtividade do Processo

Como descrito no capítulo 1, o processo de usinagem, quando comparado a outros processos como a fundição ou conformação mecânica possui a vantagem de atingir precisão e acabamento superiores nas peças fabricadas, mas a um custo normalmente maior, já que o processo é mais lento e envolve perda de material. Por estas limitações de custo, procuram-se alternativas à usinagem sempre que o tipo de produção e peça permitem, o que nem sempre é realizável. Muitas peças exigem uma qualidade geométrica (macro e micro) superior à capacidade de outros processos, só sendo atendida por algum processo de usinagem. Por esta e outras razões, a usinagem é empregada em grande parte das peças metálicas produzidas na indústria, [25;26] com uma característica comum: na maioria dessas peças, a usinagem define a sua geometria final sendo, pois, o processo terminal.

Ao buscar estas características na usinagem, aumenta-se o custo da peça em troca da exatidão e acabamento a serem agregados e, desta forma, a conformidade geométrica é o principal atributo de controle de uma peça usinada e a produtividade do processo está diretamente associada ao atendimento desta conformidade, no menor tempo possível.

Peças fora das tolerâncias levam ao refugo e retrabalho com a consequente perda de material e tempo, e aumento significativo dos custos de produção (custos da não qualidade). Como a usinagem é normalmente um processo terminal, o prejuízo com o refugo é aumentado já que todos os processamentos anteriores são perdidos (a peça tem maior valor agregado). A figura 2.1

ilustra, agora qualitativamente, o aumento de valor de uma esfera de rolamento, ao longo das etapas de seu processo de fabricação, que pode ser perdido em caso de refugo da peça. Nesta etapa final de definição de geometria, o valor agregado à peça em caso de sucesso é bem menor do que o prejuízo causado pelo refugo de uma peça fora de tolerâncias. O controle na condução deste processo deve ser proporcional a esta importância, exigindo uma performance otimizada dos fatores de produção envolvidos, entre eles a máquina-ferramenta, principalmente quando se trabalham com tolerâncias estreitas.

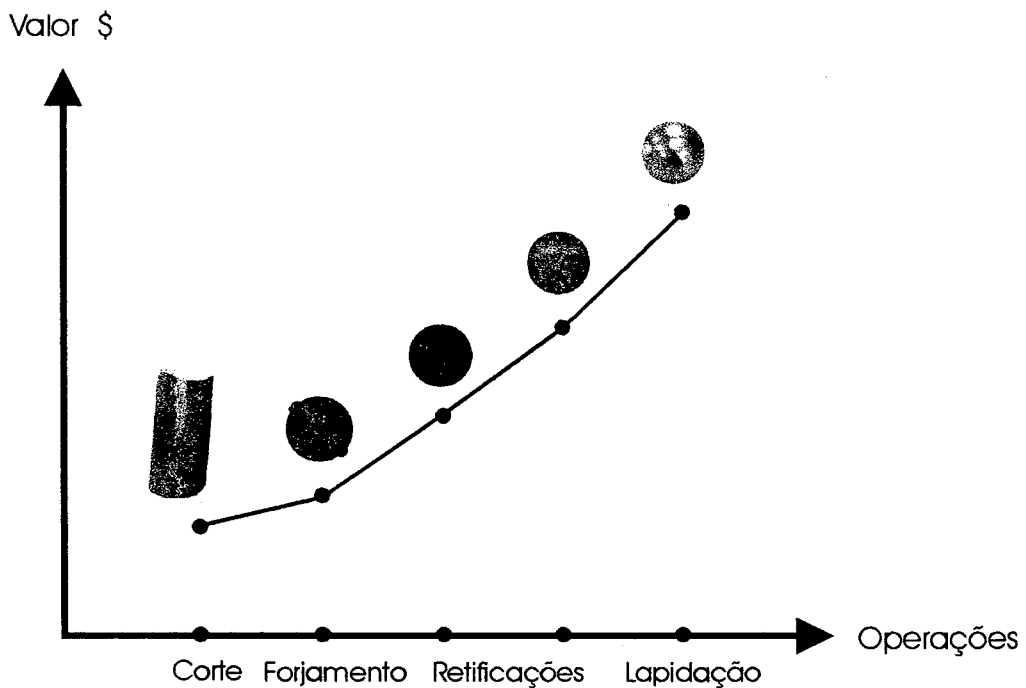


Figura 2.1 – Aumento do valor da esfera de rolamento ao longo do processo

A probabilidade de ocorrência de peças fora de especificação aumenta à medida que suas tolerâncias dimensionais diminuem. Normas como a QS 9000 [27] recomendam procedimentos estatísticos para determinar a capacidade de um processo produzir uma determinada peça dentro de certas tolerâncias dimensionais (capabilidade de processo), para a garantia da qualidade. O índice de capacidade C_{pk} , definido pela equação 2.1, estima a dispersão do processo relativo à tolerância da peça e deve ser, segundo a QS9000, superior a 1,33 para processos estáveis e com distribuição normal. Nesta situação, o processo é capaz. Segundo essa definição, na figura 2.2 observa-se um processo capaz que passa a ser crítico se a tolerância da peça diminui. Para facilidade de ilustração, considerou-se a média centrada, fazendo o $C_{pu} = C_{pl}$.

$$Cpk = \min\{Cpu, Cpl\} \quad (2.1)$$

sendo

$$Cpu = \frac{LSE - \bar{x}}{3 \cdot s} \quad \text{e} \quad Cpl = \frac{\bar{x} - LIE}{3 \cdot s}$$

onde,

Cpk = Índice de capacidade reduzido

Cpu = Índice de capacidade superior

Cpl = Índice de capacidade inferior

LSE = Limite Superior de Especificação da tolerância da peça

LIE = Limite Inferior de Especificação da tolerância da peça

\bar{x} = Dimensão média das peças fabricadas, na amostra de peças verificadas

S = Desvio padrão da amostra

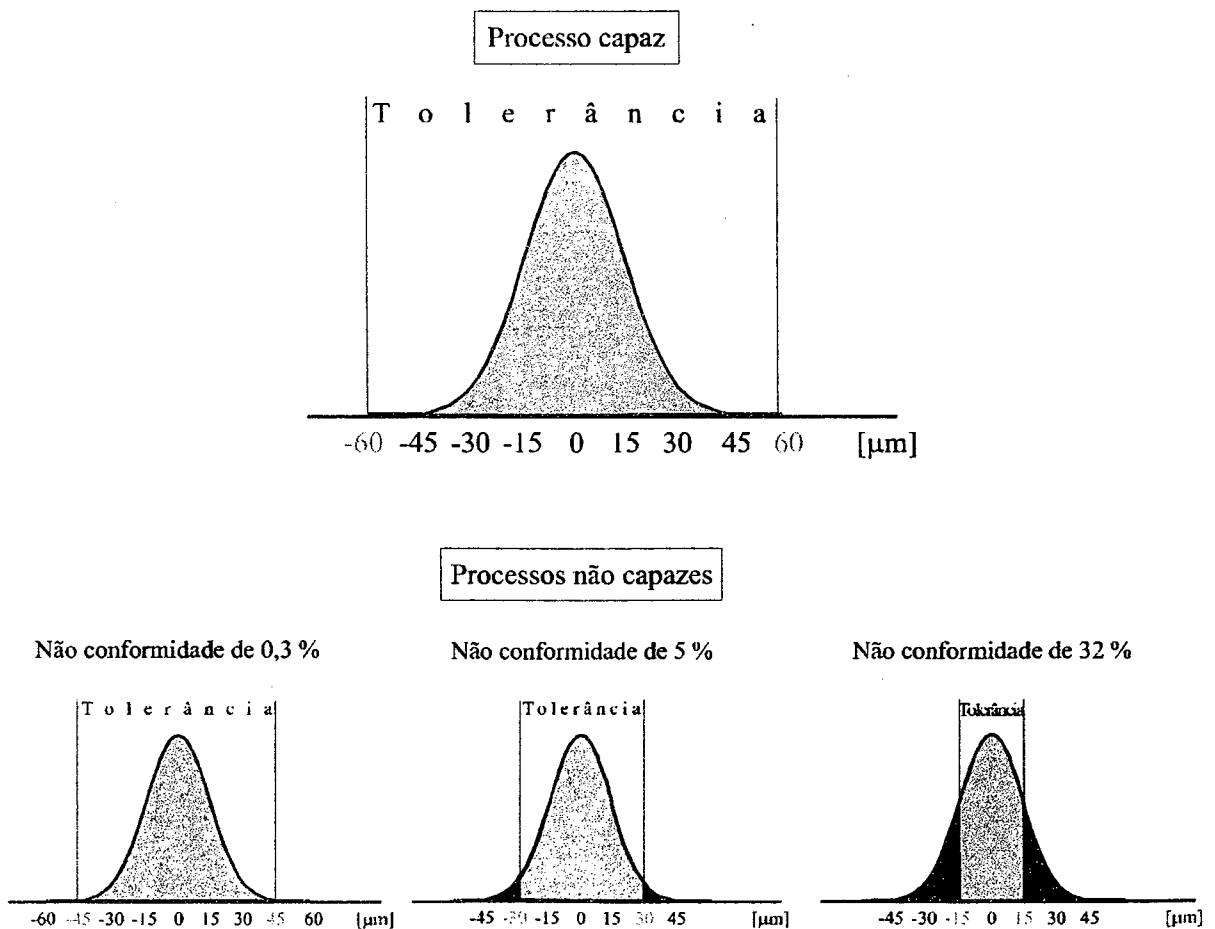


Figura 2.2 - Probabilidade de rejeição de peças em função da tolerância, em processos capazes e não capazes

Por sua significativa influência nas dimensões das peças, deteriorando a capacidade do processo, a máquina-ferramenta é um dos principais itens avaliados nesta análise de capacidade. Nesse contexto, o conhecimento prévio da exatidão de trabalho de uma máquina é muito importante, pois possibilita direcionar a sua aplicação para a usinagem de peças com tolerâncias compatíveis, mantendo os processos com boa capacidade [9;28;29]. Esta prática é comum em indústrias aero-espaciais, bastante conservativas quanto à especificação e verificação de tolerâncias dimensionais.

Analisando-se conjuntamente os processos de fabricação da peça e de controle de qualidade, pode-se afirmar que a dispersão do processo e a incerteza de medição no controle de qualidade são complementares e sua soma não deve ultrapassar os limites de tolerância, sob pena de se cometer erros de classificação, aprovando peças fora de especificação ou reprovando peças adequadas [30]. A figura 2.3 ilustra qualitativamente esta interdependência, indicando que processos muito capazes permitem medições com incertezas maiores e processos com baixa capacidade requerem medições com incertezas bem menores. Para facilidade de exemplificação, considerou-se a média das dimensões coincidente com a dimensão nominal.

Essa medição com baixa incerteza irá requerer sistemas de medição mais sofisticados, ambientes de trabalho mais controlados, pessoal mais qualificado e procedimentos de medição mais elaborados e demorados. Todos esses aspectos são indesejáveis, na medida em que elevam o custo de produção, sem agregarem nenhuma função nova ao produto. A figura 1.1, mostrou um indicativo desse problema. O aumento de valor do bloco nas operações de medição é maior do que todas as operações de usinagem que antecederam ao controle de qualidade, juntas.

Contrariamente, se o sistema de fabricação possui uma boa capacidade, as operações de controle de qualidade tornam-se menos críticas sem haver riscos de má classificação de peças, bem como medições menos frequentes são permitidas. Os custos de produção serão conseqüentemente reduzidos.

Todos esses dados indicam ser muito mais racional atuar para no sistema de fabricação do que somente empreender esforços para que o controle de qualidade seja rigoroso. Embora as medições sejam necessárias para a garantia de que os processos estejam operando de forma

adequada, a única forma de garantir que as peças sejam fabricadas dentro das tolerâncias, é ter um sistema de fabricação capaz de atender a essa demanda, continuamente.

Os cuidados com o sistema de fabricação possuem um caráter fundamentalmente preventivo, evitando a ocorrência de não conformidades e os custos da não qualidade. Empresas que têm adotado essa estratégia relatam melhorias significativas em seus processos. Reduções de 30% no número de peças refugadas e aumento de 95 % no tempo efetivo das máquinas foram conseguidas [29].

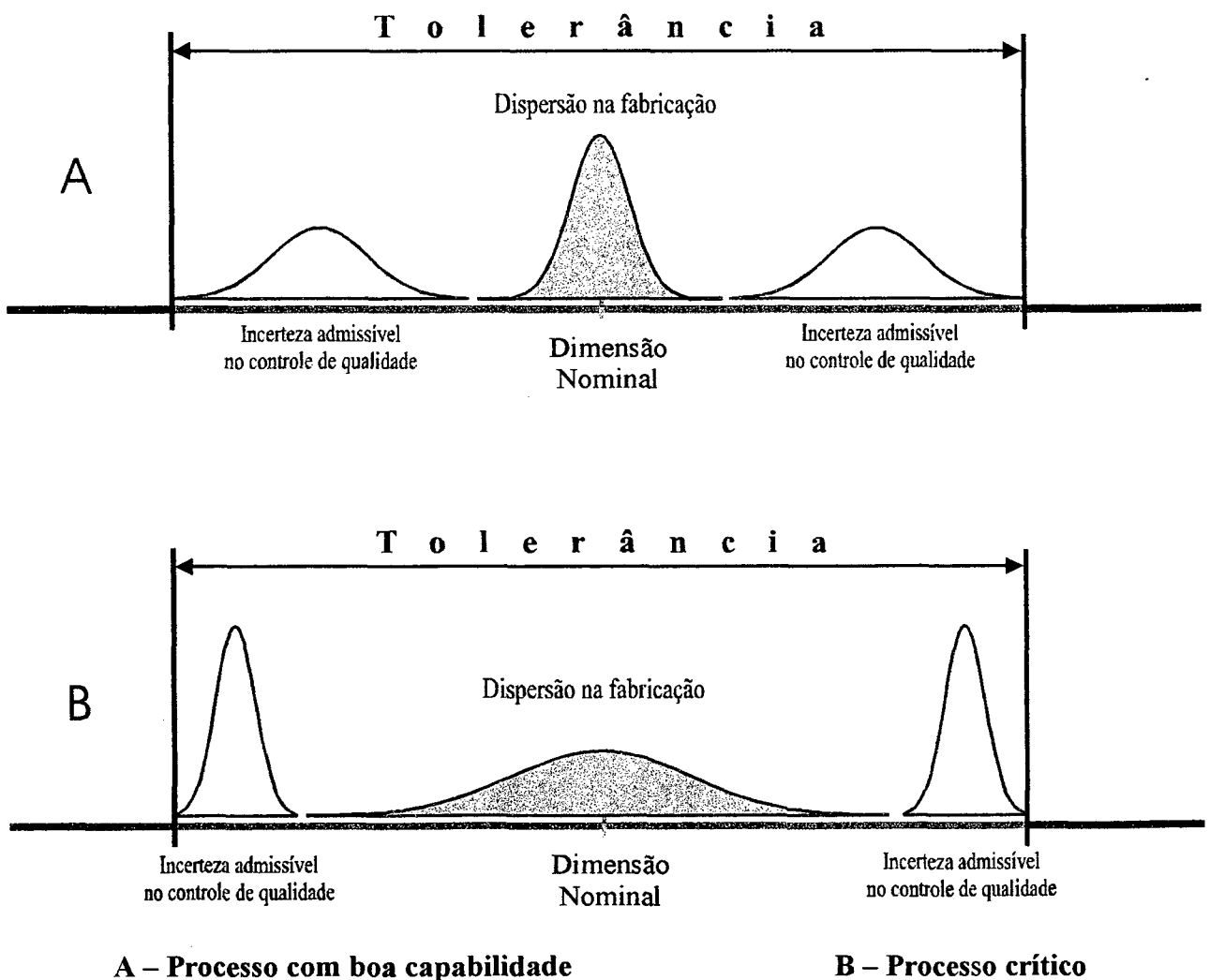


Figura 2.3 - Interdependência das Incertezas no processo de fabricação e no controle de qualidade

2.2 Requisitos para a obtenção da Conformidade Geométrica

A produção de uma peça usinada dentro das tolerâncias requer uma série de cuidados e obedece a um ciclo de produção bem controlado, envolvendo vários fatores de produção (figura 2.4). Esses fatores de produção possuem incertezas que contribuem para que, muitas vezes, as peças não sejam produzidas conforme o especificado [3;31].

No chão de fábrica, a ocorrência de peças usinadas fora de especificação normalmente é corrigida através de procedimentos de “try-out”, corrigindo por tentativa e erro alguns dos fatores de produção de forma a corrigir os erros verificados nas peças [3;19;32]. Este procedimento é frequentemente utilizado em início/retomada da produção, até serem estabelecidas as condições de fabricação adequadas para a produção de peças dentro das tolerâncias.

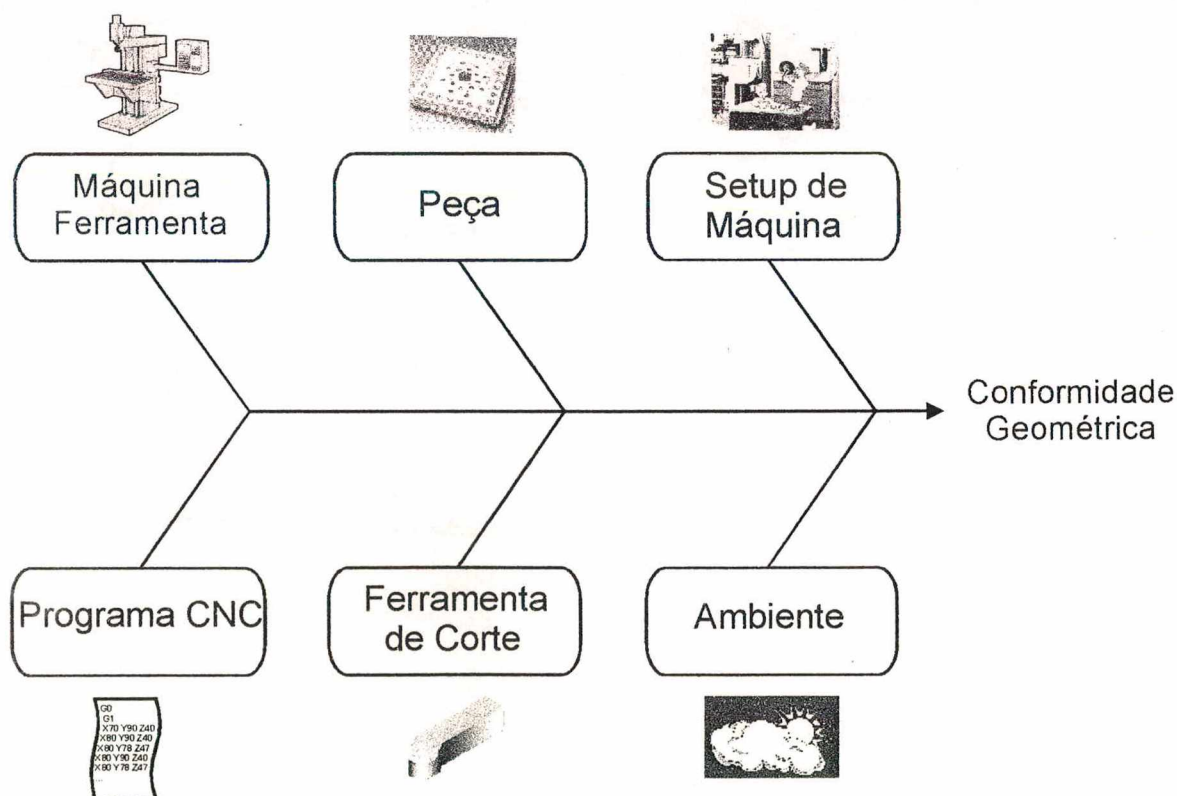


Figura 2.4 - Fatores de produção envolvidos na usinagem de peças geometricamente aceitáveis

A figura 2.5 ilustra um ciclo de “try-out”, que sempre envolve custos indesejáveis com a perda de tempo e material, sendo pouco rentável quando a peça possui valor financeiro alto, e crítica para lotes com pequenos números de peças, uma tendência atual, em modos de produção como o *Just in Time* [7;9;33]. Para uma produção de uma peça hipotética em que sejam usadas 5 unidades (descartadas) até obter-se a primeira conforme, tem-se a curva de desperdício de material mostrada na figura 2.6.

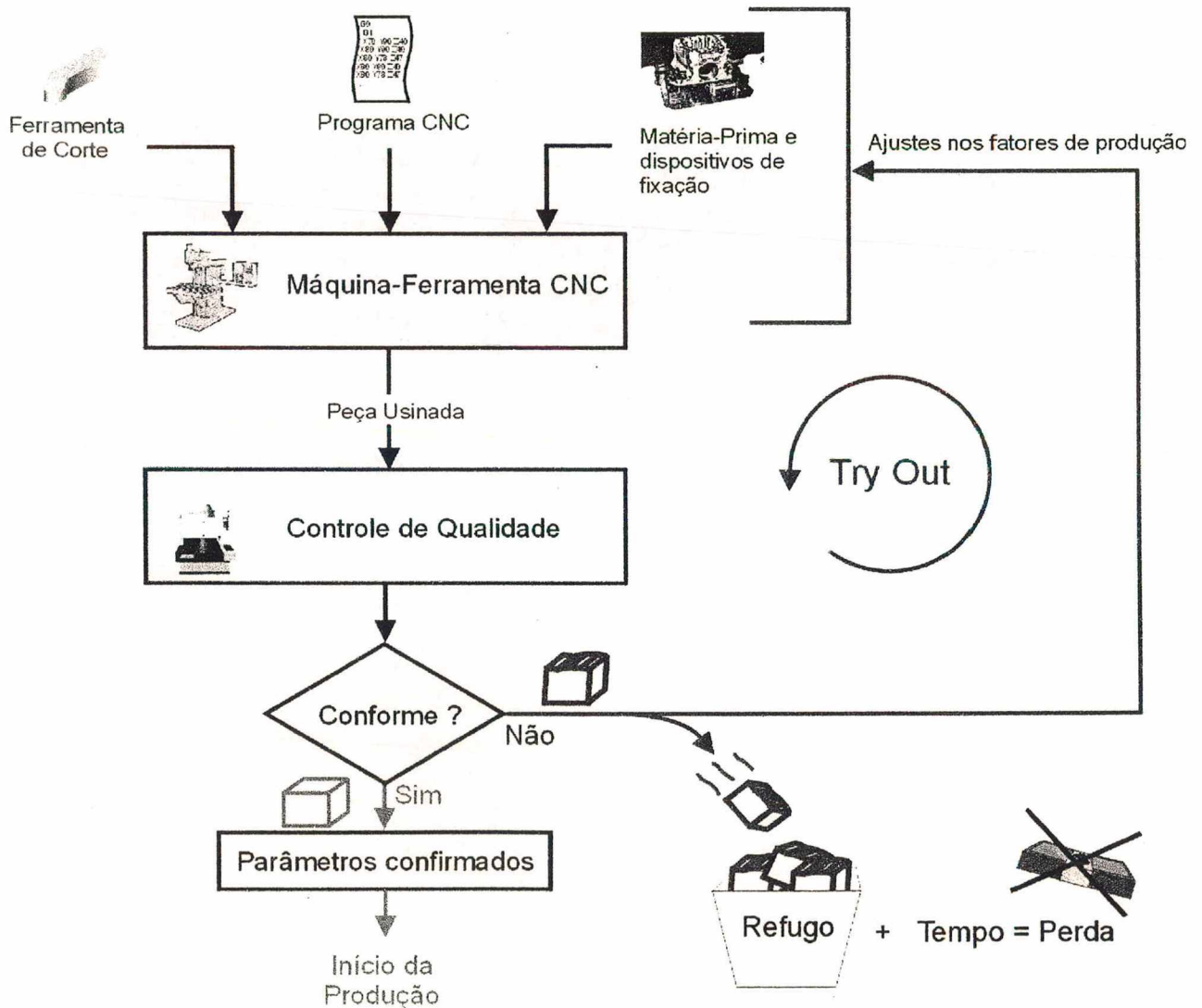
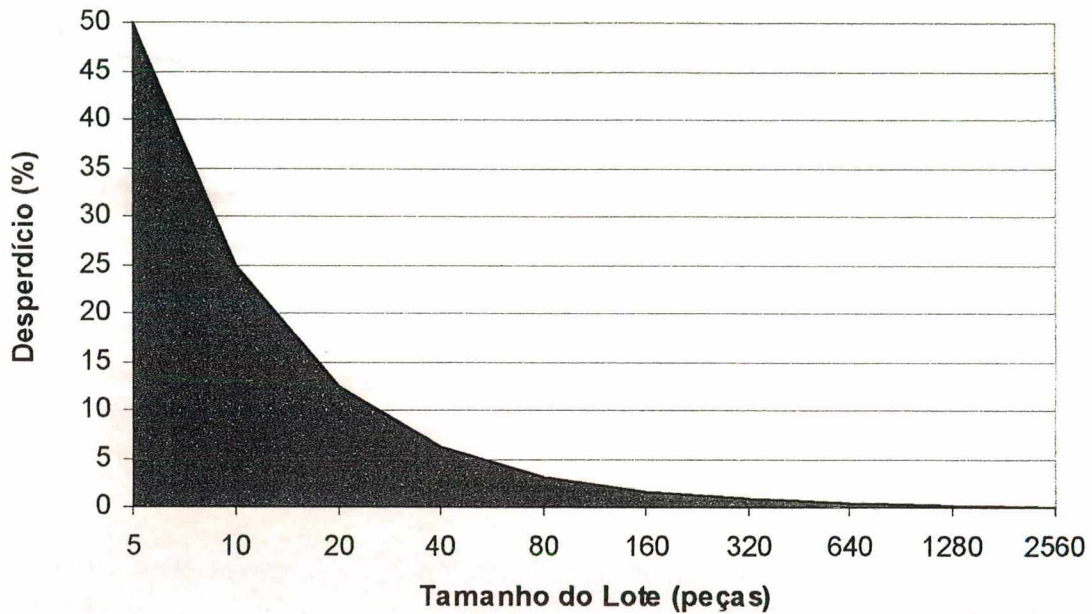


Figura 2.5 - Ciclo de “try-out” para o estabelecimento das condições de fabricação

Tryout com 5 peças



$$Desperdício = \left(\frac{N}{N+T}\right) \cdot 100$$

N = Número de peças usadas no tryout, até obter-se a primeira peça conforme

T = Número de peças do lote

Figura 2.6 - Desperdício do “try-out” em relação ao número de peças do lote

A máquina-ferramenta, como o principal equipamento deste sistema de fabricação, tem uma contribuição significativa para a conformidade geométrica das peças, sendo a principal causa da necessidade de ciclos de “try-out” em início de produção [19;33-35]. Diversos fatores internos e externos à máquina-ferramenta podem alterar sua exatidão de trabalho, fazendo com que as trajetórias programadas sejam diferentes das realizadas. Melhorias na exatidão das peças e o conseqüente aumento de produtividade do processo de usinagem passam, necessariamente, por uma otimização no comportamento geométrico da máquina-ferramenta [36].

2.3 Comportamento Geométrico de Máquinas-ferramenta

A alta velocidade de produção trazida pelo CNC para as máquinas-ferramenta não mais tem sido suficiente para proporcionar uma vantagem competitiva aos seus usuários. Mais do que isso, buscam-se hoje equipamentos que aliem alta velocidade, exatidão e flexibilidade, permitindo a produção de peças diversificadas com tolerâncias estreitas, no menor tempo e com alta confiabilidade.

Esta confiabilidade na fabricação não engloba somente a confiabilidade funcional do processo, mas requer que o sistema seja capaz de produzir peças dentro das tolerâncias, continuamente. A tendência de automação e integração de processos e o custo óbvio de verificar a exatidão das peças reforça a necessidade de agregar exatidão à peça no sistema de fabricação, em vez de somente verificá-la pós-processo. Embora esta verificação seja necessária para a garantia da qualidade no sistema de fabricação, a única forma de evitar não-conformidades nas peças é ter um processo capaz de atender os requisitos de exatidão das peças produzidas. Este requisito confronta-se com a realidade, na qual, devido a efeitos térmicos, rigidez finita da máquina, limitações do sistema de controle e erros geométricos nos componentes mecânicos (figura 2.7) [37-39], é limitada a exatidão possível de ser obtida nas peças usinadas por qualquer máquina-ferramenta.

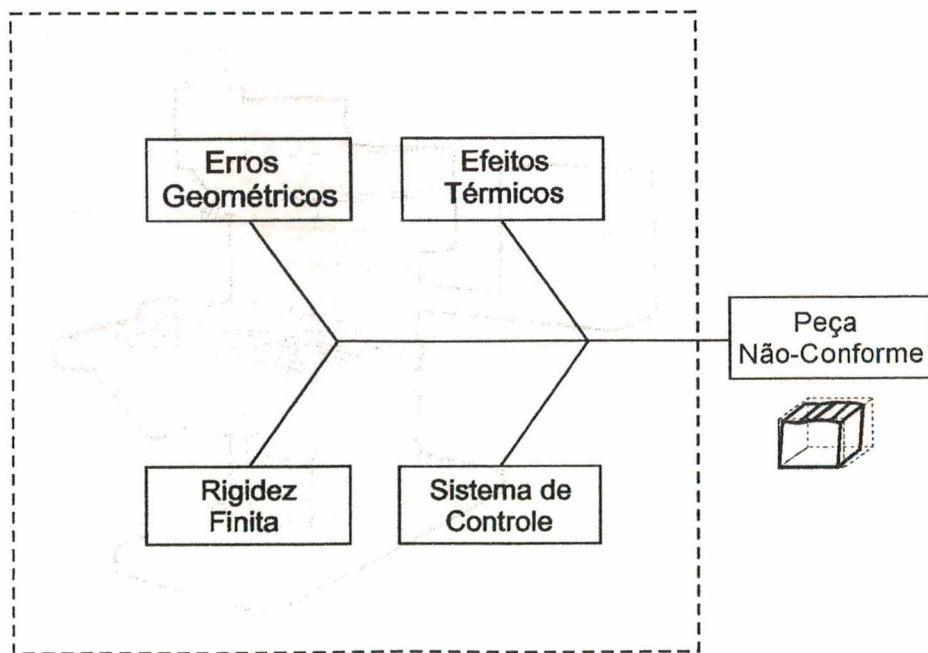


Figura 2.7 - Fatores perturbadores do comportamento geométrico da máquina-ferramenta

Estes fatores causam alterações indesejáveis no comportamento geométrico da máquina, provocando erros de posição e trajetória para os eixos da máquina (figura 2.8), com reflexos na geometria final do produto.

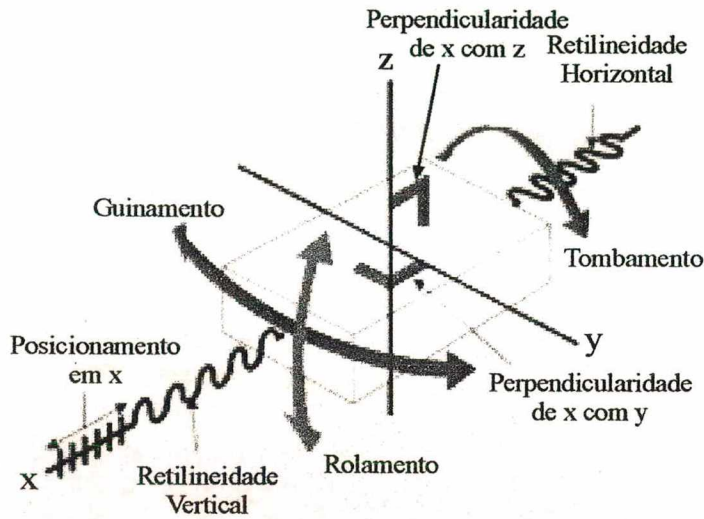


Figura 2.8 - Erros geométricos para um eixo de movimentação [15]

2.3.1 Efeitos Térmicos

Durante a operação, a máquina-ferramenta sofre influência térmica causadas por fatores internos e externos [40-42], que causam deformações térmicas na estrutura da máquina afetando seu comportamento geométrico. Estima-se que 40% dos erros de uma máquina-ferramenta se devam a efeitos térmicos [36;40-50].

Internamente, os centros de usinagem possuem várias fontes de calor. Dentre as mais significativas estão:

- Motores de acionamento das mesas e ferramenta de corte;
- Fusos que transmitem o movimento dos motores às mesas da máquina;
- Mancais que suportam o movimento de mesas e ferramentas;
- O sistema hidráulico;
- O processo de corte e os cavacos que se depositam sobre a área de trabalho.

Externamente, a variação de temperatura no ambiente onde a máquina opera também influencia o seu comportamento geométrico. No entanto, essa influência é secundária, quando comparada com as fontes internas de calor. A temperatura no ambiente de trabalho normalmente varia de forma mais lenta do que as alterações térmicas provocadas pelo aquecimento próprio da máquina. Em caso de forte radiação solar no ambiente e na existência de fortes correntes de ar sobre a máquina a influência do ambiente passa a ser mais crítica.

Estes fatores, agindo conjuntamente, dificultam uma estabilidade térmica da máquina, já que as diversas operações de usinagem irão produzir calor em intensidades diferentes e os efeitos térmicos externos variam de intensidade. No entanto, embora a rigor uma estabilidade térmica dificilmente seja atingida, após certo de tempo de operação contínua, a variação de temperatura na máquina diminui consideravelmente. Na figura 2.9 esta tendência à estabilização pode ser vista em um experimento para avaliação térmica de um centro de usinagem [51], onde utilizou-se um transdutor indutivo sem contato para medir os deslocamentos de um cilindro colocado no eixo árvore da máquina a 6000 rpm durante 24 horas, no aquecimento e no resfriamento da máquina. A figura 2.10 mostra um resultado semelhante, mas agora os deslocamentos foram calculados por elementos finitos, a partir da medição de temperatura em pontos estratégicos da máquina [48].

Esta constatação leva os fabricantes a recomendarem ciclos de aquecimento (“warm up”) aos usuários de suas máquinas, antes de iniciar a produção. As máquinas são até pré-ajustadas para melhorarem a sua exatidão de trabalho quando aquecidas. Em alguns processos, este ciclo de aquecimento é longo o suficiente para ser vantajoso manter as máquinas em operação contínua.

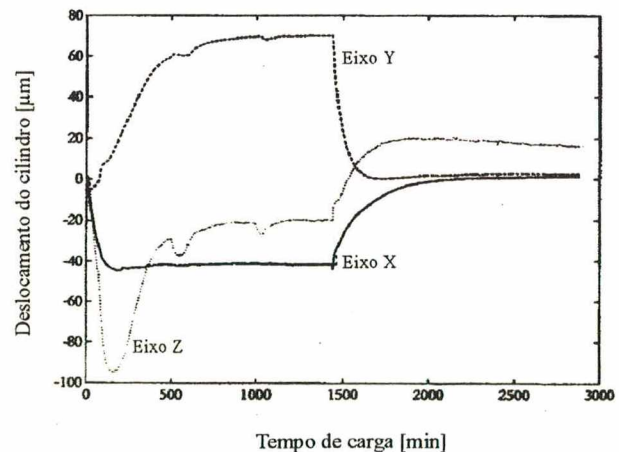
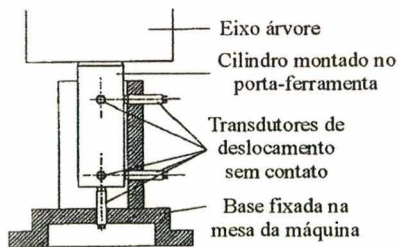


Figura 2.9 – Medição dos deslocamentos entre peça e ferramenta, causados por variação térmica da máquina [51]

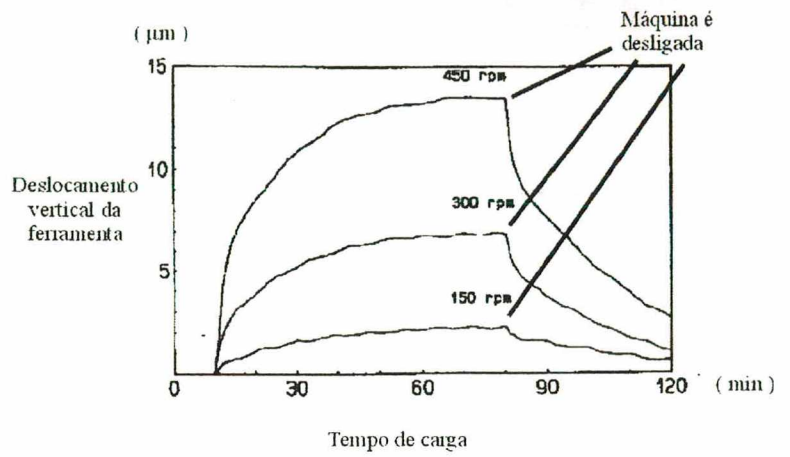
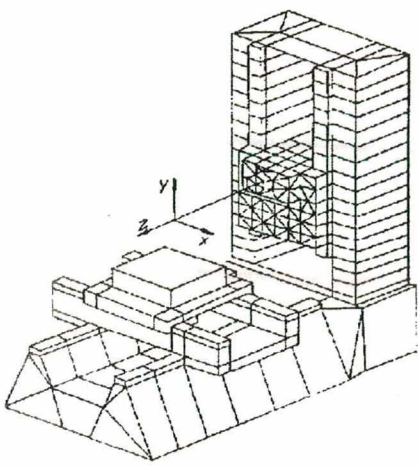


Figura 2.10 – Determinação do deslocamento vertical da ferramenta por elementos finitos [53]

Por causa dessa influência térmica, as normas que tratam de ensaios geométricos de máquinas também recomendam sempre ciclos de pré-aquecimento para que os erros da máquina sejam medidos numa condição mais próxima de seu estado térmico normal quando em operação [54-56].

Neste ponto surge um problema, já que durante os ensaios geométricos a máquina fica quase estática e a temperatura tende a diminuir. Esse problema é bem mais grave quando o método de ensaio utilizado é muito demorado, pois o tempo necessário para a realização do ensaio é longo o suficiente para a máquina esfriar e, assim, o ensaio é realizado durante um transiente térmico. Um método de ensaio de rápida aplicação permitirá a verificação da máquina aquecida, em uma condição mais estável.

A influência térmica é mais crítica em máquinas-ferramenta que usam encoders como sistema de medição de posicionamento das mesas, para a realimentação do controlador da máquina. Nestas máquinas, ao contrário das máquinas com escala linear, a posição da mesa não é medida diretamente, já que somente a posição angular do servo-motor está sendo medida (a figura 2.11 mostra as duas possibilidades de sistemas de medição de posicionamento). A posição da mesa é obtida a partir de relações cinemáticas entre a rotação do motor e o avanço da mesa. Ou seja, o passo da rosca do fuso é a escala de medição, correlacionando a rotação do motor com o avanço da mesa.

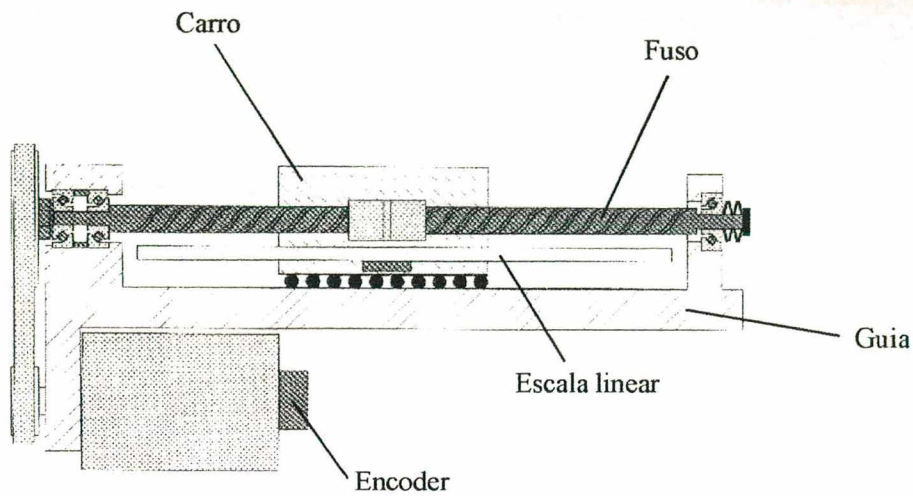


Figura 2.11 - Sistemas de medição de posicionamento em máquinas-ferramenta [57]

Na movimentação da mesa há atrito e geração de calor, ocorrendo a dilatação térmica do fuso e alterando a relação rotação do motor/avanço da mesa. Como o controlador da máquina utiliza esta relação como constante, passa a obter informação errada para controlar a posição da máquina. Com a dilatação, a máquina irá produzir peças maiores do que o programado e também a referência do sistema de coordenadas local (zero peça) altera-se, produzindo erros de posicionamento dos elementos geométricos das peças.

Na figura 2.12 pode-se observar uma imagem termográfica indicando o aquecimento em um fuso de esferas recirculantes, provocado pelo deslocamento alternativo da mesa da máquina durante 6 horas, a 24 m/min, entre dois pontos distantes de 150 mm. Variações significativas de temperatura foram medidas e dilatações térmicas proporcionais são esperadas.

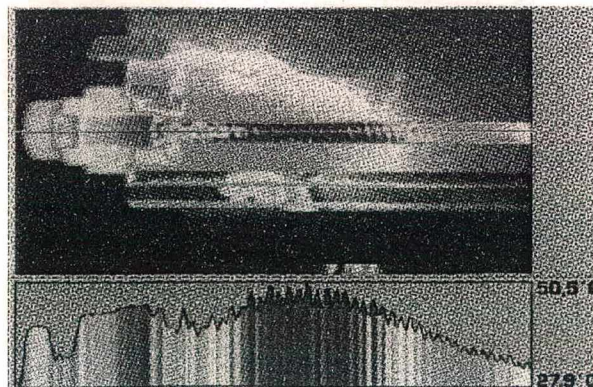


Figura 2.12 - Análise termo gráfica do aquecimento no fuso de esferas [57]

Nas máquinas que utilizam escalas lineares como sistema de medição de posicionamento, a posição da mesa é medida diretamente e a dilatação do fuso não influencia a exatidão da máquina, já que é medida e informada ao sistema de controle. Embora a solução por encoder seja de menor custo, a utilização de escalas é mais favorável por não propagar efeito de erros térmicos como os encoders. Na figura 2.13 pode ser vista a influência desta comparação em peças usinadas em máquinas idênticas mas utilizando sistemas de medição distintos. Peças idênticas foram usinadas durante 2 horas nas duas máquinas, em ambiente de temperatura controlada, e os seus comprimentos foram medidos e registrados. O gráfico indica um crescimento significativo das peças usinadas na máquina com encoder, não se notando (neste caso) influência significativa na máquina com escala linear. Deve-se ressaltar que as máquinas com escalas lineares não são inertes aos efeitos térmicos, e sim menos sensíveis.

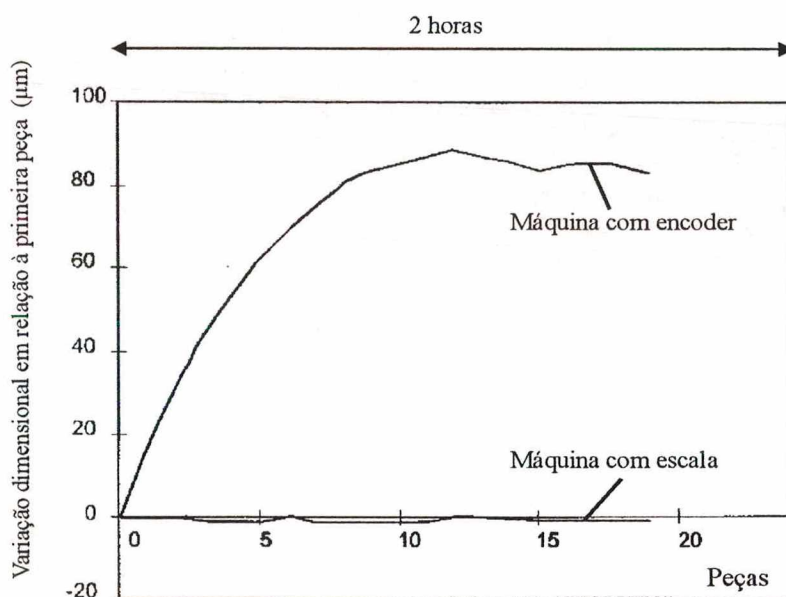


Figura 2.13 - Erro de posicionamento com encoder e escala linear [57]

2.3.2 Sistema de controle CNC

Em sua função principal de transformar códigos de programação em movimentos controlados dos eixos da máquina, o sistema de controle presente na máquina-ferramenta CNC possui limitações que contribuem para prejudicar o comportamento geométrico da máquina [58-60].

Como os diversos sistemas de controle em malha fechada, o CNC recebe os códigos de programação, ajusta os parâmetros de velocidade, direção, e distância para os movimentos necessários para seguir trajetória programada, e calcula uma série de posições para cada eixo, a serem obedecidas ao longo da trajetória programada, na velocidade desejada. Sinais são enviados para os servo-motores para movimentarem os eixos da máquina, de forma que a trajetória seja seguida e, para certificar-se disto, o CNC verifica continuamente a posição atual e a compara com a programada fazendo ajuste em tempo real, de forma a manter esta diferença (“following error”) a menor possível. A figura 2.14 ilustra esta ação, que deve ocorrer no menor tempo possível, para minimizar as alterações de trajetória que causem erros nas peças.

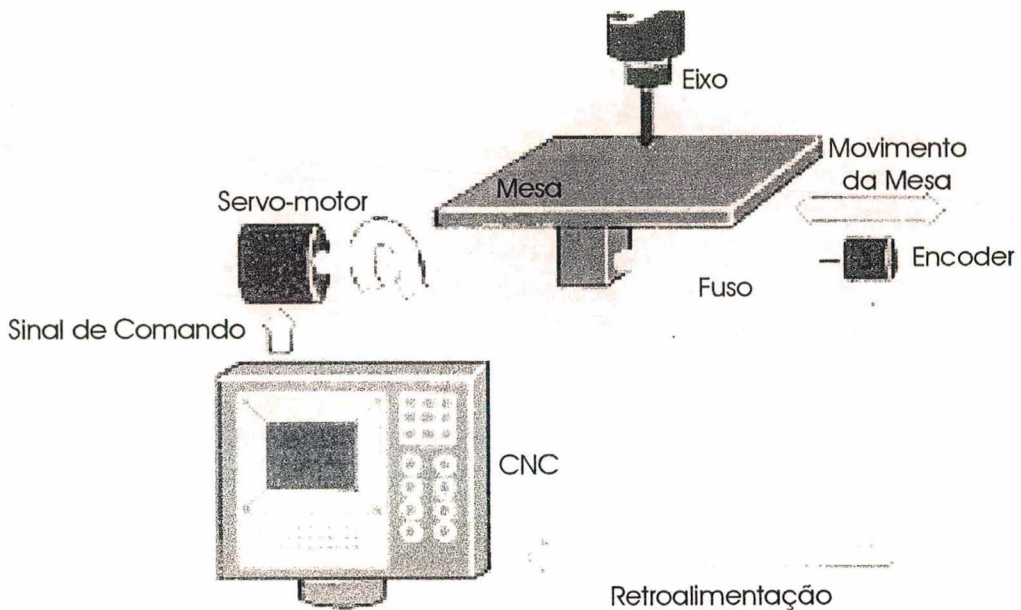
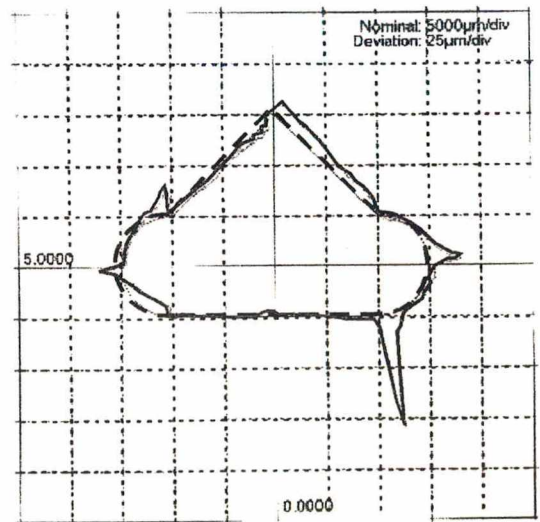
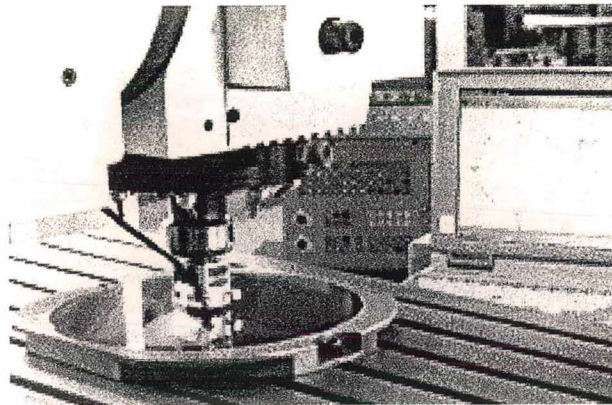


Figura 2.14 - Sistema de controle de Máquina-ferramenta CNC

Este tempo de processamento influencia, pois, diretamente o comportamento geométrico da máquina, na medida em que permite um melhor controle de trajetória [61]. Quanto mais rápido se fechar este laço de controle, mais frequentemente o CNC pode comparar os valores programados com os realizados e mais rápido tomará ações corretivas. Como a capacidade de processamento do CNC é finita, as trajetórias reais se desviam em relação às programadas, como ilustra a figura 2.15 em um ensaio de trajetória em vazio, realizado com um *grid encoder* no plano de trabalho horizontal de um centro de usinagem vertical.

Percebe-se nesses resultados, maiores desvios em trajetórias curvas e nos cantos vivos, situações que exigem maior velocidade de processamento do CNC. Para seguir trajetórias curvas, cada comando ponto-a-ponto enviado aos servo-motores é resultado de cálculos complexos que são feitos em tempo real, enquanto a ferramenta está removendo material. Este processamento é ainda mais complexo quando dados adicionais como comprimentos e raio da ferramenta e fatores de compensação de erros, têm que ser incluídos nos cálculos. À medida que as superfícies ficam mais complexas e com tolerâncias mais estreitas, o CNC tem que ser capaz de fazer mais cálculos por mm de avanço da ferramenta.



Trajétória Programada - - - - -
 Trajetória Real —————

Figura 2.15 - Ensaio dinâmico de trajetória com sistema Grid Encoder (Heidenhain)

Um outro problema para o CNC nas trajetórias curvas é que quase sempre há a inversão de movimento de pelo menos algum dos eixos envolvidos, e esta inversão requer que os servomotores respondam de maneira uniforme e estável aos sinais vindos do CNC, sob pena de que algum atraso ou instabilidade provoque alterações geométricas na peça. Nesta mudança de direção, deficiências mecânicas da máquina também contribuem significativamente para erros na peça. A figura 2.16 mostra o resultado de um ensaio de circularidade realizado em uma peça usinada por fresamento tangencial em interpolação circular. Observa-se em cada inversão de eixos (mudança de quadrante) alterações nas dimensões e acabamento da peça. No item 3.1.4 serão discutidas as limitações mecânicas co-responsáveis por este erro.

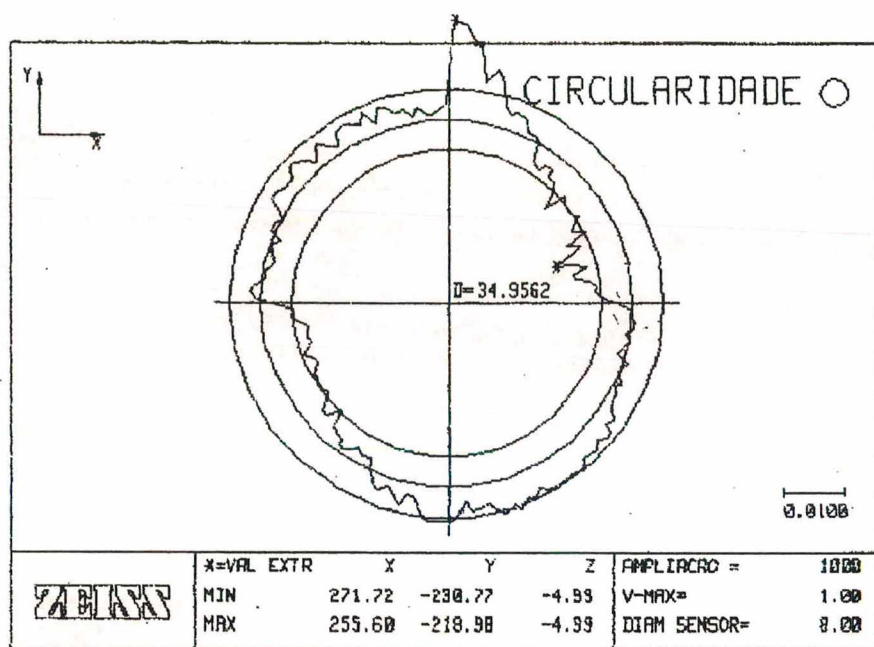


Figura 2.16 - Problemas na peça durante a inversão dos eixos

Além de limitações de velocidade, fatores de ajuste dos servo-motores também provocam alterações no comportamento geométrico da máquina, ao fazer com que um eixo da máquina responda de forma diferenciada de outros, desequilibrando o sistema. Erros no sistema de medição também provocam erros de controle, já que toda a movimentação da máquina é re-alimentada pelas informações que encoders e escalas fornecem. A relação entre os pulsos que vêm do sistema de medição e o deslocamento do eixo deve ser correta e constante para todos os eixos da máquina.

Como visto no item 2.3.1, nas máquinas que possuem encoders medindo a rotação do motor, correlaciona-se rotação com deslocamento linear por meio do passo do fuso, sofre dilatações térmicas e desgastes. Ao optar por uma escala linear, mede-se diretamente o deslocamento dos eixos da máquina mas, desalinhamentos da escala com o eixo e dilatações térmicas diferenciais da máquina em relação à escala (no caso de escalas de vidro) podem provocar erros de medição.

Apesar de estar sob essas fontes de incerteza, o sistema de controle tem continuamente incorporado os avanços da micro-informática e é um dos grandes responsáveis pela melhoria na exatidão de trabalho das máquinas-ferramenta, como será mostrado no item 2.4.2.

2.3.3 Esforços mecânicos (rigidez finita)

Esforços mecânicos estáticos e dinâmicos causados pelo *peso próprio da máquina*, pelo *peso da peça* e pelos *esforços do processo* de usinagem podem afetar o comportamento geométrico das máquinas-ferramenta, na medida em que causam deformações elásticas que podem modificar a posição correta entre peça e ferramenta [15;38;62].

O *peso próprio* dos componentes da máquina tem uma influência mais significativa sobre o comportamento de máquinas de grande porte e em máquinas com configuração desfavorável, com baixa rigidez. Na figura 2.17, a deformação no braço de suporte de uma furadeira radial altera a orientação da ferramenta.

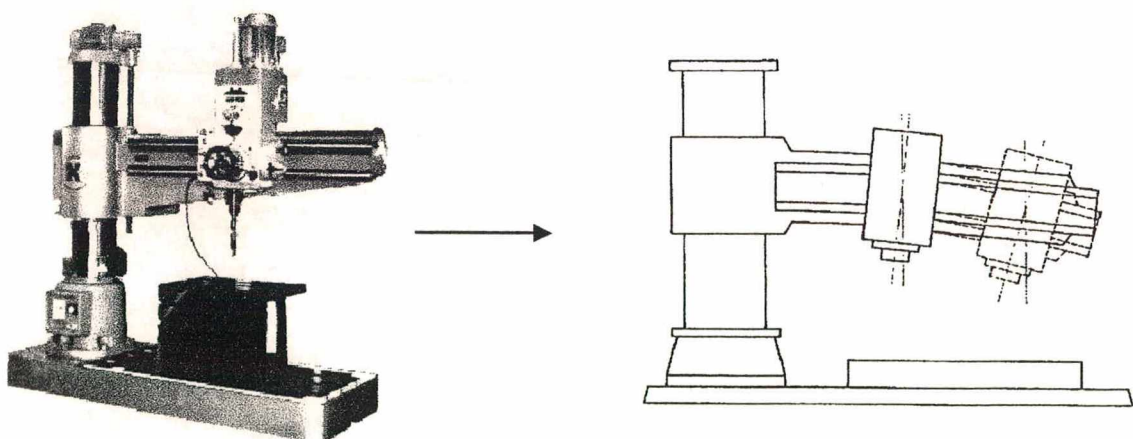


Figura 2.17 - Rigidez prejudicada pela configuração da máquina

O *peso da peça* pode causar deformações significativas na máquina e contribuir para erros geométricos nas peças e essa situação também é mais crítica em máquinas de grande porte, onde peças de grandes dimensões e peso podem estar presentes, embora seja também um fator de influência em máquinas de pequeno e médio porte. Pode-se verificar a influência deste peso nos resultados experimentais, retirados de [51]. Foi testado um centro de usinagem vertical, colocando-se sobre sua mesa uma massa de 260 kg, sendo então medidos os erros de inclinação sofridos pela mesa da máquina em sua trajetória ao longo do eixo x (figura 2.18).

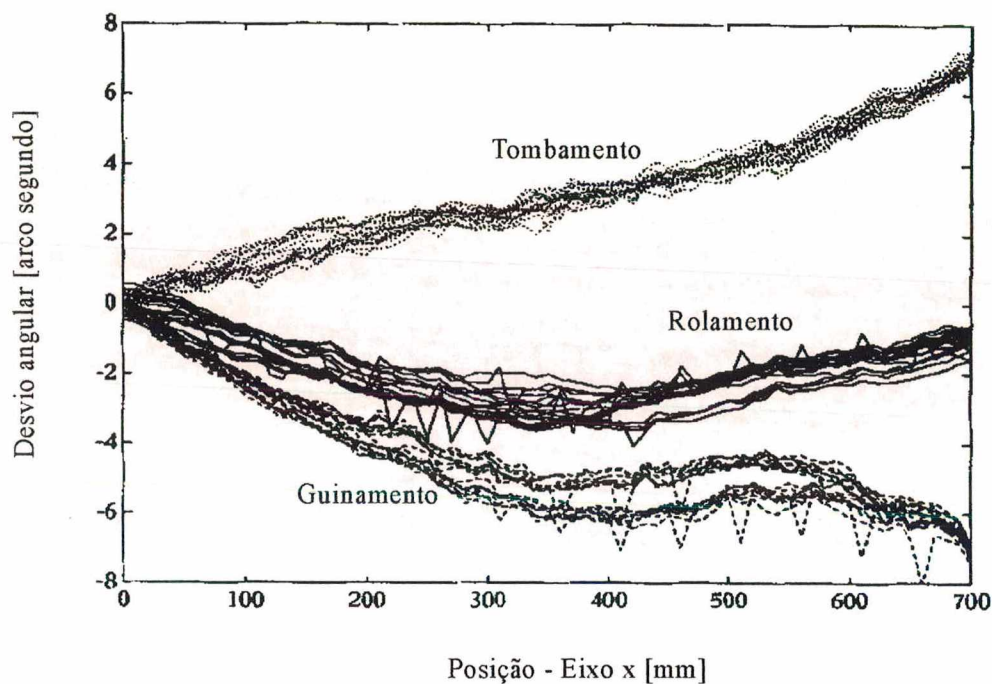


Figura 2.18 - Inclinações causadas pelo peso da peça [1 segundo = 4,8 $\mu\text{m}/\text{m}$]

Além da deformação elástica direta, o peso das estruturas de máquinas de grande e médio porte contribui para que as fundações da máquina cedam com o tempo, provocando apoio ineficiente e deformações adicionais.

Em relação aos *esforços do processo* de usinagem, tem-se constatado que eles têm influência mais significativa sobre a microgeometria da peça [38]. Sua influência sobre as dimensões das peças é limitada, devido aos baixos esforços de corte nas operações de acabamento, que definem a geometria final das peças.

2.3.4 Erros Geométricos em função dos componentes e da montagem da máquina-ferramenta

Para que possa atender aos requisitos de tolerância das peças usinadas, é fundamental que a máquina apresente uma boa exatidão construtiva de seus componentes aliada a uma montagem adequada destes [63]. Disto irá depender grandemente a exatidão de trabalho do equipamento na execução de um programa de usinagem. A figura 2.19 mostra a estrutura de um centro de usinagem de 3 eixos, podendo-se visualizar as guias e fusos de acionamento dos eixos da máquina.

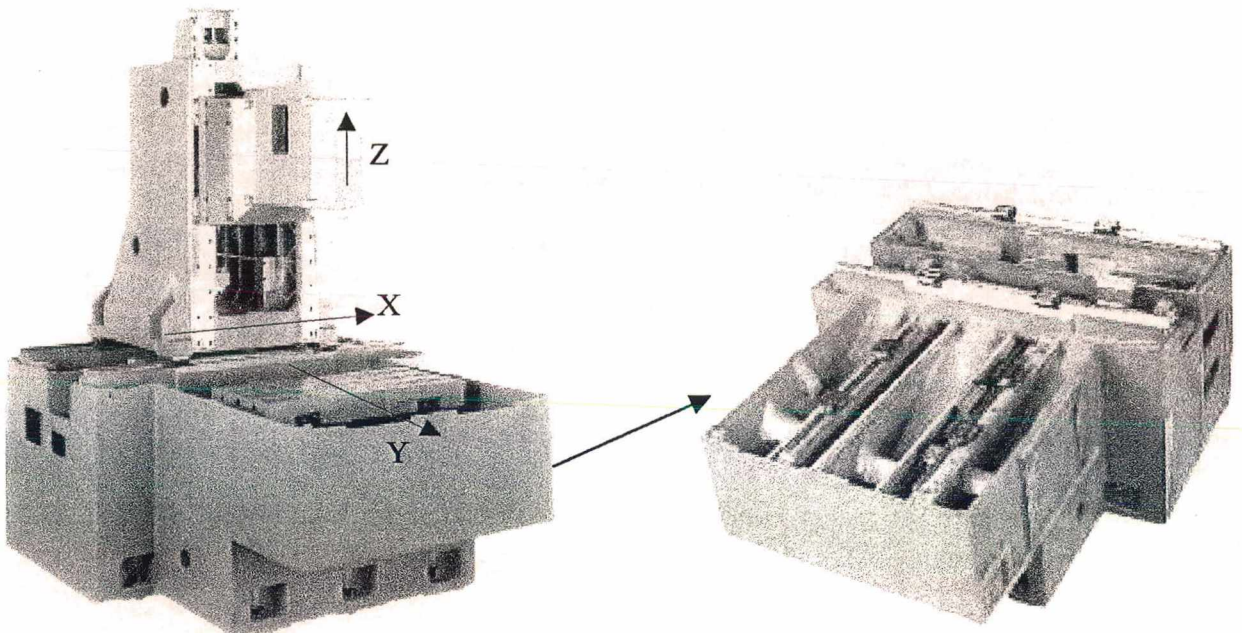


Figura 2.19 - Estrutura de um centro de usinagem vertical com 3 eixos

No entanto, limitações na fabricação e montagem dos componentes da máquina-ferramenta estão sempre presentes, e desgastes ocorridos com o uso da máquina juntamente com alterações estruturais modificam o comportamento geométricos da máquina, levando a erros de trajetória e posicionamento na movimentação dos seus eixos [64-67].

Erros de fabricação das guias provocam desvios de retilidade e inclinações (tombamento, rolamento e guinamento), e erros de fabricação no fuso provocam erros de posicionamento linear em máquinas que utilizam *encoders* rotativos como sistema de medição de deslocamento.

Os erros de montagem provocam desalinhamentos e folgas entre componentes da máquina levando aos erros de perpendicularidade entre eixos. As folgas existentes nos elementos de acionamentos causam histerese e má repetitividade no posicionamento dos eixos.

Os desgastes nos componentes mecânicos decorrentes do uso normal da máquina, ou após uma irregularidade como uma colisão, excesso de carga ou lubrificação deficiente, podem provocar alterações significativas no comportamento geométrico da máquina. Mesmo a utilização em condições normais leva ao desgaste progressivo das guias e fusos, provocando falhas na planicidade das guias que levam aos erros retilineidade e inclinação. O desgaste do fuso provocará erros de posicionamento nas máquinas que utilizam *encoder* como sistema de medição de posicionamento.

Alterações estruturais são causadas por alívio de tensões no material da máquina, provocando fluência no material e, conseqüentemente, modificando a geometria de seus componentes mecânicos [15] e levando aos mais variados erros. A alteração nas fundações da máquina colabora para essa variação na condição geométrica.

2.3.5 Comportamento Resultante

A figura 2.20 mostra a conseqüência desses fatores de influência no posicionamento linear de várias máquinas encontradas em operação na indústria nacional. Os erros encontrados são comparados com os valores máximos admissíveis, especificados pelos fabricantes destes equipamentos [68]

Na figura 2.21 pode-se ver a influência de alguns destes erros em uma peça hipotética. Em peças reais, estes desvios sempre estão presentes e cuidados devem ser tomados para que a sua magnitude não ultrapasse a tolerância especificada para a peça.

Tem-se constatado que em centros de usinagem de pequeno e médio porte, os erros geométricos mais significativos são normalmente erros de posicionamento linear, histerese e os erros de perpendicularidade entre eixos. Os erros de retilineidade normalmente apresentam valores pequenos em máquinas novas, mas crescentes ao longo do tempo de vida da máquina-

ferramenta, principalmente quando ocorrem problemas operacionais como lubrificação deficiente, colisão ou excesso de carga, além do uso intenso em uma só região do volume de trabalho da máquina-ferramenta. Os erros de inclinação, em condições normais, não constituem grande problema devido às dimensões não serem grandes nestas máquinas [69].

Em relação à ordem de importância dos erros para as peças, não se pode generalizar, já que o erro mais crítico é definido em função dos requisitos de tolerância da peça a ser usinada.

Deve-se ressaltar que estes fatores de influência contêm uma componente sistemática predominante, e variam de forma lenta ao longo do período de operação da máquina [70], ao contrário de erros por influência térmica, por exemplo. Para minimizarem esta influência sistemática na exatidão de trabalho da máquina, os fabricantes otimizam a fabricação e montagem destes componentes até o limite economicamente viável. Os erros sistemáticos ainda existentes são compensados eletronicamente através dos recursos dos controladores. A exatidão de trabalho das máquinas-ferramenta evolui nessas duas direções, o que tem contribuído para proporcionar avanços significativos na exatidão das máquinas, sem aumento de custo.

ERRO DE POSICIONAMENTO – MÁQUINAS ENSAIADAS								
Máquina	A	B	C	D	E	F	G	H
Especificado ¹ [μm]	± 50	± 70	± 25	± 10	± 30	± 15	± 5	± 45
Medido ² [μm]	265	237	40	32	170	76	29	238

¹Incerteza de posicionamento ao longo da faixa de trabalho da máquina segundo o fabricante

² Erro máximo encontrado

Figura 2.20 – Desvios de posicionamento especificados e encontrados em máquinas em operação [68]

EFEITOS DOS ERROS GEOMÉTRICOS DE TRAJETÓRIA

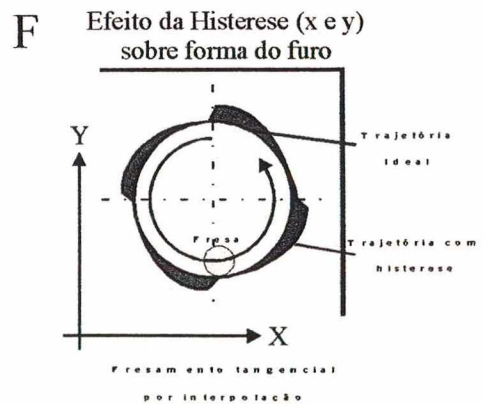
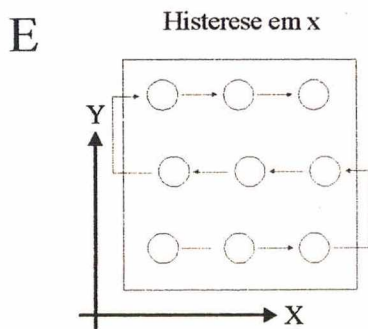
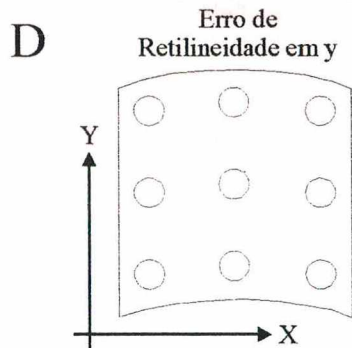
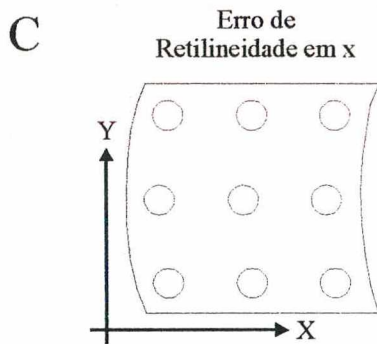
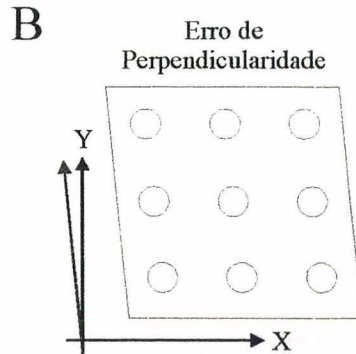
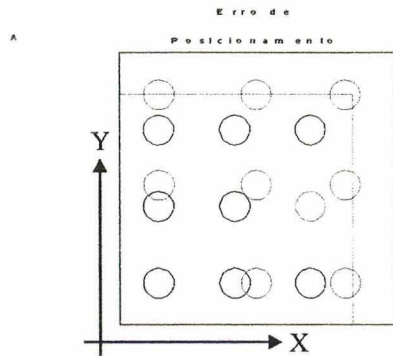
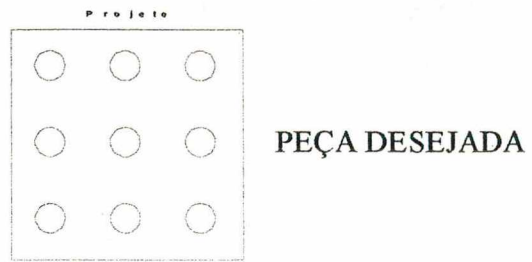


Figura 2.21 - Conseqüência de erros geométricos em peça hipotética

2.4 Evolução na exatidão de trabalho das Máquinas-ferramenta

Para atender as exigências de peças com tolerâncias dimensionais cada vez mais estreitas, a exatidão de trabalho das máquinas-ferramenta evoluiu significativamente [71-75], como pôde ser observado na figura 1.2, que mostra a diminuição da incerteza de posicionamento linear das máquinas ao longo das últimas 2 décadas.

Esta melhoria foi conseguida a partir de otimizações implementadas, conjuntamente, nas partes mecânica e eletrônica das máquinas-ferramenta CNC.

2.4.1 Evoluções Mecânicas

Como evoluções ocorridas na parte mecânica da máquina-ferramenta podem ser incluídas:

- Otimizações no projeto, concebendo máquinas mais rígidas e leves, e menos afetadas por influências térmicas [38];
- Utilização de novos materiais na estrutura da máquina, garantindo maior rigidez e resistência ao desgaste [46];
- Utilização de novos componentes, como o fuso de esferas autocompensado e guias lineares, garantindo uma estabilidade bem maior no funcionamento;
- Otimização na fabricação dos componentes mecânicos, com maior controle sobre os fatores de influência nesta fabricação [43;48;49;76-78];
- Melhor controle na montagem da máquina com a utilização de sistemas de medição sofisticados (níveis eletrônicos, autocolimador, laser interferométrico, etc.) [67;79]

Estas evoluções foram a base indispensável para se obter as máquinas atuais e propiciaram, durante certo tempo, evoluções significativas na exatidão de trabalho das máquinas. No entanto, progressivamente percebeu-se que os avanços conseguidos ficavam cada vez menores para investimentos cada vez maiores, indicando que os benefícios na exatidão da máquina-ferramenta obtida por otimizações puramente mecânicas já não justificavam o custo de obtê-las [16].

2.4.2 Evoluções Eletrônicas

A intensa evolução da micro-eletrônica e informática foi sendo incorporada às máquinas-ferramenta ao longo do tempo, propiciando desempenho crescente a custo decrescente. Esta evolução se fez sentir principalmente sobre os controladores da máquina, que passaram a apresentar uma capacidade de processamento muito superior aos controladores de gerações anteriores [58;80-83].

Uma medida desta evolução pode ser a velocidade com que o controlador transforma um código de programa em sinais para os servo-motores acionarem os eixos da máquina. Os controladores de 16 bits do início da década de 80 demoravam cerca de 50 ms para realizar esse processamento. Nos controladores de 32 bits da década de 90 esse mesmo processamento pode ser feito em 25 μ s, um tempo 2000 vezes menor. Com este aumento de velocidade de processamento, novos recursos foram sendo implementados aos controladores. Alguns destes recursos possibilitaram melhor apresentação gráfica, simulações prévias e a correção de raios, tornando o processo mais fácil e seguro ao operador. Outros recursos, como a compensação de erros geométricos [84] buscaram otimizar a exatidão da máquina, levando sua exatidão de trabalho além de suas limitações mecânicas [43;85;86]. Esta compensação de erros é feita sempre se alterando a trajetória da ferramenta em relação à peça, de forma a compensar os erros da máquina.

Alguns controladores mais recentes possibilitam compensar erros ocorridos com a dilatação térmica da máquina. Nesta compensação, sensores de temperatura são colocados em alguns pontos da máquina, e o controlador faz uma correlação entre as temperaturas medidas e os erros da máquina, segundo algoritmo interno. Estes erros calculados são adicionados à trajetória da máquina como fatores de compensação, corrigindo sua dilatação. Embora estes recursos já estejam disponíveis em alguns controladores, sua aplicação ainda está sendo avaliada. Existem muitas incertezas nesta correlação entre temperatura medida e deslocamento entre ferramenta e peça e, assim, a compensação ainda não tem sido eficiente como o esperado.

Em algumas máquinas de ultraprecisão atualmente em operação, utiliza-se uma estratégia mais direta para compensar os erros térmicos. Nestas máquinas, os deslocamentos ocorridos com a dilatação são medidos diretamente por transdutores, e a compensação da trajetória utiliza esses valores medidos.

A compensação eletrônica dos erros geométricos da máquina já é um procedimento bem mais

estabelecido, estando disponível na grande maioria dos controladores das máquinas atuais, como mostra a figura 2.22, para máquinas com até 3 eixos de movimentação. A descrição do procedimento e as melhorias obtidas com esta correção estão descritas no capítulo 3 [71;87-90].

DISPONIBILIDADE DE FUNÇÕES DE COMPENSAÇÃO DE ERROS EM CNCs									
Erro Compensado	Altus	MCS	Romi	Fanuc	Haas	Heidenhain	Mitsubishi	Okuma	Siemens
Histerese	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Posicionamento	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Retilidade				x		x	x		x
Perpendicularidade				x		x	x		x
	Tecnologia nacional			Tecnologia externa					

Figura 2.22 - Recursos de compensação de alguns controladores [84;91-97]

Além de melhorias na parte de controle da máquina, também houveram otimizações nos sistemas de medição usados para realimentar o controlador com a posição dos eixos da máquina [98-101]. Cada vez mais se utilizam escalas lineares no lugar de encoders rotativos, com as vantagens já citadas no item 2.32. Em máquinas de grande porte são empregadas escalas eletro-ópticas de aço, para minimizar dilatações térmicas diferenciais com a máquina. Ultimamente para estas máquinas de grande porte tem-se utilizado, inclusive, o laser interferométrico como sistema de medição, com compensação automática para efeitos térmicos. Na figura 2.23 pode-se ver a melhoria obtida com o uso deste sistema em uma máquina de grande porte, na usinagem de peças de alumínio. A temperatura da peça é medida e a escala laser automaticamente ajustada para compensar eventuais dilatações da peça [102].

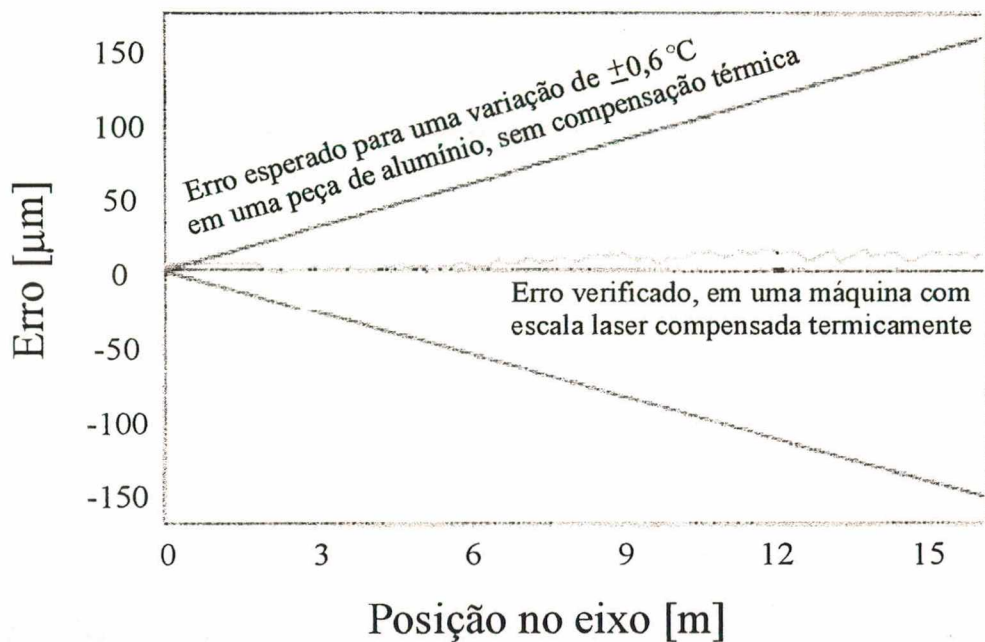
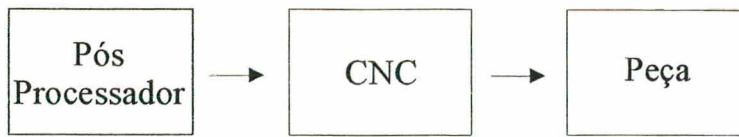


Figura 2.23 - Melhoria obtida com o uso de laser como escala de medição (Renishaw)

Uma das últimas tendências na área tem sido o uso de micro-computadores como unidades de controle das máquinas. O desenvolvimento acelerado e a redução de custos do computador e das tecnologias de rede estão fazendo com que as funções dos PCs sejam expandidas nessa direção. Cada vez mais os PCs têm sido usados como unidades de controle de máquinas CNC, compondo um sistema de controle de arquitetura aberta com vantagens em relação aos CNCs convencionais, fabricados de acordo com tecnologia exclusiva de cada fabricante e com pouca flexibilidade.

Os recursos proporcionados por estes sistemas têm sido aplicados também na melhoria da exatidão de trabalho das máquinas-ferramenta. Uma de suas possibilidades é a utilização, em paralelo, de sistemas de aquisição de sinais junto ao sistema de controle [61;76;85;103-106], possibilitando medir algumas variáveis do processo e realimentar o CNC para realizar um controle adaptativo da máquina durante o processo de usinagem [45;107-113] como mostra a figura 2.24 [85], com a realimentação do controlador com a temperatura da peça.

Processo clássico



Processo com controle adaptativo



Figura 2.24 - Controle adaptativo em máquina-ferramenta com CNC aberto [114]

As figuras 2.25 e 2.26 mostram a melhoria obtida com um sistema que monitora a temperatura da máquina e o esforço de corte durante a usinagem. Diversas peças foram usinadas e suas dimensões e rugosidades foram medidas, podendo-se observar melhorias significativas nas peças usinadas sob controle adaptativo [115].

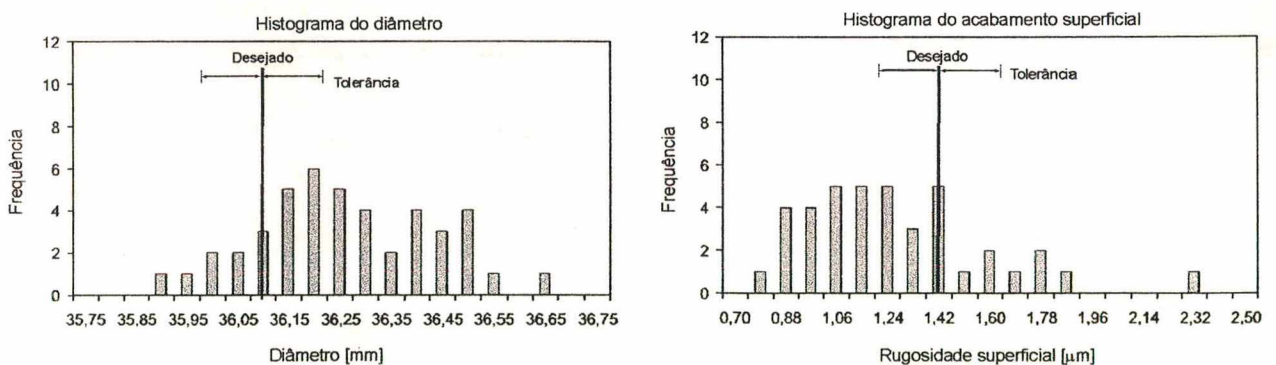


Figura 2.25 - Dispersão do processo sem controle adaptativo [28]

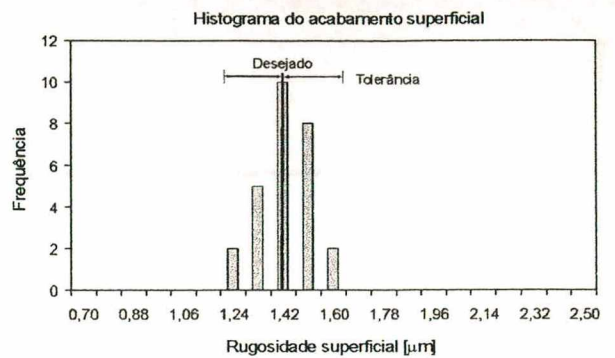
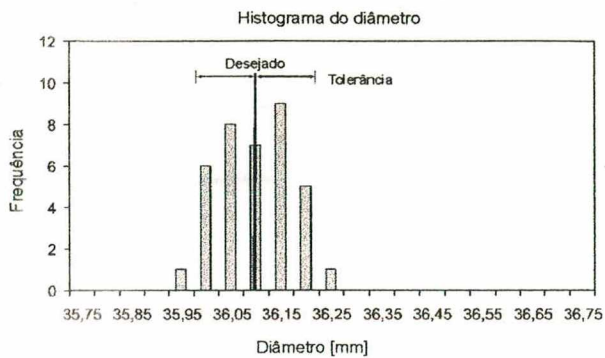


Figura 2.26 - Dispersão do processo com controle adaptativo [112]

Sistemas computacionais de auxílio à usinagem (CAM) também têm evoluído na direção de melhorar a exatidão das peças usinadas [110;116-119]. Um destes sistemas constitui-se em um pós-processador corretor de erros (figura 2.27) [120]. As trajetórias geradas por um sistema CAM normal são corrigidas por um software pós-processador que contém os erros da máquina, medidos previamente por um ensaio geométrico. Desta forma, o código de programação gerado por este sistema e a ser interpretado pelo controlador já considera os erros da máquina, corrigindo-os.

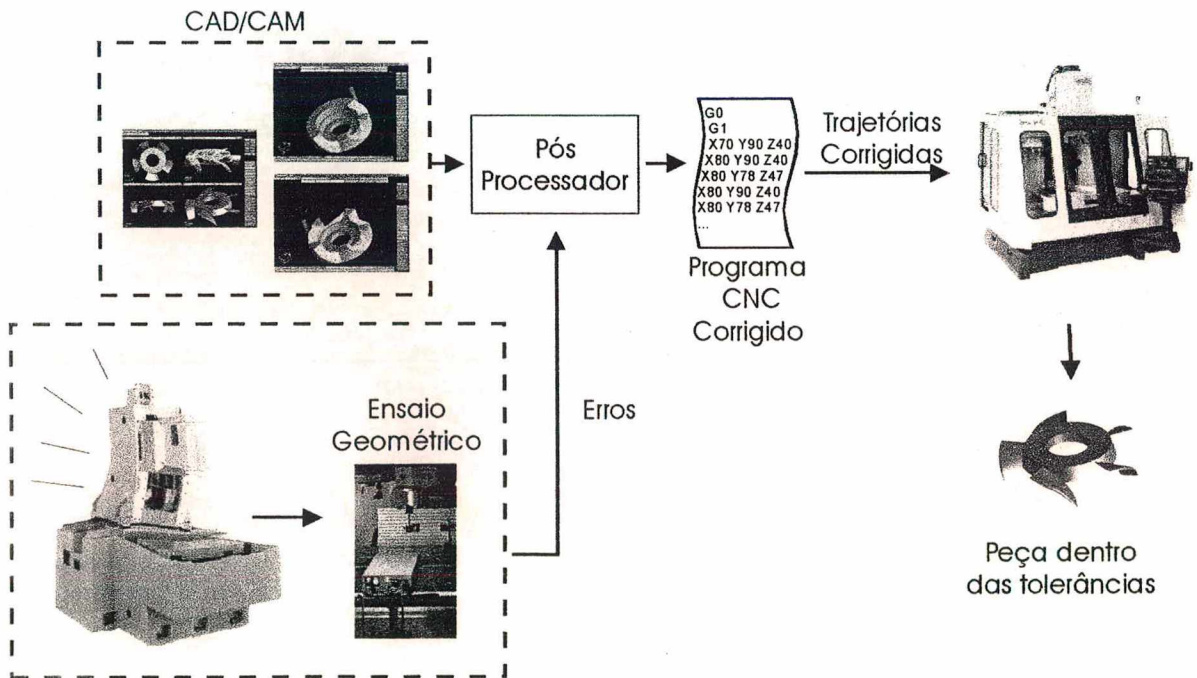


Figura 2.27 – Correção de erros geométricos através de Pós-processador de sistemas CAD/CAM

Todos esses avanços contribuíram e irão contribuir para a existência de máquinas de custo razoável com erros pequenos [11;90], com grandes ganhos de produtividade para os usuários. O gráfico mostrado na figura 1.2 do capítulo 1 indica esta tendência, mostrando melhoria da exatidão de trabalho da máquina com a redução no seu custo, ao longo das últimas 3 décadas.

Várias estratégias aqui descritas para a melhoria de exatidão de trabalho da máquina-ferramenta requerem informações atualizadas sobre os seus erros geométricos, para efetuar os processamentos e as devidas compensações. A exploração desses recursos indica que, no futuro, os ensaios geométricos serão cada vez mais necessários e freqüentes, para alimentar de informações esses sistemas e mantê-los atualizados.

CAPÍTULO 3 - QUALIFICAÇÃO PERIÓDICA DA MÁQUINA-FERRAMENTA

A qualificação geométrica da máquina-ferramenta pode ser definida como a operação de verificar a sua exatidão geométrica para certificar-se de que a máquina atende às especificações do fabricante e/ou aos requisitos do processo de usinagem ao qual se destina. Sempre que necessário, alguma alteração é realizada no equipamento para que a sua exatidão venha a ficar compatível com as especificações, ficando a máquina, assim, qualificada geometricamente para a operação. Para que a qualificação geométrica da máquina possibilite uma vantagem competitiva ao usuário, é importante que os ensaios ocorram periodicamente, já que os erros da máquina variam ao longo do tempo, como já demonstrado no capítulo 2.

As informações obtidas a partir da qualificação geométrica da máquina-ferramenta são de vital importância para a eficiência do processo de usinagem, pois permitem:

- a) Identificar problemas operacionais e afastar a máquina de serviço
- b) Alocar a máquina para a usinagem de peças com tolerâncias compatíveis com sua exatidão de trabalho
- c) Atualizar os fatores de compensação de erros presentes no CNC da máquina, melhorando sua exatidão de trabalho além de suas limitações mecânicas.

Todas essas operações são de caráter preventivo, permitindo se antecipar a não conformidades que venham a ocorrer no processo e nas peças usinadas [121;122].

Neste capítulo serão descritas as vantagens advindas da qualificação geométrica da máquina-ferramenta, com ênfase para a correção eletrônica de erros, bem como as técnicas de ensaio utilizadas para essa operação, cujas limitações têm sido apontadas como um dos entraves para a criação de uma prática de ensaios periódicos em máquinas-ferramenta.

3.1 Informação para Manutenção

Os resultados obtidos com ensaios periódicos de uma máquina permitem acompanhar a degradação de sua exatidão geométrica ao longo do tempo e, preventivamente, planejar uma parada da máquina para ajustes mecânicos e eletrônicos e/ou troca de componentes que otimizem o seu desempenho metrológico. Essa previsibilidade na manutenção da máquina evita a ocorrência de paradas inesperadas, que sempre acarretam custos bem maiores do que interrupções programadas

Adicionalmente, os resultados de um ensaio permitem identificar avarias em componentes da máquina, causadas por eventualidades como uma colisão, má lubrificação, apoio deficiente, etc. A figura 3.1 mostra o resultado de um ensaio de rolamento ao longo de um barramento de um torno. Os resultados do ensaio foram analisados até chegar-se à causa do problema, uma quebra nas fundações da máquina.

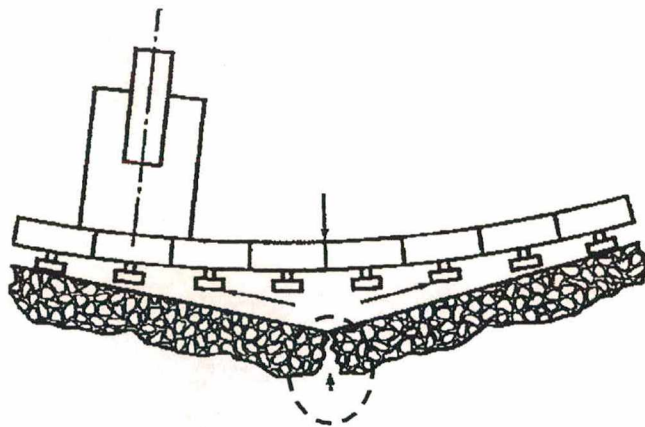
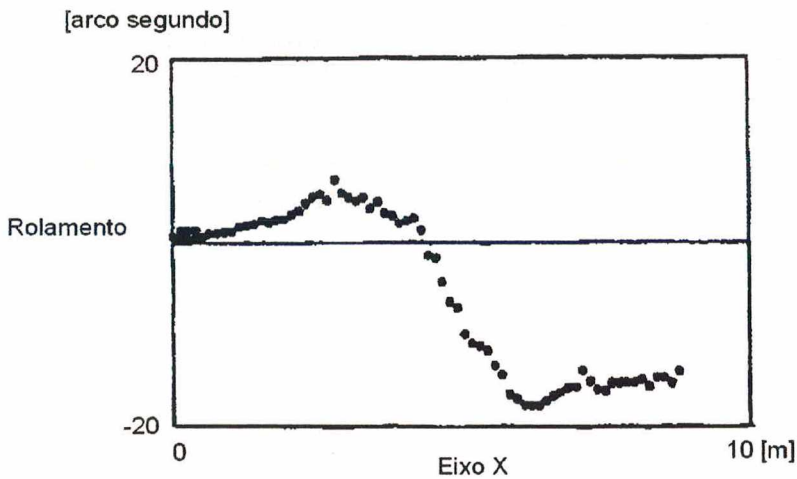


Figura 3.1 - Erro de rolamento causado por apoio deficiente

Ao servir a esses propósitos, o ensaio é uma importante ferramenta para o monitoramento da máquina em um sistema de manutenção preditiva [9;28;29;123;124]. Vários são os casos de empresas que adotam os ensaios geométricos com essa finalidade, e a otimização conseguida em seus processos é significativa.

3.2 Fornecimento de dados para compatibilização de uso

A combinação das informações obtidas em ensaios geométricos com dados de capacidade de processos permite identificar, dentro de um conjunto de máquinas-ferramenta, as melhores em termos de exatidão de trabalho e, com isso, é possível compatibilizar as máquinas com as tolerâncias das peças fabricadas na empresa. Peças com tolerâncias mais estreitas seriam acabadas nas melhores máquinas e peças com maiores tolerâncias nas máquinas com maiores erros.

Essa compatibilização pode ocorrer, também, no que se refere à utilização destinada à máquina. As máquinas com maiores erros podem ser destinadas às operações de desbaste, ficando as outras para as operações de acabamento. Esse procedimento permite, simultaneamente, otimizar a sua utilização prevenindo contra problemas nas peças usinadas. Sua implantação em várias empresas tem otimizado a capacidade das máquinas e postergado o momento de parada para manutenção ou ajustes nos equipamentos, sem comprometer a qualidade das peças usinadas [9;125].

3.3 Geração de fatores de Correção de erros pelo CNC

O procedimento de otimizar a exatidão de equipamentos através meios computacionais, após a sua fabricação e montagem, já é bem estabelecido no campo das Máquinas de Medir por Coordenadas, no que se convencionou chamar de *Computer Aided Accuracy* (CAA) [6]. Esta prática fundamenta-se na constatação de que certas imperfeições nos diversos componentes de um equipamento provocam desvios que variam de forma lenta ao longo do tempo, possuindo um

caráter predominantemente sistemático. Desta forma, é possível corrigir esses desvios a partir da sua quantificação.

Embora já empregados nas Máquinas de Medir há mais de 25 anos, esta estratégia é bem mais recente no campo das máquinas-ferramenta. A principal razão para isso é que a velocidade de processamento computacional tem que ser muito maior quando esta estratégia é utilizada para corrigir as máquinas-ferramenta.

O produto de uma máquina de medir é o resultado da medição, portanto números que podem ser alterados sem que haja a necessidade da alteração das trajetórias percorridas pelos eixos da máquina de medir. Assim, o CAA da máquina atua somente sobre o resultado da medição. Os eixos continuam deslocando-se com os desvios geométricos advindos da fabricação dos componentes e montagem do equipamento mas, no momento que são realizados os processamentos matemáticos para o cálculo das medições, a matriz CAA com os erros da máquina é introduzida e os resultados já são apresentados de forma corrigida.

No caso de uma máquina-ferramenta, o procedimento é mais complexo, já que o seu produto é uma peça, cuja geometria depende das **trajetórias** dos eixos da máquina. Portanto, nesse caso a utilização de CAA requer, obrigatoriamente, que as **trajetórias** da máquina sejam corrigidas, e não somente a indicação de sua posição em um display. Em tempo real, durante o deslocamento da ferramenta de corte e da peça (*on the fly*), a matriz de erros geométricos da máquina (pré-determinada e armazenada no CNC) é introduzida para corrigir os erros ao longo de todo o volume de trabalho. O CNC tem que verificar a posição atual dos eixos da máquina-ferramenta, encontrar os erros geométricos que a máquina apresenta nesta posição, e adicionar as correções, continuamente, ponto a ponto.

A velocidade de processamento do CNC tem que ser alta para que não haja sobrecarga de cálculo que retarde ou cause oscilações no avanço da ferramenta, e isso só passou a ocorrer de forma eficiente com a evolução na capacidade de processamento dos controladores mais recentes (figura 3.2).

O procedimento experimental que possibilita a correção eletrônica de erros em máquinas-ferramenta pode ser visto na figura 3.3. Um ensaio geométrico é realizado através de uma ou mais técnicas de ensaio, e os erros da máquina são determinados e introduzidos no CNC, em

uma matriz CAA já existente. Novos ensaios são realizados para que verifique que a correção esteja ocorrendo de forma eficiente.

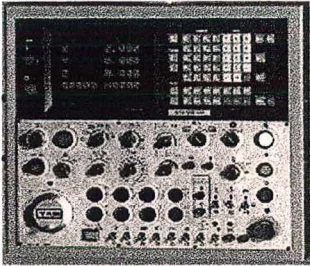

<p>Época e desempenho de CNCs</p> <p>Características</p>	<p>1980</p> 	<p>1997</p> 
<p>Capacidade de Processamento matemático</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Processador Z80 de 8 bits e 8 MHz • Tempo de 50 ms para o processamento de um bloco de programa 	<ul style="list-style-type: none"> • Processador Pentium de 64 bits e 300 MHz • Tempo de 25 μs para o processamento de um bloco de programa
<p>Controle</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Trajetórias ponto a ponto 	<ul style="list-style-type: none"> • Recurso de <i>look ahead</i> com programação paramétrica
<p>Interface com operador</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Display de fósforo verde com caracteres de texto, somente 	<ul style="list-style-type: none"> • Monitor SVGA com programação gráfica e simulação prévia
<p>Correções</p>	<p>-----</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Correção de raio da ferramenta • Monitoramento de parâmetros do processo • Correção de erros geométricos e térmicos da máquina-ferramenta
<p>Memória</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Pouca capacidade de armazenamento, requerendo execução bloco a bloco 	<ul style="list-style-type: none"> • 128 Mbytes de memória RAM e Disco rígido próprio. Sistemas baseados em computadores PC.
<p>Segurança</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Verificação do programa somente através da execução em vazio (<i>dry run</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> • Memorização de zonas de colisão e proteção automática contra impactos • Simulação gráfica das trajetórias e identificação prévia de erros

Figura 3.2 - Evolução de desempenho dos controladores CNC

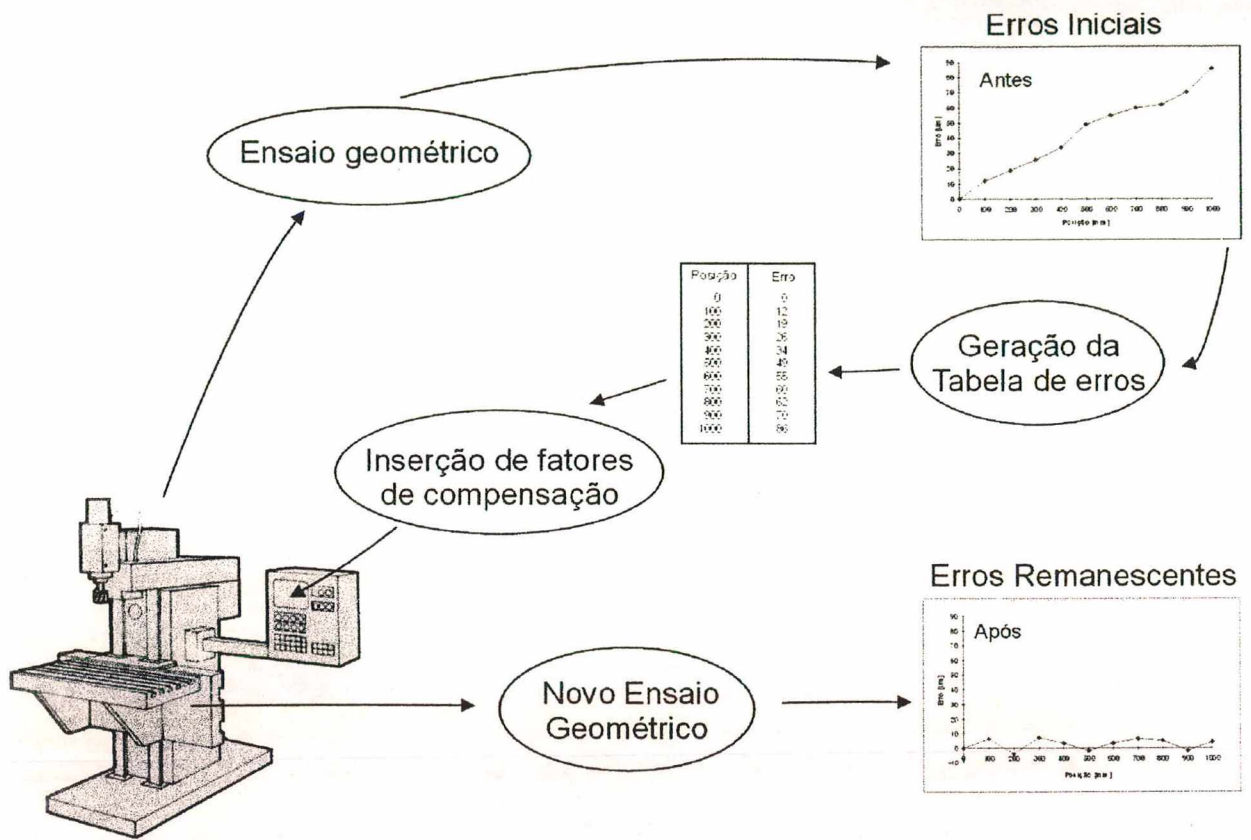


Figura 3.3 - Etapas do processo de correção de erros pelo CNC da Máquina-ferramenta [126]

A incorporação dos avanços da micro-eletrônica pelo CNC das máquinas-ferramenta faz com que, atualmente, todos os controladores disponíveis no mercado ofereçam recursos para a compensação eletrônica de erros geométricos da máquina, como mostrou a figura 2.22.

3.3.1 Recursos de correção disponíveis nos controladores de série

Atualmente, todos os controladores de série são capazes de corrigir, em uma máquina de 3 eixos, erros de **posicionamento linear**, além da **histerese** do sistema de acionamento dos eixos. Os controladores de última geração possuem, ainda, recursos para a correção de erros de **retilidade** e **perpendicularidade** entre eixos.

A correção de erros de **posicionamento linear** é feita modificando-se, no CNC, a relação entre o deslocamento do eixo e os pulsos gerados pelo sistema de medição de deslocamento (escala ou

encoder), ou seja, pulsos/ μm . A correção pode ser linear ou não linear, dependendo se os erros de posicionamento medidos com o ensaio geométrico assumam uma boa linearidade ou não. Na correção linear, modifica-se somente um parâmetro de máquina no CNC, normalmente indicado em μm de erro por metro de deslocamento do eixo. Este tipo de correção é mais rápido e mais utilizado em máquinas de pequeno porte.

Quando os erros de posicionamento se apresentam acentuadamente não lineares ao longo do eixo da máquina, a correção não linear, ou ponto a ponto, é mais indicada, apesar de mais demorada. Nesta correção, os erros pontuais medidos ao longo do eixo são introduzidos no CNC, que suporta até centenas de pontos por eixo. Estes erros pontuais serão utilizados pelo controlador como fatores de correção, subtraindo-os previamente do posicionamento do eixo, sempre a máquina tiver programado uma passagem nesta posição. Este tipo de compensação é mais utilizado em máquinas de grande porte. A figura 3.4 exemplifica as duas formas de compensação de erros de posicionamento linear.

Para a correção da **histerese** dos eixos, é necessário um ensaio geométrico que determine o desvio existente entre avanço e retorno dos eixos. Este desvio é introduzido no controlador e somado ao posicionamento do eixo, sempre que houver uma inversão no sentido de movimentação. A figura 3.5 mostra este procedimento.

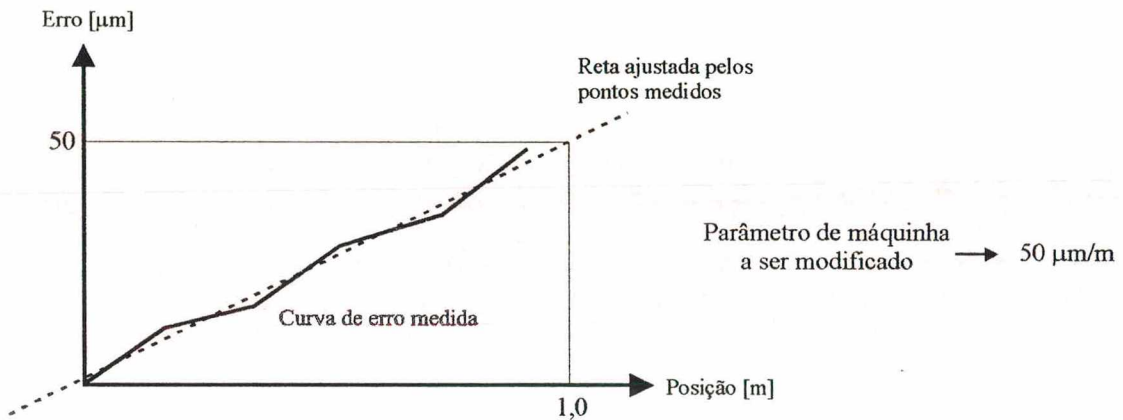
A correção de histerese é de eficiência questionável pelo fato dos controladores compensarem um único valor para toda a faixa de deslocamentos do eixo. Resultados de ensaios estáticos têm mostrado que a histerese varia de forma significativa ao longo do eixo, como será visto no capítulo 6. Dos erros geométricos da máquina-ferramenta, a histerese é o único que pode ser minimizado através de uma estratégia de usinagem eficiente [127].

A correção de erros de **retilidade e perpendicularidade** é feita simultaneamente e envolve sempre a movimentação relativa de dois eixos (os fabricantes de CNC normalmente a chamam de compensação bidirecional). Para que essa correção seja possível, ensaios de retilidade são realizados em dois eixos mantendo-se uma referência de esquadro entre eles, para que seja possível obter também o desvio de perpendicularidade entre os eixos. Com estes resultados, é possível introduzir os valores medidos no controlador e a correção envolverá a movimentação dos dois eixos envolvidos. Ou seja, quando um eixo tiver sua posição programada para determinada posição, o outro eixo deslocar-se-á para corrigir o erro previamente medido no ensaio de retilidade/perpendicularidade. A figura 3.6 mostra os erros de retilidade e

perpendicularidade entre dois eixos. Os deslocamentos da direção Z, medidos ao longo da direção Y, são introduzidos no controlador. Neste exemplo, quando a máquina mover-se para Y600, o eixo Z mover-se-á simultaneamente de 59 μm , verticalmente para baixo.

Estes recursos de correção são mais recentes, estando presentes nos controladores de última geração e, por dificuldades com as técnicas de ensaio geométrico de retilidade/perpendicularidade, são de utilização muito rara.

a) Compensação Linear



b) Compensação Não-linear

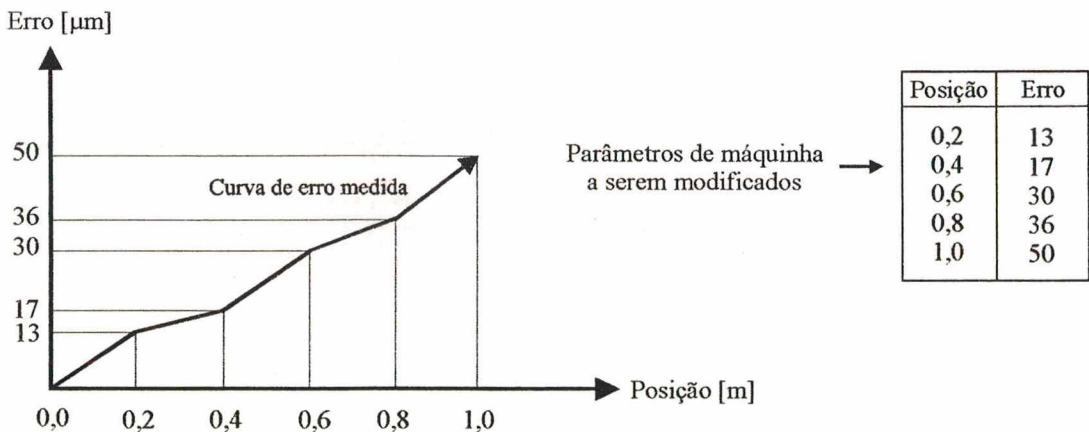


Figura 3.4 - Formas de compensação de erros de posicionamento

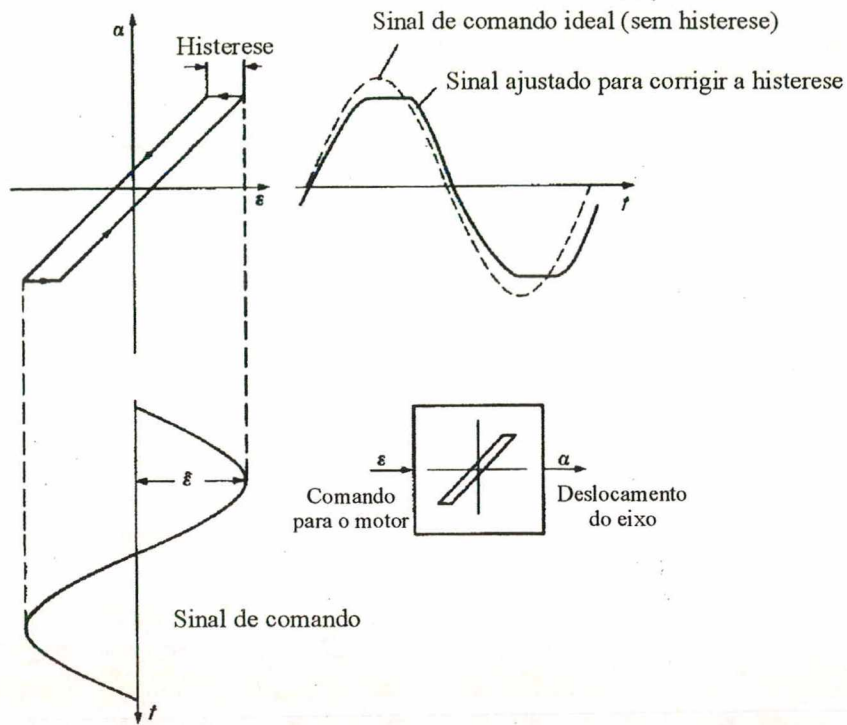


Figura 3.5 - Compensação de histerese [128]

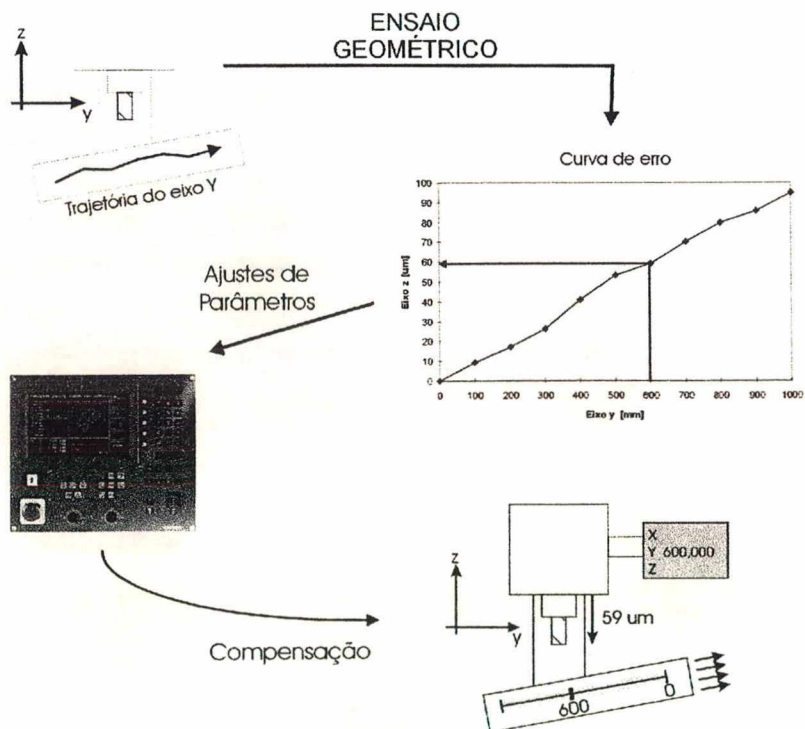


Figura 3.6 - Compensação de retilidade e perpendicularidade

3.3.2 Inovações implementadas em controladores CNC com arquitetura aberta

Os controladores CNC normalmente são bastante fechados quanto à possibilidade de agregar novas funções àsquelas de série, e isso dificulta a criação de novos recursos CAA que sejam específicos da necessidade de cada usuário. Com a crescente utilização de controladores CNC de arquitetura aberta e baseados em computadores pessoais (PC), essa limitação tem diminuído por causa da maior flexibilidade na criação de outras funções de CAA para a otimização geométrica das máquinas [62;129]. Um desses recursos foi desenvolvido por [51] e pode ser descrito com o auxílio da figura 3.7.

Um modelo numérico contendo toda a cadeia de movimentos entre a peça e a ferramenta foi desenvolvido, compondo a modelagem cinemática ideal da máquina, que só seria correspondida na prática se não houvesse nenhum desvio de trajetória. Os erros paramétricos da máquina, determinados por ensaios geométricos, foram introduzidos nesse modelo e, dessa forma, criou-se uma modelagem cinemática realista da máquina, considerando os desvios apresentados em operação, ao longo de todo o volume de trabalho.

Esse modelo cinemático pode, então, ser aplicado para a correção eletrônica da máquina. Durante a usinagem o PC adquire a posição atual dos eixos da máquina, e o software de controle, utilizando o modelo cinemático desenvolvido, determina os desvios de posição dos eixos e envia as devidas correções aos servo-motores para o reposicionamento dos eixos. A implementação dessa estratégia permitiu corrigir até 90 % dos erros geométricos da máquina-ferramenta testada no trabalho.

O modelo cinemático pode ser usado também para pós-processar um programa CNC e introduzir as correções geométricas de forma a corrigir deficiências da máquina, como descrito na figura 2.27. Outros recursos para a melhoria da exatidão têm sido implementados em controladores de arquitetura aberta, como a utilização de transdutores de temperatura na máquina-ferramenta, para a correção de dilatações térmicas [24;130;131].

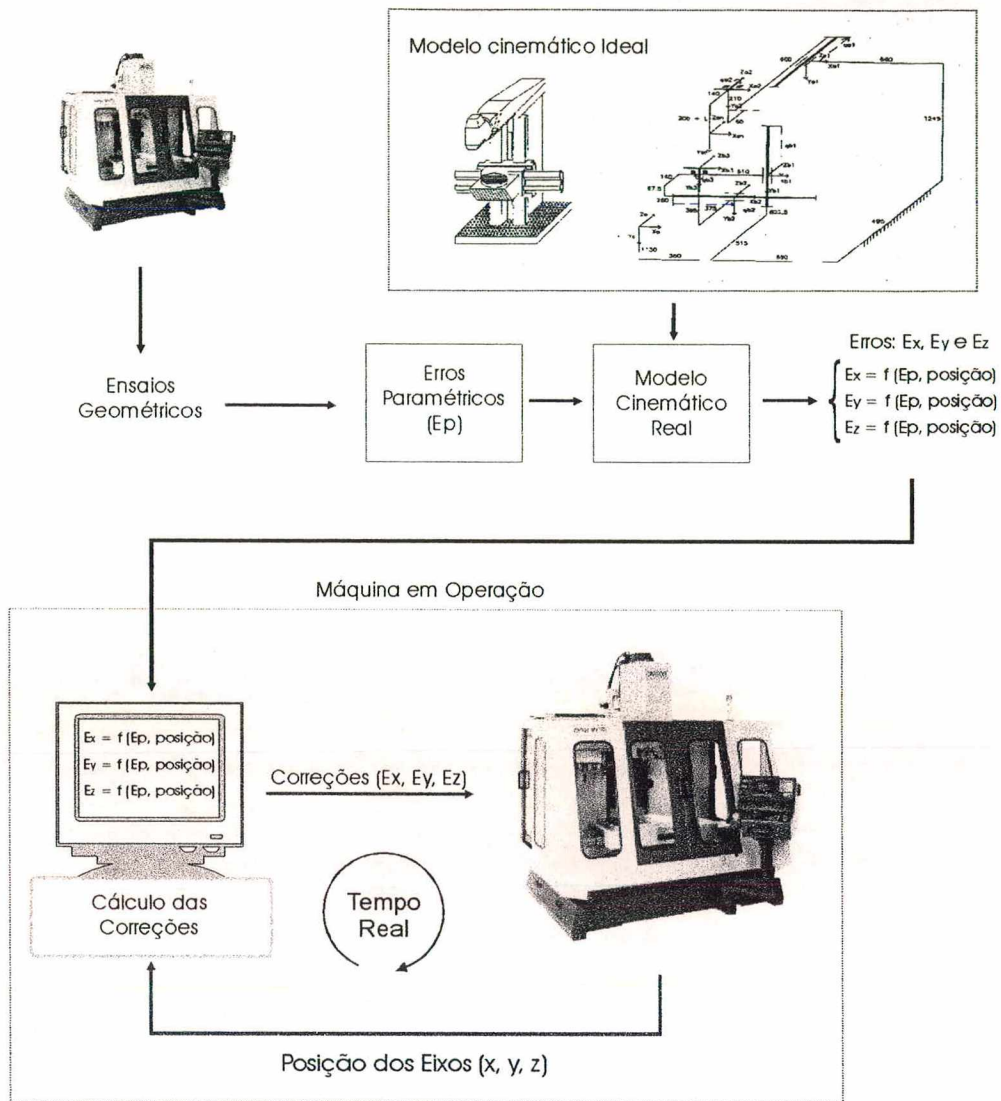


Figura 3.7 - Correção de erros em controladores de arquitetura aberta

3.3.3 Verificação experimental da eficiência das correções

A eficiência dos recursos de correção eletrônica de erros disponíveis nos controladores CNC de série pode ser avaliada através da comparação da exatidão da máquina antes e após o procedimento de qualificação geométrica e correção de erros. A figura 3.8 mostra os resultados de alguns ensaios realizados pela Fundação CERTI nos últimos 5 anos, em máquinas-ferramenta operando no chão de fábrica. A primeira linha indica os erros de posicionamento que as máquinas apresentavam em sua condição original. Após a correção de erros, todas as máquinas passaram a apresentar erros de posicionamento linear dentro das especificações, podendo-se constatar melhorias significativas [132].

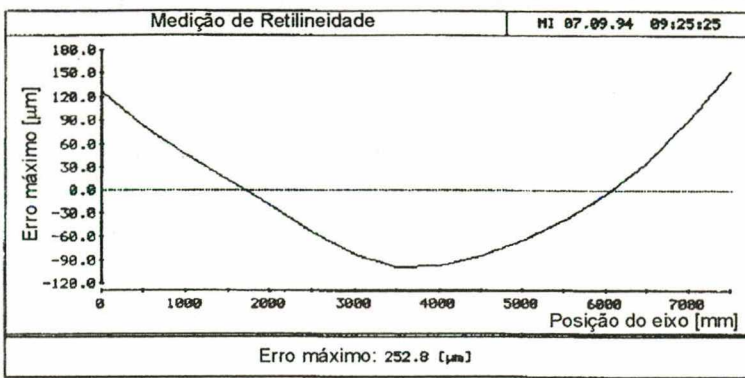
A figura 3.9 indica a melhoria na exatidão de trajetória que a máquina apresentou quando o desvio de retilinearidade foi sendo corrigido passo a passo, através dos recursos mecânicos e do CNC [124].

CORREÇÕES ELETRÔNICAS IMPLEMENTADAS EM MÁQUINAS NA INDÚSTRIA								
Máquina	A	B	C	D	E	F	G	H
Antes da Correção [μm]	265	237	40	32	170	76	29	238
Após a Correção [μm]	< 50	< 70	< 25	< 10	< 30	< 15	< 5	< 45

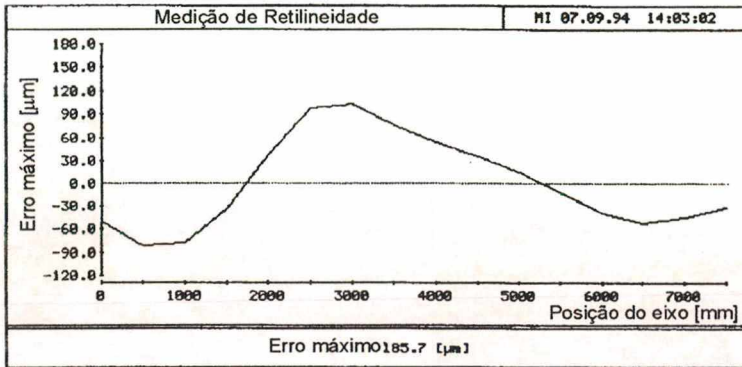
Figura 3.8 - Melhoria obtida no posicionamento em determinado eixo, com a correção eletrônica da Máquina

Para verificar a eficiência das correções eletrônicas da máquina-ferramenta para a melhoria das peças usinadas, testou-se neste trabalho um centro de usinagem com 2 anos de operação em chão de fábrica [18]. Neste experimento duas peças iguais foram usinadas, uma **antes** e a outra **após** os ensaios de posicionamento com laser interferométrico e compensações de erro pelo CNC. A primeira peça foi usinada na condição em que a máquina-ferramenta se encontrava, após o que foram realizados ensaios de posicionamento com o laser Interferométrico *Renishaw* (rastreado aos padrões internacionais) nos 3 eixos da máquina, e efetuadas as compensações no CNC da máquina. Depois de verificada a eficiência dos ajustes, a segunda peça foi usinada mantendo-se todas as condições de corte inalteradas, em relação à primeira peça. Com isso buscou-se verificar somente o efeito dos ajustes no CNC sobre as peças. Ambas as peças foram medidas em uma máquina de medir por coordenadas onde foram avaliadas as posições dos centros dos furos nas duas direções (x e y) do plano horizontal da máquina-ferramenta (figura 3.10).

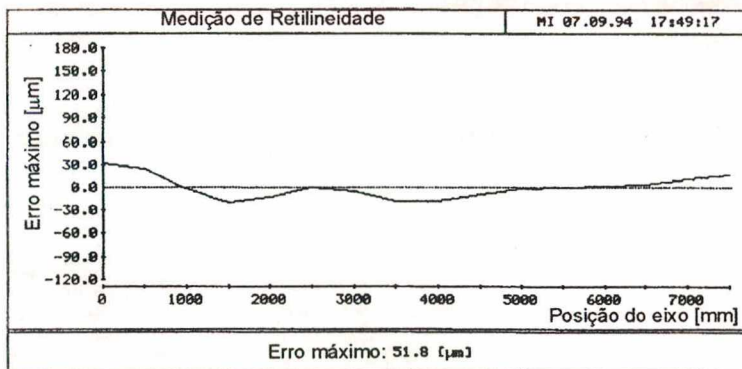
A figura 3.11 permite observar a direta transferência dos erros da máquina para a peça, bem como a melhoria ocorrida com a correção eletrônica de erros. O eixo Y, que estava com o erro de posicionamento acima do especificado para a máquina teve sua exatidão otimização em 84%. O erro de posicionamento reduziu-se de 19 μm para 3 μm . Os erros medidos com o laser foram semelhantes aos desvios de posição medidos nos furos das placas, indicando que a própria placa poderia ser utilizada para um ensaio geométrico. Todas as curvas possuem um intervalo de confiança de $\pm 4 \mu\text{m}$ (não representado).



AJUSTES
MECÂNICOS



AJUSTES
NO CNC



AJUSTES
NO CNC

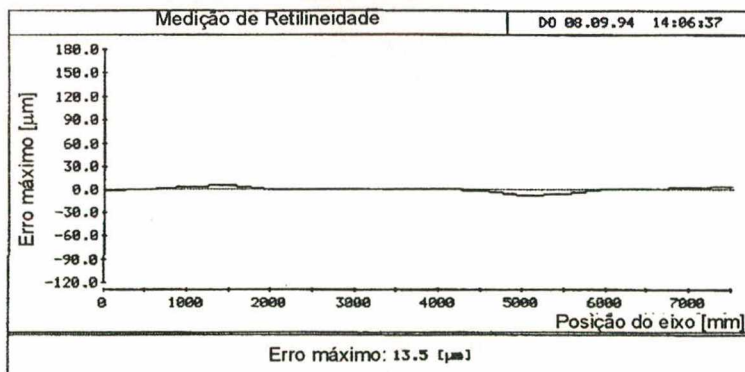


Figura 3.9 - Otimização da retilidade em torno de grande porte, através de ajustes mecânicos e eletrônicos [124]

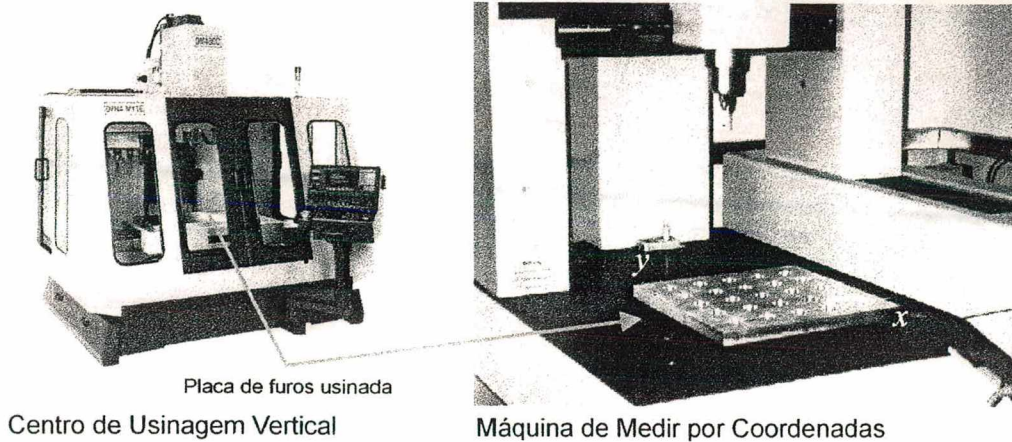
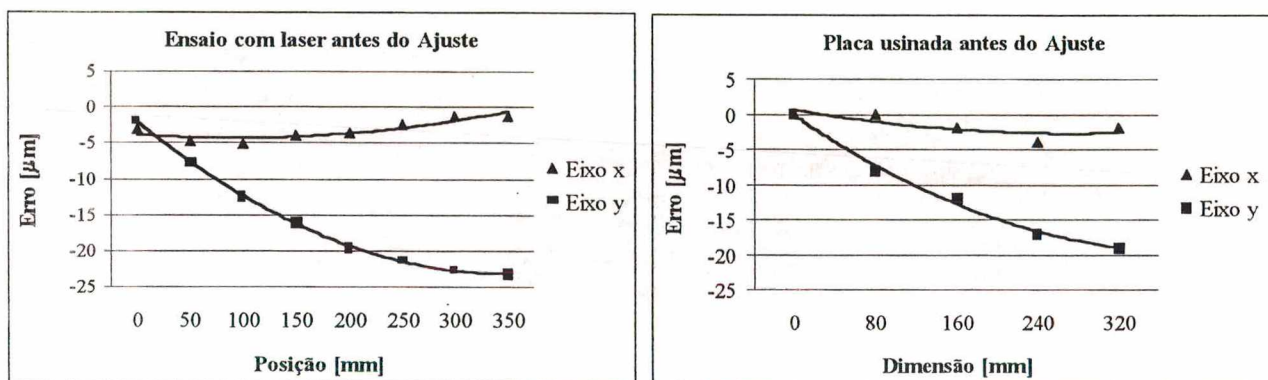
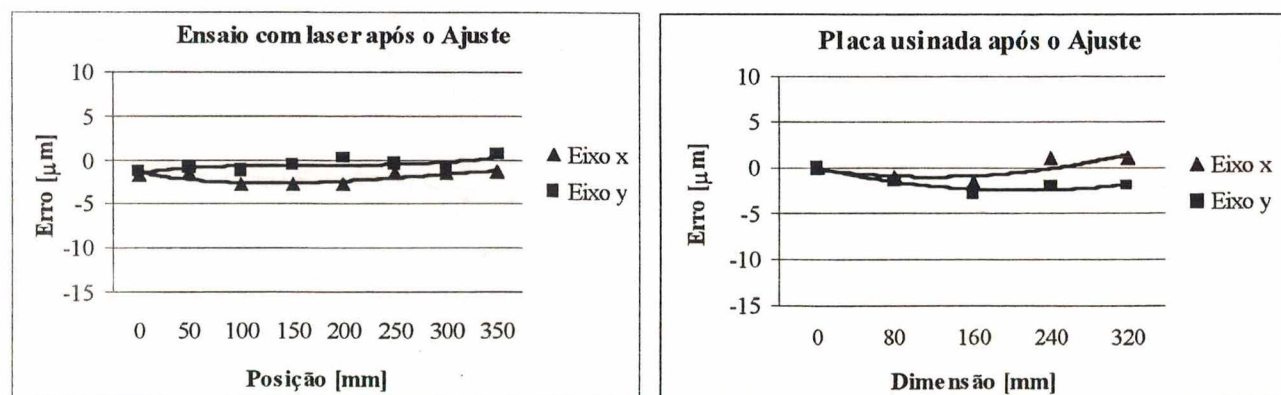


Figura 3.10 - Usinagem e verificação da exatidão de trabalho de uma Máquina-ferramenta



a) Erros medidos pelo laser e presentes na peça usinada antes da correção no CNC



b) Erros medidos pelo laser e presentes na peça usinada após a introdução dos valores de correção

Figura 3.11 - Melhoria na exatidão de trabalho dos eixos X e Y do centro de usinagem testado

3.4 Freqüência da Qualificação Geométrica pelos Usuários de Máquinas-ferramenta

Os exemplos descritos anteriormente ilustraram, em casos típicos, a eficiência da qualificação geométrica e das correções eletrônicas para melhorar a exatidão da máquina. Porém, para que esse recurso venha trazer uma vantagem competitiva aos usuários de máquinas-ferramenta, é importante que a qualificação geométrica da máquina seja realizada periodicamente, para atualizar continuamente as tabelas de correção de erros no CNC frente à variabilidade do estado geométrico da máquina (figura 3.12).

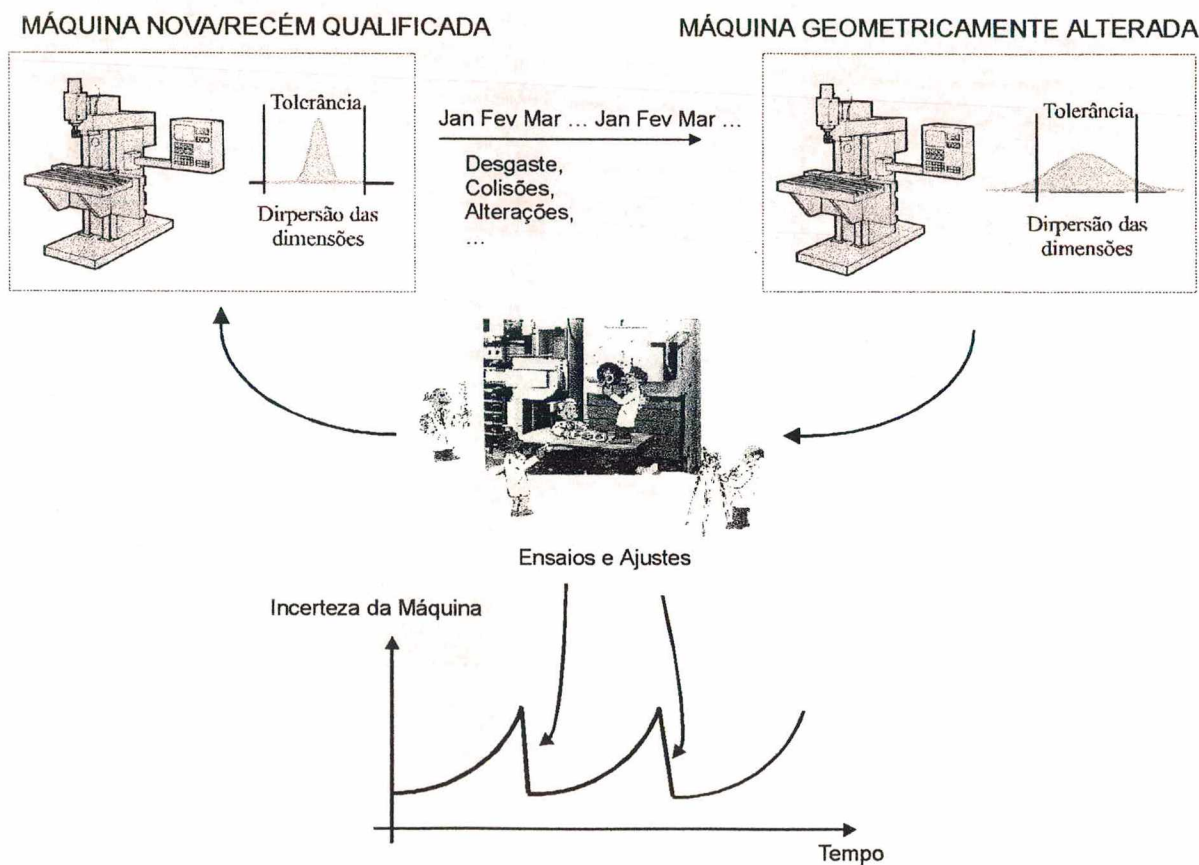


Figura 3.12 - Otimização periódica da exatidão da máquina-ferramenta

A especificação da freqüência com que a máquina-ferramenta deva ser qualificada geometricamente depende de cada aplicação. Máquinas que operem em condições mais

controladas ou na usinagem de peças com tolerâncias dimensionais maiores poderão ter intervalos maiores entre ensaios, enquanto máquinas utilizadas para o acabamento de peças com tolerâncias estreitas merecerão intervalos menores. Alguns usuários recomendam que máquinas novas sejam testadas a cada 6 meses e, desde que os resultados não indiquem problemas, esse prazo é estendido para 1 ano [133].

Em outros casos, a máquina passa por testes mais elaborados, é corrigida eletronicamente e, após isso, a sua exatidão passa a ser monitorada mensalmente através de algum ensaio rápido de verificação. Sempre que houver alguma alteração brusca no comportamento da máquina, um novo ensaio é realizado e a matriz de correção do CNC é atualizada [28;134].

Deve-se ressaltar que as recomendações acima valem para a utilização normal da máquina. Na ocorrência de eventualidades como colisões ou superaquecimentos, as máquinas são paradas e ensaios geométricos detalhados são realizados para verificar alguma avaria, independente de prazos pré-estabelecidos.

Apesar das vantagens proporcionadas pela qualificação geométrica periódica da máquina-ferramenta, e dos recursos de CAA da máquina estarem disponíveis em praticamente todos os controladores CNC, a prática de ensaios geométricos é bastante restrita e o seu crescimento não tem acompanhado o crescimento do mercado de máquinas-ferramenta CNC (figura 3.13). Ou seja, os usuários não consideram a qualificação geométrica periódica das máquinas uma estratégia para a garantia dimensional das peças usinadas.

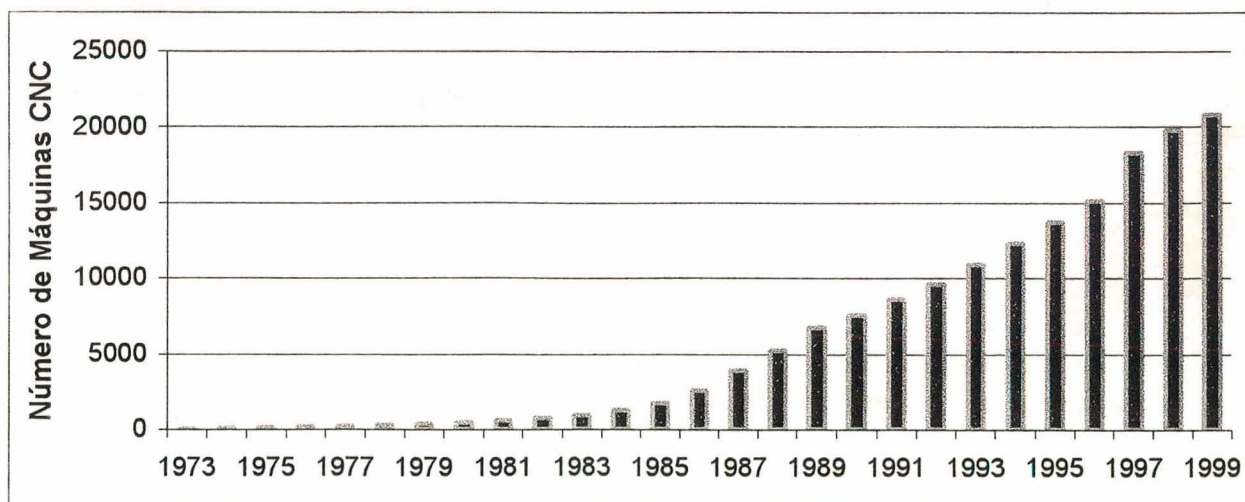


Figura 3.13 - Crescimento nacional da base instalada de Máquinas-ferramenta CNC [135]

Como já citado no capítulo 1, as próprias técnicas de ensaio, seja pelo custo ou limitações, contribuem significativamente para o baixo grau de uso de ensaios geométricos para melhoria das máquinas-ferramenta. A motivação para a maior prática de ensaios passa, necessariamente, pelo desenvolvimento de métodos de ensaio mais eficientes nesses aspectos.

3.5 Os ensaios geométricos

Os ensaios geométricos estão na ponta de qualquer processo de qualificação de máquinas-ferramenta. A partir dos resultados fornecidos pela técnica de ensaio, todas as ações preventivas e corretivas serão empreendidas sobre a máquina e/ou sobre o processo e, dessa forma, o principal requisito de uma técnica de ensaio é a sua confiabilidade metrológica. No entanto, de pouco adianta ao método possuir uma incerteza de medição muito baixa, se a sua aplicação demanda muito tempo e grandes esforços operacionais ou, ainda, se o custo de aquisição e operação do sistema não é compensatório. Tanto quanto confiabilidade metrológica, uma técnica de ensaio ideal deve congrega:

- Rapidez e praticidade operacional
- Custo compatível com o benefício
- O fornecimento de resultados úteis para os propósitos do ensaio

Os métodos atuais apresentam características que permitem classificá-los como **métodos de qualificação** e **métodos de avaliação** [136]. Os **métodos de qualificação** permitem obter resultados bastante confiáveis e completos sobre o estado da máquina mas são de difícil aplicação, exigindo pessoal altamente qualificado para a tarefa e envolvendo muito tempo de ensaio e alto custo dos equipamentos. Os resultados destes ensaios permitem atualizar os fatores de compensação de erros no CNC da máquina. O laser interferométrico [137-140] e as réguas/esquadros [15;141] são exemplos de métodos de qualificação.

Os **métodos de avaliação** são de aplicação fácil e rápida e envolvem equipamentos de custo mais baixo, mas fornecem apenas uma avaliação geral sobre o estado da máquina. Os erros da máquina normalmente se apresentam sobrepostos, sendo difícil ou não confiável a separação de cada fonte de erro. Destinam-se a uma avaliação mais rápida e frequente da máquina. O *ball bar* [20;142] e a peça padrão usinada [34;143-145] são exemplos de métodos de avaliação.

As principais características de alguns métodos clássicos e novas tecnologias para o ensaio geométrico de máquinas estão descritas a seguir.

3.5.1 Laser Interferométrico

Um interferômetro a laser é utilizado para determinar a trajetória de um refletor fixado na estrutura da máquina, em relação a um divisor de feixe óptico fixo (figura 3.14) [15;140]. É o sistema mais utilizado para ensaios geométricos de posicionamento e histerese em máquinas-ferramenta. Apresenta as vantagens de baixa incerteza de medição e faixas de medição grandes, além de fornecer resultados adequados para a correção de erros no CNC da máquina-ferramenta. Como limitações principais, estes sistemas apresentam alto custo de aquisição e dificuldades operacionais que tornam os ensaios demorados, mesmo quando realizados por pessoal experiente. Estas dificuldades operacionais são ainda maiores quando se utiliza o sistema para ensaios de retilidade e perpendicularidade. Tempos de 24 horas de trabalho ou mais podem ser necessários para ensaios de posicionamento, retilidade e perpendicularidade em uma máquina de 3 eixos, apesar dos sistemas atuais serem bastante automatizados. Por estas dificuldades os ensaios de retilidade e perpendicularidade são normalmente feitos com padrões corporificados: réguas e esquadros. Para máquinas com cursos de eixos abaixo de 500 mm, o laser é desaconselhado para o ensaio de posicionamento, devido aos erros de cosseno no alinhamento do feixe laser à trajetória do eixo da máquina [146].

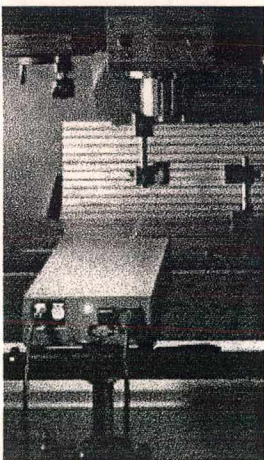
	Ensaio	Faixa de Aplicação	Incerteza de Medição
	Posicionamento Linear	0,5 – 50 m	\pm (Valor medido em mm * 10^{-6}) μm
	Retilidade		$\pm 5 \mu\text{m}$
	Perpendicularidade		$\pm 10 \mu\text{m}$
	Inclinamentos		$\pm 15 \mu\text{m/m}$

Figura 3.14 - Características metrológicas do laser interferométrico

3.5.2 Laser de Alinhamento

No sistema de medição com laser de alinhamento, a reta padrão é formada pelo raio do laser e a medição do erro em relação a essa reta é feita em qualquer direção transversal ao feixe, por um foto-detector bidirecional (figura 3.15) [147].

Operacionalmente o ensaio é realizado colocando-se o foto-detector sobre o eixo a ensaiar e, após alinhar o feixe laser com a trajetória do eixo, mover esse eixo longitudinalmente. Qualquer desvio de retilidade do eixo em relação à reta padrão provocará deslocamentos transversais, que serão medidos pelo foto-detector. A utilização de um esquadro óptico (penta-prisma) permite a sua aplicação para o ensaio de perpendicularidade.

O sistema apresenta vantagens operacionais consideráveis para o ensaio de retilidade e perpendicularidade em relação ao laser interferométrico, permitindo ensaios em máquinas com até 30 m de eixo. A incerteza de medição depende da aplicação, alcançando valores de $1\mu\text{m/m}$. Comercialmente a sua utilização ainda é restrita, por causa de problemas de estabilidade lateral do feixe de laser em função das condições ambientais, o que aumenta a incerteza do método.

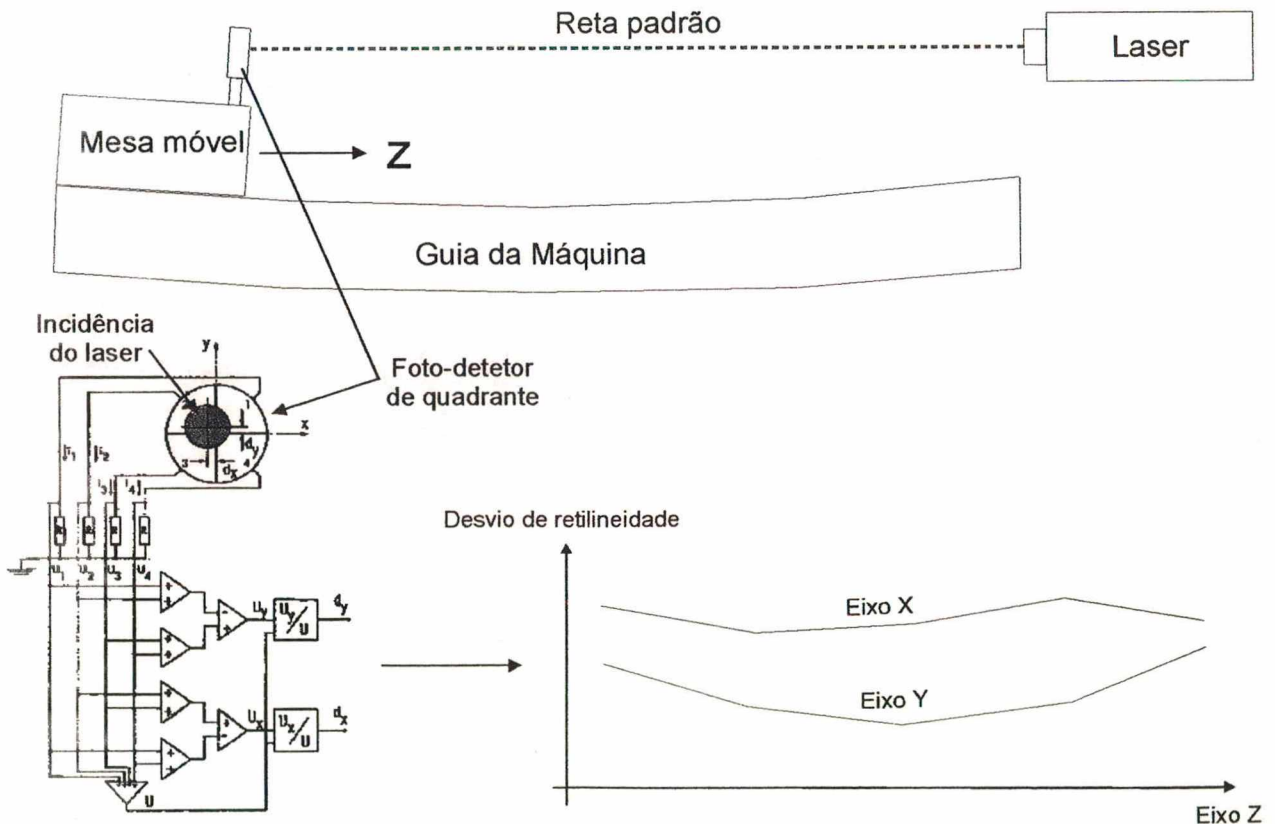
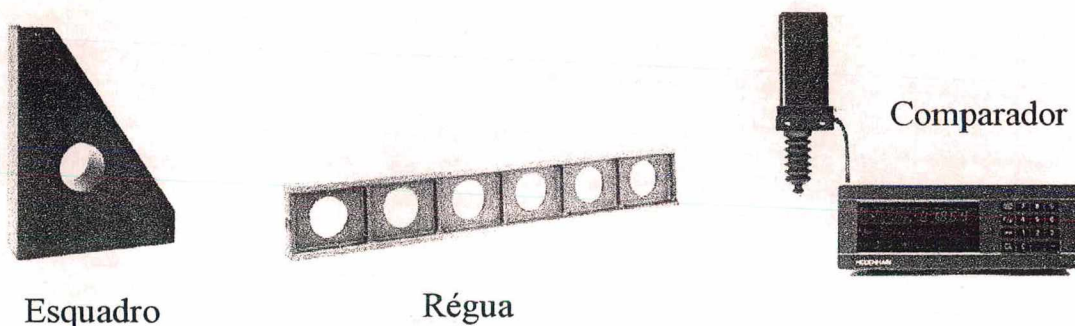


Figura 3.15 - Aplicação do Laser de Alinhamento em ensaio de retilidade [147]

3.5.3 Régua/Esquadro e comparador

São os métodos mais utilizados para ensaio de retilidade e perpendicularidade. Os padrões são colocados na área de trabalho da máquina e tocados por um comparador à medida que os eixos da máquina se deslocam, podendo haver um rebatimento dos padrões para minimização dos erros. Os métodos fornecem resultados confiáveis, com baixo custo dos equipamentos e a operação é simples e relativamente rápida. As principais limitações são dificuldades no manuseio destes padrões, e quanto ao tamanho da máquina-ferramenta. O padrão deve ser proporcional à área de trabalho e, para máquinas de grande porte, isto se torna inviável. Normalmente a aquisição dos pontos é feita de modo manual, mas o sistema pode ser automatizado sem muitas dificuldades se o apalpador usado permite interligação com sistemas computacionais. Na figura 3.16 podem ser vistos alguns destes padrões e suas principais características.



Ensaio	Faixa de Aplicação	Incerteza de Medição
Retilidade	0 – 1 m (dimensões da régua)	$\pm 2 \mu\text{m}$
Perpendicularidade	0,7 x 0,4 m (dimensões do esquadro)	$\pm 5 \mu\text{m/m}$

Figura 3.16 - Características de Padrões corporificados para o ensaio de retilidade e perpendicularidade

3.5.4 Peças padrão usinadas

É a condição mais direta para o ensaio de máquinas-ferramenta, já que se avalia o produto da sua função. Peças padrão [145] ou a própria peça fabricada em série, são usinadas em condição de acabamento e medidas, normalmente em máquinas de medir por coordenadas. A partir dos desvios observados na peça em relação às dimensões programadas, avalia-se a exatidão de trabalho da máquina-ferramenta.

Considera-se este tipo de ensaio mais realista já que esforços de corte e influências térmicas estão presentes de forma mais significativa, na condição real de trabalho da máquina. O método é rápido e de baixo custo, fornecendo uma avaliação geral do estado da máquina. No entanto, a separação das diversas fontes de erros da máquina é difícil e/ou pouco confiável e, dessa forma, os resultados apresentam pouca utilidade para a correção de erros no CNC. A temperatura da peça deve ser monitorada para separar a dilatação da peça dos erros da máquina. Deve-se tomar cuidado, ainda, com desgastes de ferramenta. É uma forma bastante comum de avaliar frequentemente a exatidão de trabalho da máquina para determinada função. A figura 3.17 mostra algumas destas peças.

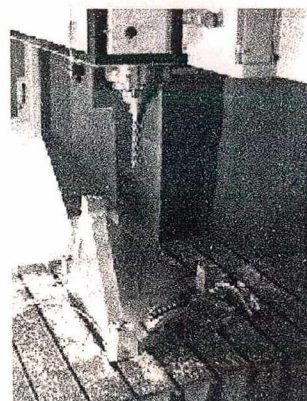
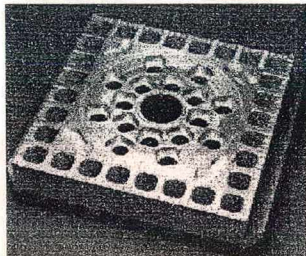
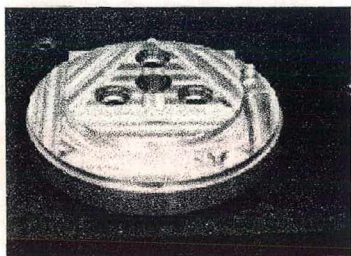


Figura 3.17 - Peças usinadas para verificar a exatidão da máquina

3.5.5 Ball bar

O *ball bar* é um outro método adequado para ensaios de avaliação geral da máquina, e foi desenvolvido para tornar esta operação rápida e fácil. Um transdutor de deslocamento mede os desvios radiais ocorridos quando a máquina percorre uma trajetória de interpolação circular, como mostra a figura 3.18. Um software processa os desvios medidos e indica diversas fontes de erro presentes na máquina.

O teste com o *ball bar* é de operacionalização fácil e rápida, com a vantagem de ser um teste dinâmico, podendo determinar erros também do sistema de acionamento e controle da máquina. Embora a incerteza nos resultados não seja baixa em função da tendência do sistema, a repetitividade nos resultados é muito boa.

A principal limitação do teste é a difícil separação das diversas fontes de erro, o que aumenta a incerteza dos resultados. Outras limitações são a área de teste reduzida e a limitação a trajetórias circulares. Os erros geométricos medidos com o sistema normalmente não são usados para as correções no CNC, mas alguns resultados dinâmicos do ensaio permitem ajustes no sistema de controle da máquina (tempo de resposta dos servomotores, backlash, etc.).

Alguns usuários, e o próprio fabricante do *ball bar*, recomendam sua utilização de forma complementar ao laser interferométrico [20]. Ensaio mais completos de qualificação da máquina são realizados com o laser e, após isso, ensaios freqüentes são realizados com o *ball bar*, quando se avalia a circularidade da trajetória da máquina. Havendo alguma alteração significativa nos resultados, um novo ensaio com laser é realizado.

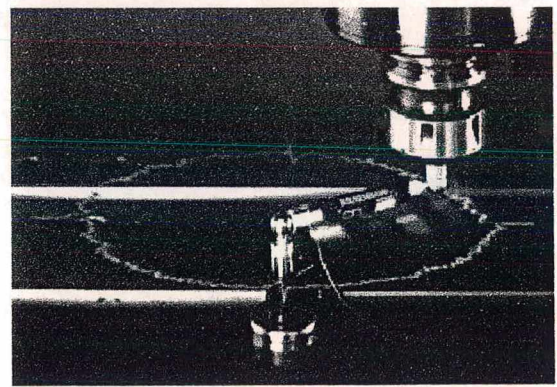
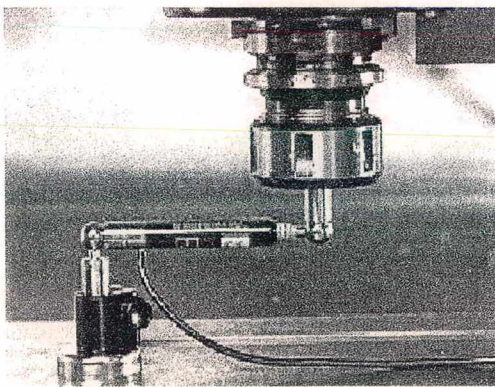


Figura 3.18 - Ensaio dinâmico de interpolação circular com o ball bar (Renishaw)

3.5.6 Grid encoder

O *grid encoder*, já mostrado anteriormente no item 3.1.2, é um sistema de ensaio dinâmico, com resposta em freqüência bem superior ao ball bar, já que não há contato na medição. Uma placa foto-sensível (grid bidimensional) mede a trajetória de um emissor de luz acoplado ao porta-ferramenta da máquina. O sistema é automatizado e permite comparar visualmente as trajetórias programadas com as realizadas. Além de ser mais adequado para ensaios dinâmicos do que o ball bar, o *grid encoder* pode avaliar trajetórias quaisquer, inclusive as trajetórias necessárias

para usinar uma determinada peça, enquanto o ball bar é limitado a trajetórias circulares.

A preparação e a execução do ensaio são bastante rápidas, mas o sistema avalia a performance da máquina em uma região limitada, o que dificulta sua aplicação em máquinas de maior porte. Sua utilização é bastante eficiente para avaliar a performance dinâmica da máquina, fornecendo resultados para o ajustes de parâmetros de controle do CNC. O sistema foi mostrado na figura 2.15.

3.5.7 Laser ball bar

Neste método [148;149] se utiliza o princípio de *trilateração* para determinar a posição da ferramenta de corte dentro do volume de trabalho da máquina. Um sistema conhecido por *Omnigage* trabalha sob este princípio e tem sido crescentemente utilizado nos Estados Unidos. Neste sistema, um laser interferométrico pré-alinhado e inserido em uma barra telescópica, como mostra a figura 3.19 é utilizado para medir as distâncias de um tetraedro formado pelo cabeçote e por 3 pontos na mesa da máquina.

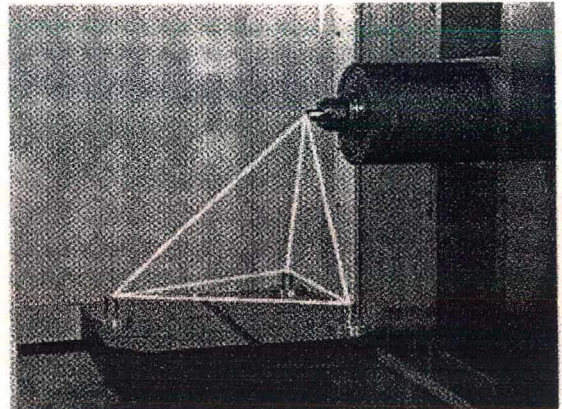
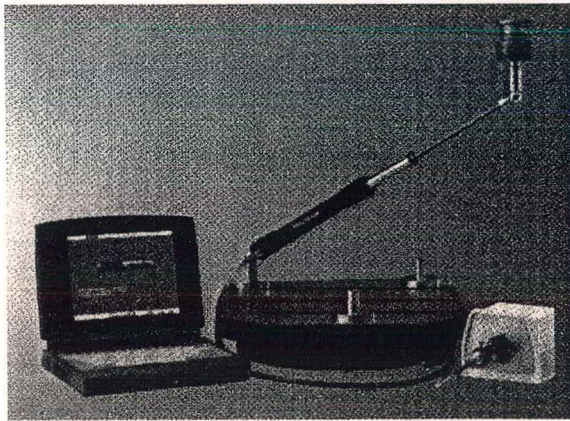


Figura 3.19 - Laser Ballbar para o ensaio de máquinas por trilateração

Relações trigonométricas são utilizadas para, a partir destas distâncias, determinar a posição do cabeçote da máquina em relação a um sistema de coordenadas cartesiano criado pelos 3 pontos na mesa. Como existe somente um *laser ballbar* é necessário mudá-lo de posição para medir nas 3 direções do tetraedro formado pela ferramenta e 3 pontos fixos na mesa da máquina (figura 3.20)

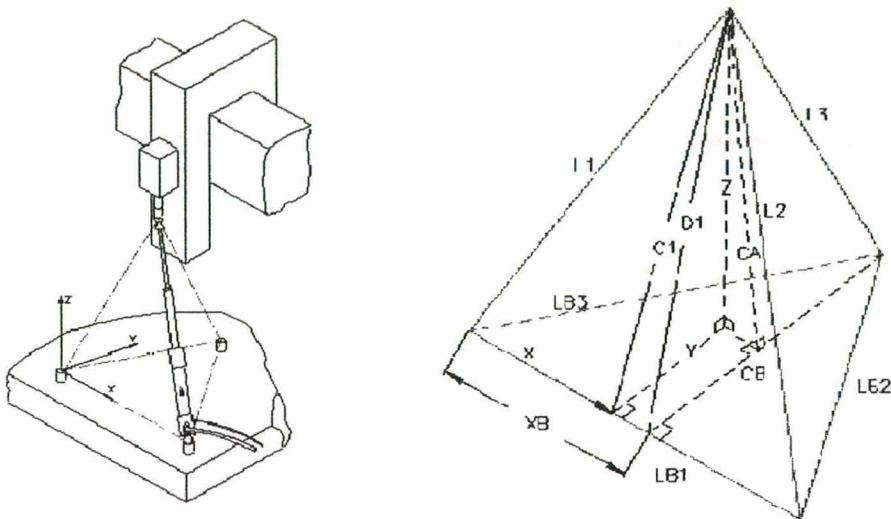


Figura 3.20 - Processamento matemático da trilateração

A grande vantagem deste sistema é a baixa incerteza de medição aliada à facilidade e rapidez na realização do ensaio. Durante o presente trabalho, acompanhou-se um ensaio para a determinação dos erros de posicionamento, reticidade e perpendicularidade, quando foram necessários 14 minutos para todo o ensaio e processamento de resultados. No entanto, apesar de bastante rápido e de fácil operacionalização, perceberam-se algumas limitações que restringem seu uso. Uma destas limitações é o grande tamanho e peso da unidade que acompanha o sistema e que contém a fonte laser e o interferômetro. Isto dificulta sua movimentação e a sua aplicação em testes de campo. Outra limitação do *OmniGage* é que sua aplicação é difícil em máquinas de grande porte, visto que seu volume de trabalho é aproximado ao de um cubo de 1 m de aresta. O alto custo do sistema é um outro limitante.

3.6 Desafios a serem superados pelas Técnicas de Ensaio

Pôde-se observar a grande variedade de métodos de ensaio geométrico existentes, e a constatação de que boa parte delas foi lançada nos últimos 10 anos indica a busca crescente por técnicas de ensaio que congreguem confiabilidade metrológica com custo atrativo e eficiência operacional [64;150;151]. Embora avanços significativos tenham ocorrido, estas técnicas ainda não conseguem atender plenamente aos objetivos, e o desafio tecnológico de produzir uma

técnica com tais qualidades permanece. Em muitas situações é necessária a aplicação de vários métodos diferentes em uma mesma máquina, para a obtenção de diferentes componentes de erro

A prática de ensaios geométricos periódicos seria impulsionada significativamente com a existência de uma técnica de ensaio com baixa incerteza de medição, custo atrativo e que fosse tão fácil e prática de utilização que pudesse ser aplicado com frequência, pelo próprio operador da máquina-ferramenta. As vantagens dessa qualificação periódica de máquinas, tais como:

- O monitoramento da exatidão de trabalho identifica quando a máquina deve ser colocada fora de serviço, antes que produzam peças fora de tolerâncias e, desta forma, resultados podem ser usados para manutenção preditiva da própria máquina;
- A máquina é selecionada devidamente para fabricar peças de acordo com a sua exatidão de trabalho;
- Os ensaios podem indicar regiões do volume de trabalho, onde os erros da máquina-ferramenta são maiores e menores. O trabalho pode ser feito nestas áreas mais favoráveis;
- Recursos de correção de erros geométricos via CNC podem ser atualizados com frequência, melhorando sua exatidão de trabalho e mantendo a máquina com erros sistemáticos corrigidos;
- Com uma técnica de ensaio rápida, a máquina pode ser ensaiada aquecida, mesmo no intervalo da produção, verificando sua exatidão em um estado térmico mais realista;

e os benefícios conseqüentes para o usuário:

- Redução de tempos e peças desperdiçados em processos de *tryout*;
- Processos mais robustos com menos peças refugadas/retrabalhadas;
- Com uma máquina melhor, peças mais críticas podem ser fabricadas, evitando a aquisição de equipamentos novos e mais caros;
- Os processos de controle de qualidade tornam-se menos críticos;
- Redução de custos com a minimização de esforços e desperdícios.

certamente são razões suficientes para motivar e justificar o constante desenvolvimento de técnicas de ensaio de máquinas-ferramenta. A demanda por ensaios geométricos impulsiona e, ao mesmo tempo, é impulsionada pelo constante desenvolvimento de técnicas de ensaio com as qualidades descritas e, neste contexto, a pesquisa de novas técnicas para o ensaio de máquinas se fundamenta e justifica, tendo sido o objetivo da pesquisa desta tese de doutorado.

CAPÍTULO 4 - PROPOSIÇÃO E DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA QUALIMAQ

As análises realizadas nos capítulos anteriores buscaram situar o trabalho no contexto técnico-científico e justificar a necessidade e validade de pesquisar métodos de ensaio geométrico alternativos que congreguem confiabilidade metrológica, praticidade operacional e custo atrativo.

Em resposta a essa demanda e ao desafio científico-tecnológico colocado, o capítulo 4 apresenta a proposição e o desenvolvimento do sistema de ensaio alternativo denominado *QUALIMAQ*. As principais tecnologias que o fundamentam são descritas e os principais elementos físicos que o compõem são caracterizados metrologicamente.

4.1 Técnicas que Fundamentam o sistema QUALIMAQ

4.1.1 *Qualificação Geométrica de CMM com Padrões Corporificados*

A exatidão de sistemas de medição na área dimensional pode ser verificada através da medição de padrões corporificados ou da comparação com sistemas geradores de medidas padrão [152]. Em sistemas de medição mais básicos (paquímetro, micrômetros, ...) a utilização de padrões corporificados é corrente, e tem a vantagem de verificar o instrumento da sua condição de utilização.

Em sistemas de medição mais complexos, como as máquinas de medir por coordenadas, a utilização de padrões corporificados só mais recentemente tem sido estabelecida como uma alternativa frequente para a calibração [153]. A utilização de sistemas como o laser interferométrico é bastante frequente (figura 4.1) e a maior parte dos fabricantes faz a primeira calibração de seus equipamentos com este sistema.

No entanto, ultimamente na área das máquinas de medir por coordenadas, a auto-verificação através da medição de padrões têm utilização crescente (figura 4.2) e reúne o maior número de vantagens em relação aos ensaios de trajetória, como o realizado com laser [136;154-160].

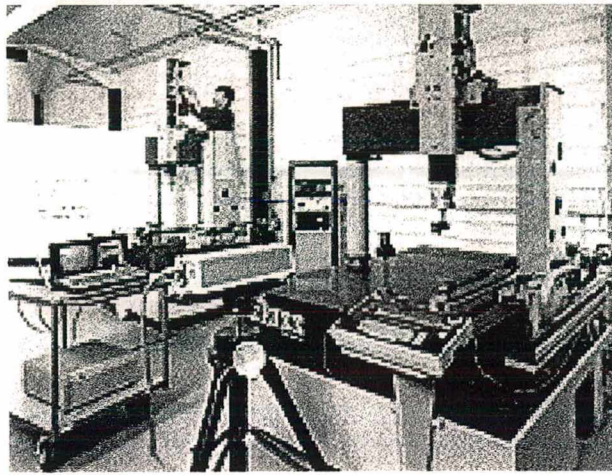


Figura 4.1 - Calibração de Máquina de Medir por Coordenadas com laser interferométrico

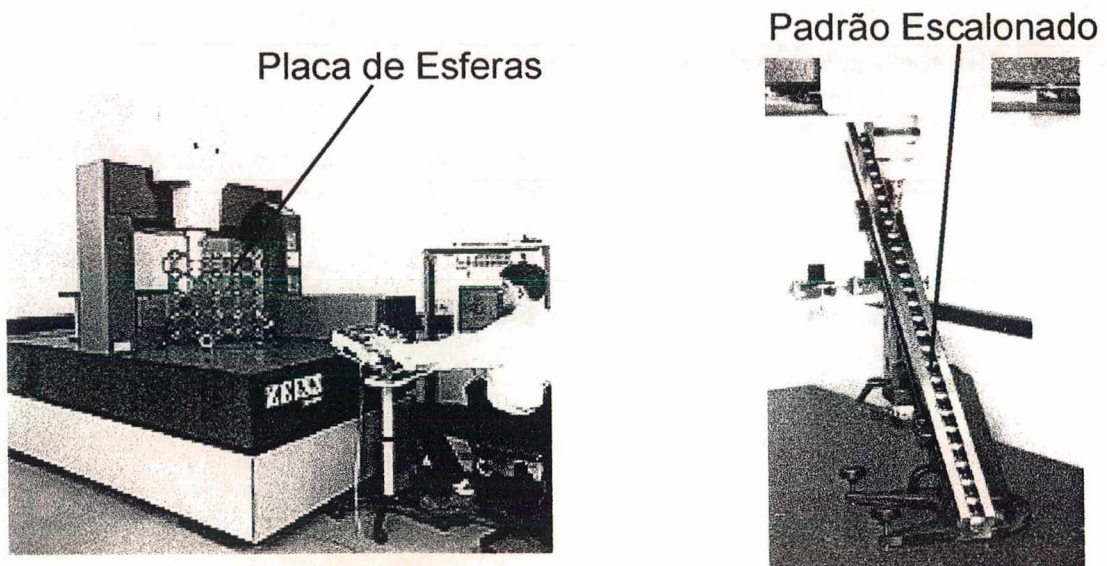


Figura 4.2 - Qualificação de Máquinas de Medir por Coordenadas com padrões corporificados

A calibração de máquinas de medir com padrões corporificados tem sido fortemente impulsionada pelos padrões bidimensionais na forma de placa com elementos (furos ou esferas) de posição calibrada (figura 4.2), desenvolvidos no *Physikalisch Technische Bundesanstalt* – Instituto de Metrologia Alemão.

As principais vantagens sobre as técnicas clássicas de ensaio consistem na sua maior

confiabilidade metrológica e no menor tempo de ensaio, fornecendo resultados mais completos sobre a exatidão de trabalho das máquinas e permitindo obter separadamente as 21 componentes de erro da máquina, em um mesmo ensaio. Alguns fabricantes já adaptaram os procedimentos para a calibração de seus equipamentos para serem realizados com estes padrões, para atualização das tabelas de compensação de erros sistemáticos.

Apesar destas vantagens comprovadas na área de medição por coordenadas, a possibilidade de utilização de padrões corporificados para a qualificação geométrica de sistemas de fabricação, como as máquinas-ferramenta, não tem sido explorada.

4.1.2 Utilização de Apalpadores de Medição em Máquinas-ferramenta

Os sistemas de medição (escalas e encoders) presentes nas Máquinas-ferramenta CNC para a realimentação da posição dos eixos, também podem ser usados para determinar a posição de elementos geométricos, dentro do seu volume de trabalho. Esta posição pode ser melhor determinada a partir do contato de um *apalpador de medição* com o elemento geométrico de interesse e o resultado dessa operação pode ser usado para (figura 4.3) [142;161]:

- Localização de peça,
- Pré-ajustagem de ferramentas,
- Medições da peça usinada na própria máquina,
- Digitalização de superfícies.

agregando confiabilidade e produtividade às máquinas-ferramenta, já que tempos de preparação do processo podem ser reduzidos em até 50%, em relação a operações manuais, aumentando a disponibilidade da máquina. As incertezas na localização da peça são reduzidas e, conseqüentemente, também a possibilidade de erros de posição de elementos geométricos nas peças usinadas [162-164].

Apoiados nesta constatação, fabricantes de sistemas de medição têm estendido a tecnologia dos apalpadores de máquinas de medir por coordenadas para utilização em máquinas-ferramenta. A robustez necessária para operação na máquina-ferramenta fez com que, em um primeiro momento, estes apalpadores apresentassem uma incerteza bem maior do que os apalpadores para máquinas de medir. Com a crescente utilização, os fabricantes têm aprimorado significativamente a tecnologia destes sistemas. A repetitividade dos apalpadores comutadores

(*touch trigger*) reduziu-se de 5 μm , nas primeiras versões, para valores abaixo de 1 μm nos apalpadores comutadores atuais. Até mesmo apalpadores medidores (*analógicos*) com transmissão remota têm sido lançados no mercado, com repetitividade inferior a 0,25 μm , portanto da mesma ordem de apalpadores para máquinas de medir por coordenadas [25;165;166].

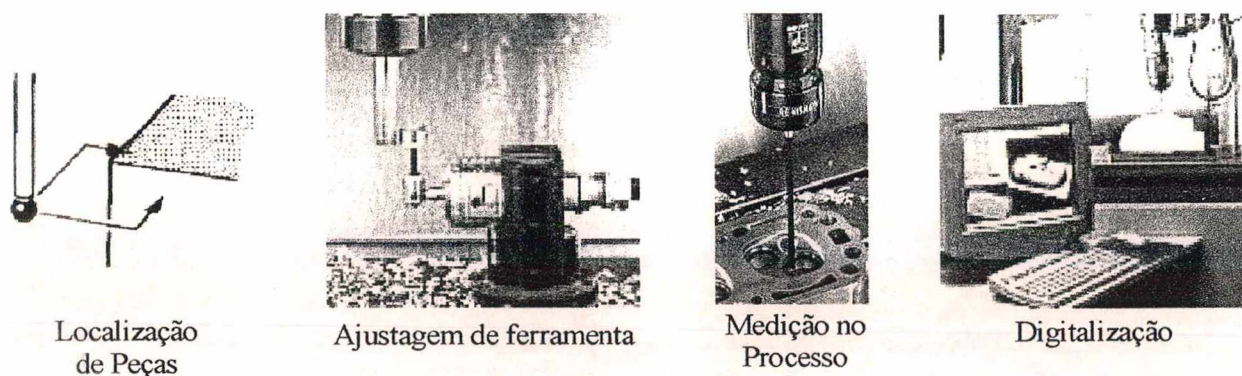


Figura 4.3 - Funções do apalpador na máquina-ferramenta

Com esta evolução, a presença de apalpadores de medição tem sido aproveitada, além das funções descritas acima, também para otimizar a exatidão das peças usinadas [113;167]. Os efeitos térmicos e erros geométricos intrínsecos da máquina-ferramenta que tornam a medição na própria máquina com alta incerteza, têm sido minimizados com a comparação da peça usinada com réplicas calibradas, com resultados muito positivos. Igualmente, a apalpação permite a atualização frequente do sistema de coordenadas da peça, minimizando variações da máquina-ferramenta por efeitos térmicos. Essas e outras possibilidades indicam que os apalpadores serão utilizados crescentemente em máquinas-ferramenta CNC.

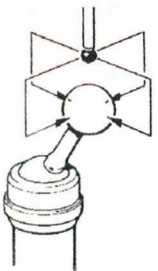
4.1.3 Recursos de Medição por Coordenadas em Controladores CNC

O aumento da capacidade de processamento computacional dos controladores CNC e a crescente utilização de apalpadores de medição em máquinas-ferramenta têm motivado os fabricantes de CNC a incluir recursos da tecnologia de medição por coordenadas antes exclusivos das máquinas de medir. Nos controladores de última geração, a criação de planos de referência para localizar a

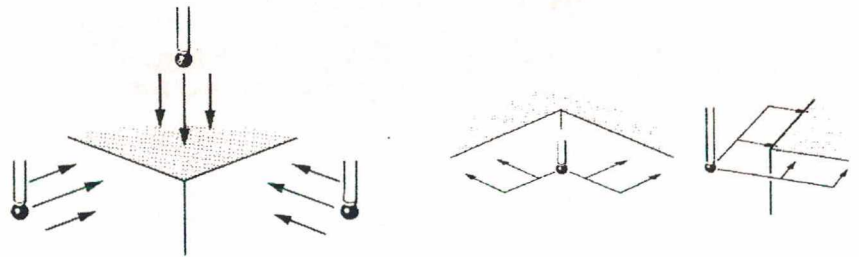
peça no volume de trabalho e definir o sistema de coordenadas local (“zero peça”), já se faz inteiramente desvinculada dos eixos da máquina. As trajetórias dos eixos de movimentação da máquina ocorrem segundo esses eixos matemáticos, facilitando bastante a preparação para o processo, com redução de tempos passivos.

O software de medição tem incorporado recursos para a medição de elementos geométricos básicos como círculos (diâmetro e posição do centro), distâncias, ângulos, etc., e funções mais avançadas como a comparação com tolerâncias para realimentação da usinagem. A calibração do sensor do apalpador para determinação da sua posição espacial e diâmetro efetivo também tem o procedimento gerenciado pelo software de medição. Recursos adicionais de digitalização de peças para engenharia reversa permitem gerenciar a aquisição de pontos e formatação de dados obtidos para manipulação sistemas CAD. A figura 4.4 ilustra alguns desses recursos [164].

Calibração do Sensor



Localização da peça



Funções de medição básicas

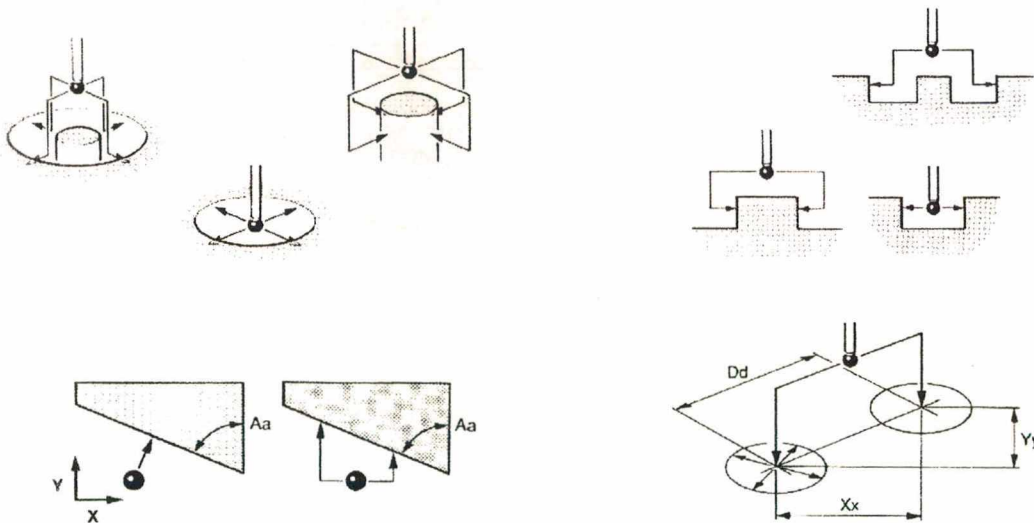


Figura 4.4 - Recursos de Medição por coordenadas presentes em controladores atuais

Além desses, outros recursos dos controladores CNC são facilitadores da exploração da tecnologia de medição por coordenadas para o ensaio geométrico da máquina-ferramenta. A maioria dos controladores possui interface serial RS 232 (configurável) para transmissão de dados, possibilitando importar e exportar informações para um equipamento remoto. Este sistema está presente em praticamente todas as máquinas no mercado, já que os programas de usinagem, em sua maioria, são transmitidos via DNC (Comando Numérico Direto), dispensando a programação manual no painel da máquina.

Como a utilização de apalpadores de medição nas máquinas-ferramenta é crescente, os fabricantes têm produzido suas máquinas com interface já instalada também para a comunicação com apalpadores que serão adquiridos *a posteriori*.

4.2 O Sistema de Ensaio Idealizado - QUALIMAQ

As tecnologias descritas anteriormente foram combinadas, resultando em um sistema idealizado para o ensaio geométrico de centros de usinagem e fresadoras CNC, o qual pode ser visualizado na figura 4.5 [168]. Padrões corporificados com geometrias específicas são medidos na máquina-ferramenta equipada com um apalpador de medição. Os pontos tocados sobre a peça são transmitidos pela interface do CNC da máquina-ferramenta para um computador portátil, onde um software adquire e processa as coordenadas dos pontos apalpados, comparando-as com as posições calibradas.

Como resultado, são obtidos os erros paramétricos de *posicionamento*, *histerese*, *retilineidade* e *perpendicularidade* ao longo do volume de trabalho da máquina. Os resultados deste ensaio podem ser facilmente configurados para a atualização da tabela de compensação de erros no CNC da máquina-ferramenta, de acordo com a formatação do controlador, que depende de cada fabricante.

Para que o método seja eficiente em determinar esses erros paramétricos da máquina-ferramenta, os padrões são movidos ao longo do volume de trabalho da máquina e/ou a sua configuração geométrica é alterada, seguindo metodologia própria do QUALIMAQ. A rastreabilidade do método de ensaio aos padrões primários é garantida através da calibração dos padrões corporificados, realizada em uma máquina de medir por coordenadas também calibrada.

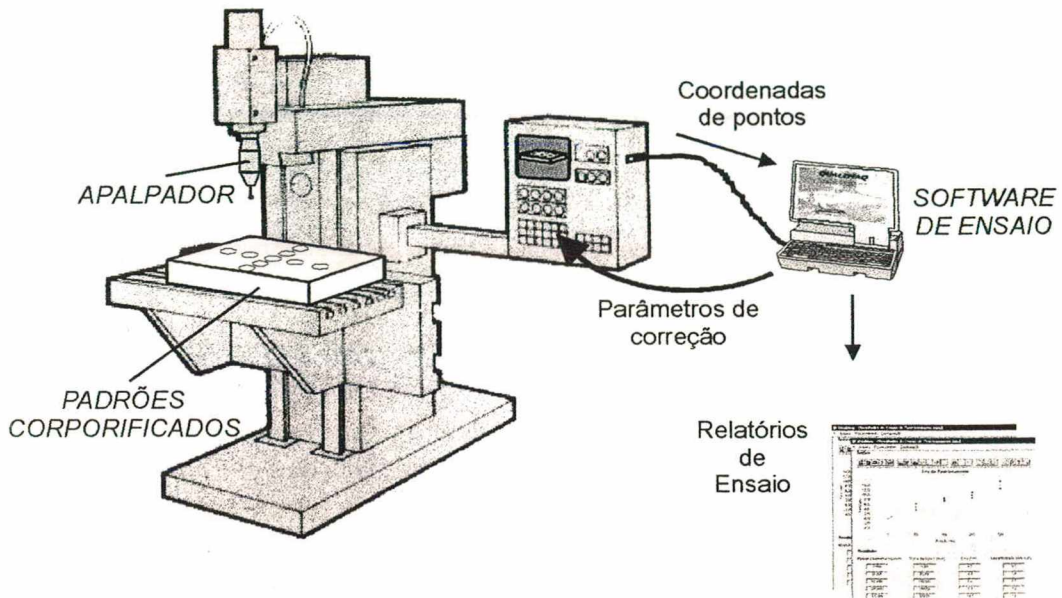


Figura 4.5 - Qualificação geométrica de Máquinas-ferramenta com padrão corporificado

Os procedimentos dos ensaios são estabelecidos de modo a tornar a seqüência do teste racional, fazendo o método ser prático e de aplicação rápida. A rapidez do ensaio é buscada não somente para uma maior praticidade do método, mas para torna-lo menos sensível às variações de temperatura do ambiente e da máquina-ferramenta. A manutenção de níveis de incerteza compatíveis com a exatidão de trabalho da máquina requer, além deste cuidado, uma alta confiabilidade dos algoritmos de processamento do software, dos padrões corporificados e do apalpador de medição instalado na máquina-ferramenta.

Desde a sua formulação, o método se mostrou potencialmente vantajoso para o ensaio geométrico de máquinas-ferramenta de pequeno e médio porte, em relação aos métodos classicamente utilizados. Essa constatação se apóia nas vantagens que a aplicação de padrões corporificados bi-dimensionais proporcionou para a calibração de máquinas de medir por coordenadas, em relação aos métodos até o seu surgimento: [136]

- Maior confiabilidade metrológica para a operação de ensaio geométrico e informações mais completas sobre a condição geométrica da máquina;
- Praticidade na realização do ensaio;
- Baixo custo dos equipamentos envolvidos;
- Resultados dos ensaios de fácil entendimento e rapidamente configuráveis para a aplicação em softwares de CAA das máquinas.

Para máquinas de grande porte, a aplicação do sistema é possível, deslocando-se os padrões ao longo do volume de trabalho, entretanto o maior tempo para essa operação faz o método perder vantagens operacionais e metrológicas, de forma a ser menos indicado para essa aplicação do que técnicas como o laser interferométrico. Essa restrição, no entanto, pouco limita o seu campo de aplicação, dado haver no mercado uma predominância de máquinas-ferramenta de pequeno e médio portes [169 - 173].

Esses indicativos motivaram a pesquisa e o desenvolvimento de meios para verificar experimentalmente se o sistema idealizado confirmaria os desempenhos metrológico e operacional esperados. Para tanto, após as atividades de fundamentação teórica, foram necessários o desenvolvimento de algoritmos e dispositivos voltados à solução, e uma verificação experimental de resultados para a comprovação metrológica do método.

4.3 Elementos físicos integrados ao Sistema

O apalpador de medição e os padrões corporificados, como principais elementos físicos integrados ao sistema de ensaio, foram especificados e/ou concebidos considerando, fundamentalmente, a confiabilidade metrológica necessária. A confirmação dessa confiabilidade veio através de calibrações, como se descreve a seguir.

4.3.1 O Apalpador de Medição

Os apalpadores utilizados em máquinas-ferramenta foram desenvolvidos a partir de apalpadores de máquinas de medir por coordenadas e são, em sua grande maioria, apalpadores comutadores. No entanto, embora a tecnologia de ambos seja semelhante, os apalpadores para máquinas-ferramenta sempre foram construídos de modo a apresentar uma robustez operacional bem maior, devido ao ambiente de operação junto a usinagem ser bem menos controlado do que no caso de uma máquina de medir por coordenadas. Fatores agressivos como altas velocidades de aproximação e a possibilidade de contato com fluidos de corte e cavacos da usinagem fazem com que, necessariamente, a robustez operacional dos apalpadores para máquina-ferramenta tenha que ser maior do que os apalpadores para máquinas de medir por coordenadas.

Esse aumento de robustez dos apalpadores, em um primeiro momento, fez com que sua

performance metrológica ficasse prejudicada [134], o que comprometeria sua utilização no sistema de ensaio geométrico proposto neste trabalho.

Com o passar do tempo, novas tecnologias foram sendo geradas para superar essa limitação. Por exemplo, a tecnologia de comutação óptica do apalpador fez com que a força de medição necessária para comuta-lo fosse menor, compensando a maior robustez do sistema de proteção do apalpador, que faria com que sua comutação fosse menos sensível. Essas e outras evoluções fazem com que os apalpadores para máquinas-ferramenta comercialmente disponíveis apresentem performance metrológica semelhante aos apalpadores para máquinas de medir por coordenadas.

Além de apresentar baixa incerteza de medição, os apalpadores de medição têm que ser compatíveis com os controladores CNC da máquina-ferramenta. Com já citado, atualmente muitos fabricantes de máquinas-ferramenta oferecem, de série, a interface com apalpadores de medição. Em máquinas onde não há essa interface, na grande maioria dos controladores há a possibilidade de *upgrade* do controlador para que essa comunicação seja possível. Mecanicamente, a fixação do apalpador de medição é realizada por meio de cones ISO, portanto sempre compatível com os sistemas de fixação e troca de ferramentas presente nas máquinas.

Com as condições de contorno metrológicas e operacionais descritas acima, foi especificado um apalpador comutador (figura 4.6), com sistema de comutação óptica e da mesma marca do controlador CNC da máquina-ferramenta utilizada no desenvolvimento experimental do trabalho (Heidenhain). A máquina-ferramenta utilizada nos experimentos já estava configurada para a comunicação com o apalpador e, dessa forma, esse requisito operacional foi atendido.

No aspecto metrológico, a exatidão com que uma apalpação pode ser realizada e repetida depende das características mecânicas, elétricas e cinemáticas do apalpador, e é determinada pela sua incerteza de medição. Os fabricantes normalmente especificam a repetitividade do apalpador quando apalpando um mesmo ponto repetidas vezes. Embora esse seja um parâmetro válido, é necessário obter a **incerteza de medição** do apalpador, que define o desvio máximo na tomada de um ponto apalpando-se sob qualquer direção, que não deve ser excedido com uma probabilidade de 95 %.

O apalpador especificado para este trabalho possui, segundo o fabricante, uma repetitividade abaixo de 1 μm , mas sem nenhuma indicação da sua incerteza 1D, 2D ou 3D. Esses parâmetros foram obtidos através da calibração do apalpador, realizada com base na diretriz VDI/VDE 2617 [175], como indicado nos itens a, b e c.

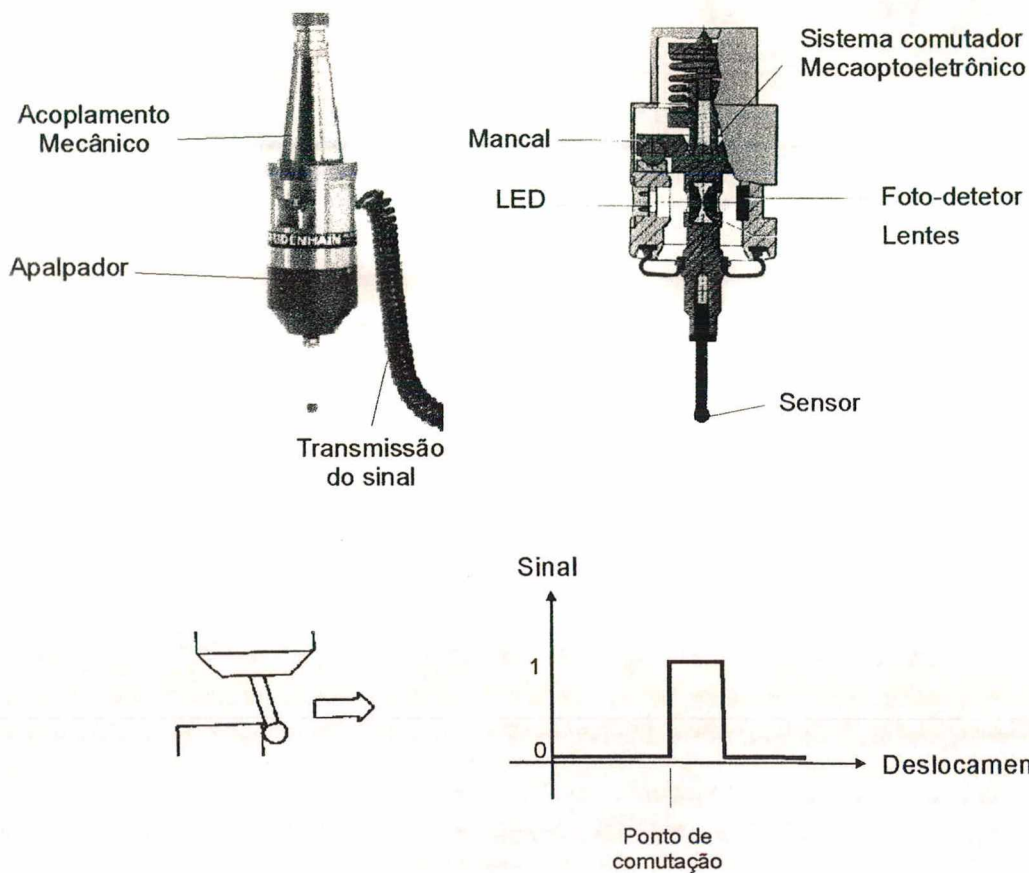
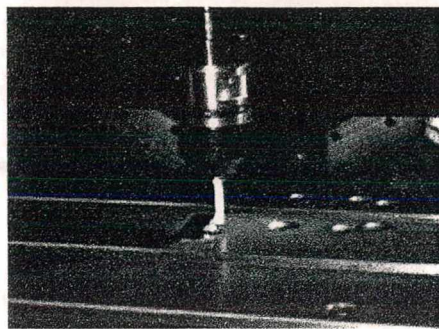
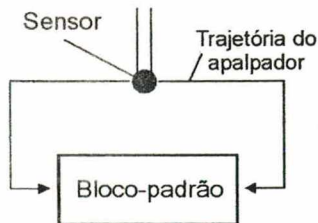


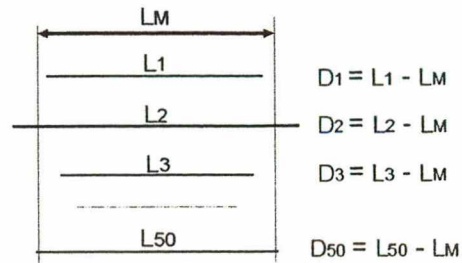
Figura 4.6 – Apalpador de comutação óptica utilizada no desenvolvimento do trabalho

a) Determinação da Incerteza de apalpação 1D

Seguindo a recomendação contida na diretriz VDI/VDE 2617 [175], a incerteza de apalpação 1D foi determinada a partir de repetidas medições de um bloco-padrão de 20 mm, colocado no volume de trabalho da máquina-ferramenta. Foram realizadas 50 medições do bloco, procurando-se apalpar sempre nos centros das suas faces de medição, perpendicularmente. A incerteza de apalpação 1D foi obtida a partir da comparação das 50 medições de comprimento com o valor médio. Os 50 desvios individuais são processados estatisticamente, calculando-se o desvio padrão dessa amostra, e a incerteza 1D tipo A é obtida. A figura 4.7 ilustra esse procedimento e indica o balanço para o cálculo da incerteza de apalpação, de acordo com a ISO GUM [179], considerando as outras fontes de incerteza do ensaio.



Desvios (D_i) em relação ao comprimento médio (LM)



Fonte de Incerteza	Incerteza [μm]	Distribuição de Probabilidade	Coefficiente de sensibilidade	Incerteza Padrão [μm]	Graus de liberdade
Repetitividade	0,60	Normal	1	0,30	49
Resolução	1,00	Retangular	1	0,60	∞
Varição de temperatura	0,06	Retangular	1	0,04	∞
Erro de forma do padrão	0,10	Retangular	1	0,06	∞
			Incerteza Combinada	0,70	1253 (Efetivo)
			Incerteza Expandida (95%)	1,3 μm	

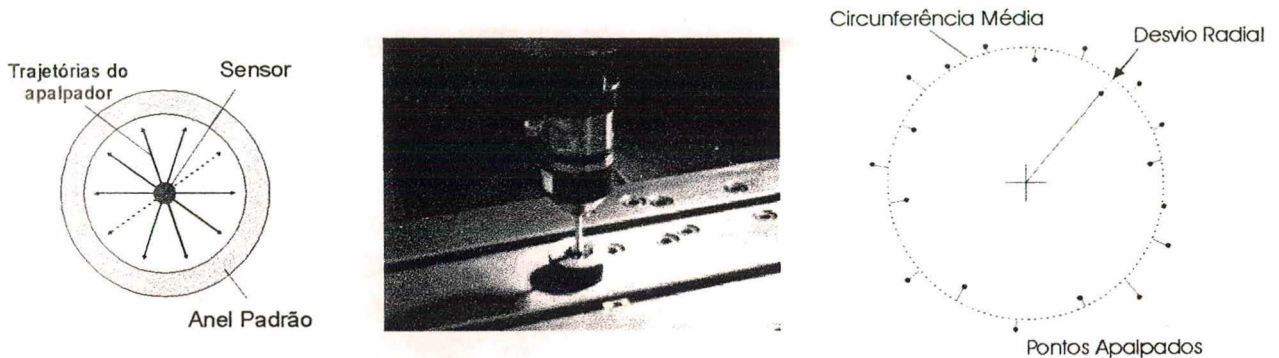
Figura 4.7 – Determinação 1D da incerteza de apalpação 1D

A experimentação para a obtenção da incerteza de apalpação revelou uma repetitividade muito boa do apalpador na direção apalpada, o que poderia ter simplificado o procedimento de ensaio com a apalpação de um número menor de pontos, em relação aos 50 pontos recomendados pela diretriz VDI2617. A incerteza obtida com o apalpador neste ensaio é da mesma ordem da incerteza de medição de apalpação para máquinas de medição por coordenadas.

b) Determinação da Incerteza de apalpação 2D

A incerteza de apalpação 2D foi obtida de forma semelhante ao ensaio 1D. Um anel liso foi apalpado 50 vezes ao longo de seu perímetro e, de posse desses pontos, foi calculada uma

circunferência média (mínimos quadrados). Os desvios radiais de cada um dos 50 pontos em relação à circunferência média são determinados e o desvio padrão dessa amostra é calculado para a obtenção da incerteza 2D tipo A do apalpador. A combinação dessa incerteza com as outras fontes permitiu determinar a incerteza 2D do apalpador, como mostra a figura 4.8.



Fonte de Incerteza	Incerteza [μm]	Distribuição de Probabilidade	Coefficiente de sensibilidade	Incerteza Padrão [μm]	Graus de liberdade
Apalpador	1,30	Normal	1	0,60	49
Resolução	1,00	Retangular	1	0,60	∞
Variação de temperatura	0,05	Retangular	1	0,03	∞
Erro de forma do padrão	0,30	Retangular	1	0,20	∞
			Incerteza Combinada	0,80	219 (Efetivo)
			Incerteza Expandida (95%)	1,7 μm	

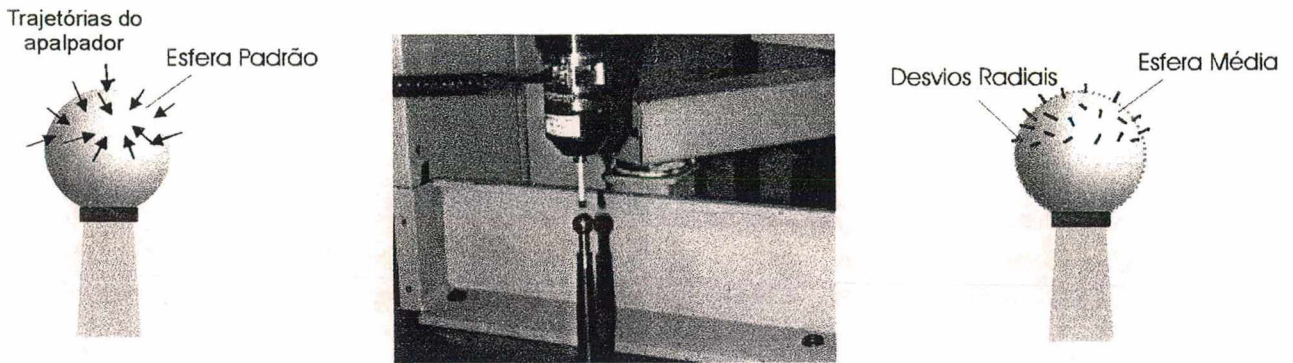
Figura 4.8 – Determinação da incerteza de apalpação 2D

A pior incerteza do apalpador no ensaio 2D em relação à incerteza 1D ocorre em função da pior repetitividade devida à comutação do apalpador em várias direções ao longo do plano horizontal de trabalho e, principalmente, pela maior influência dos erros de posicionamento da máquina-ferramenta que possuem magnitudes diferentes.

O maior erro de forma do anel padrão, bem como o próprio erro de forma do sensor do apalpador também contribuem para uma maior incerteza. A repetitividade ultrapassou um pouco o valor especificado pelo fabricante.

c) Determinação da Incerteza de apalpação 3D

A incerteza 3D foi obtida de forma semelhante aos procedimentos anteriores, apalpando-se uma esfera padrão 50 vezes, estando os pontos distribuídos ao longo do hemisfério superior da esfera. Com esses pontos é calculada uma esfera média e os desvios radiais de cada ponto à esfera ajustada são processados estatisticamente (desvio-padrão) para determinar a incerteza 3D tipo A. Combinando com as outras fontes de incerteza, foi determinada a incerteza de apalpação 3D (figura 4.9).



Fonte de Incerteza	Incerteza [μm]	Distribuição de Probabilidade	Coefficiente de sensibilidade	Incerteza Padrão [μm]	Graus de liberdade
Apalpador	2,10	Normal	1	1,10	49
Resolução	1,00	Retangular	1	0,60	∞
Varição de temperatura	0,03	Retangular	1	0,02	∞
Erro de forma do padrão	0,30	Retangular	1	0,20	∞
Incerteza Combinada				1,30	52 (Efetivo)
Incerteza Expandida (95%)				2,5 μm	

Figura 4.9 – Determinação da incerteza de apalpação 3D

Ao contrário da pequena variação da incerteza 1D para a incerteza 2D, houve um aumento mais significativo quando da determinação da incerteza 3D do apalpador. Esse aumento foi causado, entre outros fatores, pela tomada de pontos na vertical descendente, em plano perpendicular ao eixo árvore da máquina-ferramenta e do apalpador. Nessa situação, a comutação ocorre por

efeito de inclinação e/ou translação vertical da haste, numa condição menos controlada do que quando apalpando lateralmente. Os erros de posicionamento linear da máquina-ferramenta, bastante desiguais nas direções X, Y e Z, foram provavelmente a principal causa dessa maior incerteza de apalpação. O ensaio do apalpador em uma máquina mais ajustada possibilitaria obter incertezas menores. A repetitividade superior a 2 μm ultrapassa o valor pré-estabelecido pelo fabricante.

Os mesmos procedimentos experimentais descritos acima foram aplicados para a calibração do apalpador medindo com uma haste horizontal, já que a utilização da placa de furos para verificar a exatidão geométrica da máquina nos planos verticais XZ e YZ, requer que a placa seja medida na vertical, paralela a esses planos. Dessa forma, houve a necessidade de adaptação do apalpador de medição, de modo que os furos da placa pudessem ser apalpados. Esse procedimento é comum nas máquinas de medir por coordenadas, já que os apalpadores (manuais ou motorizados) possuem flexibilidade para se adaptarem a posições diversas, mas na máquina-ferramenta essa flexibilidade não existe.

Um outro aspecto que diferencia as máquinas-ferramenta das máquinas de medir por coordenadas se refere à largura da coluna Z. Nas máquinas de medir, a coluna é estreita e facilita a medição da placa na vertical, sem haver a necessidade de longas hastes de prolongamento horizontais para alcançar a placa. Nas máquinas-ferramenta, devido à necessidade de maior rigidez estrutural, a coluna Z é bastante larga, o que força a colocação da placa de furos mais longe para permitir o livre deslocamento do eixo Z da máquina-ferramenta. Isso exigiu a adaptação de uma haste de prolongamento horizontal de 300 mm ao apalpador, o que elevou significativamente a incerteza de apalpação, principalmente por influência da flexão da haste, erros de Abbe, e pela condição de comutação em torção na apalpação em movimento horizontal, para a qual o apalpador não é projetado (figura 4.10).

Como esperado, a incerteza de medição aumentou significativamente em relação aos resultados anteriores, indicando que a incerteza do ensaio geométrico utilizando a placa de furos na vertical será bastante prejudicada por essa adaptação. O cálculo da incerteza considerou as mesmas fontes de influência e os valores encontrados foram:

- Incerteza 1D: $\pm 3,3 \mu\text{m}$ - Incerteza 2D: $\pm 5,1 \mu\text{m}$ - Incerteza 3D: $\pm 6,7 \mu\text{m}$

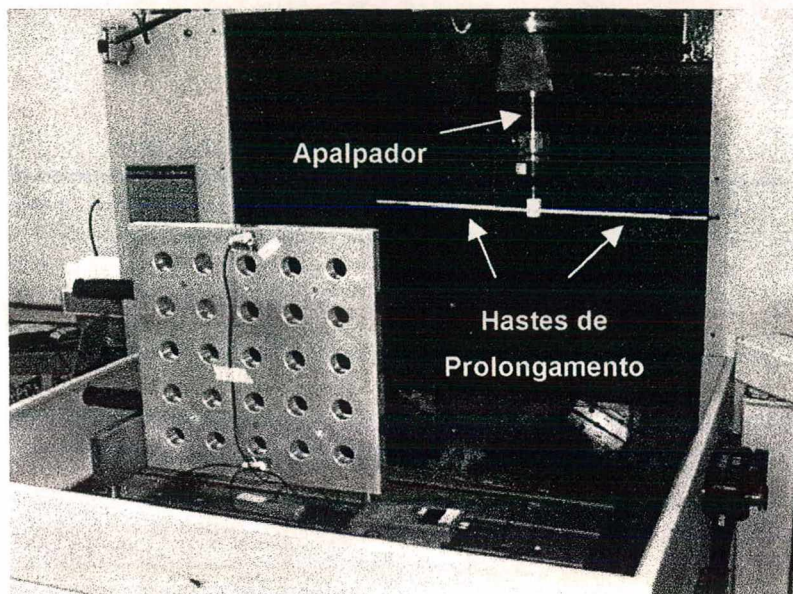


Figura 4.10 – Adaptação do apalpador para medir a placa de furos na vertical

4.3.2 Placa de Furos

Os padrões bidimensionais na forma de placa com esferas ou furos esféricos distribuídos em forma de *grid*, desenvolvidos primeiramente no PTB na Alemanha, têm sido crescentemente utilizados para a calibração de máquinas de medir por coordenadas. A possibilidade de obtenção simultânea de diversas componentes de erro e a boa estabilidade dimensional do padrão têm motivado sua utilização [6].

Baseado nessa constatação e na experiência da Fundação CERTI com a utilização desses padrões, foi desenvolvido uma placa de furos para o ensaio de máquinas-ferramenta a ser utilizada nesse trabalho. Todo o desenvolvimento foi fundamentado e orientado por recomendações contidas na diretriz para o desenvolvimento de placas do DKD [176], que estabelece os requisitos operacionais e metrológicos a serem atendidos pelo padrão, dentre eles:

- Dimensões da placa e número de elementos de referência (esferas ou furos);
- Número, dimensão e erro de forma de furos/esferas, bem como seu espaçamento ao longo da placa;
- Proteção para a isolamento térmica no manuseio do padrão;
- Apoios e suportes para as fixações horizontal e vertical da placa;
- Procedimento de calibração da placa e incerteza admissível;
- Variações de temperatura admissíveis na calibração e utilização do padrão.

Com base nessas recomendações e adaptando a tecnologia para a utilização em máquinas-ferramenta (ao longo do projeto do padrão, foram realizadas várias simulações de fontes de incerteza para determinar alguns requisitos metrológicos a serem apresentados pela placa), buscou-se o desenvolvimento de um padrão priorizando a confiabilidade metrológica, mas buscando incorporar praticidade operacional ao ensaio, com redução de custos. Sob esses requisitos, optou-se por validar uma opção de padrão diferente das placas disponíveis comercialmente, o que acabou configurada em uma placa de alumínio com 25 furos cilíndricos distribuídos em forma de uma grade 5 x 5.

Ao contrário das placas comercialmente disponíveis, que utilizam furos com insertos esféricos ou esferas como elementos de referência, esta placa é monobloco e contém furos cilíndricos como elementos de referência (figura 4.11). A utilização de furos cilíndricos requer mudanças no procedimento para o alinhamento e medição da placa, visto que a criação do plano primário de referência deve ser feito, agora, utilizando a face superior da placa, ao contrário daquelas placas, onde este plano é criado com o centro de 3 esferas. Devido à necessidade de menos pontos para a medição de furos cilíndricos, a placa desenvolvida permitiu uma redução de aproximadamente 25% no tempo de apalpação, em relação às placas de esferas ou com cavidades esféricas

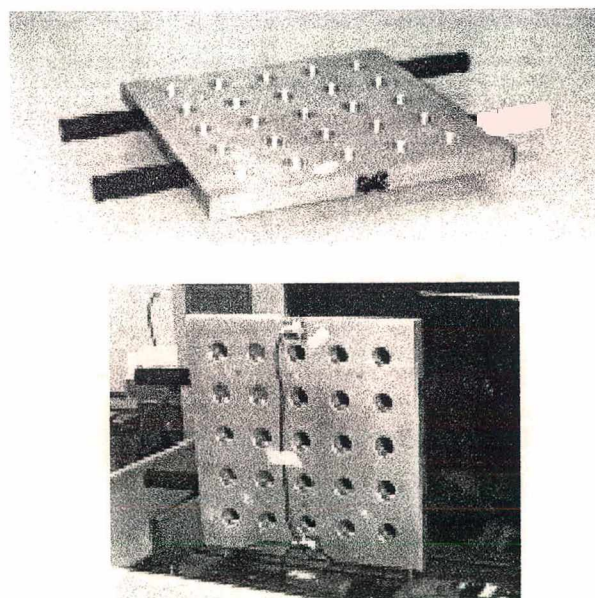
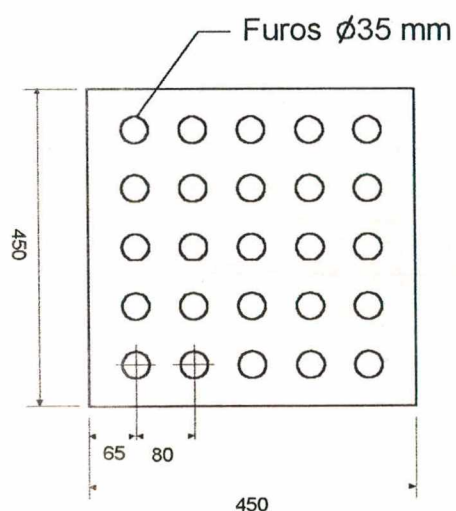


Figura 4.11 - Protótipo desenvolvido: Placa de Furos como padrão corporificado bi-dimensional

A distribuição dos furos na placa permite a determinação de erros de posicionamento, retilidade e perpendicularidade ao longo de 5 linhas em cada plano de trabalho da máquina-ferramenta. Dessa forma, em cada ensaio são realizadas 10 avaliações de posicionamento linear, 10 de retilidade e 25 verificações de perpendicularidade, simultaneamente.

Uma outra característica alternativa desse padrão está no material da placa, de alumínio, ao contrário da maior parte das placas para máquinas de medir por coordenadas, fabricadas em aço. Esta opção foi motivada pelo menor peso do padrão, o que melhora sua portabilidade, e também pelo fato de os ensaios geométricos em máquina-ferramenta serem realizados em ambientes sem controle de temperatura. Embora, em uma primeira análise, a opção pelo alumínio possa parecer inadequada, análises e simulações matemáticas indicaram a possibilidade de sua utilização, desde que atendidas certas condições.

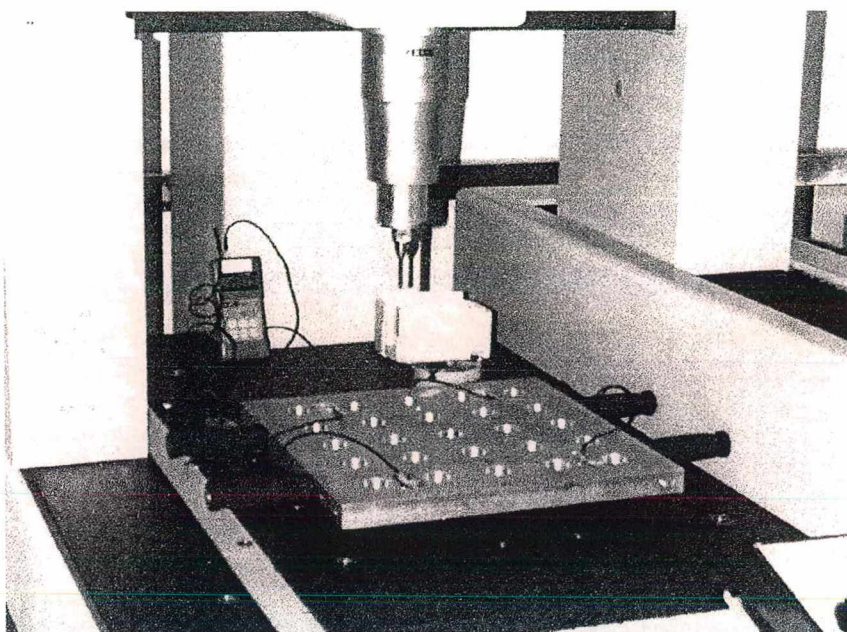
Apesar do alumínio possuir um coeficiente de expansão térmica cerca de 2 vezes superior ao do aço, possui um coeficiente de condutibilidade térmica também cerca de 10 vezes maior. Isto resulta em uma possibilidade bem menor da placa distorcer quando há uma mudança de temperatura, além de um período de estabilização térmica bem menor, quando levada de um ambiente a outro [177;178].

Vale ressaltar que a temperatura da placa é medida durante o ensaio e que as compensações matemáticas de dilatações térmicas são bem mais eficientes sem a presença de distorções na placa, causada por um gradiente térmico em seu corpo. Experimentos e simulações mostraram essa vantagem do alumínio, desde que a variação de temperatura durante o ensaio não ultrapasse 0,1 K durante os cerca de 14 minutos de ensaio. Sendo o tempo de apalpação bastante curto, diminui a possibilidade de variação de temperatura do padrão e pôde-se validar a utilização desse material.

Na fabricação da placa foram tomados os cuidados para a garantia de sua estabilidade dimensional e para que os erros de forma dos furos apresentassem valores compatíveis com a aplicação do padrão. Após a usinagem de desbaste, a placa foi submetida a um tratamento térmico para alívio de tensões e os furos foram acabados por mandrilamento, resultando em um desvio de circularidade médio de 4 μm , distribuído. A calibração da placa foi realizada com uma máquina de medir por coordenadas Zeiss ZMC500 utilizando uma barra de esferas calibrada, no laboratório de medição por coordenadas da Fundação CERTI, credenciado pela rede de calibração Alemã (DKD) para esse tipo de serviço.

O procedimento de calibração consiste simplificada na comparação da placa a calibrar com padrões de alta exatidão por meio da máquina de medir por coordenadas, e no rebatimento da

placa em vários planos da máquina de medir. A comparação da placa com padrões e os rebatimentos são realizados para a minimização dos desvios sistemáticos da máquina de medir, possibilitando obter na calibração da placa incertezas inferiores à da máquina, dispensando inclusive a necessidade desta estar calibrada. A figura 4.12 mostra a placa no momento da calibração e a incerteza obtida na determinação das posições dos centros dos furos.



Fonte de Incerteza	Incerteza [μm]	Distribuição de Probabilidade	Coefficiente De sensibilidade	Incerteza Padrão [μm]	Graus de liberdade
CMM	1,0	Normal	1	0,50	5
Resolução da CMM	0,1	Retangular	1	0,06	∞
Varição de temperatura	0,5	Retangular	1	0,29	∞
Desvio de forma localizado (furo)	1,0	Retangular	1	0,58	∞
			Incerteza Combinada	0,78	36 (Efetivo)
			Incerteza Expandida (95%)	1,6 μm	

Figura 4.12 – Calibração da Placa de Furos na Máquina de medir por coordenadas

4.3.3 Padrão Desmontável

Diante da necessidade de adaptar uma haste horizontal ao apalpador para o ensaio com a placa de furos nos planos verticais da máquina-ferramenta, foi demonstrado que a incerteza do ensaio cresce de forma bastante significativa, o que restringe a utilização do método. Com o objetivo de superar essa limitação, foi desenvolvido um novo padrão corporificado, que pode ser descrito como um *padrão desmontável*, com remontagem cinemática. O padrão possui várias esferas fixadas em uma estrutura triangular cujas colunas de suporte se apóiam em montagem cinemática proporcionada por 3 rasgos em “V”, fixados na base triangular inferior (figura 4.13).

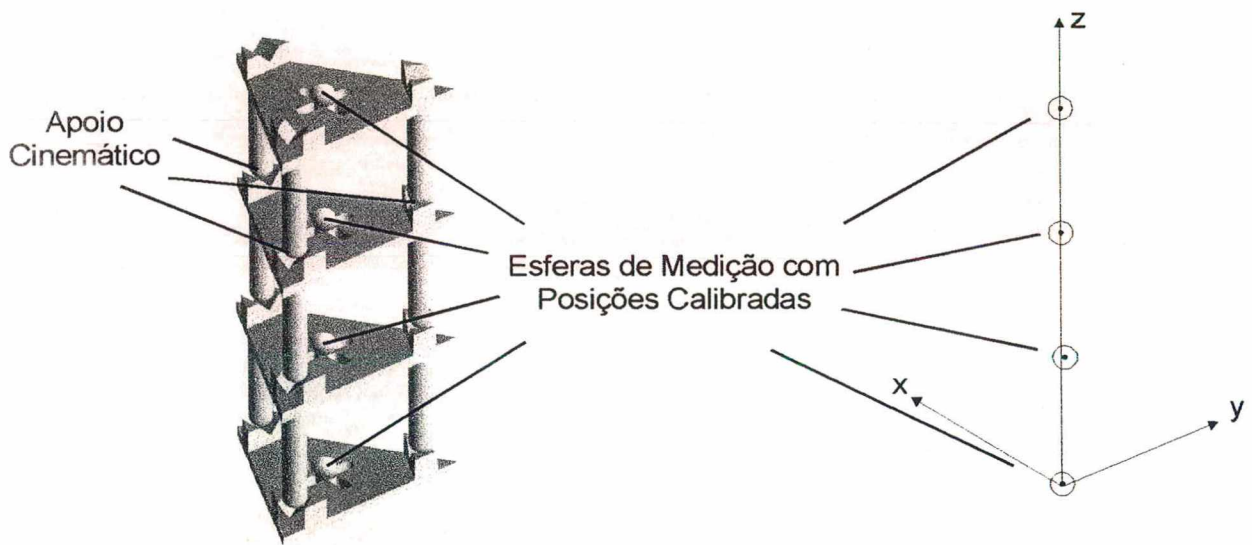


Figura 4.13 – Padrão vertical desenvolvido para substituir a medição da placa de furos na vertical

Durante o ensaio da máquina-ferramenta, à medida que o apalpador mede as esferas, esta parte do padrão é retirada e a máquina mede as esferas inferiores, de forma que o eixo árvore fica alinhando com a linha média que une o centro das esferas, sem a necessidade de adaptação do apalpador, e fazendo o ensaio atender ao princípio de Abbe. As posições dos centros das esferas são calibradas em uma máquina de medir por coordenadas e, a partir da comparação das esferas medidas na máquina-ferramenta com as posições calibradas, são determinados os erros de posicionamento, reticidade e perpendicularidade nos 2 planos verticais de trabalho da máquina-ferramenta. Os comprimentos das colunas de cada base são escalonados de forma que,

combinando diferentes montagens, é possível verificar 75 posições ao longo da faixa de ensaio de 0 a 400 mm (figura 4.14).

O reposicionamento com apoio cinemático é bastante utilizado em dispositivos de mecânica de precisão, notadamente em montagens ópticas [178], mas a sua aplicação em padrões e instrumentos de medição é restrita, por causa de deficiência de uma melhor estabilidade de longo prazo. Para otimizar a estabilidade deste padrão, foram utilizados materiais de alta resistência ao desgaste e à deformação nos elementos de contato, além de cuidados para manter a estrutura do conjunto o mais termo-simétrica possível. Para minimizar a incerteza no posicionamento das esferas, foram empregados elementos de referência com desvios de esfericidade inferiores a $0,3 \mu\text{m}$.

Durante o desenvolvimento do padrão, várias simulações e diversos testes foram realizados para estimar e verificar a repetitividade na remontagem do padrão e a influência desta repetitividade na incerteza da posição das esferas, e também para verificar a sua estabilidade ao longo do tempo e seu comportamento frente a efeitos térmicos. As influência destes fatores foram calculadas a partir do modelo matemático utilizado para obter os erros geométricos da máquina-ferramenta, utilizando os centros calibrados e medidos das esferas.

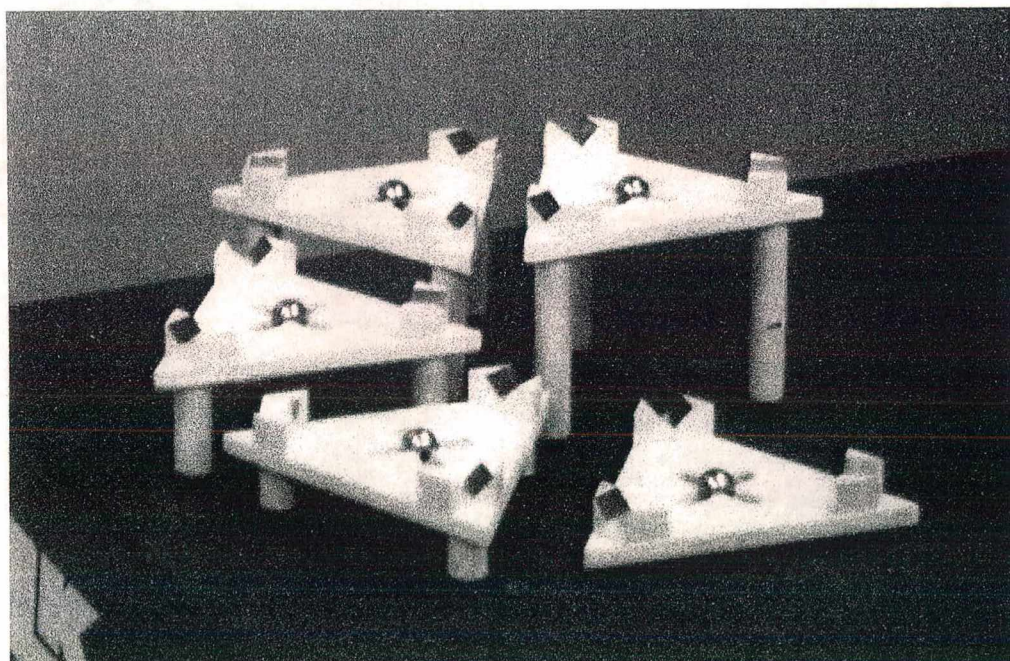


Figura 4.14 – Escalonamento das colunas de suporte das bases triangulares

A calibração do padrão foi realizada em uma máquina de medir por coordenadas Zeiss ZMC550, rastreada aos padrões primários (figura 4.15). O procedimento de calibração constou da medição das posições das esferas de medição à medida que o padrão era montado e desmontado, em vários ciclos de medição. O sistema de coordenadas local foi estabelecido através de esferas de alinhamento fixadas à base inferior do padrão. Foram calibradas as combinações de colunas que seriam utilizadas no ensaio geométrico da máquina-ferramenta, ou seja, base 1, bases 1 + 3, bases 1 + 3 + 4 + 2 e bases 1 + 3 + 4 + 5, como ilustra a figura 4.16. Foram realizados 5 ciclos de medição de forma crescente e decrescente, obtendo-se o conjunto de dados que indica os desvios em relação à posição média, de onde foi possível determinar a incerteza tipo A do posicionamento das esferas na montagem e remontagem do padrão. Observa-se uma excelente repetitividade na posição das esferas, com a remontagem cinemática.

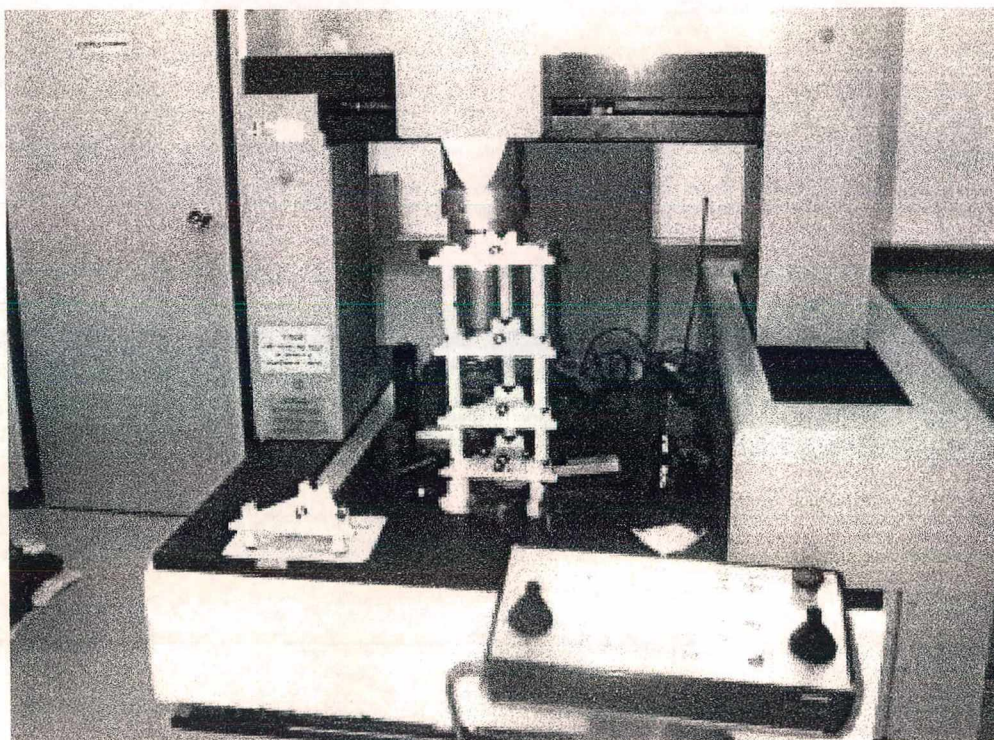
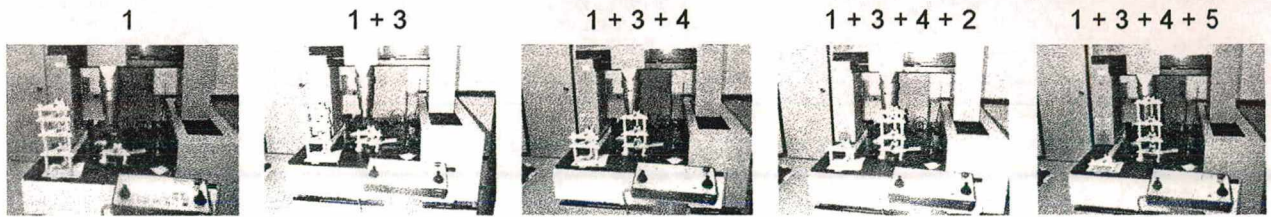


Figura 4.15 - Calibração do padrão vertical na Máquina de Medir por Coordenadas

O desvio padrão desse conjunto amostral é calculado para obter a incerteza tipo A que, combinada com as outras fontes de incerteza, permite obter a incerteza na determinação do posicionamento das esferas de medição (figura 4.17).



		Ciclos e Desvios [μm]									
		I	V	I	V	I	V	I	V	I	V
BASES		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	X	-0,4	0,0	0,0	0,2	0,1	0,0	0,2	0,0	0,2	-0,3
	Y	-0,3	0,1	0,0	0,0	0,3	0,0	0,1	0,1	-0,1	-0,2
	Z	0,2	0,1	-0,1	-0,2	-0,1	0,1	-0,1	0,1	0,0	0,0
1 + 3	X	0,2	0,0	-0,2	0,0	-0,1	0,2	-0,1	0,1	0,1	-0,2
	Y	0,3	-0,2	-0,2	0,2	0,0	-0,2	0,4	0,0	-0,3	0,0
	Z	0,2	-0,1	0,2	0,1	0,0	-0,4	-0,3	0,2	0,1	-0,1
1 + 3 + 4	X	0,2	-1,7	0,0	1,1	-0,1	-0,4	-0,1	1,0	0,1	0,1
	Y	0,2	-0,4	-1,0	0,2	0,5	-0,2	-0,3	0,5	0,2	0,2
	Z	0,3	-0,1	0,3	-0,2	-0,1	-0,6	0,1	-0,1	0,2	0,2
1 + 3 + 4 + 2	X	-0,4	-0,4	-0,4	0,6	-0,1	0,2	0,2	-0,1	0,2	0,2
	Y	-1,5	0,0	0,5	0,6	0,7	0,5	-0,3	0,0	-0,2	-0,2
	Z	-0,1	-0,2	0,1	0,2	0,6	-0,3	0,2	0,0	-0,3	-0,2
1 + 3 + 4 + 5	X	0,2	-0,2	0,1	0,3	0,1	0,1	-0,2	-0,3	0,1	0,1
	Y	0,7	0,7	-0,6	0,2	-0,2	0,2	-0,5	-0,2	-0,2	-0,1
	Z	0,1	0,1	0,3	-0,1	-0,4	-0,3	-0,2	0,1	0,1	0,2

I = Ciclo ascendente

V = Ciclo descendente

Figura 4.16 - Desvios no reposicionamento das esferas em relação à posição média

Para avaliar a estabilidade do padrão ao longo do tempo, foram realizadas novas medições na Máquina Zeiss e em outra máquina de medir por coordenadas (LK G80C) e, mesmo após toda a utilização do padrão nos ensaios máquina-ferramenta, os resultados se mantiveram dentro do intervalo de confiança ($2,2 \mu\text{m}$) determinado na calibração.

Fonte de Incerteza	Incerteza [μm]	Distribuição de Probabilidade	Coefficiente de sensibilidade	Incerteza Padrão [μm]	Graus de liberdade
Reposicionamento	1,7	Normal	1	0,85	9
Resolução	0,1	Retangular	1	0,06	∞
Varição de temperatura	0,4	Retangular	1	0,23	∞
CMM	1,4	Normal	2	0,70	∞
Incerteza Combinada				1,1	54 (Efetivo)
Incerteza Expandida (95%)				2,2 μm	

Figura 4.17 - Balanço de Incerteza do padrão vertical

4.3.4 Padrões para a medição da histerese

A placa de furos e o padrão desmontável são empregados para a medição dos erros de posicionamento linear, retilineidade e perpendicularidade, mas a sua aplicação para a determinação da histerese presente na movimentação dos eixos da máquina-ferramenta é inviável. Assim, foi analisada a viabilidade metrológica de utilizar outros padrões para esse ensaio: **anel padrão e blocos-padrão**.

Após analisar os requisitos metrológicos para o ensaio de histerese e a incerteza de medição com a utilização desses padrões, e realizar ensaios de viabilidade, pôde-se concluir que os métodos propostos não se adequavam para esse ensaio, por causa da sua incerteza de medição.

a) Anel padrão

O procedimento de ensaio com o anel padrão para a obtenção da histerese pode ser observado na figura 4.18. O anel é alinhado com o eixo vertical da máquina-ferramenta e, após isso, apalpado

nos 6 pontos indicados, obtendo-se as coordenadas (x_i, y_i) de cada ponto.

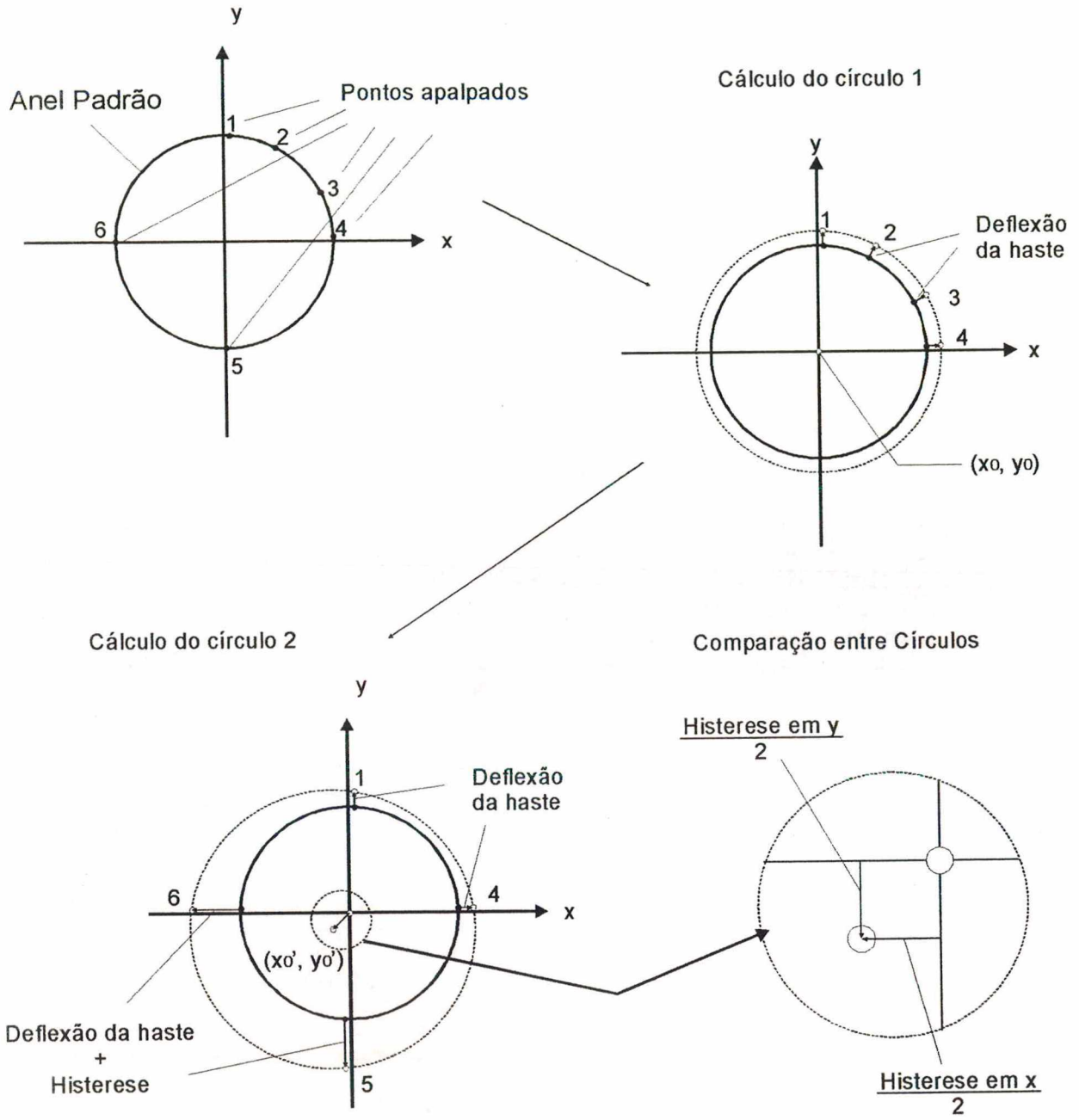


Figura 4.18 - Procedimento para a determinação da histerese utilizando anel padrão

Aplicando os pontos 1, 2, 3 e 4 à equação:

$$(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 = r^2 \quad (4.1)$$

onde:

x_i e y_i = coordenadas dos pontos $i = 1, 2, 3$ e 4

r = raio da circunferência

são obtidas as coordenadas x_0 e y_0 , do centro do anel. Como os pontos 1, 2, 3 e 4 estão localizados todos no mesmo quadrante, não houve a inversão de sentido no eixo X ou Y da máquina-ferramenta para a tomada dos pontos e as coordenadas do centro da circunferência calculada são obtidas sem a influência da histerese.

Repetindo o mesmo procedimento matemático, só que agora aplicando os pontos 1, 4, 5 e 6 à mesma equação 4.1, são obtidas as coordenadas x_0' e y_0' do centro do anel. A posição do anel calculada com esses pontos está deslocada da posição (x_0, y_0) por influência da histerese na movimentação dos eixos x e y da máquina-ferramenta, quando da tomada dos pontos 6 e 5, respectivamente.

Comparando-se, através das equações 4.2 e 4.3, as coordenadas do centro do anel obtidas pelos diferentes conjuntos de pontos, obtêm-se as histereses em X e Y, no local em que o anel foi medido.

$$\text{Histerese}_x = 2 \cdot (x_0 - x'_0) \quad (4.2)$$

$$\text{Histerese}_y = 2 \cdot (y_0 - y'_0) \quad (4.3)$$

Para medir a histerese ao longo do eixo o anel é deslocado e o procedimento repetido nas diversas posições. As análises metrológicas para a obtenção da incerteza incluíram testes de viabilidade e as principais fontes identificadas foram a incerteza 2D do apalpador de medição e a componente tipo A, devido à repetitividade dos resultados nos testes realizados (figura 4.19). A combinação das fontes de incerteza determinou a incerteza de medição da histerese em $\pm 4,3 \mu\text{m}$. Analisando os erros de histerese presentes em muitas máquinas-ferramenta, percebe-se uma incompatibilidade metrológica entre a incerteza obtida e a magnitude e tolerâncias do mensurando, o que torna o método do anel padrão pouco confiável.

Fonte de Incerteza	Incerteza	Distribuição de Probabilidade	Coefficiente de sensibilidade	Incerteza Padrão [μm]	Graus de liberdade
Repetitividade	3,8 μm	Normal	1	1,90	23
Resolução	1,0 μm	Retangular	1	0,58	∞
Forma do Anel	0,2 μm	Retangular	1	0,12	∞
Apalpador (2D)	1,7 μm	Normal	1	0,85	219
Incerteza Combinada				2,16	36 (efetivo)
Incerteza Expandida (95%)				4,3 μm	

Figura 4.19 – Balanço para a determinação da incerteza da medição da histerese com o anel padrão

b) Blocos-padrão

Uma outra alternativa para a determinação da histerese foi a utilização de 2 blocos-padrão parcialmente aderidos, e apalpados em direções opostas nas duas faces semi-aderidas, como mostra a figura 4.20. Os pontos 1, 2, 3 e 4 são apalpados e, a partir da comparação entre as posições dos pontos 3 e 4, relativos à linha que passa pelos pontos 1 e 2, é possível determinar a histerese na reversão de movimento do eixo.

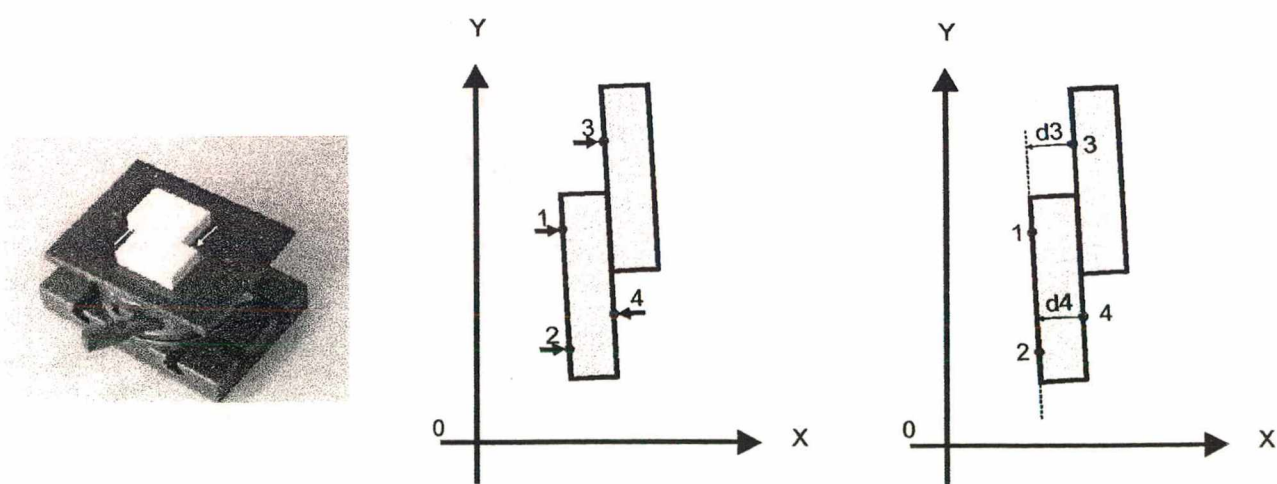


Figura 4.20 – Procedimento para a determinação da histerese utilizando blocos-padrão

Antes, no entanto, é necessário determinar a deflexão da haste do apalpador durante a comutação, para a sua compensação. Essa deflexão é determinada ao medir-se um anel calibrado de raio conhecido r_C , apalpando-se em apenas 1 dos quadrantes do círculo. Aplicando esses pontos, à equação:

$$(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 = r_M^2 \quad (4.4)$$

onde,

x_i e y_i = coordenadas dos pontos apalpados no mesmo quadrante do anel

x_0 e y_0 = coordenadas do centro da circunferência

como resultado, obtém-se o raio r_M do anel medido.

A deflexão D da haste do apalpador é determinada comparando-se os raios medido (r_M) e calibrado (r_C) do anel:

$$D = r_M - r_C \quad (4.5)$$

Com os pontos 1 e 2, apalpados sobre o bloco padrão, constrói-se uma reta de alinhamento e, posteriormente, são determinadas as distâncias dos pontos 3 e 4 a essa reta. Essas distâncias juntamente com a deflexão da haste são processadas para a obtenção da histerese do eixo nessa direção, de acordo com o processamento a seguir.

Seja $\overline{V12} = (x_2 - x_1, y_2 - y_1)$

o vetor que passa pelos pontos 1 e 2, sendo (x_1, y_1) e (x_2, y_2) as coordenadas dos pontos 1 e 2, respectivamente, e sejam

$$\overline{V31} = (x_3 - x_1, y_3 - y_1) \quad \text{e} \quad \overline{V41} = (x_4 - x_1, y_4 - y_1)$$

os vetores formados pelos pontos 3 e 4 com o ponto 1, sendo (x_3, y_3) e (x_4, y_4) as respectivas coordenadas.

As distâncias d_3 e d_4 dos pontos 3 e 4 à reta passando pelos pontos 1 e 2 são obtidas por:

$$d_3 = \frac{|\vec{V12} \times \vec{V31}|}{|\vec{V12}|} \quad \text{e} \quad d_4 = \frac{|\vec{V12} \times \vec{V41}|}{|\vec{V12}|} \quad (4.7)$$

e histerese no eixo x será obtida a partir da comparação das distâncias determinadas, descontando-se a inclinação da haste durante a apalpação.

$$\text{Histerese}_x = (d_3 - d_4) - 2 \cdot D \quad (4.8)$$

O mesmo procedimento é aplicado para a determinação da histerese no eixo y , colocando-se a linha de aderência agora aproximadamente paralela ao eixo x . O ensaio é repetido ao longo dos eixos X e Y da máquina-ferramenta para avaliar a histerese em toda a da máquina.

Apesar desse método, a princípio, apresentar vantagem metrológica potencial em relação ao anel, por sofrer influência da incerteza 1D do apalpador (menor do que a 2D), a incerteza na determinação da deflexão da haste acabou anulando essa vantagem, e a incerteza da determinação da histerese com o bloco-padrão ficou semelhante à obtida com o anel padrão (figura 4.21). Além disso, operacionalmente o método do bloco-padrão é menos eficiente pois determina somente a histerese em uma direção, a cada ensaio, o que acaba elevando o tempo total do teste.

Ao comparar ambos os métodos, *anel e bloco-padrão*, com os resultados do ensaio com o laser interferométrico, observa-se pouca concordância, por causa da alta incerteza de medição e da diferença de procedimento de ensaio. O ensaio com o laser é realizado sem nenhuma carga sobre o eixo, enquanto o apalpador exerce uma força de medição de aproximadamente 1,3 N, o que contribui para resultados diferentes.

De qualquer forma, com qualquer método de ensaio, o teste para a determinação da histerese é questionável, por que o mensurando apresenta magnitude da mesma ordem da incerteza dos sistemas de medição. Além disso, o ensaio é feito praticamente sem carga e na usinagem as forças de corte, mesmo sendo pequenas em condição de acabamento, alteram essa histerese. Um outro fator que restringe a validade de um ensaio para determinar a histerese é que a compensação de folga no CNC é realizada introduzindo 1 valor de correção para todo o eixo e, como se poderá observar nas figuras 6.4, 6.5 e 6.6 (capítulo 6), a histerese varia de forma intensa e imprevisível ao longo do eixo. Assumir que a histerese é constante não é uma opção realista.

Fonte de Incerteza	Incerteza [μm]	Distribuição de Probabilidade	Coefficiente de sensibilidade	Incerteza Padrão [μm]	Graus de liberdade	
Repetitividade	3,0	Normal	1	1,00	23	
Resolução	1,0	Retangular	1	0,58	∞	
Deflexão da Haste do apalpador	2,0	Normal	1	1,00	9	
Planeza do Bloco-padrão	0,1	Retangular	1	0,06	∞	
Apalpador (1D)	1,3	Normal	1	0,65	219	
				Incerteza Combinada	2,1	73 (efetivo)
				Incerteza Expandida (95%)	4,0 μm	

Figura 4.21 - Balanço para a determinação da incerteza da medição da histerese com os blocos-padrão

Além disso, a histerese é um erro que pode ser evitado se a seqüência de usinagem for bem planejada e essa é a forma mais eficiente de evitar esse tipo de erro da máquina-ferramenta [127]. Na usinagem de vários elementos geométricos, a aproximação da ferramenta dar-se-ia sempre em um mesmo sentido (crescente ou decrescente), evitando a inversão de eixos que introduz a histerese do eixo da máquina-ferramenta na geometria das peças usinadas.

De qualquer forma a determinação da histerese é importante para a indicação de máquinas com grande folga nos elementos de acionamento e, para isso, no capítulo 7 é mostrada a configuração de um sistema de ensaio para a medição de histerese utilizando um transdutor de deslocamento eletro-óptico. O sistema não utiliza padrões corporificados mas pode ser integrado ao sistema QUALIMAQ em um ensaio que inclua a medição da histerese.

CAPÍTULO 5 - ALGORITMOS DE PROCESSAMENTO PARA A OBTENÇÃO DOS ERROS GEOMÉTRICOS DA MÁQUINA-FERRAMENTA

Para que seja possível obter os erros geométricos da máquina-ferramenta partir da medição dos padrões corporificados, é necessário processar matematicamente as coordenadas dos pontos localizados pelo apalpador e adquiridos pelo computador ligado ao CNC da máquina. Esse processamento matemático engloba as operações para **a localização da peça na máquina-ferramenta**, **a comparação dos pontos medidos sobre os padrões com as posições previamente calibradas**, e **a separação de diferentes componentes de erro da máquina**. Os algoritmos de processamento desenvolvidos para essas operações, a partir da utilização dos padrões *placa de furos* e do *padrão vertical*, estão descritos de forma numérica e gráfica neste capítulo, nos subitens 5.1 e 5.2, respectivamente.

Para designar os erros geométricos obtidos com os processamentos matemáticos, a simbologia utilizada baseou-se, em sua maior parte, na recomendação interna do PTB (**Physicalisch Technische Bundesanstalt**), e descrita em [176]. A simbologia e o significado de cada componente de erro correspondem a:

- x_{px} = Erro de posicionamento linear – Eixo x
- y_{py} = Erro de posicionamento linear – Eixo y
- z_{pz} = Erro de posicionamento linear – Eixo z
- x_{ty} = Desvio de Retilidade em y, ao mover eixo x
- y_{tx} = Desvio de Retilidade em x, ao mover eixo y
- x_{tz} = Desvio de Retilidade em z, ao mover eixo x
- z_{tx} = Desvio de Retilidade em x, ao mover eixo z
- x_{ty} = Desvio de Retilidade em y, ao mover eixo x
- y_{tz} = Desvio de Retilidade em z, ao mover eixo y
- z_{ty} = Desvio de Retilidade em y, ao mover eixo z
- x_{wy} = Desvio de Perpendicularidade entre os eixos x e y
- x_{wz} = Desvio de Perpendicularidade entre os eixos x e z
- y_{wz} = Desvio de Perpendicularidade entre os eixos y e z

5.1 Placa de Furos

O processamento matemático de coordenadas espaciais para a obtenção dos erros geométricos a partir da medição da placa de furos utiliza, fundamentalmente, os mesmo algoritmos, independente do plano em que se realiza o ensaio: XY, XZ ou YZ

Para efeitos de sintetização, a descrição dos algoritmos a seguir será feita considerando-se a placa sendo medida no plano horizontal (XY) da máquina. Deve-se ter a mesma compreensão para os processamentos matemáticos nos outros planos.

A configuração geométrica da placa de furos utilizada pode ser vista na figura 5.1, indicando a presença de 25 furos dispostos em grade 5 x 5, e numerados segundo a seqüência de medição, em espiral. Para que a comparação entre as posições calibradas e medidas seja possível, é necessário estabelecer um sistema de coordenadas local comum em ambas as operações. O plano primário de alinhamento que determina o eixo Z (fora do plano da placa) é definido a partir da localização de pontos em locais determinados sobre a superfície da placa. O eixo X é determinado pelos centros dos furos 1 e 5 e a origem do sistema local é estabelecida no centro do furo 1. Na calibração da placa na máquina de medir por coordenadas e na medição na máquina-ferramenta, a tomada dos pontos e o alinhamento seguem essas definições.

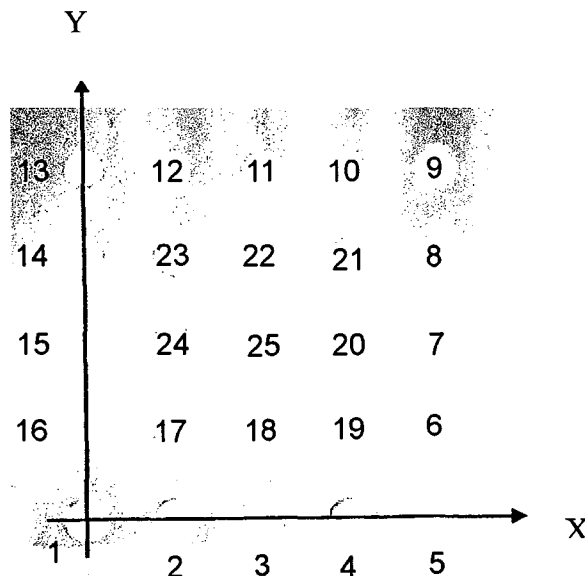


Figura 5.1 - Distribuição e alinhamento cartesiano dos furos na Placa padrão

A partir da calibração da placa na máquina de medir, são obtidas as posições dos centros dos furos já alinhados e compensados termicamente a 20°C que, para fins de processamento matemático, foram agrupados em forma matricial, com a mesma disposição que apresentam na placa. Dessa forma, tem-se a matriz Pos_Cal com as posições calibradas dos furos:

$$Pos_Cal = \begin{bmatrix} xcal_{13}, ycal_{13} & xcal_{12}, ycal_{12} & xcal_{11}, ycal_{11} & xcal_{10}, ycal_{10} & xcal_9, ycal_9 \\ xcal_{14}, ycal_{14} & xcal_{23}, ycal_{23} & xcal_{22}, ycal_{22} & xcal_{21}, ycal_{21} & xcal_8, ycal_8 \\ xcal_{15}, ycal_{15} & xcal_{24}, ycal_{24} & xcal_{25}, ycal_{25} & xcal_{20}, ycal_{20} & xcal_7, ycal_7 \\ xcal_{16}, ycal_{16} & xcal_{17}, ycal_{17} & xcal_{18}, ycal_{18} & xcal_{19}, ycal_{19} & xcal_6, ycal_6 \\ xcal_1, ycal_1 & xcal_2, ycal_2 & xcal_3, ycal_3 & xcal_4, ycal_4 & xcal_5, ycal_5 \end{bmatrix}$$

Desmembrando as coordenadas X e Y da matriz Pos_Cal , obtém-se as matrizes $Xcal$ e $Ycal$, contendo as posições X e Y dos centros dos furos, obtidas na calibração da placa.

$$Xcal = \begin{bmatrix} xcal_{13} & xcal_{12} & xcal_{11} & xcal_{10} & xcal_9 \\ xcal_{14} & xcal_{23} & xcal_{22} & xcal_{21} & xcal_8 \\ xcal_{15} & xcal_{24} & xcal_{25} & xcal_{20} & xcal_7 \\ xcal_{16} & xcal_{17} & xcal_{18} & xcal_{19} & xcal_6 \\ xcal_1 & xcal_2 & xcal_3 & xcal_4 & xcal_5 \end{bmatrix} \quad Ycal = \begin{bmatrix} ycal_{13} & ycal_{12} & ycal_{11} & ycal_{10} & ycal_9 \\ ycal_{14} & ycal_{23} & ycal_{22} & ycal_{21} & ycal_8 \\ ycal_{15} & ycal_{24} & ycal_{25} & ycal_{20} & ycal_7 \\ ycal_{16} & ycal_{17} & ycal_{18} & ycal_{19} & ycal_6 \\ ycal_1 & ycal_2 & ycal_3 & ycal_4 & ycal_5 \end{bmatrix}$$

Assumindo o mesmo procedimento, agora com as posições dos centros dos furos obtidos da medição da placa na máquina-ferramenta, tem-se a matriz Pos_Med contendo as posições X e Y dos furos e, desmembrando esse conjunto de dados, as matrizes $Xmed$ e $Ymed$.

$$Pos_Med = \begin{bmatrix} xmed_{13}, ymed_{13} & xmed_{12}, ymed_{12} & xmed_{11}, ymed_{11} & xmed_{10}, ymed_{10} & xmed_9, ymed_9 \\ xmed_{14}, ymed_{14} & xmed_{23}, ymed_{23} & xmed_{22}, ymed_{22} & xmed_{21}, ymed_{21} & xmed_8, ymed_8 \\ xmed_{15}, ymed_{15} & xmed_{24}, ymed_{24} & xmed_{25}, ymed_{25} & xmed_{20}, ymed_{20} & xmed_7, ymed_7 \\ xmed_{16}, ymed_{16} & xmed_{17}, ymed_{17} & xmed_{18}, ymed_{18} & xmed_{19}, ymed_{19} & xmed_6, ymed_6 \\ xmed_1, ymed_1 & xmed_2, ymed_2 & xmed_3, ymed_3 & xmed_4, ymed_4 & xmed_5, ymed_5 \end{bmatrix}$$

$$Xmed = \begin{bmatrix} xmed_{13} & xmed_{12} & xmed_{11} & xmed_{10} & xmed_9 \\ xmed_{14} & xmed_{23} & xmed_{22} & xmed_{21} & xmed_8 \\ xmed_{15} & xmed_{24} & xmed_{25} & xmed_{20} & xmed_7 \\ xmed_{16} & xmed_{17} & xmed_{18} & xmed_{19} & xmed_6 \\ xmed_1 & xmed_2 & xmed_3 & xmed_4 & xmed_5 \end{bmatrix}$$

$$Y_{med} = \begin{bmatrix} y_{med_{13}} & y_{med_{12}} & y_{med_{11}} & y_{med_{10}} & y_{med_9} \\ y_{med_{14}} & y_{med_{23}} & y_{med_{22}} & y_{med_{21}} & y_{med_8} \\ y_{med_{15}} & y_{med_{24}} & y_{med_{25}} & y_{med_{20}} & y_{med_7} \\ y_{med_{16}} & y_{med_{17}} & y_{med_{18}} & y_{med_{19}} & y_{med_6} \\ y_{med_1} & y_{med_2} & y_{med_3} & y_{med_4} & y_{med_5} \end{bmatrix}$$

Após alguns processamentos prévios, como será descrito a seguir, esses dados calibrados e medidos podem ser comparados para a obtenção dos erros geométricos da máquina-ferramenta.

5.1.1 Alinhamento e compensação térmica da Placa Medida

Como já citado, os dados calibrados foram obtidos a partir da medição da placa em uma máquina de medir por coordenadas em ambiente de temperatura controlada, a 20° C. Com as facilidades de processamento oferecidas pelo software de medição os dados obtidos da calibração já se encontram formatados conforme o sistema de coordenadas local especificado na figura 5.1.

No entanto, a medição da placa na máquina-ferramenta é realizada em ambientes com temperatura diferente de 20° C e, muitas vezes, o software de medição da máquina não possui recursos próprios para o estabelecimento do sistema de coordenadas local. Dessa forma se faz necessário preparar os dados obtidos da medição na máquina-ferramenta, antes que eles possam ser comparados aos dados calibrados, e essa preparação consta do **alinhamento da placa medida** e da **compensação térmica da placa e da máquina-ferramenta**.

O **alinhamento matemático da placa de medida** pode ser visto na figura 5.2, constando de rotações e translações do sistema de coordenadas da máquina-ferramenta, para que esse se alinhe ao sistema de coordenadas local pré-especificado.

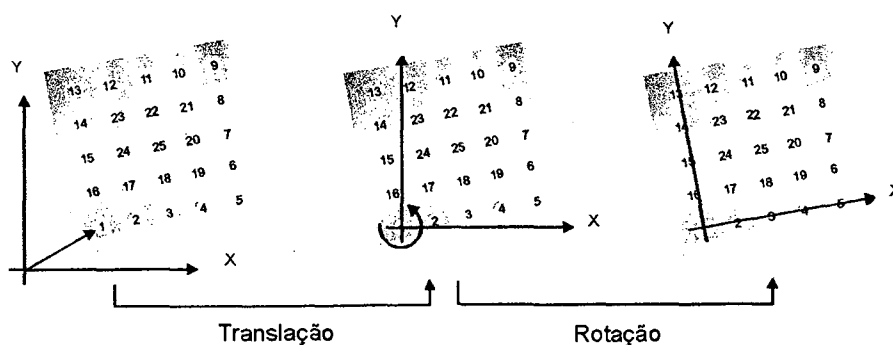


Figura 5.2 - Transformações de coordenadas para o alinhamento da placa

Matematicamente, as operações constam de:

a) TRANSLAÇÃO DEFININDO ORIGEM NO FURO 1:

A translação do sistema de coordenadas é feita simplificadamente através de:

$$X_{med} = X_{med} - x_{med}_1 \quad (5.1)$$

$$Y_{med}_T = Y_{med} - y_{med}_1 \quad (5.2)$$

, resultando em:

$$X_{med}_T = \begin{bmatrix} x_{med}_{T13} & x_{med}_{T12} & x_{med}_{T11} & x_{med}_{T10} & x_{med}_{T9} \\ x_{med}_{T14} & x_{med}_{T23} & x_{med}_{T22} & x_{med}_{T21} & x_{med}_{T8} \\ x_{med}_{T15} & x_{med}_{T24} & x_{med}_{T25} & x_{med}_{T20} & x_{med}_{T7} \\ x_{med}_{T16} & x_{med}_{T17} & x_{med}_{T18} & x_{med}_{T19} & x_{med}_{T6} \\ 0 & x_{med}_{T2} & x_{med}_{T3} & x_{med}_{T4} & x_{med}_{T5} \end{bmatrix} \quad Y_{med}_T = \begin{bmatrix} y_{med}_{T13} & y_{med}_{T12} & y_{med}_{T11} & y_{med}_{T10} & y_{med}_{T9} \\ y_{med}_{T14} & y_{med}_{T23} & y_{med}_{T22} & y_{med}_{T21} & y_{med}_{T8} \\ y_{med}_{T15} & y_{med}_{T24} & y_{med}_{T25} & y_{med}_{T20} & y_{med}_{T7} \\ y_{med}_{T16} & y_{med}_{T17} & y_{med}_{T18} & y_{med}_{T19} & y_{med}_{T6} \\ 0 & y_{med}_{T2} & y_{med}_{T3} & y_{med}_{T4} & y_{med}_{T5} \end{bmatrix}$$

b) ROTAÇÃO DEFININDO EIXO X PELOS FUIROS 1 E 5:

A rotação realizada para fazer o eixo X local passar pelos centros dos furos 1 e 5, é realizada a partir da determinação do ângulo de desalinhamento α definido por:

$$\alpha = \frac{y_{med}_5}{x_{med}_5} \quad (5.3)$$

Com esse ângulo, aplica-se a transformação de coordenadas homogêneas a todos os pontos de X_{med}_T e Y_{med}_T , na forma:

$$P = T \cdot P_i \quad (5.4)$$

onde,

$$P_i = \begin{bmatrix} xmed_i \\ ymed_i \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad e \quad T = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 & 0 \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

, o que resulta em

$$Xmed_R = \begin{bmatrix} xmed_{R13} & xmed_{R12} & xmed_{R11} & xmed_{R10} & xmed_{R9} \\ xmed_{R14} & xmed_{R23} & xmed_{R22} & xmed_{R21} & xmed_{R8} \\ xmed_{R15} & xmed_{R24} & xmed_{R25} & xmed_{R20} & xmed_{R7} \\ xmed_{R16} & xmed_{R17} & xmed_{R18} & xmed_{R19} & xmed_{R6} \\ 0 & xmed_{R2} & xmed_{R3} & xmed_{R4} & xmed_{R5} \end{bmatrix}$$

e

$$Ymed_R = \begin{bmatrix} ymed_{R13} & ymed_{R12} & ymed_{R11} & ymed_{R10} & ymed_{R9} \\ ymed_{R14} & ymed_{R23} & ymed_{R22} & ymed_{R21} & ymed_{R8} \\ ymed_{R15} & ymed_{R24} & ymed_{R25} & ymed_{R20} & ymed_{R7} \\ ymed_{R16} & ymed_{R17} & ymed_{R18} & ymed_{R19} & ymed_{R6} \\ 0 & ymed_{R2} & ymed_{R3} & ymed_{R4} & 0 \end{bmatrix}$$

c) COMPENSAÇÃO DA DILATAÇÃO TÉRMICA DA PLACA MEDIDA

Após a placa estar alinhada, procede-se à compensação térmica dos dados obtidos da medição da placa na máquina-ferramenta. Isso é possível a partir da monitoração da temperatura da placa (T_{PL}) e da máquina-ferramenta (T_{MF}) durante o ensaio geométrico. Aplicando-se as equações 5.5 e 5.6 às matrizes de dados medidos já alinhados $Xmed_R$ e $Ymed_R$, faz-se a correção térmica desses dados, compensando-se a dilatação da máquina-ferramenta e da placa no momento do ensaio, de forma que os dados medidos possam ser comparados com os dados calibrados.

$$Xmed_C = Xmed_R \cdot [1 - (\alpha_{PL} \cdot (T_{PL} - 20) - \alpha_{MF} \cdot (T_{MF} - 20))] \quad (5.5)$$

$$Ymed_C = Ymed_R \cdot [1 - (\alpha_{PL} \cdot (T_{PL} - 20) - \alpha_{MF} \cdot (T_{MF} - 20))] \quad (5.6)$$

onde,

α_{PL} = Coeficiente de dilatação térmica da Placa [$^{\circ}C^{-1}$]

T_{PL} = Temperatura média da Placa [$^{\circ}C$]

α_{MF} = Coeficiente de dilatação térmica da Máquina-ferramenta [$^{\circ}C^{-1}$]

T_{MF} = Temperatura média da Máquina-ferramenta [$^{\circ}C$]

Após essa preparação dos dados, é realizada a comparação entre as posições calibrada e medida dos furos da placa, obtendo-se os desvios que a máquina-ferramenta apresentou na determinação da posição de cada furo. A figura 5.3 ilustra qualitativamente a diferença entre as posições calibradas e medidas. A cruz indica a posição calibrada do furo, e as retas desenhadas unem essas posições calibradas às posições determinadas quando da medição da placa na máquina-ferramenta.

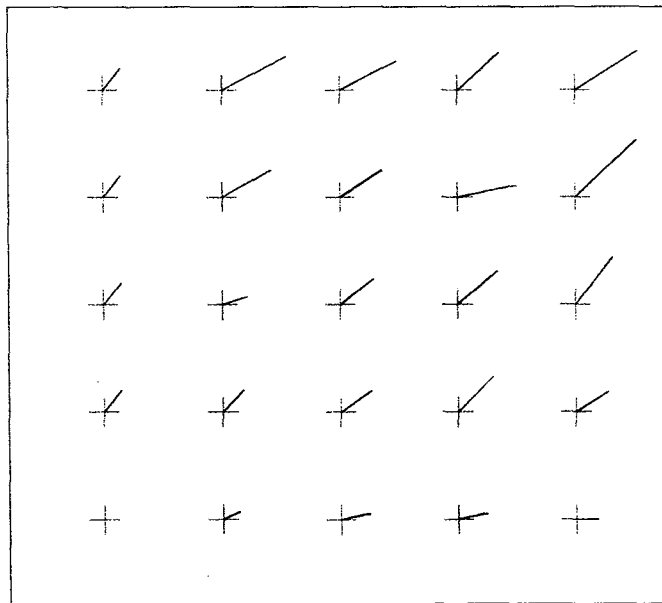


Figura 5.3 - Diferença entre as posições calibradas e medidas dos centros furos da placa

Estes desvios contêm as componentes individuais dos erros geométricos da máquina-ferramenta sobrepostas e, para a separação dos erros, foram desenvolvidos algoritmos de processamento específicos para cada componente de erro a extrair, como descrito a seguir.

5.1.2 Erro de posicionamento linear no eixo x: xpx

A determinação do erro de posicionamento linear xpx inicia-se com a comparação entre posições em X medida e calibrada dos furos da placa, obtendo-se:

$$xpx = Xcal - Xmed_c \quad (5.7)$$

Em seguida é aplicado um processamento para efetuar a separação dos desvios de Perpendicularidade e Retilidade linha por linha (erro de seno), que se apresentam sobrepostos aos erros de posicionamento. Para isso é criada uma matriz de compensação através da equação 5.8.

$$M_x = xpx_{C,i,1} \cdot [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1] \quad (5.8)$$

onde,

$xpx_{i,1}$ = Matriz formada pela 1ª coluna da matriz xpx

Subtraindo-se a matriz M_x , da matriz xpx_C , segundo a equação 5.9, tem-se:

$$xpx_F = xpx_C - M_x \quad (5.9)$$

Resultando na matriz erro:

$$xpx_F = \begin{bmatrix} 0 & xpx_{F12} & xpx_{F11} & xpx_{F10} & xpx_{F9} \\ 0 & xpx_{F23} & xpx_{F22} & xpx_{F21} & xpx_{F8} \\ 0 & xpx_{F24} & xpx_{F25} & xpx_{F20} & xpx_{F7} \\ 0 & xpx_{F17} & xpx_{F18} & xpx_{F19} & xpx_{F6} \\ 0 & xpx_{F2} & xpx_{F3} & xpx_{F4} & xpx_{F5} \end{bmatrix}$$

que contém os erros de posicionamento na direção X ao longo das 5 linhas da placa, já separados dos desvios de retilidade e perpendicularidade.

Com esses dados, são calculados os erros de posicionamento xpx médios (equação 5.10), ao

longo das 5 colunas da placa, bem como o desvio padrão em cada coluna (equação 5.11), para possibilitar o cálculo da incerteza de medição do resultado obtido.

$$xpx_F = \left[\overline{xpx_{F,i,1}} \quad \overline{xpx_{F,i,2}} \quad \overline{xpx_{F,i,3}} \quad \overline{xpx_{F,i,4}} \quad \overline{xpx_{F,i,5}} \right] \quad (5.10)$$

$$S(xpx_F) = \left[S(xpx_{F,i,1}) \quad S(xpx_{F,i,2}) \quad S(xpx_{F,i,3}) \quad S(xpx_{F,i,4}) \quad S(xpx_{F,i,5}) \right] \quad (5.11)$$

onde,

$\overline{xpx_{F,i,n}}$ = Média dos erros presentes em cada coluna n

$S(xpx_{F,i,n})$ = Desvio padrão dos erros presentes em cada coluna n

5.1.3 Desvio de Perpendicularidade entre eixos - xwy

O desvio de perpendicularidade entre os eixos X e Y é determinado a partir da variação das posições X medidas em relação às calibradas, ao longo do eixo Y. Para isso, é realizada a comparação entre posições X calibradas e medidas, quando se obtém a matriz xwy:

$$xwy = Xcal - Xmed \quad (5.12)$$

Esse conjunto de dados é rotacionado de 90° e são calculadas as melhores retas horizontais que passam pelos pontos ao longo de cada linha da matriz xwy.

$$\text{Reta} = m \cdot x + c \quad (5.13)$$

sendo,

$$m = \frac{n \cdot \sum x_i \cdot y_i - \sum y_i \cdot \sum x_i}{n \cdot \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad \text{e} \quad c = \frac{\sum x_i^2 \cdot \sum y_i - \sum x_i \cdot \sum x_i y_i}{n \cdot \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2}$$

onde,

x_i e y_i = coordenadas dos pontos por onde se ajusta a reta (linhas da matriz $Xmed$)

n = número de pontos utilizados no ajuste da reta

O ângulo de inclinação de cada reta horizontal é calculado por :

$$\alpha_i = \arctg(m_i) \quad [\mu m / m] \quad (5.14)$$

Esses ângulos são somados de 90° para desfazer a rotação necessária para calcular os coeficientes angulares das retas, obtendo-se agora os ângulos de inclinação das retas verticais (figura 5.4). O desvio de perpendicularidade xwy é calculado realizando-se a média dos ângulos de inclinação das retas ao longo da placa, segundo:

$$xwy = \sum_{i=1}^n \frac{\alpha_i}{n} \quad [\mu m / m] \quad (5.15)$$

Da mesma forma, o desvio padrão das inclinações é determinado para possibilitar o cálculo da incerteza dos resultados da medição.

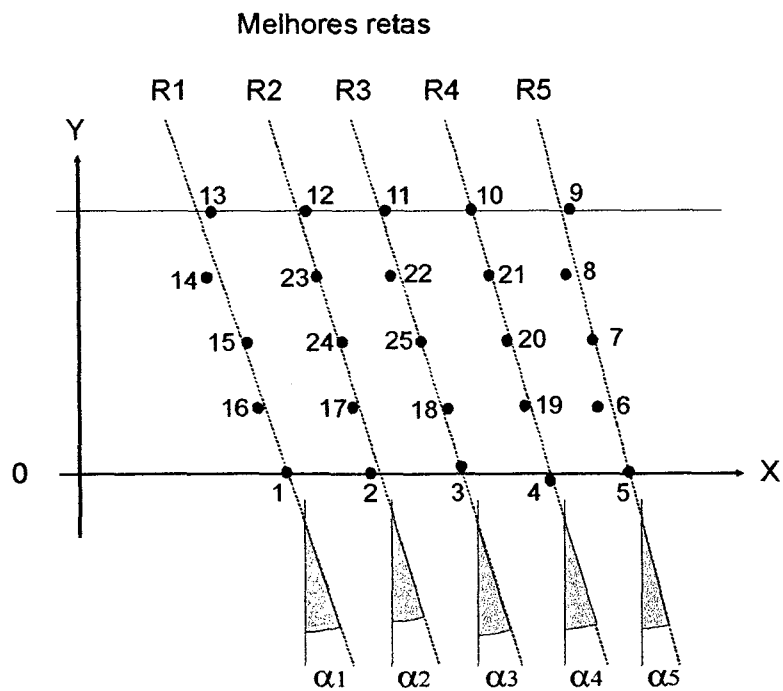


Figura 5.4 - Determinação das melhores retas para a determinação do desvio de perpendicularidade xwy

5.1.4 Erro de posicionamento linear no eixo y - y_{py}

O erro de posicionamento linear y_{py} é determinado a partir da comparação entre posições medida e calibrada, agora na direção Y, resultando na matriz de erro:

$$y_{py} = Y_{cal} - Y_{med_c} \quad (5.16)$$

Sobre esse conjunto de dados é aplicado um processamento de modo a compensar o erro de perpendicularidade x_{wy} do erro de posicionamento linear, caso contrário haveria um erro de cosseno embutido nos resultados (figura 5.5). Essa compensação é realizada através da aplicação da transformação de coordenadas a todos os pontos de X_{med} e Y_{med} , segundo:

$$P = T \cdot P_i \quad (5.17)$$

onde,

$$P_i = \begin{bmatrix} x_{med_i} \\ y_{med_i} \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad T = \begin{bmatrix} \cos(x_{wy}) & -\text{sen}(x_{wy}) & 0 & 0 \\ \text{sen}(x_{wy}) & \cos(x_{wy}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

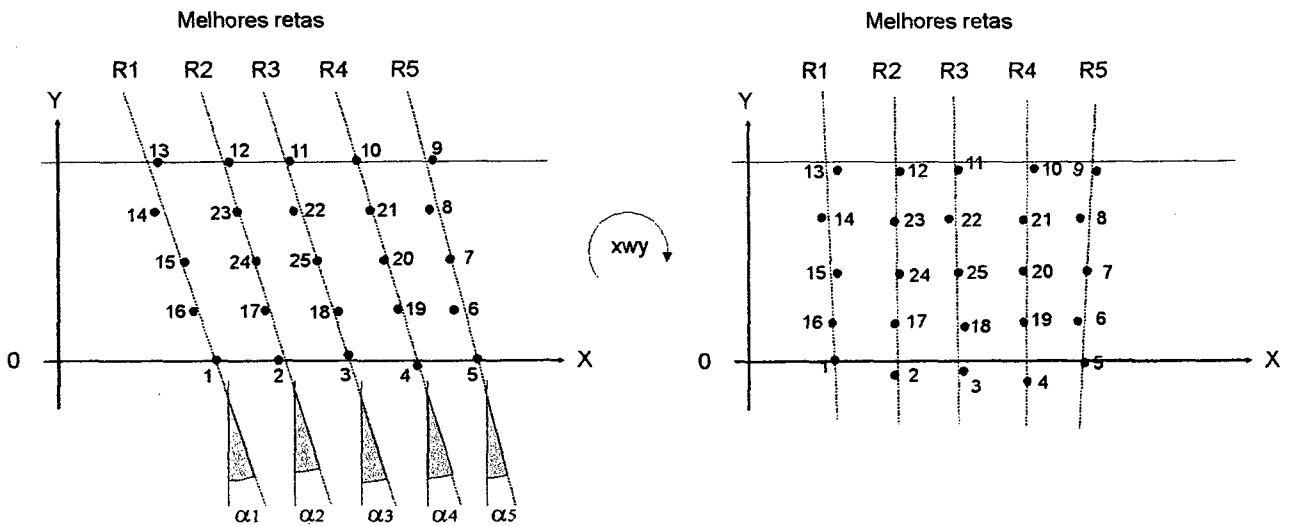


Figura 5.5 - Compensação do desvio de perpendicularidade x_{wy} para a determinação do erro de posicionamento linear y_{py}

Como se pode observar na figura 5.5, as posições Y dos furos variam ao longo do eixo X, o que é causado por erros de retilidade da máquina-ferramenta na direção Y, ao mover o eixo X. Para compensar esse desvio, é criada uma matriz de compensação M_y , por meio de:

$$M_y = ypy_{5,i} \cdot [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1] \quad (5.18)$$

onde,

$ypy_{1,i}$ = Matriz formada pela 5ª linha da matriz ypy

A compensação é realizada da forma:

$$ypy_F = ypy - M_y \quad (5.19)$$

Resultando na matriz de erro:

$$ypy_F = \begin{bmatrix} ypy_{F13} & ypy_{F12} & ypy_{F11} & ypy_{F10} & ypy_{F9} \\ ypy_{F14} & ypy_{F23} & ypy_{F22} & ypy_{F21} & ypy_{F8} \\ ypy_{F15} & ypy_{F24} & ypy_{F25} & ypy_{F20} & ypy_{F7} \\ ypy_{F16} & ypy_{F17} & ypy_{F18} & ypy_{F19} & ypy_{F6} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

, já adequada para a determinação do erro e posicionamento desejado.

O desvio de posicionamento ypy_F médio e a repetitividade dos erros ao longo da placa são determinados pelas equações:

$$ypy_F = \begin{bmatrix} ypy_{F1,i} \\ ypy_{F2,i} \\ ypy_{F3,i} \\ ypy_{F4,i} \\ ypy_{F5,i} \end{bmatrix} \quad (5.20)$$

e

$$S(\text{ypy}_F) = \begin{bmatrix} S(\text{ypy}_F)_{1,i} \\ S(\text{ypy}_F)_{2,i} \\ S(\text{ypy}_F)_{3,i} \\ S(\text{ypy}_F)_{4,i} \\ S(\text{ypy}_F)_{5,i} \end{bmatrix} \quad (5.21)$$

onde,

$\overline{\text{ypy}_{F,n,i}}$ = Média dos erros presentes em cada linha n da matriz ypy

$S(\text{ypy}_F)_{n,i}$ = Desvio padrão dos erros presentes em cada linha n da matriz ypy

5.1.5 Desvios de Retilidade xty e ytx

Os desvios de retilidade xty e ytx são calculados de maneira semelhante, e correspondem à variação em uma direção (X ou Y) quando se desloca na outra (Y ou X). O algoritmo desenvolvido para a obtenção desses erros parte das matrizes com as posições X e Y medidas, já alinhadas e compensadas termicamente.

$$Xmed_C = \begin{bmatrix} xmed_{C13} & xmed_{C12} & xmed_{C11} & xmed_{C10} & xmed_{C9} \\ xmed_{C14} & xmed_{C23} & xmed_{C22} & xmed_{C21} & xmed_{C8} \\ xmed_{C15} & xmed_{C24} & xmed_{C25} & xmed_{C20} & xmed_{C7} \\ xmed_{C16} & xmed_{C17} & xmed_{C18} & xmed_{C19} & xmed_{C6} \\ 0 & xmed_{C2} & xmed_{C3} & xmed_{C4} & 0 \end{bmatrix}$$

$$Ymed_C = \begin{bmatrix} ymed_{C13} & ymed_{C12} & ymed_{C11} & ymed_{C10} & ymed_{C9} \\ ymed_{C14} & ymed_{C23} & ymed_{C22} & ymed_{C21} & ymed_{C8} \\ ymed_{C15} & ymed_{C24} & ymed_{C25} & ymed_{C20} & ymed_{C7} \\ ymed_{C16} & ymed_{C17} & ymed_{C18} & ymed_{C19} & ymed_{C6} \\ 0 & ymed_{C2} & ymed_{C3} & ymed_{C4} & ymed_{C5} \end{bmatrix}$$

a) Retilidade xty

Como citado, o desvio de retilidade xty é obtido a partir das variações nas posições dos furos na direção y, quando se desloca ao longo da placa, na direção x. Como indicado abaixo:

$$\begin{array}{c}
 \xrightarrow{\hspace{10em}} X \\
 Y_{med\ C} = \begin{bmatrix} y_{med\ C_{13}} & y_{med\ C_{12}} & y_{med\ C_{11}} & y_{med\ C_{10}} & y_{med\ C_9} \\ y_{med\ C_{14}} & y_{med\ C_{23}} & y_{med\ C_{22}} & y_{med\ C_{21}} & y_{med\ C_8} \\ y_{med\ C_{15}} & y_{med\ C_{24}} & y_{med\ C_{25}} & y_{med\ C_{20}} & y_{med\ C_7} \\ y_{med\ C_{16}} & y_{med\ C_{17}} & y_{med\ C_{18}} & y_{med\ C_{19}} & y_{med\ C_6} \\ 0 & y_{med\ C_2} & y_{med\ C_3} & y_{med\ C_4} & y_{med\ C_5} \end{bmatrix}
 \end{array} \quad (5.22)$$

Para isso, inicialmente são comparadas as posições Y, calibradas e medidas segundo:

$$xty = Y_{cal} - Y_{med\ C} \quad (5.23)$$

e, de forma análoga ao procedimento para o cálculo do desvio de perpendicularidade xwy, para cada linha da matriz xty resultante, são calculadas as melhores retas, ajustadas por mínimos quadrados como indicado a seguir:

$$\text{Reta 5} \rightarrow xty_{1,j} = [x_{med\ c_{13}}, xty_{13} \quad x_{med\ c_{12}}, xty_{12} \quad x_{med\ c_{11}}, xty_{11} \quad x_{med\ c_{10}}, xty_{10} \quad x_{med\ c_9}, xty_9]$$

$$\text{Reta 4} \rightarrow xty_{2,j} = [x_{med\ c_{14}}, xty_{14} \quad x_{med\ c_{23}}, xty_{23} \quad x_{med\ c_{22}}, xty_{22} \quad x_{med\ c_{21}}, xty_{21} \quad x_{med\ c_8}, xty_8]$$

$$\text{Reta 3} \rightarrow xty_{3,j} = [x_{med\ c_{15}}, xty_{15} \quad x_{med\ c_{24}}, xty_{24} \quad x_{med\ c_{25}}, xty_{25} \quad x_{med\ c_{20}}, xty_{20} \quad x_{med\ c_7}, xty_7]$$

$$\text{Reta 2} \rightarrow xty_{4,j} = [x_{med\ c_{16}}, xty_{16} \quad x_{med\ c_{17}}, xty_{17} \quad x_{med\ c_{18}}, xty_{18} \quad x_{med\ c_{19}}, xty_{19} \quad x_{med\ c_6}, xty_6]$$

$$\text{Reta 1} \rightarrow xty_{5,j} = [x_{med\ c_1}, xty_1 \quad x_{med\ c_2}, xty_2 \quad x_{med\ c_3}, xty_3 \quad x_{med\ c_4}, xty_4 \quad x_{med\ c_5}, xty_5]$$

sendo,

$$\text{Reta} = m \cdot x + c \quad (5.24)$$

$$m = \frac{n \cdot \sum xmed_{ci} \cdot xty_i - \sum xty_i \cdot \sum xmed_{ci}}{n \cdot \sum xmed_{ci}^2 - (\sum xmed_{ci})^2} \quad e \quad c = \frac{\sum xmed_{ci}^2 \cdot \sum xty_i - \sum xmed_{ci} \cdot \sum xmed_{ci} \cdot xty_i}{n \cdot \sum xmed_{ci}^2 - (\sum xmed_{ci})^2}$$

onde,

$xmed_{ci}$ e xty_i = coordenadas dos pontos por onde se ajusta a reta (linhas da matriz xty)

n = número de pontos utilizados no ajuste da reta

Os desvios de retilidade correspondem às distâncias dos pontos às retas ajustadas, como indica a figura 5.6 e, para a determinação dessas distâncias, é necessário determinar os ângulos das retas em relação ao eixo x , o que se faz por:

$$\delta_i = \text{arc tg}(m_i) \quad (5.25)$$

Determinado esse ângulo, os desvios de retilidade pontuais ao longo de cada linha da matriz em relação às retas obtidas são determinados por:

$$xty = \begin{bmatrix} xty_{13} - \text{Reta}_5(x_{13}) & xty_{12} - \text{Reta}_5(x_{12}) & xty_{11} - \text{Reta}_5(x_{11}) & xty_{10} - \text{Reta}_5(x_{10}) & xty_9 - \text{Reta}_5(x_9) \\ xty_{14} - \text{Reta}_4(x_{14}) & xty_{23} - \text{Reta}_4(x_{23}) & xty_{22} - \text{Reta}_4(x_{22}) & xty_{21} - \text{Reta}_4(x_{21}) & xty_8 - \text{Reta}_4(x_8) \\ xty_{15} - \text{Reta}_3(x_{15}) & xty_{24} - \text{Reta}_3(x_{24}) & xty_{25} - \text{Reta}_3(x_{25}) & xty_{20} - \text{Reta}_3(x_{20}) & xty_7 - \text{Reta}_3(x_7) \\ xty_{16} - \text{Reta}_2(x_{16}) & xty_{17} - \text{Reta}_2(x_{17}) & xty_{18} - \text{Reta}_2(x_{18}) & xty_{19} - \text{Reta}_2(x_{19}) & xty_6 - \text{Reta}_2(x_6) \\ xty_1 - \text{Reta}_1(x_1) & xty_2 - \text{Reta}_1(x_2) & xty_3 - \text{Reta}_1(x_3) & xty_4 - \text{Reta}_1(x_4) & xty_5 - \text{Reta}_1(x_5) \end{bmatrix} \cdot \cos(\delta_i) \quad (5.26)$$

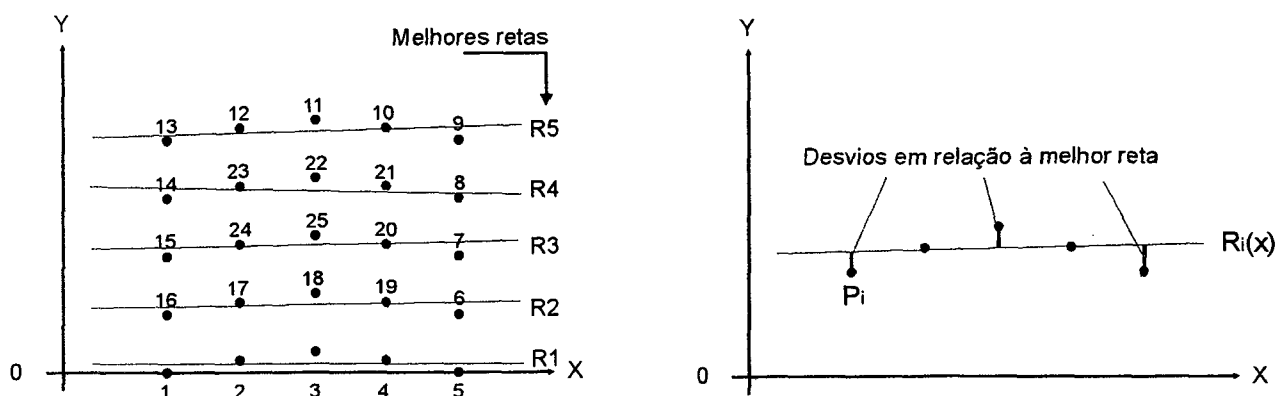


Figura 5.6 - Determinação dos desvios de retilidade em cada linha da placa, em relação às melhores retas

Finalmente, são determinados média e desvio-padrão das distâncias em cada coluna da matriz xy , fazendo:

$$xy = \left[\overline{xy}_{i,1} \quad \overline{xy}_{i,2} \quad \overline{xy}_{i,3} \quad \overline{xy}_{i,4} \quad \overline{xy}_{i,5} \right] \quad (5.27)$$

e

$$S(xy) = \left[S(xy)_{i,1} \quad S(xy)_{i,2} \quad S(xy)_{i,3} \quad S(xy)_{i,4} \quad S(xy)_{i,5} \right] \quad (5.28)$$

onde,

$xy_{i,n}$ = média dos desvios de retilinearidade em cada coluna n da matriz xy

$S(xy)_{i,n}$ = Desvio padrão do valores em cada coluna n da matriz xy

b) Retilinearidade ytx

O procedimento é semelhante ao descrito para a determinação da retilinearidade xy , mas agora os eixos se invertem. O desvio de retilinearidade ytx é obtido a partir das variações nas posições dos furos na direção X, quando se move ao longo da placa, na direção Y, como indicado:

$$Xmed_c = \begin{bmatrix} xmed_{c13} & xmed_{c12} & xmed_{c11} & xmed_{c10} & xmed_{c9} \\ xmed_{c14} & xmed_{c23} & xmed_{c22} & xmed_{c21} & xmed_{c8} \\ xmed_{c15} & xmed_{c24} & xmed_{c25} & xmed_{c20} & xmed_{c7} \\ xmed_{c16} & xmed_{c17} & xmed_{c18} & xmed_{c19} & xmed_{c6} \\ 0 & xmed_{c2} & xmed_{c3} & xmed_{c4} & 0 \end{bmatrix} \uparrow$$

A comparação das posições X calibradas e medidas segundo:

$$ytx = Xcal - Xmed_c \quad (5.29)$$

permite obter a matriz de erro ytx e, utilizando os dados de cada coluna, são calculadas as melhores retas, por mínimos quadrados, como indicado a seguir:

Reta 1	Reta 2	Reta 3	Reta 4	Reta 5
↓	↓	↓	↓	↓
$ytx_{1,j} = [ytx_{13}, ymed_{C13}$	$ytx_{12}, ymed_{C12}$	$ytx_{11}, ymed_{C11}$	$ytx_{10}, ymed_{C10}$	$ytx_9, ymed_{C9}]$
$ytx_{2,j} = [ytx_{14}, ymed_{C14}$	$ytx_{23}, ymed_{C23}$	$ytx_{22}, ymed_{C22}$	$ytx_{21}, ymed_{C21}$	$ytx_8, ymed_{C8}]$
$ytx_{3,j} = [ytx_{15}, ymed_{C15}$	$ytx_{24}, ymed_{C24}$	$ytx_{25}, ymed_{C25}$	$ytx_{20}, ymed_{C20}$	$ytx_7, ymed_{C7}]$
$ytx_{4,j} = [ytx_{16}, ymed_{C16}$	$ytx_{17}, ymed_{C17}$	$ytx_{18}, ymed_{C18}$	$ytx_{19}, ymed_{C19}$	$ytx_6, ymed_{C6}]$
$ytx_{5,j} = [ytx_1, ymed_{C1}$	$ytx_2, ymed_{C2}$	$ytx_3, ymed_{C3}$	$ytx_4, ymed_{C4}$	$ytx_5, ymed_{C5}]$

sendo,

$$Reta = m \cdot x + c \quad (5.30)$$

$$m = \frac{n \cdot \sum ytx_i \cdot ymed_{C_i} - \sum ymed_{C_i} \cdot \sum ytx_i}{n \cdot \sum ytx_i^2 - (\sum ytx_i)^2} \quad e \quad c = \frac{\sum ytx_i^2 \cdot \sum ymed_{C_i} - \sum ytx_i \cdot \sum ytx_i ymed_{C_i}}{n \cdot \sum ytx_i^2 - (\sum ytx_i)^2}$$

onde,

ytx_i e $ymed_{C_i}$ = coordenadas dos pontos por onde se ajusta a reta (linhas da matriz xy)

n = número de pontos utilizados no ajuste da reta

Os desvios de retilineidade correspondem às distâncias dos pontos às retas ajustadas, como indica a figura 5.7 e, para a determinação dessas distâncias, é necessário determinar os ângulos das retas em relação ao eixo Y, o que se obtém de:

$$\alpha_i = \text{arc tg}(m_i) \quad (5.31)$$

Os desvios de retilidade pontuais ao longo de cada linha da matriz em relação às retas obtidas são determinados por:

$$ytx = \begin{bmatrix} ytx_{13} - \text{Reta}_1(y_{13}) & ytx_{12} - \text{Reta}_1(y_{12}) & ytx_{11} - \text{Reta}_1(y_{11}) & ytx_{10} - \text{Reta}_1(y_{10}) & ytx_9 - \text{Reta}_1(y_9) \\ ytx_{14} - \text{Reta}_2(y_{14}) & ytx_{23} - \text{Reta}_2(y_{23}) & ytx_{22} - \text{Reta}_2(y_{22}) & ytx_{21} - \text{Reta}_2(y_{21}) & ytx_8 - \text{Reta}_2(y_8) \\ ytx_{15} - \text{Reta}_3(y_{15}) & ytx_{24} - \text{Reta}_3(y_{24}) & ytx_{25} - \text{Reta}_3(y_{25}) & ytx_{20} - \text{Reta}_3(y_{20}) & ytx_7 - \text{Reta}_3(y_7) \\ ytx_{16} - \text{Reta}_4(y_{16}) & ytx_{17} - \text{Reta}_4(y_{17}) & ytx_{18} - \text{Reta}_4(y_{18}) & ytx_{19} - \text{Reta}_4(y_{19}) & ytx_6 - \text{Reta}_4(y_6) \\ ytx_1 - \text{Reta}_5(y_1) & ytx_2 - \text{Reta}_5(y_2) & ytx_3 - \text{Reta}_5(y_3) & ytx_4 - \text{Reta}_5(y_4) & ytx_5 - \text{Reta}_5(y_5) \end{bmatrix} \cdot \cos(\alpha_i) \quad (5.32)$$

O erro de retilidade ytx é, então, determinado realizando-se a média dos desvios obtidos em cada linha da matriz ytx . Da mesma forma o desvio-padrão é obtido.

$$ytx = \begin{bmatrix} \overline{ytx}_{1,i} \\ \overline{ytx}_{2,i} \\ \overline{ytx}_{3,i} \\ \overline{ytx}_{4,i} \\ \overline{ytx}_{5,i} \end{bmatrix} \quad (5.33)$$

$$S(ytx) = \begin{bmatrix} S(ytx)_{1,i} \\ S(ytx)_{2,i} \\ S(ytx)_{3,i} \\ S(ytx)_{4,i} \\ S(ytx)_{5,i} \end{bmatrix} \quad (5.34)$$

onde,

$ytx_{n,i}$ = média dos desvios de retilidade em cada linha n da matriz ytx

$S(ytx)_{n,i}$ = Desvio padrão dos valores em cada linha n da matriz ytx

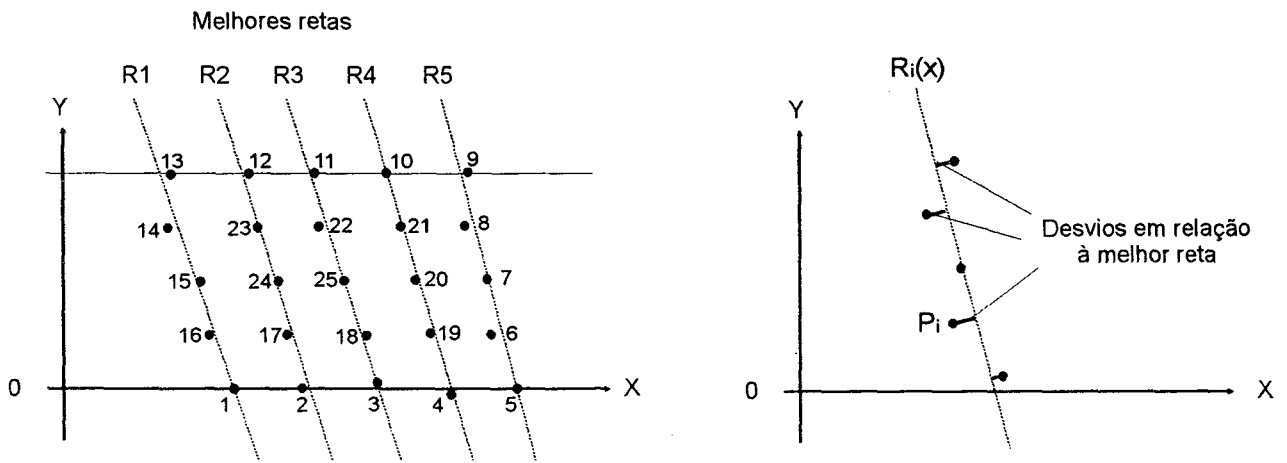


Figura 5.7 - Determinação dos desvios de retilidade y_{tx} , em relação às melhores retas

5.1.6 Verificação da eficiência dos algoritmos

Para atestar a confiabilidade metrológica dos algoritmos matemáticos desenvolvidos, foram realizados vários testes e simulações. Nesta avaliação, dados de experimentos e dados simulados foram introduzidos nos algoritmos para avaliar, principalmente, a eficiência na estratégia experimental para compensar os efeitos térmicos e os algoritmos para a separação das várias componentes de erros geométricos.

a) Compensação térmica da placa

Para avaliar a eficiência na estratégia utilizada para compensar os efeitos térmicos sobre o sistema de ensaio idealizado, foram realizados ensaios geométricos com a placa de furos em uma máquina de medir por coordenadas localizada em ambiente sob controle de temperatura. A temperatura ambiente foi ajustada para valores diferentes em cada ensaio, sendo medidas as temperaturas placa de furos e da máquina de medir.

Para isso, foi ensaiada uma máquina de medir por coordenadas LKG80-C tipo portal, do Laboratório de Metrologia da Escola Técnica Federal de Santa Catarina. Os resultados das medições da placa foram processados nos algoritmos de cálculo de duas formas: introduzindo as medições de temperatura da placa e da máquina, e omitindo essa informação.

Os resultados dos ensaios permitiram concluir pela eficiência da medição de temperatura e do

processamento matemático para a compensação térmica. A figura 5.8 indica um dos resultados, para o erro de posicionamento em um dos eixos da máquina de medir, podendo-se observar que a dispersão nos resultados dos ensaios realizados nas diferentes temperaturas de medição reduz-se significativamente, quando as medições de temperatura são introduzidas nos algoritmo de compensação térmica.

A dispersão ainda existente ocorre pela existência de incertezas nos fatores envolvidos na realização dos ensaios tais como a placa calibrada, a Máquina de medir por coordenadas, a medição de temperatura e os coeficientes de dilatação térmica da Placa e da Máquina.

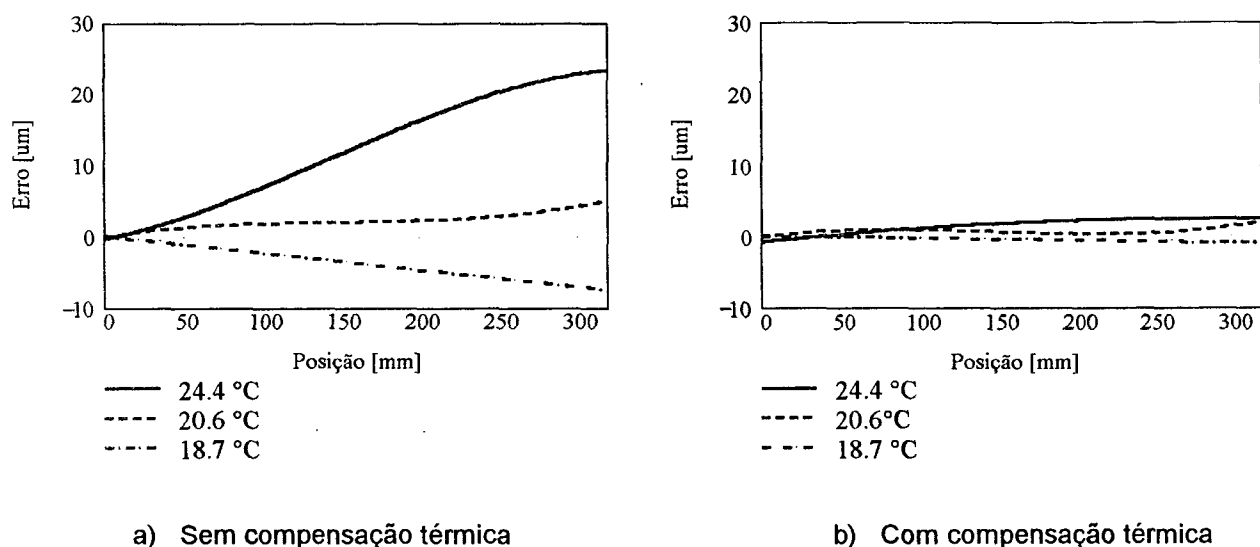
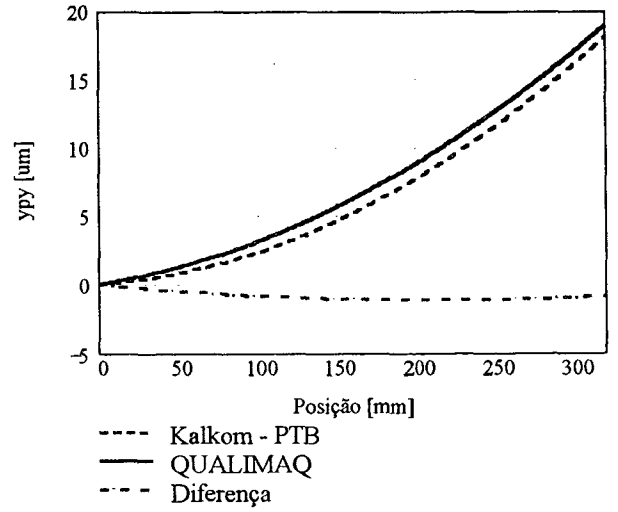
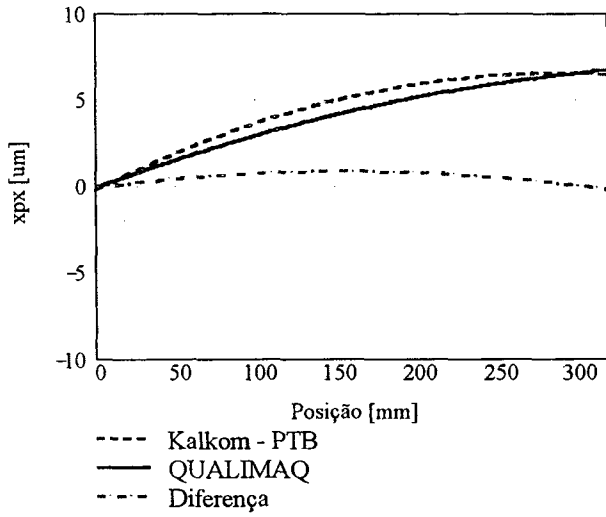


Figura 5.8 - Redução da dispersão dos resultados com a compensação térmica

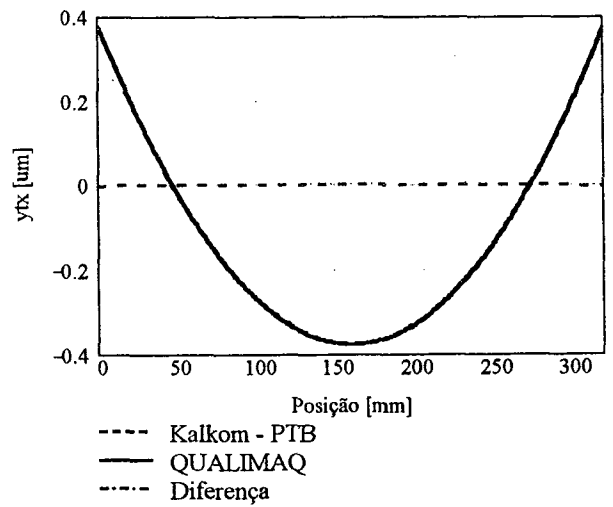
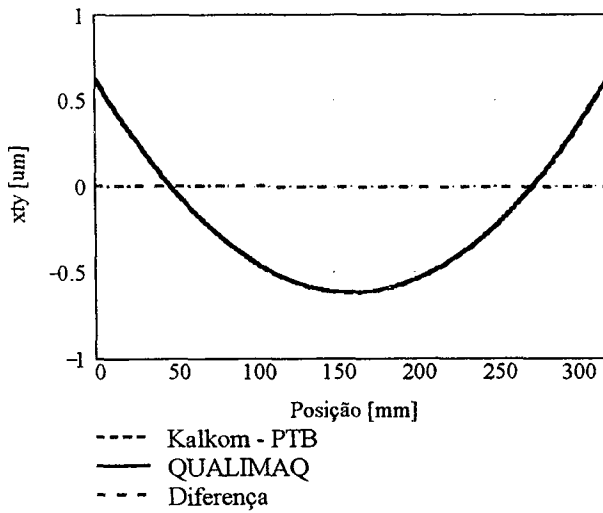
b) Comparação com software de referência

Para uma verificação prática da eficiência dos algoritmos para a determinação dos erros geométricos, foram realizadas várias comparações com o software *Kalkom*, desenvolvido pelo PTB para a calibração de máquinas de medir por coordenadas. Dados teóricos e dados obtidos de ensaios foram introduzidos no software do PTB e nos algoritmos desenvolvidos (*QUALIMAQ*) para, após os processamentos, se fazer uma comparação dos resultados obtidos. A figura 5.9 indica um resultado típico obtido dessa comparação, podendo-se verificar uma estreita concordância de resultados. A diferença entre os resultados em todas as simulações ficou sempre abaixo de 1 µm, o que comprova a eficiência dos modelos matemáticos desenvolvidos para a determinação dos erros de posicionamento linear, retilinearidade e perpendicularidade.

a) Posicionamento



b) Retilneidade



c) Perpendicularidade

PTB = $18 \pm 3 \mu\text{m/m}$

QUALIMAQ = $19 \pm 3 \mu\text{m/m}$

Figura 5.9 - Comparação dos algoritmos desenvolvidos com software de referência

5.2 Padrão Desmontável

Como descrito no capítulo 4, a necessidade de avaliar os planos verticais da máquina-ferramenta (XZ e YZ) motivou o desenvolvimento de um padrão desmontável com remontagem cinemática, que denominamos resumidamente de *Padrão Desmontável*.

Embora a geometria desse padrão seja completamente diferente da geometria da placa de furos, a sistemática do ensaio é semelhante. Ou seja, um padrão com elementos de referência com posições previamente calibradas em uma máquina de medir por coordenadas, é medido na máquina-ferramenta, e da comparação entre as posições calibrada e medida, são obtidos os erros na determinação da posição dos elementos. Um processamento matemático é, então, aplicado sobre esse conjunto de dados para separar as diversas componentes de erro da máquina-ferramenta. Resultados da medição de temperatura do padrão e da máquina são introduzidos para a compensação de efeitos térmicos.

Devido à possibilidade de intercambiabilidade das bases do padrão vertical, pode-se ter arranjos diferentes dependendo da máquina a ser ensaiada. Para flexibilizar o processamento matemático, a calibração do padrão pode ser feita elemento por elemento, armazenando as posições das esferas calibradas. Quando da utilização do padrão no ensaio geométrico, o operador pode definir as combinações de montagem mais adequadas para a sua máquina e informar a sua configuração de ensaio ao software, que irá montar virtualmente o padrão calibrado a partir das posições das esferas de referência obtidas na calibração.

A configuração geométrica do padrão pode ser vista novamente na figura 5.10, onde são indicadas as *esferas de referência* que possuem as posições previamente calibradas na máquina de medir por coordenadas. Essas posições calibradas estão referenciadas a um sistema de coordenadas local, que é criado com as *esferas de alinhamento* A, B e C, fixadas na base inferior do padrão.

Para a criação desse sistema de coordenadas, o plano primário é definido pelos centros das 3 esferas de alinhamento, definindo um eixo Z perpendicular a esse plano. O eixo X é paralelo à reta que passa pelos centros das esferas A e B, e a origem de todo o sistema local é definida no centro da esfera de referência 1.

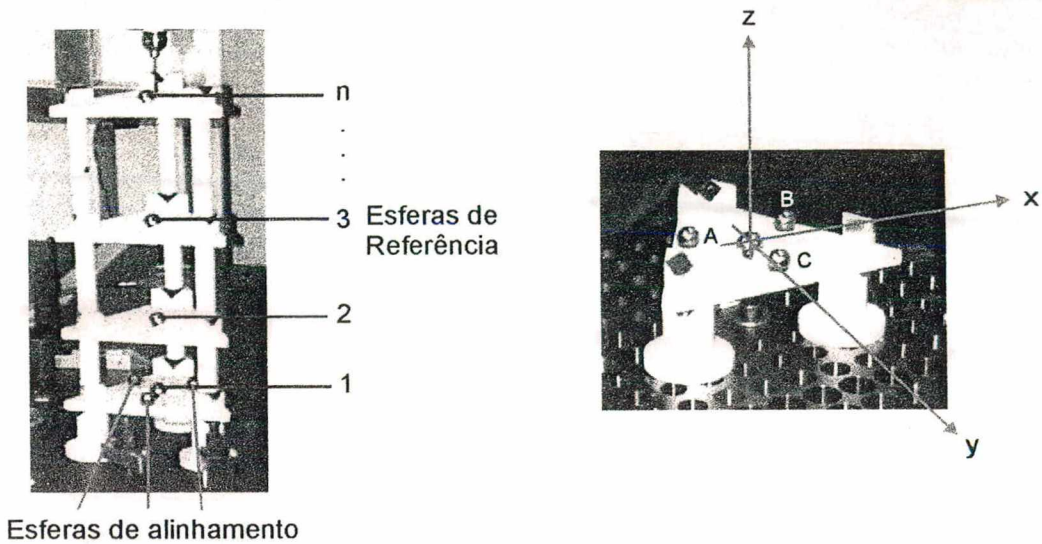


Figura 5.10 - Estrutura e configuração cartesiana do padrão vertical desmontável

A calibração do padrão é realizada sob essas condições de alinhamento, fazendo surgir um conjunto de dados indicado abaixo, com as posições X, Y e Z de todas as esferas de referência utilizadas no ensaio. Vale ressaltar que o padrão apresenta flexibilidade que permite variar o número de posições calibradas.

$$\text{Posições_Calibradas} = \begin{bmatrix} xcal_n, ycal_n, zcal_n \\ \dots \\ xcal_3, ycal_3, zcal_3 \\ xcal_2, ycal_2, zcal_2 \\ xcal_1, ycal_1, zcal_1 \end{bmatrix}$$

Ao se desmembrar esse conjunto de dados de acordo com a coordenada cartesiana, surgem 3 matrizes de dados calibrados, a saber:

$$Xcal = \begin{bmatrix} xcal_n \\ \dots \\ xcal_3 \\ xcal_2 \\ xcal_1 \end{bmatrix} \qquad Ycal = \begin{bmatrix} ycal_n \\ \dots \\ ycal_3 \\ ycal_2 \\ ycal_1 \end{bmatrix} \qquad Zcal = \begin{bmatrix} zcal_n \\ \dots \\ zcal_3 \\ zcal_2 \\ zcal_1 \end{bmatrix}$$

Quando do ensaio geométrico na máquina-ferramenta, as esferas de alinhamento e de referência são medidas, e as posições dos centros calculadas, resultando em um conjunto de dados brutos

que requer processamentos para o alinhamento do padrão bem como a compensação de efeitos térmicos. Todo esse processamento é realizado com algoritmos próprios, já que muitas vezes o CNC da máquina-ferramenta não possui recursos para esse alinhamento.

Na descrição dos procedimentos, as posições das esferas da base serão denominadas por:

$$A = (x_A, y_A, z_A) \qquad B = (x_B, y_B, z_B) \qquad C = (x_C, y_C, z_C)$$

e as posições das esferas medidas, nesse momento ainda não alinhadas, serão descritas como:

$$\text{Posições_Medidas} = \begin{bmatrix} xmed_n, ymed_n, zmed_n \\ \dots \\ xmed_3, ymed_3, zmed_3 \\ xmed_2, ymed_2, zmed_2 \\ xmed_1, ymed_1, zmed_1 \end{bmatrix}$$

Esse conjunto de dados pode ser desmembrado de acordo com a coordenada cartesiana, surgindo as 3 matrizes de dados medidos:

$$Xmed = \begin{bmatrix} xmed_n \\ \dots \\ xmed_3 \\ xmed_2 \\ xmed_1 \end{bmatrix} \qquad Ymed = \begin{bmatrix} ymed_n \\ \dots \\ ymed_3 \\ ymed_2 \\ ymed_1 \end{bmatrix} \qquad Zmed = \begin{bmatrix} zmed_n \\ \dots \\ zmed_3 \\ zmed_2 \\ zmed_1 \end{bmatrix}$$

5.2.1 Alinhamento e compensação térmica

As operações de alinhamento realizadas sobre os dados obtidos da medição do padrão na máquina-ferramenta, e necessárias para a definição do sistema de coordenadas local (figura 5.11), iniciam-se com a criação do plano primário utilizando as 3 esferas de alinhamento da base inferior.

Sendo **A**, **B** e **C** as esferas de alinhamento com posições do centro

$$A = (x_A, y_A, z_A)$$

$$B = (x_B, y_B, z_B)$$

$$C = (x_C, y_C, z_C)$$

um vetor normal ao plano primário será obtido por:

$$\vec{n} = \overrightarrow{AB} \times \overrightarrow{AC} \quad (5.35)$$

, resultando:

$$\vec{n} = a \cdot \vec{i} + b \cdot \vec{j} + c \cdot \vec{k} \quad (5.36)$$

onde **a**, **b** e **c** são as componentes do vetor normal ao plano contendo as esferas A, B e C.

A equação do plano primário pode, então, ser obtida por:

$$a \cdot (x - x_A) + b \cdot (y - y_A) + c \cdot (z - z_A) = 0 \quad (5.37)$$

resultando

$$a \cdot x + b \cdot y + c \cdot z + d = 0 \quad (5.38)$$

que é a **equação paramétrica do plano primário** que passa pelos pontos A, B e C. Para efetuar as rotações necessárias ao alinhamento do eixo Z da máquina-ferramenta com o vetor normal ao plano primário, determinam-se os ângulos de desalinhamento do eixo Z em relação às projeções ortogonais do vetor **n** nos planos XZ e YZ:

$$\alpha_{XZ} = \text{arc tg} \left(\frac{a}{c} \right) \quad (5.39)$$

$$\alpha_{YZ} = \text{arc tg} \left(\frac{b}{c} \right) \quad (5.40)$$

onde,

α_{XZ} = Ângulo entre o eixo Z da máquina-ferramenta e a projeção do vetor \vec{n} no plano XZ

α_{YZ} = Ângulo entre o eixo Z da máquina-ferramenta e a projeção do vetor \vec{n} no plano YZ

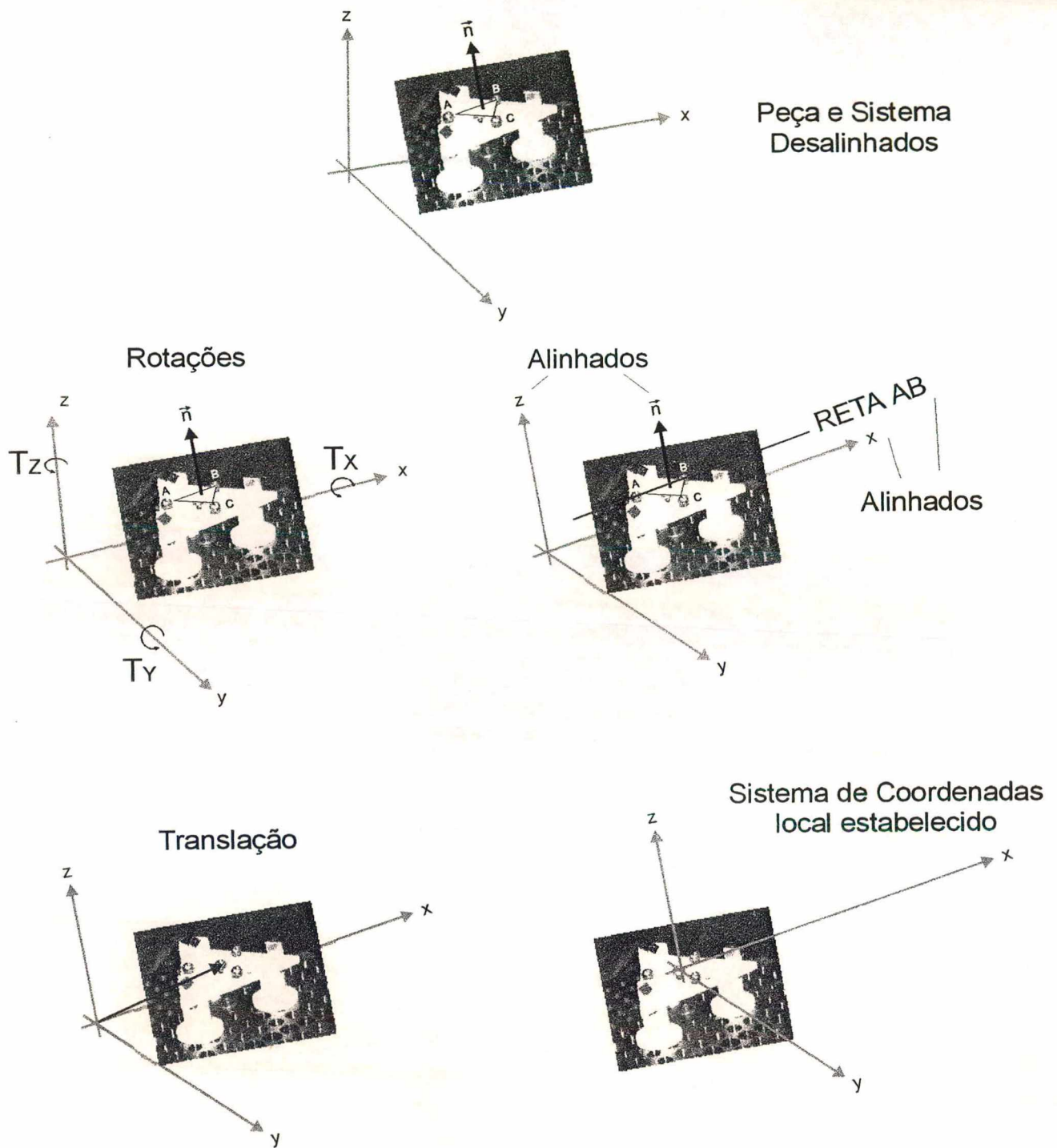


Figura 5.11 – Transformações de coordenadas para o alinhamento do padrão vertical

Determinados os ângulos, são aplicadas as transformadas homogêneas:

$$T_X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_{YZ}) & -\sin(\alpha_{YZ}) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha_{YZ}) & \cos(\alpha_{YZ}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \text{e} \quad T_Y = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_{XZ}) & 0 & \sin(\alpha_{XZ}) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin(\alpha_{XZ}) & 0 & \cos(\alpha_{XZ}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

em todas as esferas de referência:

$$P_i = \begin{bmatrix} xmed_i \\ ymed_i \\ zmed_i \\ 1 \end{bmatrix}$$

na forma:

$$P = T \cdot P_i \quad (5.41)$$

Com isso, o sistema de coordenadas da máquina-ferramenta é rotacionado em torno dos eixos X e Y, alinhando o eixo Z ao vetor \vec{n} .

Após as rotações em torno dos eixos X e Y para alinhar o eixo Z, é realizada mais uma rotação, agora em torno desse eixo Z, de forma que o eixo X fique paralelo à reta que passa pelas esferas de alinhamento A e B. Para isso, determina-se o ângulo de desalinhamento do eixo X em relação à reta que passa pelas esferas de alinhamento A e B:

$$\alpha_{AB} = \text{arc tg} \left(\frac{y_B - y_A}{x_B - x_A} \right) \quad (5.42)$$

onde,

α_{AB} = Ângulo entre o eixo X da máquina-ferramenta e a reta que passa pelas esferas de alinhamento A e B

Aplicando a transformada homogênea:

$$T_Z = \begin{bmatrix} -\cos(\alpha_{AB}) & -\sin(\alpha_{AB}) & 0 & 0 \\ \sin(\alpha_{AB}) & \cos(\alpha_{AB}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

em todas as esferas de referência, já rotacionadas de α_{XZ} e α_{YZ} , rotaciona-se novamente o sistema de coordenadas, agora em torno de Z.

Com isso, os eixos X, Y e Z da máquina-ferramenta já estão alinhados com o sistema de coordenadas local, faltando ainda uma operação de translação que defina a origem desse sistema sobre o centro da esfera de referência colocada na base inferior.

Sendo a P_{med} a matriz com os dados medidos, após todas as operações de rotação:

$$P_{med} = \begin{bmatrix} x_{med_n} & y_{med_n} & z_{med_n} \\ \dots & \dots & \dots \\ x_{med_3} & y_{med_3} & z_{med_3} \\ x_{med_2} & y_{med_2} & z_{med_2} \\ x_{med_1} & y_{med_1} & z_{med_1} \end{bmatrix}$$

o sistema de coordenadas terá sua origem na esfera inferior, segundo a operação:

$$P_{med_T} = P_{med} - \begin{bmatrix} x_{med_1} & y_{med_1} & z_{med_1} \\ \dots & \dots & \dots \\ x_{med_1} & y_{med_1} & z_{med_1} \\ x_{med_1} & y_{med_1} & z_{med_1} \\ x_{med_1} & y_{med_1} & z_{med_1} \end{bmatrix} \quad (5.43)$$

Com isso, o sistema de coordenadas local está completamente definido sendo necessário, agora, os processamentos para a **compensação de dilatações térmicas do padrão e da máquina-ferramenta**.

Considerando X_{med} , Y_{med} e Z_{med} as coordenadas alinhadas das posições de todas as esferas de referência, a compensação da dilatação térmica do padrão vertical será dada por:

$$X_{med_C} = x_{med_{T_i}} \cdot [1 - (\alpha_{PL} \cdot (T_{PL} - 20) - \alpha_{MF} \cdot (T_{MF} - 20))] \quad (5.44)$$

$$Y_{med_C} = y_{med_{T_i}} \cdot [1 - (\alpha_{PL} \cdot (T_{PL} - 20) - \alpha_{MF} \cdot (T_{MF} - 20))] \quad (5.45)$$

$$Z_{med_C} = z_{med_{T_i}} \cdot [1 - (\alpha_{PL} \cdot (T_{PL} - 20) - \alpha_{MF} \cdot (T_{MF} - 20))] \quad (5.46)$$

onde,

$x_{med_{T_i}}$, $y_{med_{T_i}}$ e $z_{med_{T_i}}$ = coordenadas x, y e z das esferas de referência já alinhadas

α_{PL} = Coeficiente de dilatação térmica do Padrão [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]

T_{PL} = Temperatura do Padrão [$^{\circ}\text{C}$]

α_{MF} = Coeficiente de dilatação térmica da Máquina-ferramenta [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]

T_{MF} = Temperatura da Máquina-ferramenta [$^{\circ}\text{C}$]

Os conjuntos de dados X_{med_C} , Y_{med_C} e Z_{med_C} estão, assim, prontos para serem comparados com os dados calibrados X_{cal} , Y_{cal} e Z_{cal} . As matrizes de erro resultantes desta comparação contêm sobrepostas as várias componentes de erro geométrico da máquina-ferramenta, sendo necessários processamentos específicos para a separação dos erros de posicionamento zpz , dos erros de retilidade ztx e zty , além dos erros de perpendicularidade xwz e ywz .

5.2.2 Posicionamento zpz

Após os dados estarem preparados, a determinação dos erros de posicionamento zpz é rápida, constando da comparação entre as coordenadas Z das esferas calibradas e medidas:

$$zpz = Z_{cal} - Z_{med_C} \quad (5.47)$$

onde,

$$Zcal = \begin{bmatrix} zcal_n \\ \dots \\ zcal_3 \\ zcal_2 \\ zcal_1 \end{bmatrix} \quad e \quad Zmed_C = \begin{bmatrix} zmed_{C_n} \\ \dots \\ zmed_{C_3} \\ zmed_{C_2} \\ zmed_{C_1} \end{bmatrix}$$

, resultando na matriz de erro:

$$zpz = \begin{bmatrix} zpz_n \\ \dots \\ zpz_3 \\ zpz_2 \\ zpz_1 \end{bmatrix}$$

Como o ensaio é realizado em vários ciclos de apalpação, ascendente e descendente, resultam em vários conjuntos de dados zpz . A média e o desvio-padrão desses valores determinarão, respectivamente, o erro de posicionamento na direção Z e a repetitividade dos resultados, que será utilizada para os cálculos da incerteza de medição.

5.2.3 Retilneidades ztx e zty

As obtenções dos erros de retilineidade ztx e zty obedecem ao mesmo processamento matemático, e são realizados a partir das variações nas posições das esferas nas direções x (ztx) e y (zty), ao longo do eixo z, como mostra a figura 5.12. Retas são ajustadas pelos pontos médios e as distâncias desses pontos às retas constituem o desvio de retilineidade.

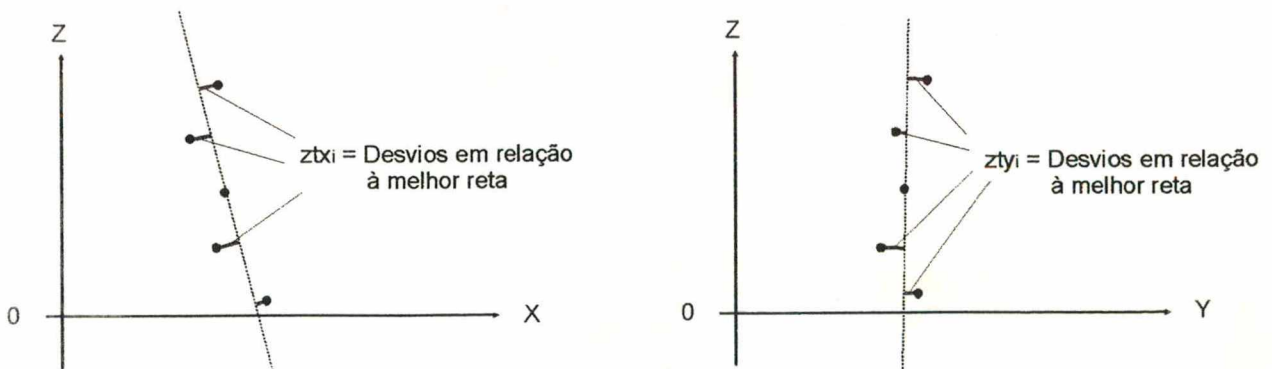


Figura 5.12 – Determinação dos desvios de retilineidade ztx e zty

Como os procedimentos para a determinação dos desvios zty e ztx são semelhantes, serão descritos os processamentos para o eixo X, devendo-se ter mesmo entendimento em relação ao eixo Y.

O processo inicia com a comparação das posições X das esferas calibradas e medidas, o que resulta na matriz erro ztx :

$$ztx = Xcal - Xmed_C \quad (5.48)$$

contendo os desvios na direção X de cada esfera de referência, ao longo das posições do eixo Z.

Esta matriz pode ser representada na forma:

$$ztx = \begin{bmatrix} ztx_n, zmed_{C_n} \\ \dots \\ ztx_3, zmed_{C_3} \\ ztx_2, zmed_{C_2} \\ ztx_1, zmed_{C_1} \end{bmatrix}$$

Com o conjunto de pontos ztx , é ajustada uma reta, por mínimos quadrados:

$$Reta = m \cdot x + c \quad (5.49)$$

sendo,

$$m = \frac{n \cdot \sum ztx_i \cdot zmed_{C_i} - \sum zmed_{C_i} \cdot \sum ztx_i}{n \cdot \sum ztx_i^2 - (\sum ztx_i)^2} \quad e \quad c = \frac{\sum ztx_i^2 \cdot \sum zmed_{C_i} - \sum ztx_i \cdot \sum ztx_i zmed_{C_i}}{n \cdot \sum ztx_i^2 - (\sum ztx_i)^2}$$

onde,

ztx_i e $zmed_{C_i}$ = coordenadas dos pontos por onde se ajusta a reta (posições da matriz ztx_C)

n = número de pontos utilizados no ajuste da reta

Para a determinação das distâncias dos pontos à reta criada, é necessário a determinação do ângulo da reta em relação ao eixo Z, o que é obtido por:

$$\alpha = \text{arc tg}(m) \quad (5.50)$$

Os desvios (na direção x) de cada ponto em relação à melhor reta são, então, calculados segundo:

$$ztx = \begin{bmatrix} ztx_n - \text{Re ta}(z_n) \\ \dots \\ ztx_3 - \text{Re ta}(z_3) \\ ztx_2 - \text{Re ta}(z_2) \\ ztx_1 - \text{Re ta}(z_1) \end{bmatrix} \cdot \cos(\alpha) \quad (5.51)$$

Como o ensaio é realizado em vários ciclos de apalpação, ascendente e descendente, resultam vários conjuntos de dados ztx . A média desses valores determinará o erro de retilinearidade na direção X quando a máquina-ferramenta se move na direção Z. O desvio-padrão dos dados será utilizado para os cálculos da incerteza de medição.

Como já citado, o mesmo procedimento deve ser adotado para a obtenção do desvio de retilinearidade na direção Y.

5.2.4 Desvios de perpendicularidade xwz e ywz

Os desvios de perpendicularidade do eixo Z da máquina-ferramenta em relação aos eixos X (xwz) e Y (ywz) são determinados segundo o mesmo procedimento. Quando o padrão vertical é calibrado na máquina de medição por coordenadas, são determinados os ângulos de inclinação da reta ajustada pelos centros das esferas de referência, em relação ao eixo Z do sistema de coordenadas local, projetado nos planos ortogonais XZ e YZ. Obtêm-se, assim, ângulos de inclinação calibrados.

O mesmo procedimento é realizado quando da medição do padrão na máquina ferramenta. As esferas de referência medidas são utilizadas para determinar uma reta ajustada, e são calculados os ângulos de inclinação entre as projeções dessa reta nos planos ortogonais XZ e YZ e o eixo Z. A figura 5.13 ilustra esse procedimento para a determinação de xwz .

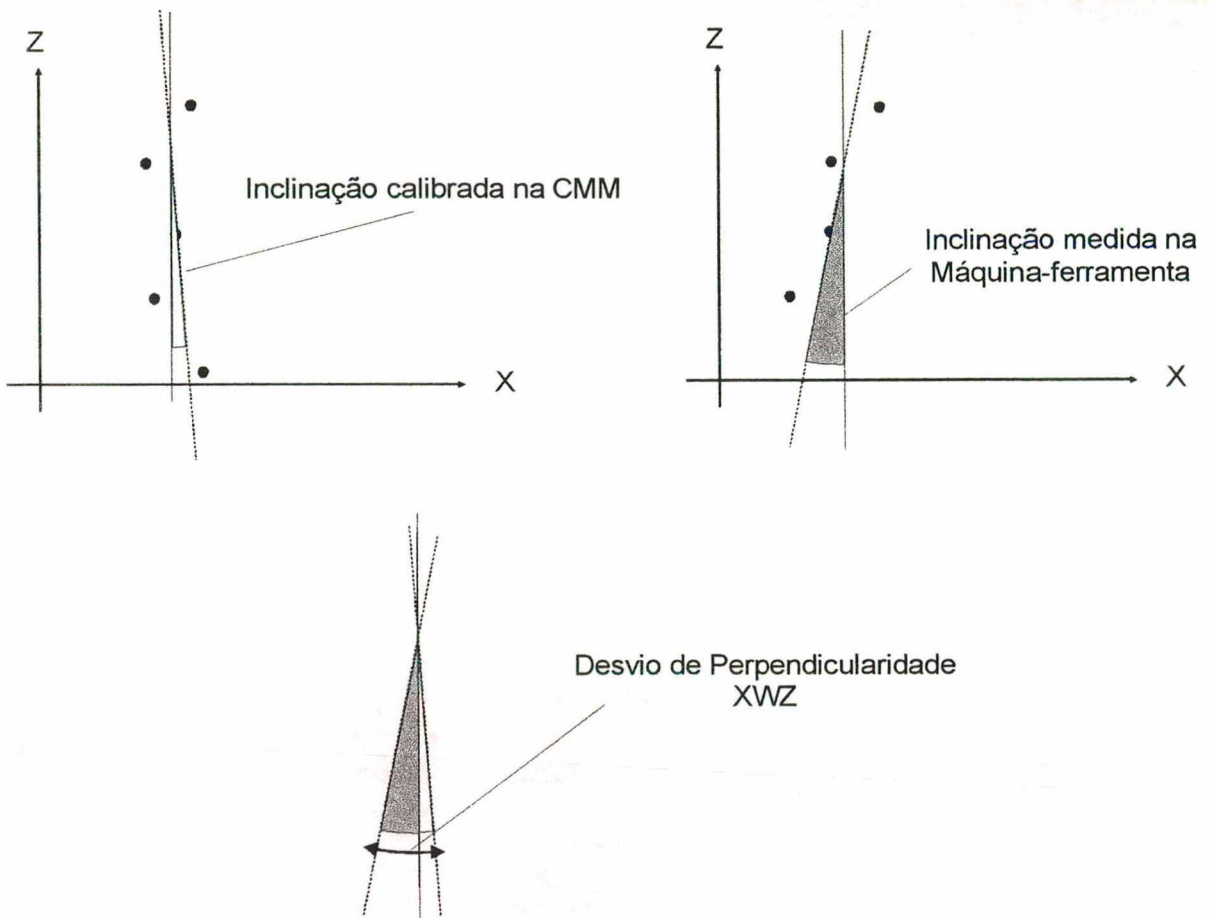


Figura 5.13 – Determinação do desvio de perpendicularidade xwz a partir do padrão vertical

Para a obtenção de xwz , sejam $Pcal_{XZ}$, e $Pmed_{XZ}$ as posições x e z de todas as esferas de referência calibradas e medidas (já alinhadas e compensadas termicamente), respectivamente:

$$Pcal_{XZ} = \begin{bmatrix} xcal_n, zcal_n \\ \dots \\ xcal_3, zcal_3 \\ xcal_2, zcal_2 \\ xcal_1, zcal_1 \end{bmatrix} \quad Pmed_{C_{XZ}} = \begin{bmatrix} xmed_{C_n}, zmed_n \\ \dots \\ xmed_{C_3}, zmed_3 \\ xmed_{C_2}, zmed_2 \\ xmed_{C_1}, zmed_1 \end{bmatrix}$$

Com esses conjuntos de dados, são ajustadas retas pelos centros das posições calibradas e medidas, e obtidas as inclinações calibrada e medida dessas retas, em relação ao eixo Z do sistema de coordenadas local, observando-se do plano XZ .

Com os dados calibrados determina-se:

$$\alpha_{cal_{XZ}} = \text{arc tg} (m_{cal}) \quad (5.52)$$

onde,

$$m_{cal} = \frac{n \cdot \sum x_{cal_i} \cdot z_{cal_i} - \sum z_{cal_i} \cdot \sum x_{cal_i}}{n \cdot \sum x_{cal_i}^2 - (\sum x_{cal_i})^2} \quad (5.53)$$

O mesmo procedimento é aplicado com os dados medidos, obtendo-se:

$$\alpha_{med_{XZ}} = \text{arc tg} (m_{med}) \quad (5.54)$$

onde,

$$m_{med} = \frac{n \cdot \sum x_{med_{C_i}} \cdot z_{med_{C_i}} - \sum z_{med_{C_i}} \cdot \sum x_{med_{C_i}}}{n \cdot \sum x_{med_{C_i}}^2 - (\sum x_{med_{C_i}})^2} \quad (5.55)$$

Comparando-se os ângulos calibrado e medido, determina-se o desvio de perpendicularidade xwz , que é a média dos vários ciclos de medição ascendente e descendente, realizados durante o ensaio da máquina-ferramenta.

$$xwz = \alpha_{cal_{XZ}} - \alpha_{med_{XZ}} \quad (5.56)$$

O mesmo entendimento se deve ter para a determinação do desvio de perpendicularidade ywz , alterando-se agora o plano de observação de XZ para YZ .

Ao final de todo o desenvolvimento matemático dos algoritmos para a obtenção dos erros com a **placa de furos** e com o padrão vertical, procedeu-se a experimentação propriamente dita, quando as estratégias de processamento aqui descritas foram testadas em ensaios reais. A experimentação e os resultados obtidos com os padrões e software desenvolvidos encontram-se descritos no capítulo 6.

CAPÍTULO 6 - VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DO SISTEMA QUALIMAQ

Para a verificação da eficiência metrológica e operacional dos dispositivos e algoritmos desenvolvidos, o sistema QUALIMAQ foi utilizado para o ensaio geométrico de uma máquina-ferramenta de referência, utilizada ao longo de todos os ensaios neste trabalho. Os erros geométricos dessa máquina foram determinados utilizando também métodos de ensaio clássicos, levando a comparações metrológicas e operacionais entre os métodos, o que permitiu avaliar a eficiência do sistema desenvolvido. A semelhança ou não entre os resultados obtidos com a instrumentação clássica e com o sistema QUALIMAQ não é o fator determinante para atestar a sua confiabilidade metrológica, visto que os procedimentos de ensaio possuem características diferentes, que podem levar a resultados diferentes.

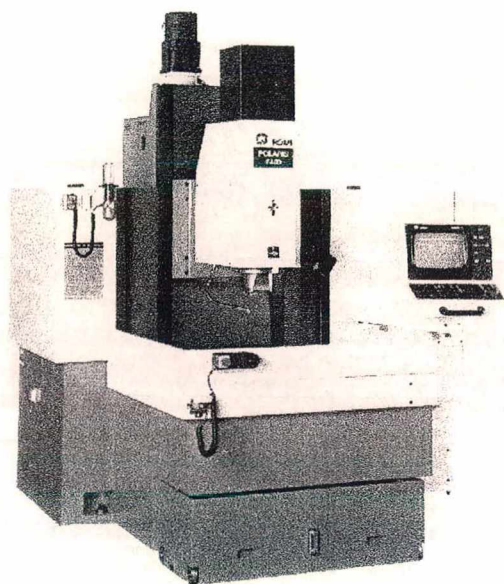
6.1 Caracterização Geométrica da Máquina-ferramenta utilizada nos ensaios

Como descrito, para o desenvolvimento e avaliação experimental das estratégias de ensaio com padrões corporificados, foi necessário definir uma máquina-ferramenta onde todos os testes seriam realizados.

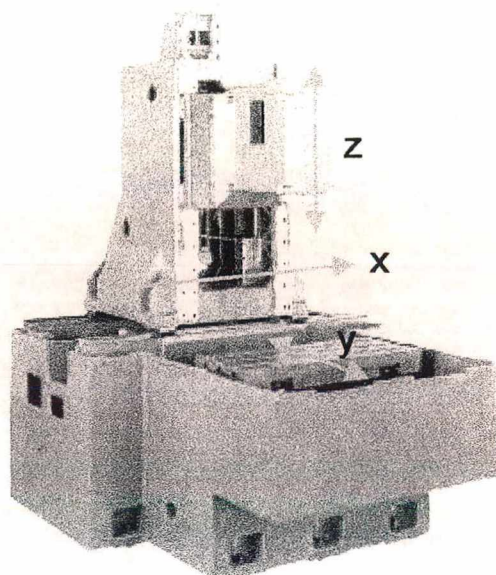
A máquina especificada para isso foi uma fresadora CNC vertical, marca ROMI Polaris, com 3 eixos de movimentação. A mesa e a coluna da máquina são suportadas por guias lineares e acionadas por fusos de esferas pré-tensionados axialmente, com pré-carga nas esferas para compensação mecânica de folga. O sistema de medição de posição é indireto, com *encoder* solidário ao fuso e servo-motor. A máquina possui 4 anos de uso e pertence ao Laboratório de Mecânica de Precisão da UFSC, sendo utilizada para atividades de pesquisa na área de Tecnologia de Usinagem. O equipamento e suas principais especificações podem ser vistos na figura 6.1.

O controlador presente na máquina é o Heidenhain TNC 360, com interface para apalpador de medição e recursos de medição por coordenadas. O CNC permite a compensação linear de erros de posicionamento, e a compensação de folga nos eixos.

Para caracterizar o estado geométrico da máquina, foram realizados ensaios de posicionamento linear, reticidade e perpendicularidade nos 3 eixos, sempre utilizando instrumentação clássica. Essa caracterização, realizada no início da fase experimental do trabalho, foi importante para identificar algum problema que pudesse inviabilizar a utilização do equipamento no trabalho de pesquisa e, principalmente, para estabelecer os erros geométricos que a máquina apresentava, de forma a permitir comparações com o sistema QUALIMAQ.



a) Máquina completa



b) Estrutura da Máquina

PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	
Cursos	X: 625 mm Y: 505 mm Z: 425 mm
Potência no Eixo árvore	20 CV
Velocidade máxima de avanço	30 m/min
Incerteza de Posicionamento	$\pm 10 \mu\text{m}$

Figura 6.1 – Máquina-ferramenta utilizada no desenvolvimento experimental do trabalho

6.1.1 Ensaios de Posicionamento linear

Os ensaios de posicionamento linear foram realizados com um laser interferométrico Renishaw – kit linear – rastreado aos padrões primários, segundo procedimento especificado na norma [55]. Nesse ensaio (figura 6.2) a posição indicada pelo “display” da máquina-ferramenta é comparada com a posição de referência, medida pelo laser. Essa comparação é realizada ao longo dos eixos da máquina-ferramenta, em 5 ciclos de medição (1 ciclo = ida e volta), de forma a obter a curva de tendência, bem como a repetitividade unidirecional e a histerese estática.

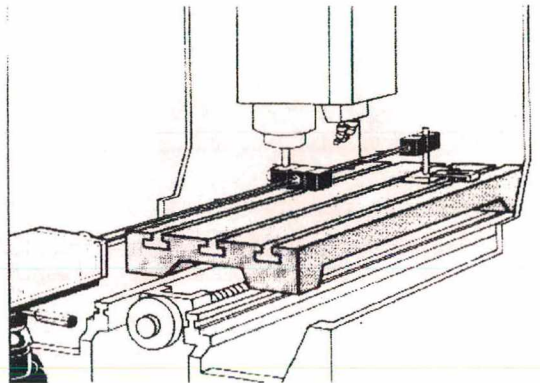
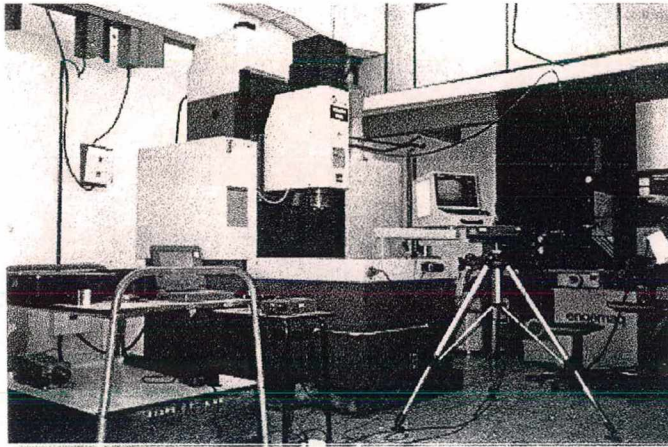


Figura 6.2 – Ensaio de posicionamento com laser interferométrico e kit linear

O tempo necessário para a realização dos ensaios foi sempre monitorado, e incluiu as montagens ópticas e alinhamentos necessários, um ciclo de pré-aquecimento da máquina e os ensaios propriamente ditos. A incerteza dos resultados de Medição foi calculada de acordo com a **ISO GUM** [179], considerando os fatores de influência mostrados no balanço de incerteza mostrado de forma incompleta na figura 6.3. A componente de incerteza tipo A, determinada pela repetitividade, é específica de cada experimento e será descrita junto aos resultados para os eixos X, Y e Z.

Seguindo o procedimento normalizado para o experimento e a avaliação de incerteza, o ensaio foi realizado e os resultados obtidos nos eixos X, Y e Z são observados e analisados a seguir.

Fonte de Incerteza	Incerteza [μm]	Distribuição de Probabilidade	Coefficiente de sensibilidade	Incerteza Padrão [μm]	Graus de liberdade
Repetitividade	Dependente do ensaio	Normal	1	Dependente do ensaio	9
Laser Interferométrico	0,60	Retangular	1	0,35	∞
Resolução da Máquina	1,00	Retangular	1	0,06	∞
Alinhamento Óptico	0,07	Retangular	1	0,04	∞
Coefficiente de Dilatação da Máquina	1,70	Retangular	1	0,98	∞
			Incerteza Combinada	Dependente do ensaio	Dependente do ensaio (efetivo)
			Incerteza Expandida (95%)	Dependente do ensaio	

Figura 6.3 – Balanço para o cálculo da Incerteza dos resultados do ensaio de posicionamento com o laser

a) Eixo X

Os resultados podem ser vistos na figura 6.4, onde estão indicadas simultaneamente as curvas de erro de **todos os ciclos de ensaio**, a **média de todos os ciclos** e a **histerese**, que é determinada como a diferença das médias dos ciclos de ensaio realizados em sentido crescente, em relação às médias dos ciclos de ensaio realizados em sentido decrescente.

Considerando os fatores de influência contidos no balanço de incerteza (figura 6.3), e introduzindo a repetitividade obtida nesse ensaio para o eixo X, obteve-se uma incerteza de $I_m = \pm 2,9 \mu\text{m}$ no posicionamento unidirecional, onde a incerteza tipo A predomina sobre as outras fontes de incerteza.

Como mostra a curva de tendência (figura 6.4 – centro), o erro apresenta característica predominantemente linear, embora com oscilações em torno de uma reta média. Como a curva de erros é crescente a partir da posição do início do ensaio, a peça usinada nesta máquina, com essa condição térmica, ficará menor do que o projetado.

A histerese permanece baixa ao longo de toda a faixa, com um valor médio de $1,6 \mu\text{m}$, mas sempre oscilando entre 1 e $2 \mu\text{m}$. A baixa histerese se reflete em uma boa repetitividade bidirecional no eixo X.

b) Eixo Y

Os resultados do ensaio podem ser vistos na figura 6.5, onde bem se observa que, apesar da magnitude do erro ser semelhante ao eixo X, o comportamento das curvas de tendência (figura 6.5 - centro) é bem diferente. As curvas de tendência dos ensaios realizados em sentido crescente encontram-se agrupadas e bem destacadas das curvas de tendência dos ensaios realizados em sentido decrescente, o que denota uma histerese bastante significativa na inversão de movimento. A curva de tendência apresenta-se linear na maior parte do eixo Y, embora com inversão no início do curso, e uma dimensão usinada nesta direção ficará provavelmente, menor do que a projetada.

A incerteza de posicionamento unidirecional foi calculada em $\pm 2,6 \mu\text{m}$, mas não considera a perda de repetitividade causada pela histerese. A histerese média ao longo do eixo é considerável ($6 \mu\text{m}$) e bastante inconstante, sendo significativamente maior nos extremos do descolamento do eixo Y.

c) Eixo Z

O eixo Z apresentou um erro de posicionamento bem mais baixo de que os eixos X e Y, como se pode observar na figura 6.6. A curva de tendência bi-direcional (figura 6.6 – centro) apresenta um comportamento estável no início e fim da faixa, e variação linear no centro. A histerese manteve-se em torno de $3,0 \mu\text{m}$ ao longo de toda a faixa, com pouca variação. A pouca diferença entre ciclos ascendente e descendente já era esperada em função do peso próprio da coluna do eixo Z proporcionar sempre a mesma condição de contato entre o fuso de esferas e a porca de acionamento, independente se o eixo se move para cima ou para baixo.

A incerteza em torno da tendência unidirecional foi determinada em $\pm 2,5 \mu\text{m}$ e novamente a repetitividade foi a parcela predominante sobre as outras fontes de incerteza. A curva de erros é crescente a partir da posição do início do ensaio, e uma dimensão usinada no eixo Z, com essa condição térmica, ficará menor do que o projetado.

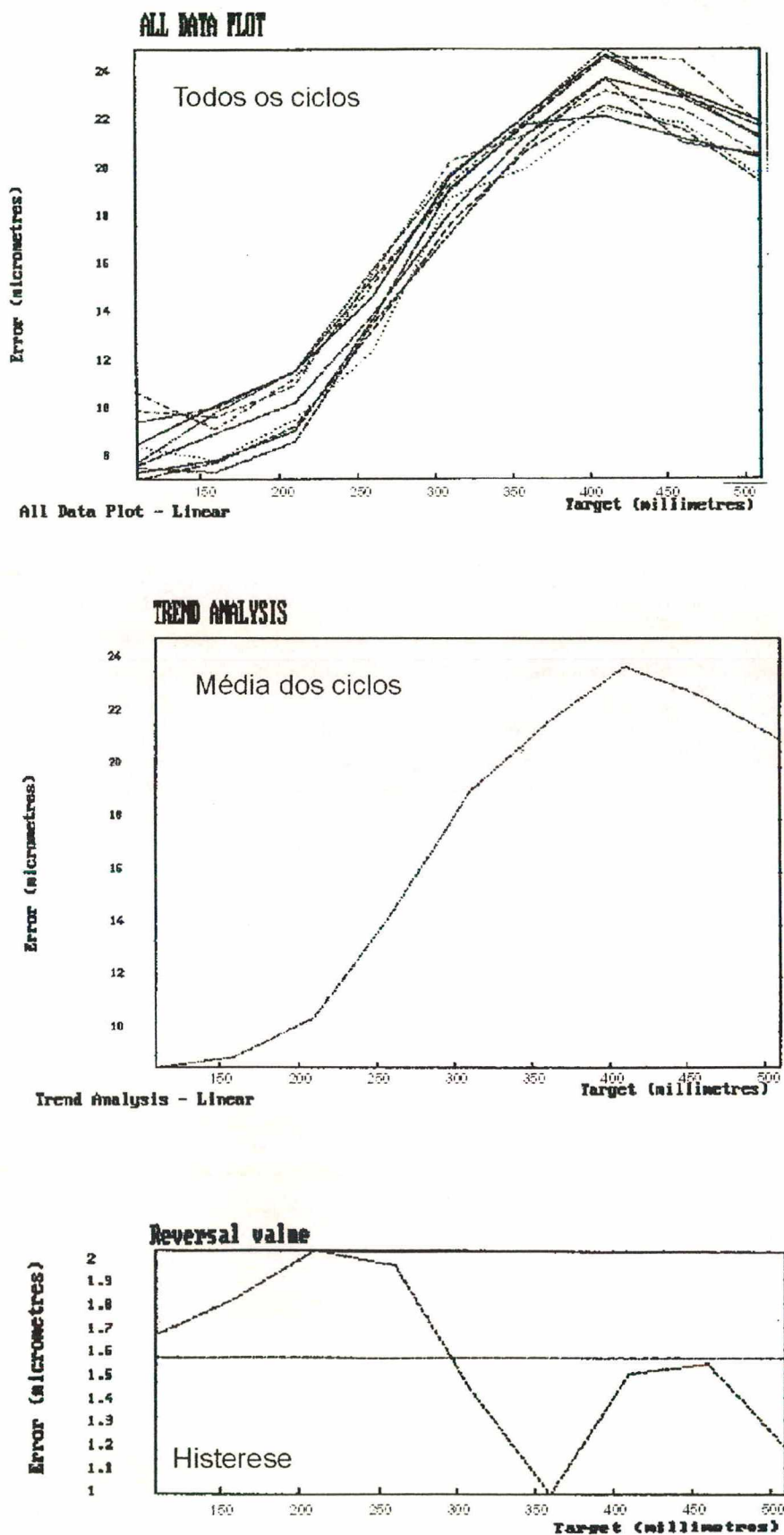


Figura 6.4 – Resultados do ensaio de posicionamento no eixo X com o laser interferométrico

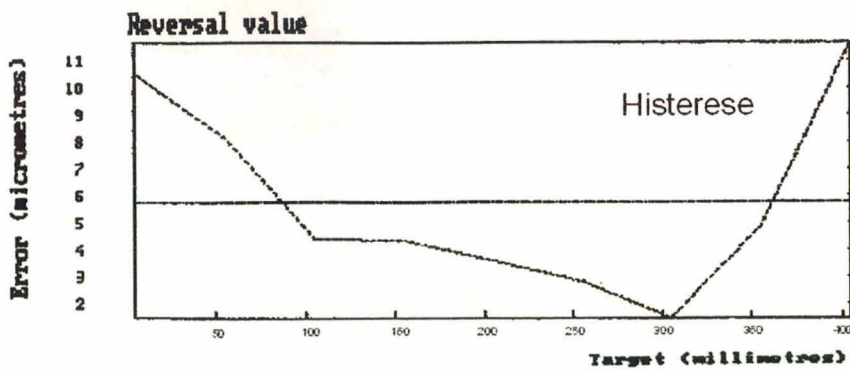
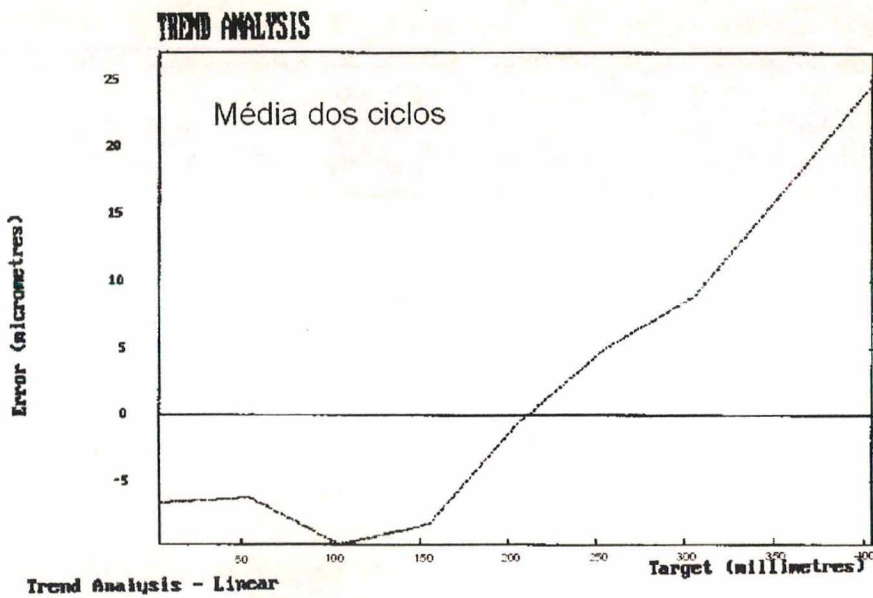
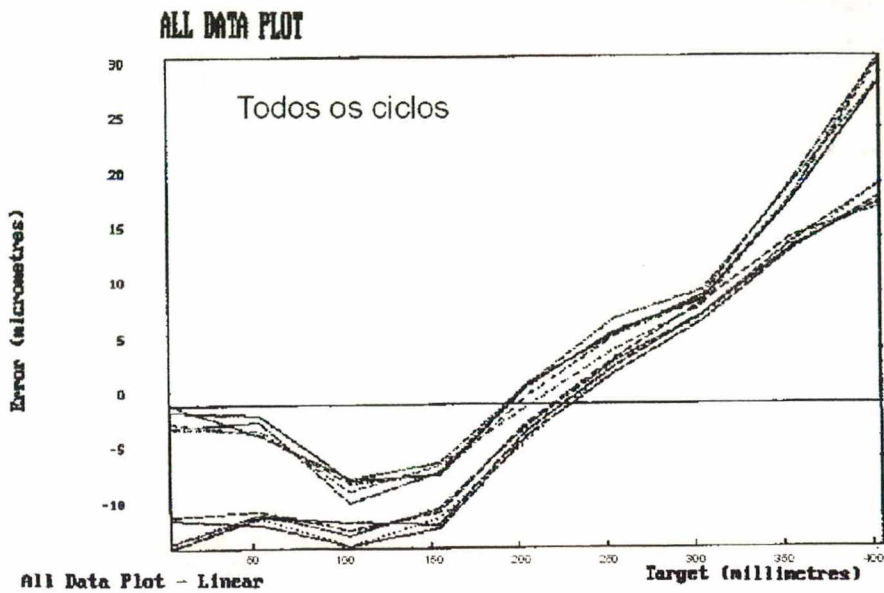


Figura 6.5 - Resultados do ensaio de posicionamento no eixo Y com o laser interferométrico

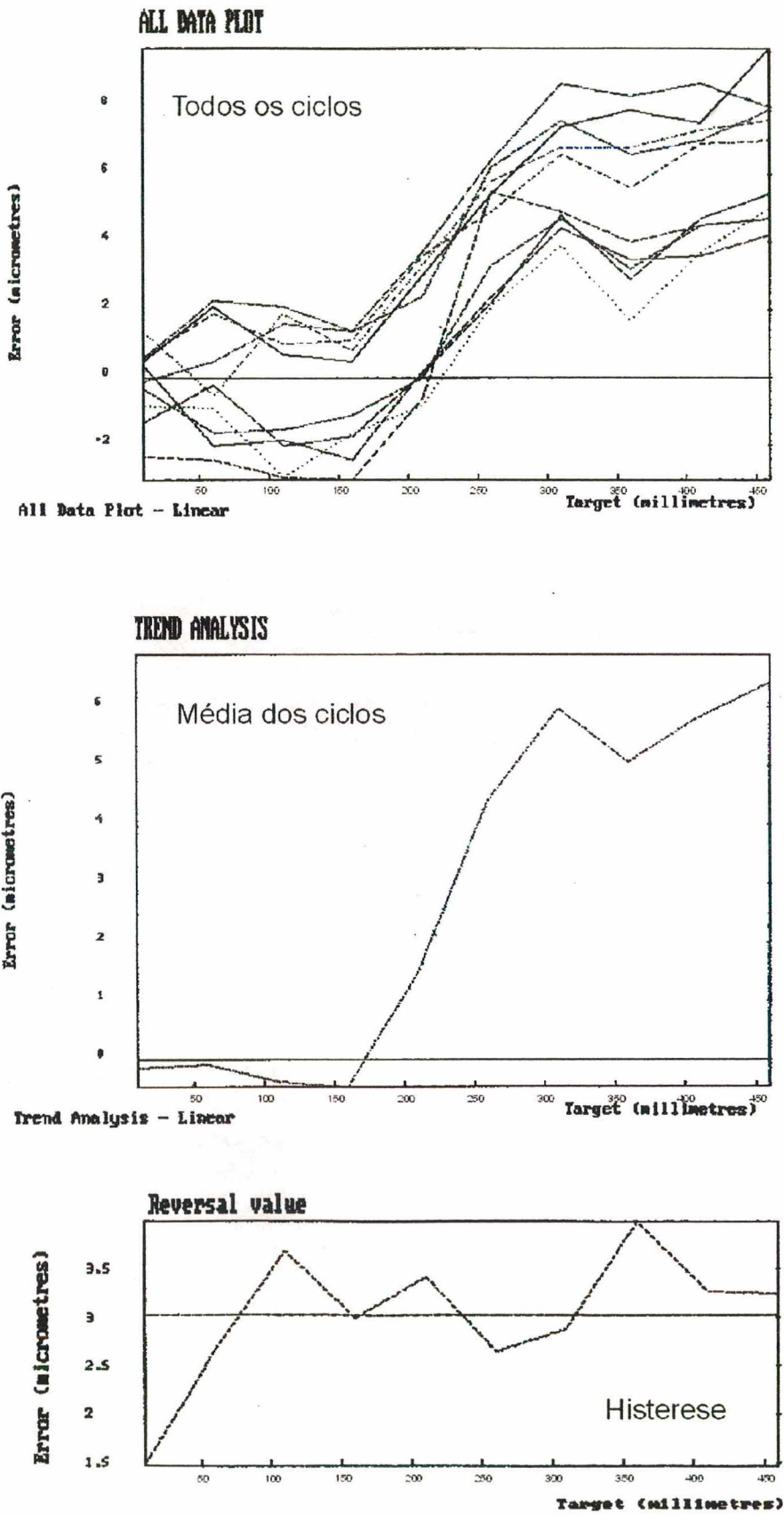


Figura 6.6 – Resultados do ensaio de posicionamento no eixo Z com o laser interferométrico

6.1.2 Ensaios de Retilidade

Os ensaios de retilidade nos planos XY, XZ e YZ da máquina foram realizados com uma régua padrão em granito e com um medidor de deslocamento eletro-óptico rastreados aos padrões primários. O procedimento para todos os ensaios seguiu as orientações da norma [54], com a trajetória da máquina-ferramenta sendo comparada, por meio do medidor, com a reta de referência gerada fisicamente pela régua padrão.

Vários ciclos de medição são realizados, obtendo um conjunto de dados brutos que contém, sobrepostos, o desvio de retilidade com o desalinhamento da régua em relação ao eixo da máquina-ferramenta. Para obter somente o desvio de retilidade, uma reta média (mínimos quadrados) é ajustada pelos pontos apalpados e os erros de retilidade correspondem aos desvios em relação a essa reta.

As incertezas de medição para todos os ensaios foram calculadas segundo a figura 6.7, obtendo-se valores semelhantes para todos os planos. Os resultados dos ensaios de retilidade nos 3 planos da máquina-ferramenta podem ser vistos na figura 6.8, onde se percebe que os erros em todos os eixos encontram-se baixos, da mesma ordem da incerteza de medição obtida com o ensaio. Os valores baixos de desvio de retilidade se justificam pelo fato da máquina-ferramenta conter poucas horas de uso, e também, pela utilização de guias lineares como mancais de deslocamento.

Fonte de Incerteza	Incerteza [μm]	Distribuição de Probabilidade	Coefficiente de sensibilidade	Incerteza Padrão [μm]	Graus de liberdade
Repetitividade	1,0	Normal	1	0,50	9
Resolução	0,1	Retangular	1	0,06	∞
Régua de Granito	2,0	Normal	1	1,00	∞
Comparador	0,3	Normal	1	0,15	∞
			Incerteza Combinada	1,13	1400 (efetivo)
			Incerteza Expandida (95%)	2,2 μm	

Figura 6.7 - Balanço de Incerteza para os ensaios de retilidade com régua-padrão e apalpador

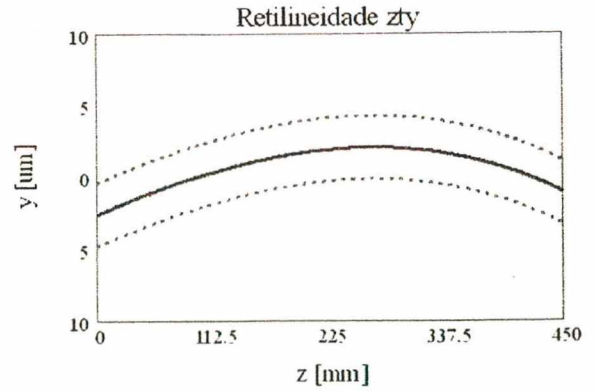
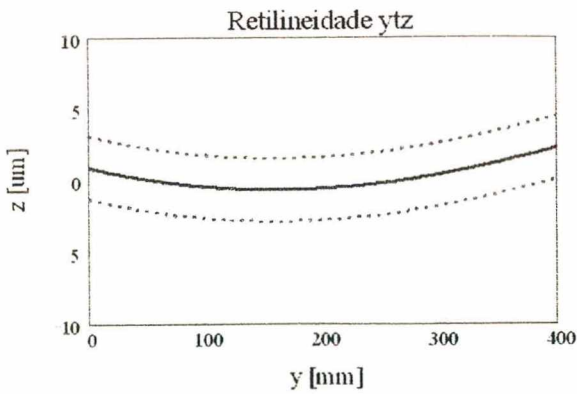
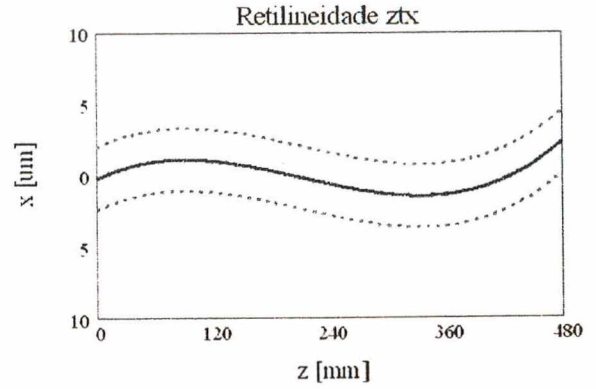
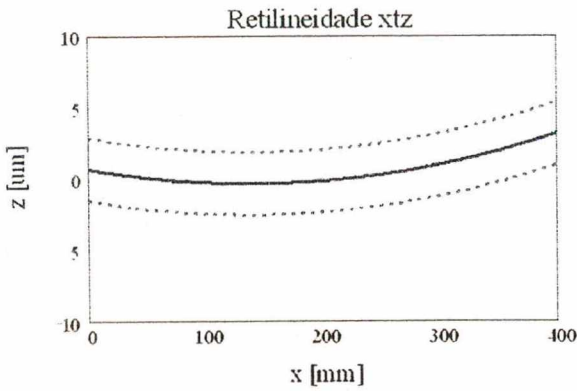
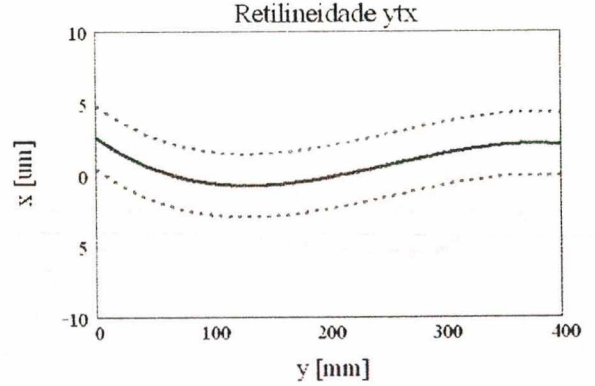
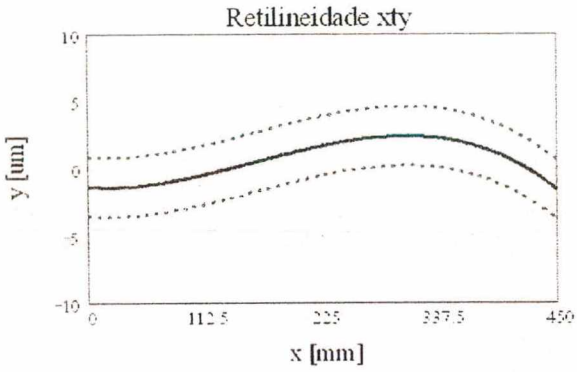
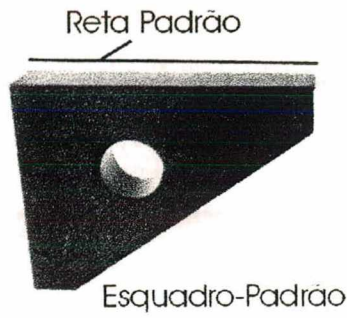


Figura 6.8 – Desvios de retilidade medidos em todos os eixos da Máquina-ferramenta

Para quantificar a influência de fatores de incerteza como a resolução e o comparador sobre a incerteza da medição de retilidade, foi estabelecido o procedimento descrito a seguir. Para clareza de entendimento, será descrito o procedimento para quantificar a influência do **comparador** sobre o erro de retilidade, que pode ser visualizado na figura 6.9:

- Em cada posição apalpada sobre a reta do esquadro durante o ensaio, foram gerados 10.000 números aleatórios com a distribuição pré-definida (normal), dentro da incerteza do comparador ($\pm 0,3 \mu\text{m}$). O número de pontos aleatórios foi definido em simulações.
- Com esse conjunto de pontos foram geradas 10.000 retas por mínimos quadrados em cada face do esquadro e, então, determinados 10.000 desvios das posições apalpadas em relação às retas geradas, ou seja, 10.000 erros de retilidade, diferentes entre si por efeito da incerteza do apalpador.
- A dispersão dos erros de retilidade determinados é calculada a partir do desvio-padrão, correlacionando-se a causa ao efeito. A incerteza do comparador, de $\pm 0,3 \mu\text{m}$ provoca uma incerteza na medição de retilidade de $\pm 0,3 \mu\text{m}$.

Em todas as simulações realizadas, as incertezas de retilidade ficaram sempre muito próximas numericamente às incertezas dos fatores causadores. Esse procedimento foi seguido ao longo de todos os ensaios de retilidade, também com o sistema QUALIMAQ.

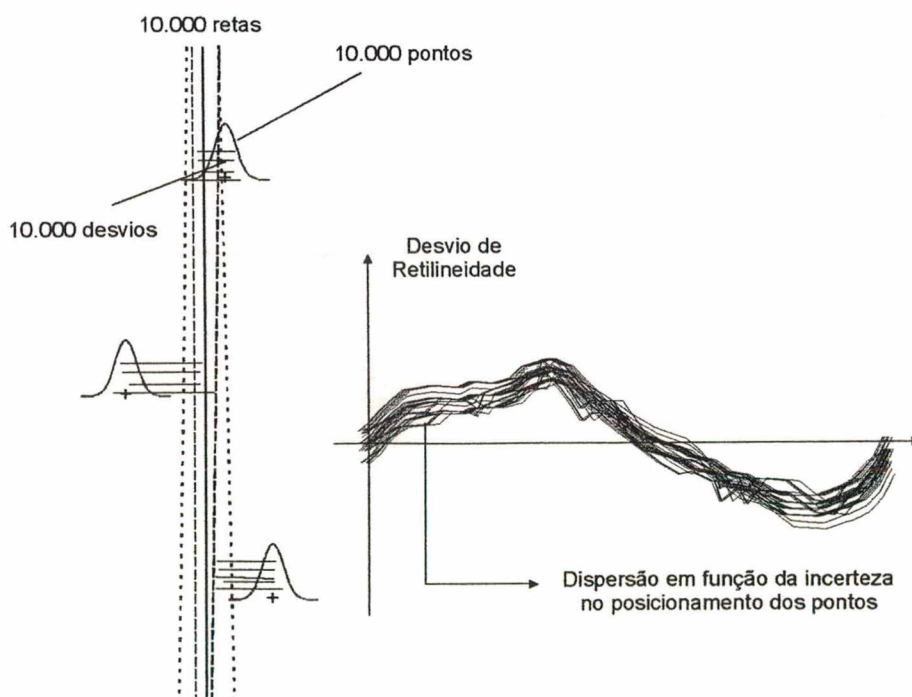


Figura 6.9 – Metodologia para o cálculo de incerteza no ensaio de retilidade

6.1.3 Ensaios de Perpendicularidade

Os ensaios de perpendicularidade foram realizados com a mesma instrumentação utilizada para os ensaios de retilidade, ou seja, com um esquadro padrão em granito e um medidor de deslocamento eletro-óptico, rastreados aos padrões primários. O procedimento também seguiu a norma ISO230-1 que estabelece o ensaio de perpendicularidade como 2 ensaios de retilidade realizados em duas faces ortogonais do esquadro de granito, que fica fixo durante os ensaios para manter uma referência de perpendicularidade entre as trajetórias medidas.

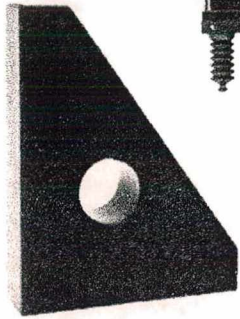
O ângulo entre as retas médias (mínimos quadrados) obtidas em cada ensaio de retilidade é comparado com o ângulo do esquadro, para a determinação do desvio de perpendicularidade entre os eixos da máquina-ferramenta.

Os resultados dos ensaios nos 3 planos da máquina estão indicados na figura 6.11, podendo-se observar que a máquina apresenta um erro bastante baixo no seu plano horizontal, mas nos planos verticais, principalmente, no plano XZ, os erros são bem maiores. A justificativa para essa diferença decorre de certas assimetrias verticais na estrutura da máquina, que dificultam um ajuste mecânico mais adequado. A perpendicularidade entre os eixos X e Y é facilitada por ajustes horizontais nas guias lineares desses eixos, e o fabricante o fez com grande eficiência na montagem desta máquina.

Fonte de Incerteza	Incerteza [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Distribuição de Probabilidade	Coefficiente de sensibilidade	Incerteza Padrão [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Graus de liberdade	
Repetitividade	4,6	Normal	1	2,30	9	
Resolução	1,1	Retangular	1	0,64	∞	
Esquadro de Granito	5,0	Normal	1	2,50	∞	
Comparador	3,2	Normal	1	1,60	∞	
				Incerteza Combinada	3,1	609 (efetivo)
				Incerteza Expandida (95%)	6,0 $\mu\text{m}/\text{m}$	

Figura 6.10 - Balanço de Incerteza para os ensaios de perpendicularidade com esquadro e apalpador

Esquadro



Comparador

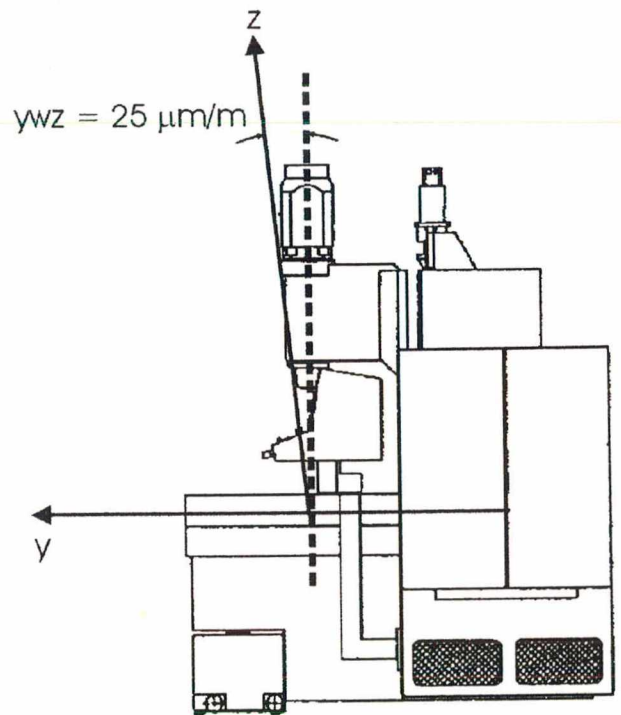
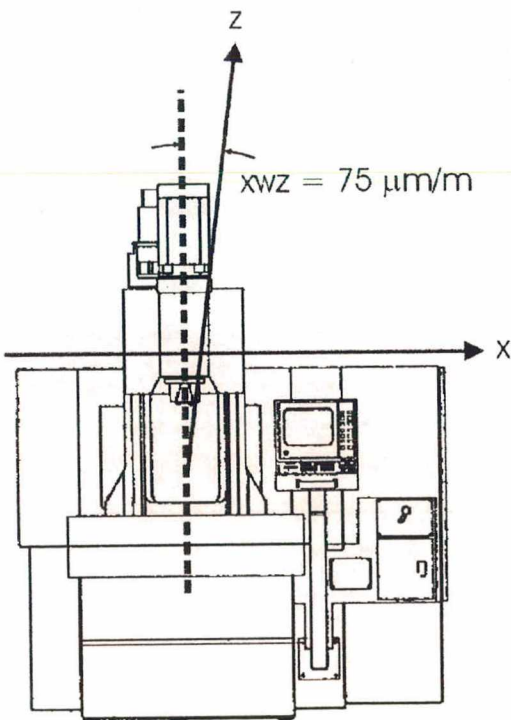
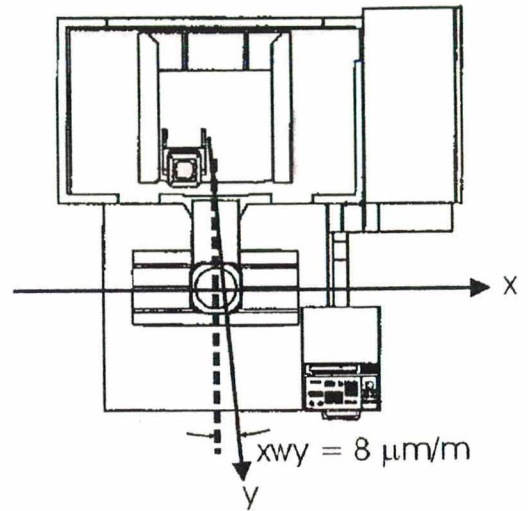


Figura 6.11 – Desvios de perpendicularidade medidos em todos os eixos da Máquina-ferramenta

Para quantificar a influência de fatores de incerteza como a resolução e o apalpador (grandezas lineares) sobre a incerteza da medição de perpendicularidade (grandeza angular), foi estabelecido um procedimento semelhante ao realizado no ensaio de retilidade. Como mostra a figura 6.12, em cada posição apalpada sobre o esquadro durante o ensaio, foram gerados 10.000 números aleatórios com a distribuição de probabilidade pré-definida. Com esse conjunto de pontos foram geradas 10.000 retas por mínimos quadrados em cada face do esquadro e foram determinados os ângulos entre as retas geradas nas faces ortogonais do esquadro. A dispersão dos ângulos obtidos (calculada a partir do desvio-padrão) é causada pela incerteza de apalpação e, dessa forma, correlaciona-se a causa ao efeito. Por exemplo, a incerteza do comparador, de $\pm 0,3 \mu\text{m}$ provoca uma incerteza na medição de perpendicularidade de $\pm 3,2 \mu\text{m/m}$. Esse mesmo procedimento foi empreendido no cálculo da incerteza nos outros ensaios de perpendicularidade.

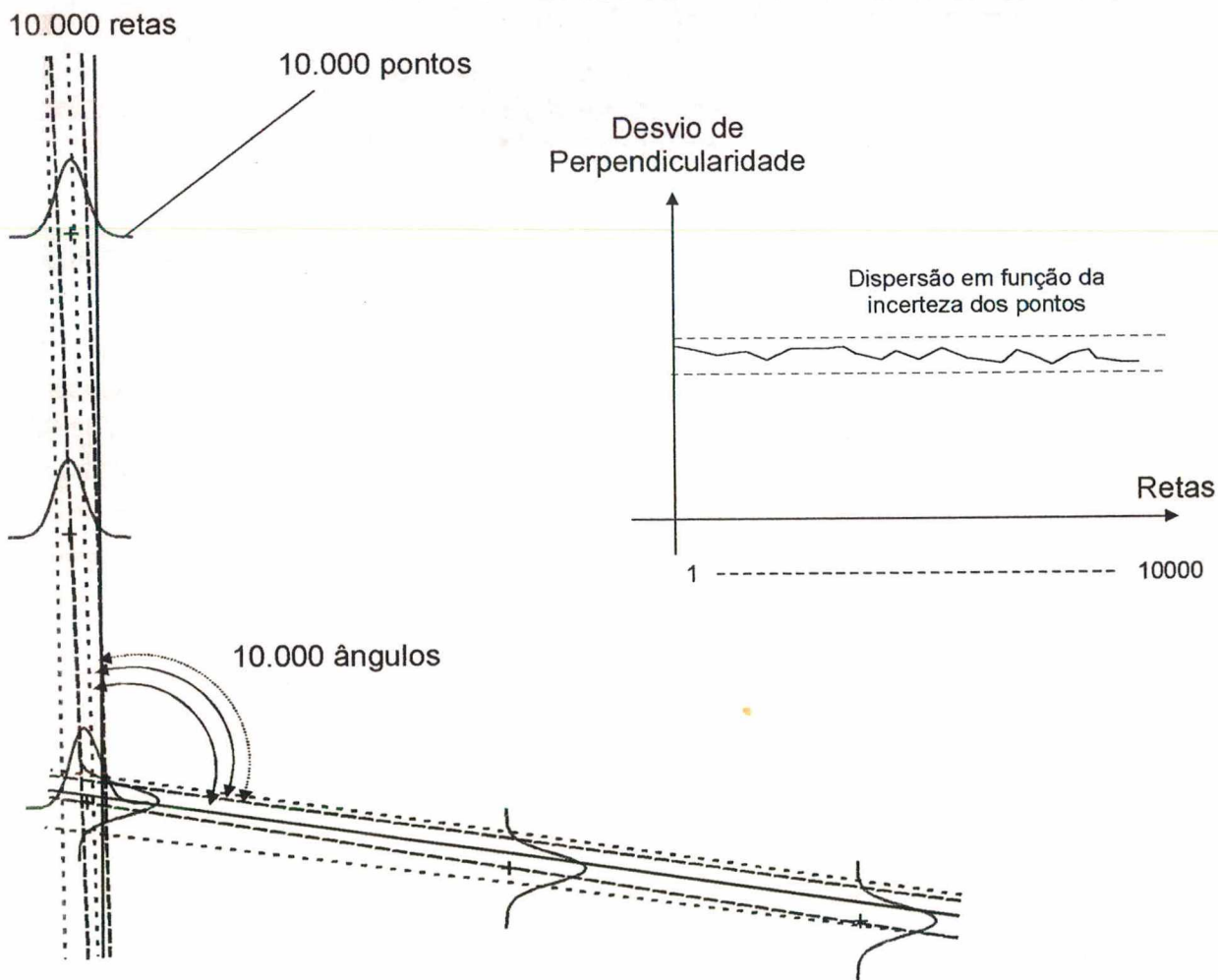


Figura 6.12 – Metodologia para o cálculo de incerteza nos ensaios de perpendicularidade

6.2 Ensaio com a Placa de furos

A experimentação do sistema QUALIMAQ com a placa de furos foi realizada em várias etapas, incluindo os testes de viabilidade e os ensaios geométricos propriamente ditos. Os ensaios de viabilidade permitiram identificar problemas metrológicos e operacionais que foram otimizados pela alteração física do sistema e/ou através de melhoramentos nos procedimentos experimentais. Após serem estabelecidas as condições adequadas, os ensaios (figura 6.13) foram realizados repetidas vezes e os resultados e as incertezas obtidas foram comparados aos ensaios realizados com métodos clássicos.

Os ensaios com a placa de furos foram implementados nos 3 planos de trabalho da máquina-ferramenta: XY (horizontal), XZ (vertical) e YZ (vertical). Em todas as medições, a placa foi fixada mediante montagem isostática (cinemática) com 3 esferas apoiadas sobre 3 rasgos em V.

A seqüência de medição foi realizada em espiral com um ciclo de ida e volta, para detectar o efeito de histerese sobre os resultados, causados por influência térmica. As temperaturas da placa e da máquina foram sempre monitoradas através de sensores de contato calibrados, tendo sido observadas variações de temperatura sempre abaixo de 0,1 K durante aquisição de pontos. A placa foi sempre colocada no ambiente de ensaio com antecedência de 3 horas em relação aos ensaios.

Para avaliar a repetitividade dos resultados, cada ensaio foi repetido 3 vezes por completo. Essa avaliação de repetitividade já é facilitada pela própria configuração do padrão. A geometria em forma de grid 2D permite obter vários resultados em cada experimento: 5 erros de posicionamento e 5 erros de reticidade em cada eixo e 5 erros de perpendicularidade entre eixos. As posições da placa de furos no volume de trabalho da máquina, bem como as velocidades de aproximação e apalpação foram mantidas constantes ao longo de todas as medições. A placa foi colocada o mais próximo ao centro do volume de trabalho da máquina-ferramenta e a velocidade de aproximação e de apalpação foram estabelecidas em 8 m/min e 0,1 m/min, respectivamente. A velocidade de aproximação foi estabelecida para minimizar o tempo de teste sem comprometer o posicionamento da placa, que é suportada em mesa móvel. A especificação da velocidade de apalpação foi fundamentada em recomendação do fabricante do apalpador, e é da mesma ordem dos apalpadores de máquinas de medir por coordenadas.

Sob essas condições os ensaios foram implementados e os resultados e incertezas obtidos,

comparativamente aos ensaios com métodos clássicos, encontram-se descritos por plano de ensaio, a seguir.

6.2.1 Plano XY

No ensaio com a placa no plano XY, visualizado na figura 6.13, são obtidos:

- Erros de posicionamento x_{px} , y_{py}
- Erros de Retilidade x_{ty} e y_{tx}
- Erro de Perpendicularidade x_{wy}

Operacionalmente, o ensaio é bastante facilitado, porque a máquina-ferramenta já é configurada para medições por coordenadas nesse plano. Não há necessidade de adaptações mecânicas e o CNC já possui incorporada a função de medição dos círculos (diâmetro e posição) da placa no plano XY. Sob essas condições, consegue-se realizar o ensaio total em 1 hora, e o tempo de apalpação da placa ficou em 18 minutos. Essa rapidez é importante não só pelo aspecto operacional mas também pelo aspecto metrológico. Quanto menor for o tempo de apalpação, menores as variações de temperatura durante o ensaio, diminuindo a incerteza do método de ensaio.

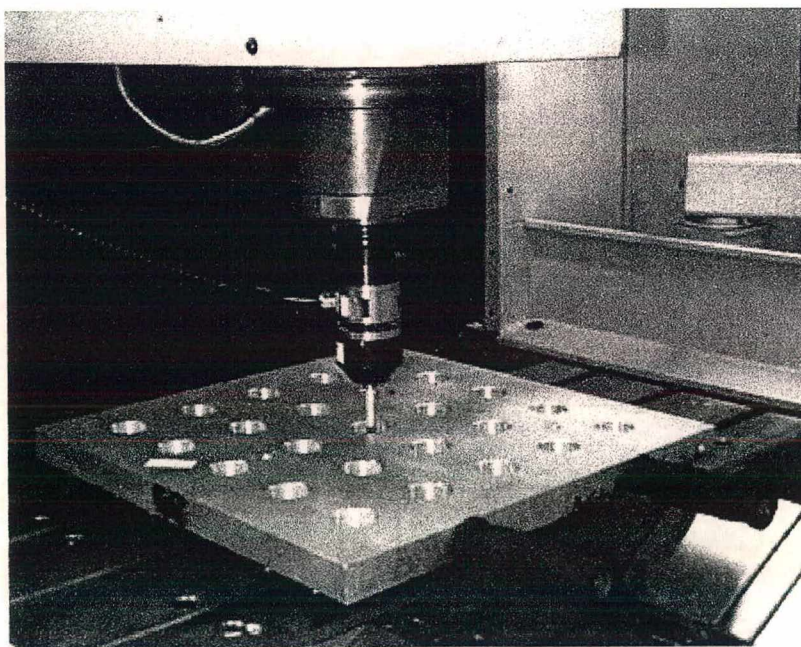


Figura 6.13 – Ensaio geométrico com a placa de furos no plano XY

a) Posicionamento linear

A incerteza de medição para este ensaio considerou, além da componente experimental tipo A, a resolução do sistema de posicionamento da máquina-ferramenta, as incertezas da placa e do apalpador, além dos fatores ligados à dilatação térmica da placa e da máquina-ferramenta. A figura 6.14 mostra o balanço para o cálculo de incerteza, onde a repetitividade indicada é a maior obtida nos 3 ensaios realizados (condição mais desfavorável). Percebe-se que essa componente predomina sobre as demais fontes de incerteza do ensaio, o mesmo que ocorre quando do uso do laser interferométrico para a obtenção do mesmo erro.

Fonte de Incerteza	Incerteza [μm]	Distribuição de Probabilidade	Coefficiente de sensibilidade	Incerteza Padrão [μm]	Graus de liberdade	
Repetitividade	3,0	Normal	1	1,50	9	
Resolução	1,0	Retangular	1	0,58	∞	
Placa	1,6	Normal	1	0,80	36	
Apalpador (2D)	1,7	Normal	1	0,85	219	
Coefficientes de dilatação térmica	0,8	Retangular	1	0,46	∞	
Medição de temperatura	0,2	Retangular	1	0,12	∞	
Varição de Temperatura	0,4	Retangular	1	0,23	∞	
				Incerteza Combinada	2,05	31
				Incerteza Expandida (95%)	4,1 μm	

Figura 6.14 - Balanço de Incertezas para os resultados de erro de posicionamento linear nos eixos X e Y

Ao comparar os resultados obtidos nesse ensaio com o resultado obtido com o laser interferométrico (figura 6.15), percebe-se uma boa concordância na tendência ao longo dos eixos X e Y, o que ocorreu em todos os ensaios. A maior incerteza no resultado da medição com a placa de furos foi causada principalmente pela pior repetitividade e, neste aspecto, cabe ressaltar que a placa avalia o erro de posicionamento ao longo do plano (5 posições diferentes), enquanto o laser o faz ao longo de uma linha somente. A pior repetitividade certamente reflete esse ensaio

ao longo de várias linhas e a comparação com técnicas clássicas deve ser feita considerando essa diferença no procedimento do ensaio.

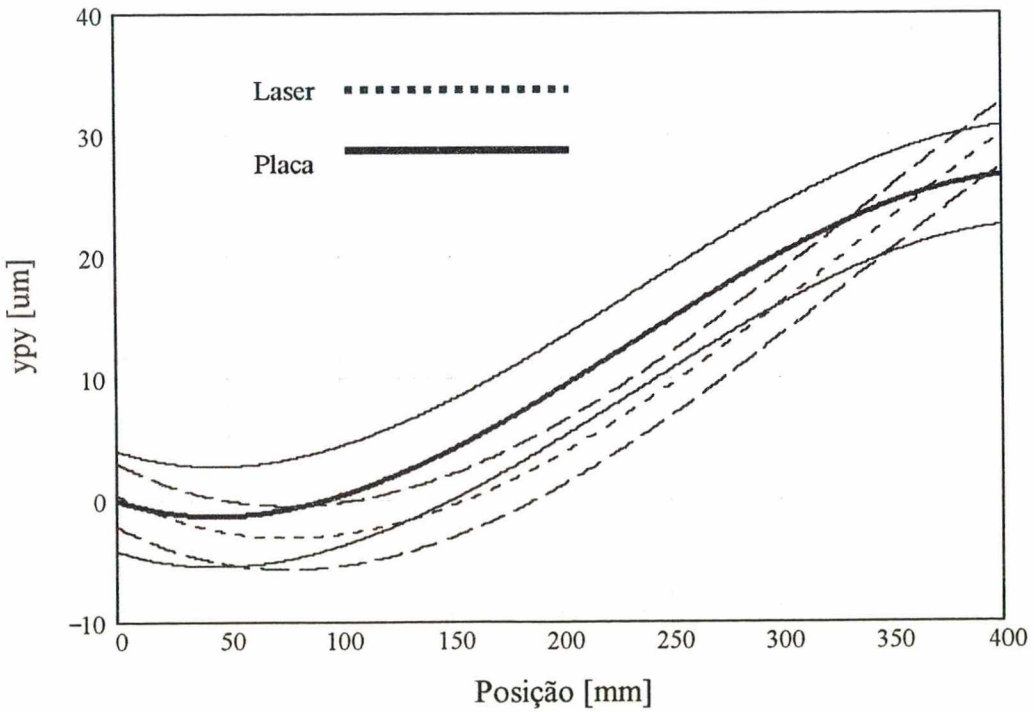
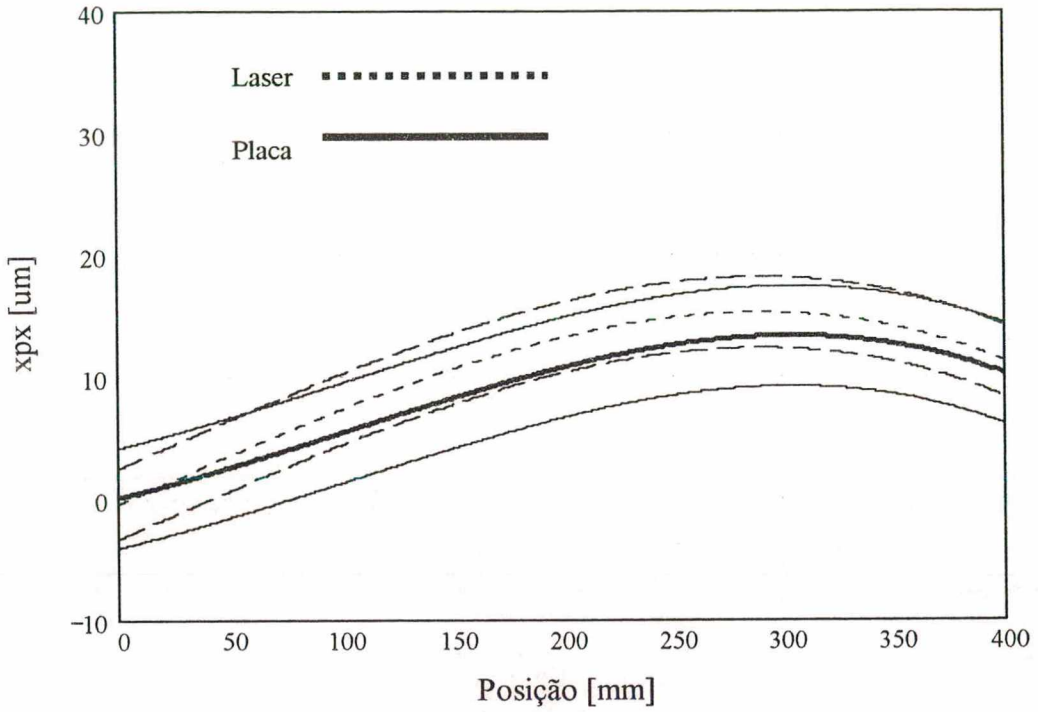


Figura 6.15 - Comparação dos resultados obtidos com a placa (plano XY) e com o laser, nos ensaios de posicionamento

b) Retilidade

A incerteza na determinação dos desvios de retilidade foi calculada com os mesmos fatores de influência considerados no cálculo da incerteza de posicionamento, podendo ser visto na figura 6.16.

Fonte de Incerteza	Incerteza [μm]	Distribuição de Probabilidade	Coefficiente de sensibilidade	Incerteza Padrão [μm]	Graus de liberdade
Repetitividade	2,0	Normal	1	1,00	9
Resolução	1,0	Retangular	1	0,58	∞
Placa	1,6	Normal	1	0,80	36
Apalpador (2D)	1,7	Normal	1	0,85	219
Coefficientes de dilatação térmica	0,8	Retangular	1	0,46	∞
Medição de temperatura	0,2	Retangular	1	0,12	∞
Varição de Temperatura	0,4	Retangular	1	0,23	∞
			Incerteza Combinada	1,7	71 (efetivo)
			Incerteza Expandida (95%)	3,4 μm	

Figura 6.16 - Balanço de Incertezas para os resultados de retilidade nos eixos X e Y

A comparação com os resultados do ensaio com a régua e comparador pode ser vista na figura 6.17. onde se observa uma baixa dispersão nos resultados e boa concordância com a régua, embora o erro de retilidade da máquina-ferramenta esteja muito pequeno, da mesma ordem da incerteza de medição das técnicas de ensaio. A obtenção de resultados favoráveis em uma condição de ensaio com um erro geométrico tão pequeno ressalta a confiabilidade do método da placa de furos para o ensaio no plano principal da máquina.

Da mesma forma que o ensaio de posicionamento, a placa avalia o erro de retilidade ao longo de 5 trajetórias ao longo do eixo X, enquanto a régua o faz ao longo de uma linha somente. Dessa forma, o ensaio com a régua está sob menor influência da repetitividade da máquina-ferramenta mas, no entanto, obtém-se informação menos completa sobre o seu real estado geométrico.

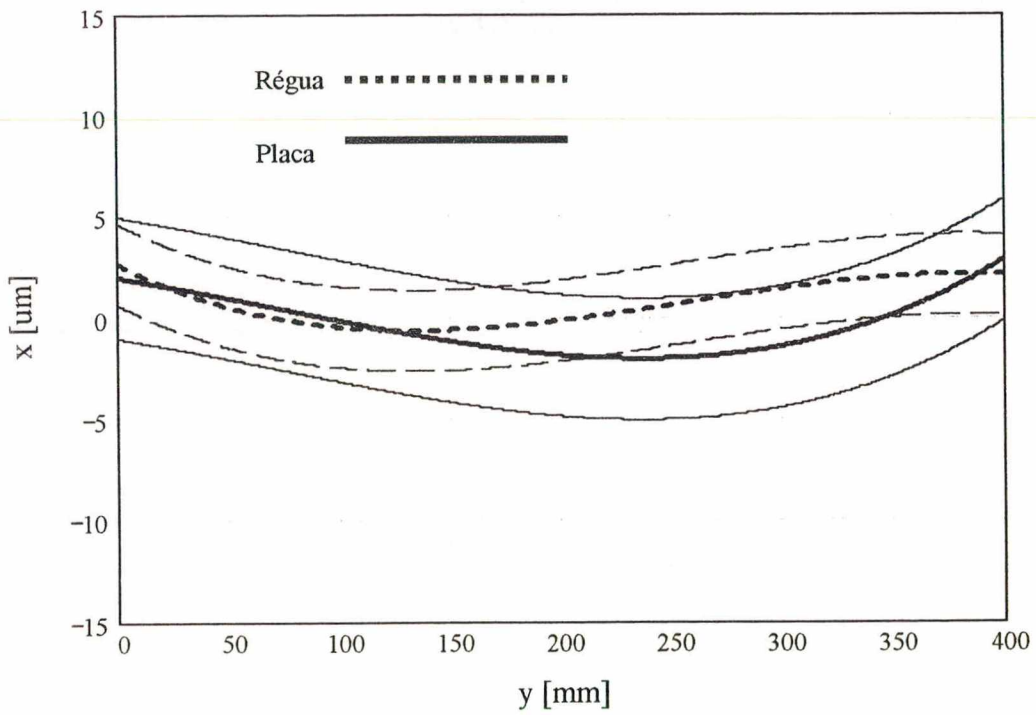
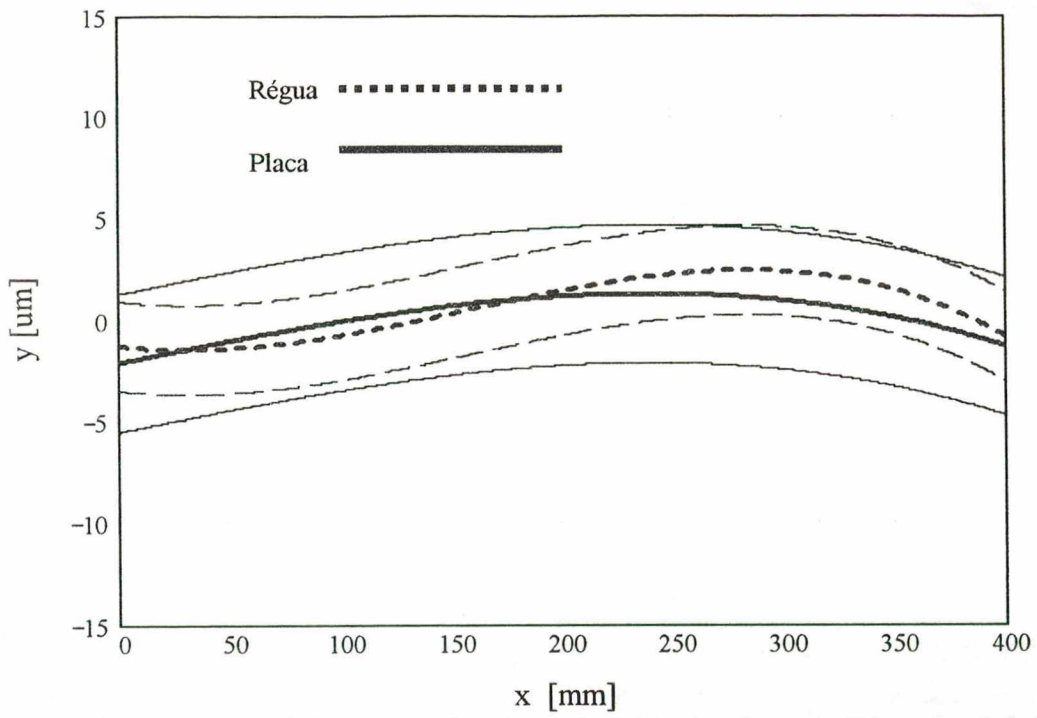


Figura 6.17 - Comparação dos resultados obtidos com a placa (plano XY) e com a régua, nos ensaios de retilidade

c) Perpendicularidade

A incerteza na determinação do erro de perpendicularidade com a placa de furos foi calculada considerando os fatores indicados na figura 6.18, podendo-se observar que nesse teste as componentes tipo B foram predominantes sobre a repetitividade (tipo A). Apesar da medição de perpendicularidade ocorrer ao longo de toda a área da placa (média de 5 linhas) a repetitividade foi muito boa.

Na comparação com o resultado de xwy obtido no ensaio com o esquadro (figura 6.19), observa-se boa concordância, apesar do erro medido ser bastante pequeno, da mesma ordem da incerteza de medição de ambos os métodos.

Fonte de Incerteza	Incerteza [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Distribuição de Probabilidade	Coefficiente de sensibilidade	Incerteza Padrão [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Graus de liberdade	
Repetitividade	4,0	Normal	1	2,00	9	
Resolução	3,3	Retangular	1	1,90	∞	
Placa	6,3	Normal	1	3,15	36	
Apalpador (2D)	6,8	Normal	1	3,42	219	
Medição de temperatura	0,9	Retangular	1	0,52	∞	
				Incerteza Combinada	4,2	168 (efetivo)
				Incerteza Expandida (95%)	8 $\mu\text{m}/\text{m}$	

Figura 6.18 - Balanço de Incertezas para os resultados de perpendicularidade entre X e Y

	Desvio de Perpendicularidade [$\mu\text{m}/\text{m}$]
Esquadro e Comparador	$8 \pm 6 \mu\text{m}$
Placa de Furos	$10 \pm 8 \mu\text{m}$

Figura 6.19 - Comparação dos resultados obtidos com a placa (plano XY) e com o esquadro, nos ensaios de perpendicularidade

Deve-se ressaltar que os desvios de posicionamento (x_{px} e y_{py}), retilineidade (x_{ty} e y_{tx}) e perpendicularidade (x_{wy}) são obtidos em uma mesma sequência de medição, simultaneamente, portanto em um mesmo estado térmico da máquina-ferramenta. A determinação das mesmas componentes de erro utilizando técnicas clássicas requer ensaios diferentes em um tempo de ensaio próximo a 10 horas, bem superior ao tempo do ensaio com a placa de furos: 1 hora.

6.2.2 Plano XZ

Com já citado quando da calibração do apalpador, a adaptação necessária para a medição da placa de furos na vertical aumentou significativamente a incerteza de apalpação, o que restringiria a sua aplicação para o ensaio geométrico. Para comprovar a ineficiência do ensaio com a placa de furos na vertical e verificar na prática o efeito da maior incerteza de apalpação nos resultados do ensaio, foram realizados ensaios com a placa de furos na vertical, nos planos XZ e YZ e resultados semelhantes foram obtidos para os dois planos, que comprovam a alta incerteza da estratégia. A seguir serão descritos os resultados obtidos no plano XZ e as mesmas análises e considerações devem ser estendidas para os resultados obtidos com o ensaio no plano YZ.

No ensaio geométrico com a placa no plano vertical XZ (figura 6.20), é possível obter as componentes de erro paramétrico:

- Erros de posicionamento x_{px} e z_{pz}
- Erros de Retilineidade x_{tz} e z_{tx}
- Erro de Perpendicularidade x_{wz}

Nesse ensaio a operação é dificultada porque a máquina-ferramenta não possui recursos de medição por coordenadas nos planos verticais. Para a determinação dos centros de cada furo da

placa todo o processamento matemático das coordenadas foi realizado fora do CNC da máquina. Além disso foi necessária a adaptação da haste horizontal de 300 mm ao apalpador para que os furos pudessem ser apalpados na vertical, o que aumenta significativamente a incerteza de apalpação, além do fato que a peça encontra-se distante da escala da máquina, incidindo os erros de Abbe.

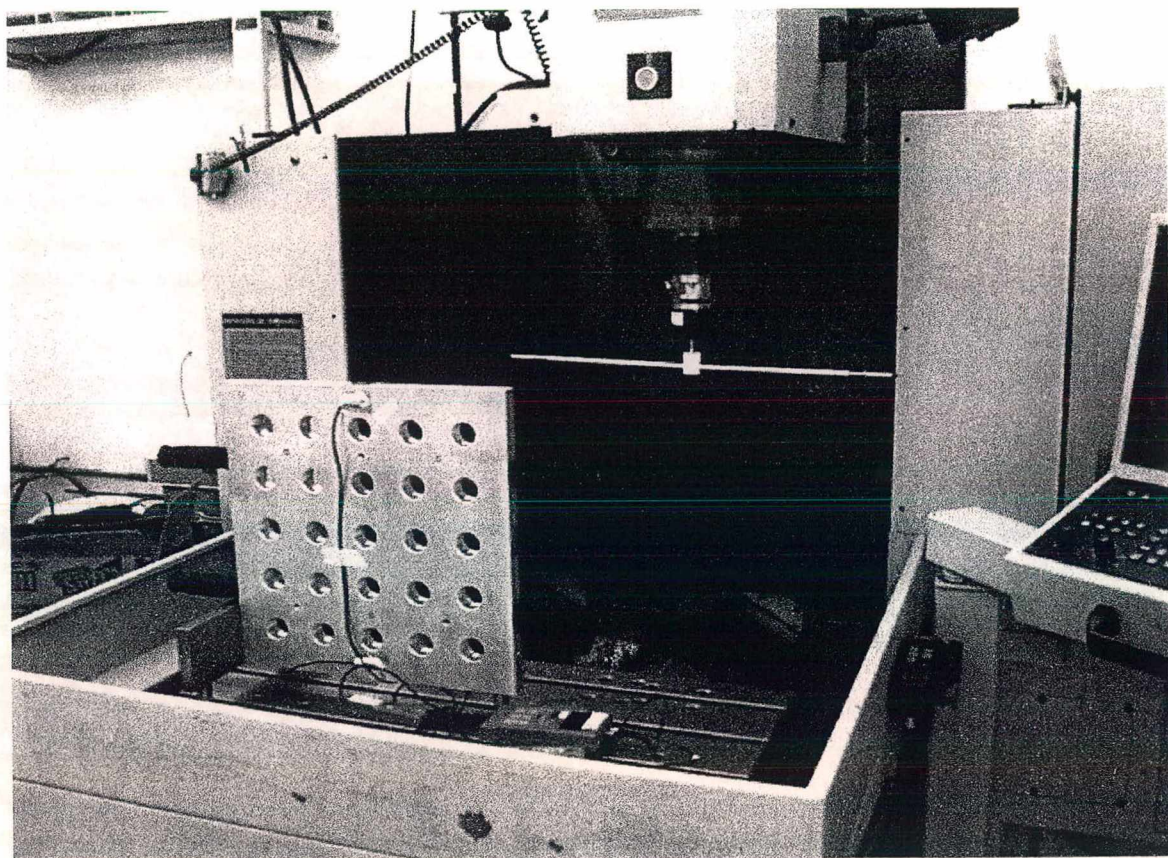


Figura 6.20 – Ensaio geométrico com a placa de furos no plano XZ

Devido a esses complicadores, o tempo de ensaio foi maior do que no ensaio com a placa colocada no plano XY. O tempo total de ensaio foi de 1,5 hora, com a placa sendo apalpada em 28 minutos. Os resultados comprovam a ineficiência esperada.

a) Posicionamento linear

As incertezas de medição de todos os ensaios com a placa na vertical foram bem superiores às obtidas com a placa no plano XY. A figura 6.21 indica o balanço de incerteza onde se percebe a incerteza de apalpação como a principal componente tipo B destacadamente, o que certamente foi o fator determinante que levou à obtenção de uma repetitividade muito pobre nos resultados.

A comparação dos erros x_{px} e y_{py} com os obtidos no ensaio com o laser (figura 6.22) refletem esse problema. Embora a tendência nos resultados do ensaio com a placa possa se aproximar aos resultados com o laser, a incerteza é bastante alta e incompatível com o grau de confiabilidade metrológica requerido para o ensaio geométrico proposto. Esse comportamento foi observado ao longo de todo o desenvolvimento experimental do trabalho e, embora algumas otimizações tenham sido implementadas nos dispositivos, não se obteve um nível de incerteza menor.

Fonte de Incerteza	Incerteza [μm]	Distribuição de Probabilidade	Coefficiente de sensibilidade	Incerteza Padrão [μm]	Graus de liberdade	
Repetitividade	8,0	Normal	1	4,00	9	
Resolução	1,0	Retangular	1	0,58	∞	
Placa	1,6	Normal	1	0,80	36	
Apalpador (2D)	5,1	Normal	1	2,26	55	
Coefficientes de dilatação térmica	0,8	Retangular	1	0,46	∞	
Medição de temperatura	0,2	Retangular	1	0,12	∞	
Varição de Temperatura	0,5	Retangular	1	0,29	∞	
				Incerteza Combinada	4.6	19 (efetivo)
				Incerteza Expandida (95%)	9 μm	

Figura 6.21 - Balanço de Incertezas para os resultados de erro de posicionamento linear nos eixos X e Z

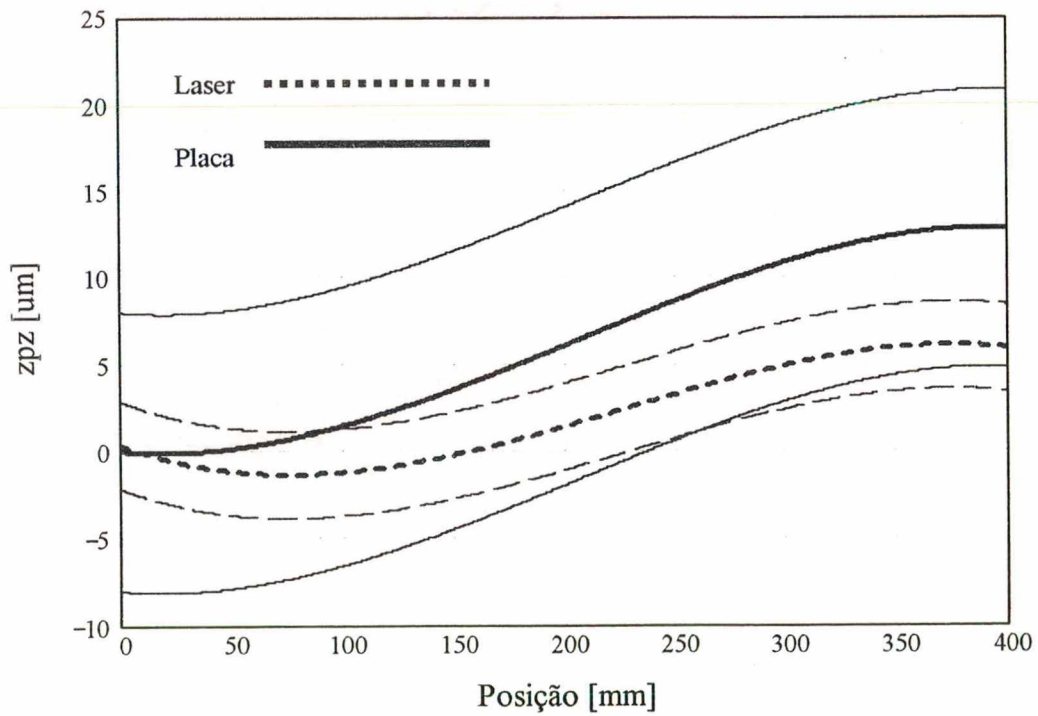
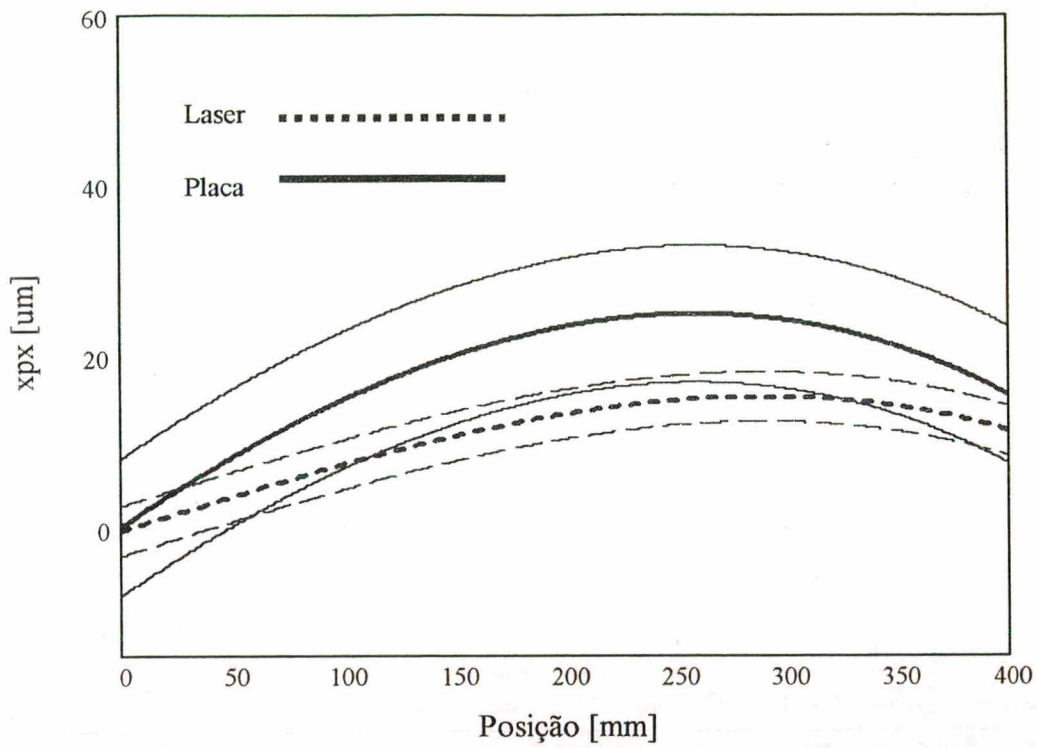


Figura 6.22 - Comparação dos resultados obtidos com a placa (plano XZ) e com o laser para os ensaios de posicionamento

b) Retilidade

Da mesma forma que no ensaio com o posicionamento, a incerteza determinada nos resultados x_{ty} e y_{tx} é significativa, como indica a figura 6.23. A comparação de resultados com o método clássico da régua com o comparador (figura 6.24) torna-se ainda mais difícil do que nos ensaios anteriores, em vista do erro de retilidade da máquina ser muito pequeno, inferior à incerteza de medição do ensaio com a placa. Percebe-se uma alta dispersão nos resultados e baixa concordância com os resultados do ensaio com a régua.

Fonte de Incerteza	Incerteza [μm]	Distribuição de Probabilidade	Coefficiente de sensibilidade	Incerteza Padrão [μm]	Graus de liberdade
Repetitividade	4,8	Normal	1	2,40	9
Resolução	1,0	Retangular	1	0,58	∞
Placa	1,6	Normal	1	0,80	36
Apalpador (2D)	5,1	Normal	1	2,26	55
Coefficientes de dilatação térmica	0,8	Retangular	1	0,46	∞
Medição de temperatura	0,2	Retangular	1	0,12	∞
Varição de Temperatura	0,5	Retangular	1	0,29	∞
			Incerteza Combinada	2,78	86 (efetivo)
			Incerteza Expandida (95%)	6 μm	

Figura 6.23 - Balanço de Incertezas para os resultados de retilidade nos eixos X e Z

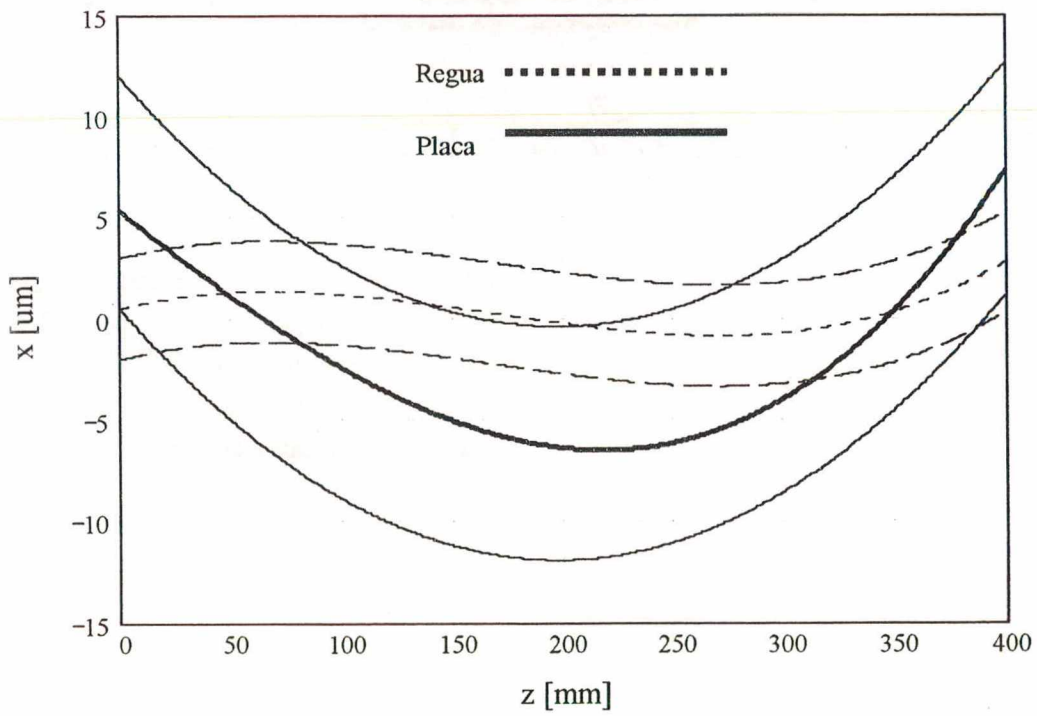
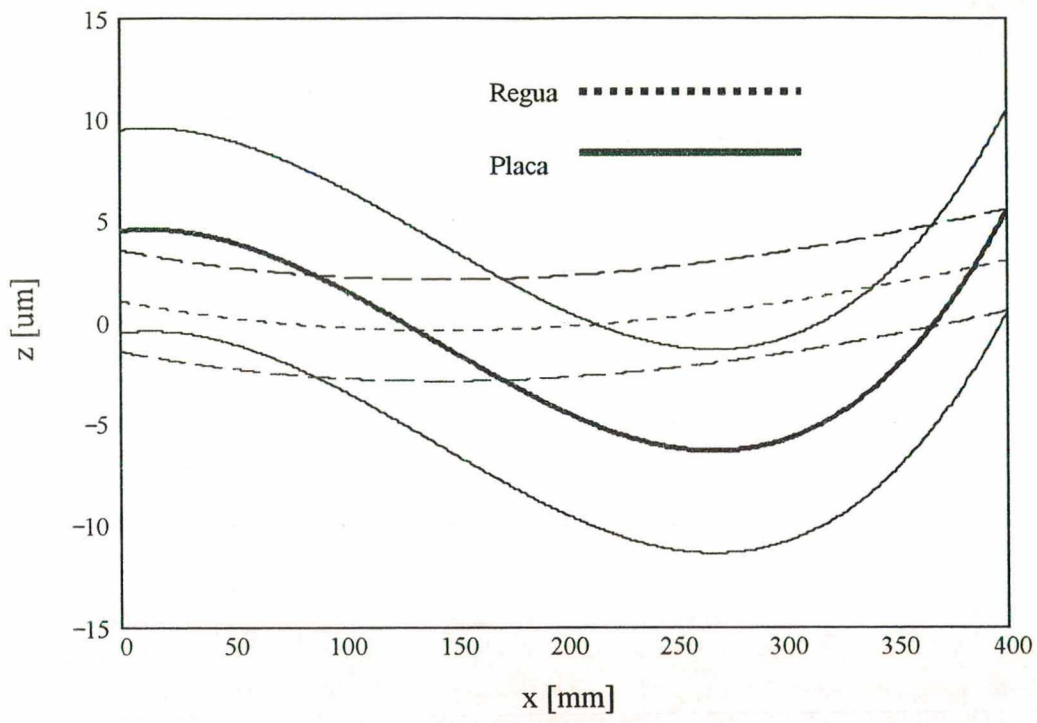


Figura 6.24 - Comparação dos resultados obtidos com a placa (plano XZ) e com a régua, para os ensaios de retilidade

c) Perpendicularidade

Também devido à incerteza de apalpação, os resultados do ensaio de perpendicularidade entre os eixos X e Z apresentaram incerteza bastante alta, como indica a figura 6.25, incompatível com o grau de confiabilidade metrológica necessário ao ensaio. Quando comparado com o ensaio com o esquadro e comparador, os resultados até se aproximam e há uma superposição das incertezas (figura 6.26), mas a incerteza do ensaio com a placa na vertical não permite validar o resultado.

Fonte de Incerteza	Incerteza [$\mu\text{m/m}$]	Distribuição de Probabilidade	Coefficiente de sensibilidade	Incerteza Padrão [$\mu\text{m/m}$]	Graus de liberdade	
Repetitividade	11,0	Normal	1	5,50	9	
Resolução	3,3	Retangular	1	1,90	∞	
Placa	6,3	Normal	1	3,15	36	
Apalpador (2D)	18,0	Normal	1	9,00	219	
Medição de temperatura	0,9	Retangular	1	0,52	∞	
				Incerteza Combinada	11,18	111 (efetivo)
				Incerteza Expandida (95%)	22 $\mu\text{m/m}$	

Figura 6.25 - Balanço de Incertezas para os resultados de perpendicularidade entre X e Z

	Desvio de Perpendicularidade [$\mu\text{m/m}$]
Esquadro e Comparador	$75 \pm 6 \mu\text{m}$
Placa de Furos	$54 \pm 22 \mu\text{m}$

Figura 6.26 - Comparação dos resultados obtidos com a placa (plano XZ) e com o esquadro, para os ensaios de perpendicularidade

Por apresentar as mesmas dificuldades do ensaio realizado no plano XZ, os resultados de medição no plano YZ apresentaram as mesmas características em todos os experimentos realizados.

6.3 Ensaio com o Padrão Vertical

Nos ensaios com o padrão vertical, as esferas de alinhamento e as esferas de referência foram apalpadas em 5 pontos (4 no equador e 1 no pólo) para a determinação da posição dos seus centros. Após os procedimentos de alinhamento do padrão, as posições das esferas de referência foram determinadas e comparadas com as posições previamente calibradas. Ao longo dos testes as temperaturas do padrão e da máquina-ferramenta foram monitoradas para as compensações de dilatação térmica.

Operacionalmente, os ensaios foram sempre realizados com o padrão vertical colocado no centro da área de trabalho no plano XY, mesmo local onde os ensaios de posicionamento, reticidade e perpendicularidade haviam sido realizados com os métodos clássicos (figura 6.27). A sequência de medição constou de 3 ciclos de medição em ida e volta, a partir da esfera inferior, sendo verificadas 5 posições ao longo do eixo Z. Para isso, foram utilizadas as configurações de montagem combinando as bases 1, 1+3, 1+3+4, 1+3+4+2 e 1+3+4+5. Para o manuseio dos padrões tomou-se o cuidado de utilizar luvas de material isolante térmico e evitar impactos na remontagem. As velocidades de aproximação e apalpação foram mantidas constantes ao longo de todas as medições.

Os tempos dos ensaios foram monitorados para comparações operacionais e econômicas com técnicas clássicas de ensaio. O tempo médio para o ensaio completo da fresadora com o padrão vertical foi definido em 1 hora com a apalpação do padrão sendo realizada em 25 minutos.

Como já explicado (Cap. 5) cada medição permite avaliar, simultaneamente, os erros de posicionamento linear (zpz), reticidade nas direções X (ztx) e Y (zty), além da perpendicularidade entre o eixo Z e os eixos X (xwz) e Y (ywz). As incertezas de medição na determinação desses erros foram calculadas, e os resultados obtidos com o padrão foram comparados com aqueles obtidos com os métodos clássicos, como demonstrados a seguir.

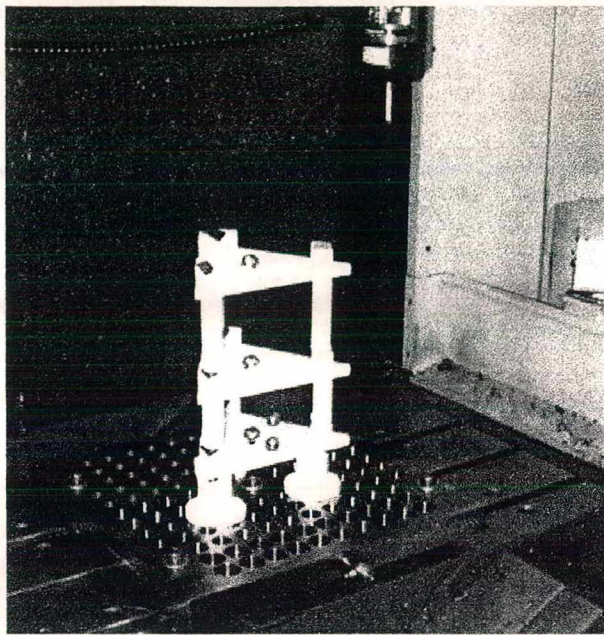


Figura 6.27 – Ensaio geométrico com o padrão vertical desmontável

a) Posicionamento linear

A determinação do erro de posicionamento z_{pz} foi afetada pelas fontes de incerteza indicadas na figura 6.28, resultando em uma incerteza expandida bem menor do que a incerteza obtida com a placa de furos nos planos XZ e YZ. Essa menor incerteza decorre dos fatos de que, além do ensaio ser realizado sem aquela haste de adaptação no apalpador, o padrão está posicionado na mesma linha do eixo árvore/apalpador, fazendo o ensaio obedecer ao princípio de Abbe. As vantagens metrológicas dessa concepção de padrão e ensaio foram expressivas, em relação à placa de furos na vertical. A utilização de um apalpador de medição medidor certamente permitiria obter incertezas ainda menores, em todos os ensaios com o padrão vertical.

As principais fontes de incerteza nesse ensaio são o próprio padrão, a repetitividade (componente tipo A) e a incerteza de apalpação, já que agora se utiliza a incerteza 3D do apalpador, pois as 3 direções de apalpação são necessárias para a medição das esferas de referência. A repetitividade ao longo dos 3 ensaios, realizados em momentos distintos, manteve-se bem estável dentro de $\pm 2,5 \mu\text{m}$. Como o tempo de medição é curto, minimizam-se as influências térmicas sobre o padrão e sobre a máquina-ferramenta.

Ao contrário do que ocorreu nos ensaios com a placa de furos, os resultados com o padrão vertical apresentaram uma excelente concordância com os resultados obtidos nos ensaios com o laser interferométrico, como se pode observar na figura 6.29, apesar do erro de posicionamento no eixo Z ser baixo. Para essa boa concordância contribuiu, além da menor incerteza do ensaio com padrão vertical, o fato de o padrão ser posicionado no mesmo local da máquina-ferramenta onde o ensaio com o laser havia sido realizado, o que foi impossível com o ensaio com a placa de furos.

Fonte de Incerteza	Incerteza [μm]	Distribuição de Probabilidade	Coefficiente de sensibilidade	Incerteza Padrão [μm]	Graus de liberdade
Repetitividade	2,50	Normal	1	1,50	5
Resolução	1,00	Retangular	1	0,58	∞
Padrão vertical	2,20	Normal	1	1,10	54
Apalpador (3D)	2,50	Normal	1	1,26	58
Coefficientes de dilatação térmica	0,18	Retangular	1	0,46	∞
Medição de temperatura	0,20	Retangular	1	0,12	∞
Varição de Temperatura	0,40	Retangular	1	0,29	∞
			Incerteza Combinada	2,04	78 (efetivo)
			Incerteza Expandida (95%)	4 μm	

Figura 6.28 - Cálculo da Incerteza de posicionamento no ensaio com o padrão vertical

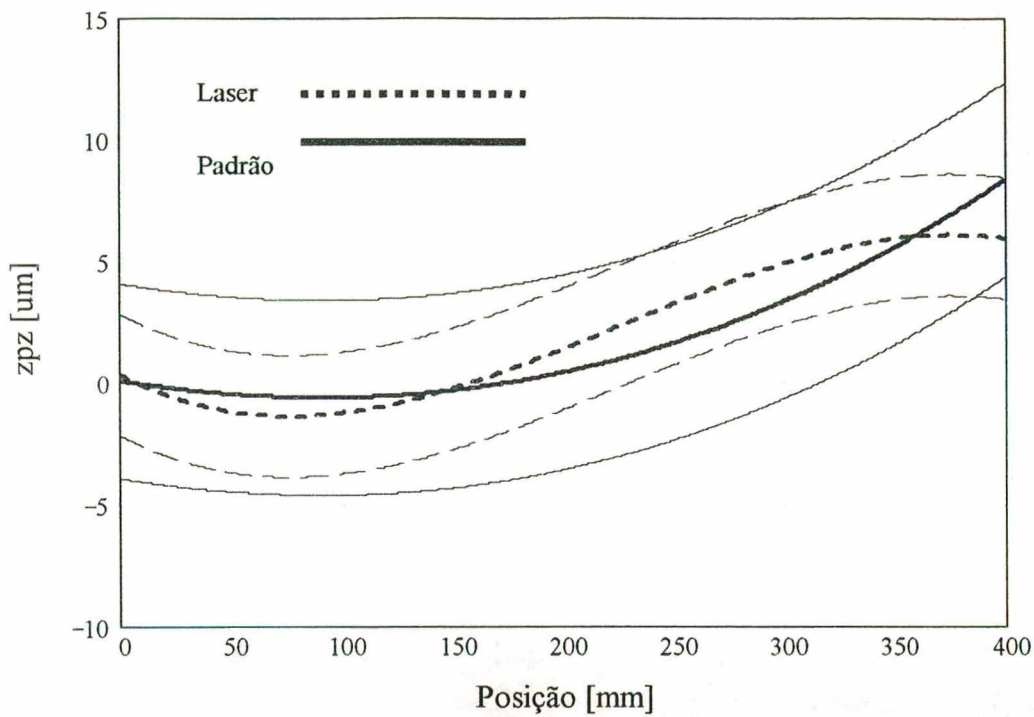


Figura 6.29 - Comparação dos resultados obtidos com padrão vertical e com o laser, nos ensaios de posicionamento

A menor incerteza do ensaio de posicionamento no eixo Z e a boa concordância com o laser interferométrico fazem do padrão vertical uma opção válida metrológica e operacionalmente para esse ensaio, que havia sido invalidada pelos maus resultados obtidos com a placa de furos. As vantagens operacionais em relação ao laser são significativas. Os resultados semelhantes vistos na figura 6.29 foram obtidos em 1/3 do tempo gasto no ensaio com o laser.

b) Retilidade

Os ensaios de retilidade com o padrão vertical apresentaram resultados e incertezas (figura 6.30) semelhantes ao ensaio com a régua de granito. O fato do erro de retilidade da máquina-ferramenta ser muito pequeno em ambas as direções (z_{tx} e z_{ty}), até da mesma ordem da incerteza de medição dos métodos, proporcionou uma avaliação do método em uma situação limite. Mesmo assim os resultados (figura 6.32) indicaram a mesma tendência observada nos ensaios com a régua e o apalpador, com incertezas da mesma ordem.

Fonte de Incerteza	Incerteza	Distribuição de Probabilidade	Coefficiente de sensibilidade	Incerteza Padrão [μm]	Graus de liberdade
Repetitividade	2,0 μm	Normal	1	1,00	17
Resolução	1,0 μm	Retangular	1	0,58	∞
Padrão vertical	2,2 μm	Normal	1	1,10	54
Apalpador (3D)	2,5 μm	Normal	1	1,25	58
Coefficientes de dilatação térmica	0,18 μm	Retangular	1	0,46	∞
Medição de temperatura	0,2 μm	Retangular	1	0,12	∞
Varição de Temperatura	0,4 μm	Retangular	1	0,29	∞
Incerteza Combinada				1,74	118 (efetivo)
Incerteza Expandida (95%)				3,3 μm	

Figura 6.30 - Cálculo da incerteza nos ensaios de retilidade com o padrão vertical

Tanto na determinação dos erros de posicionamento como na determinação dos erros de retilidade, a incerteza na medição das esferas de alinhamento possui uma influência de 2ª ordem sobre as componentes de erro calculadas, como mostra a figura 6.31. No entanto, essa incerteza influencia de forma significativa na determinação do erro de perpendicularidade, como será visto a seguir.

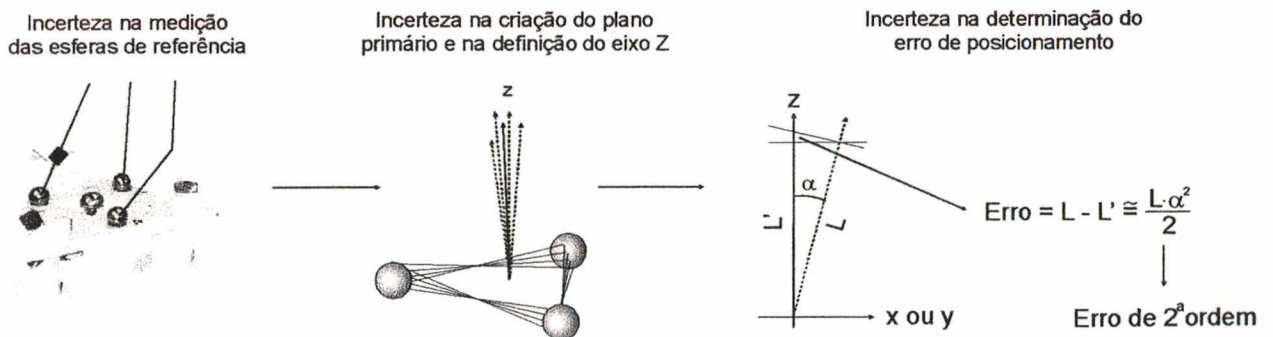


Figura 6.31 - Influência da incerteza de medição das esferas de alinhamento, no erro de posicionamento

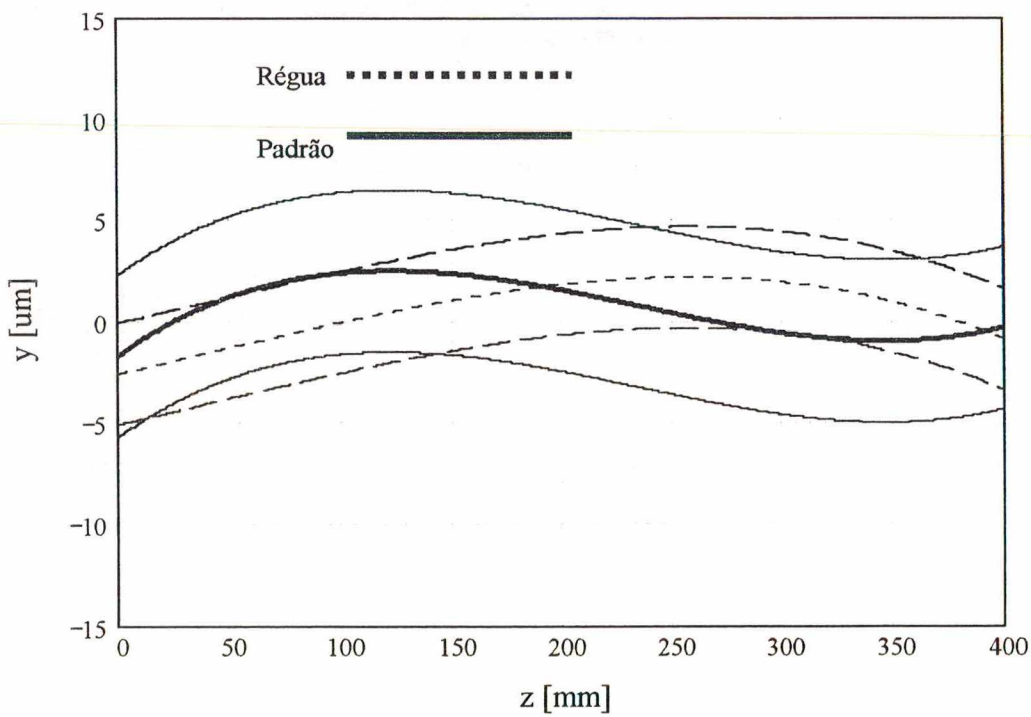
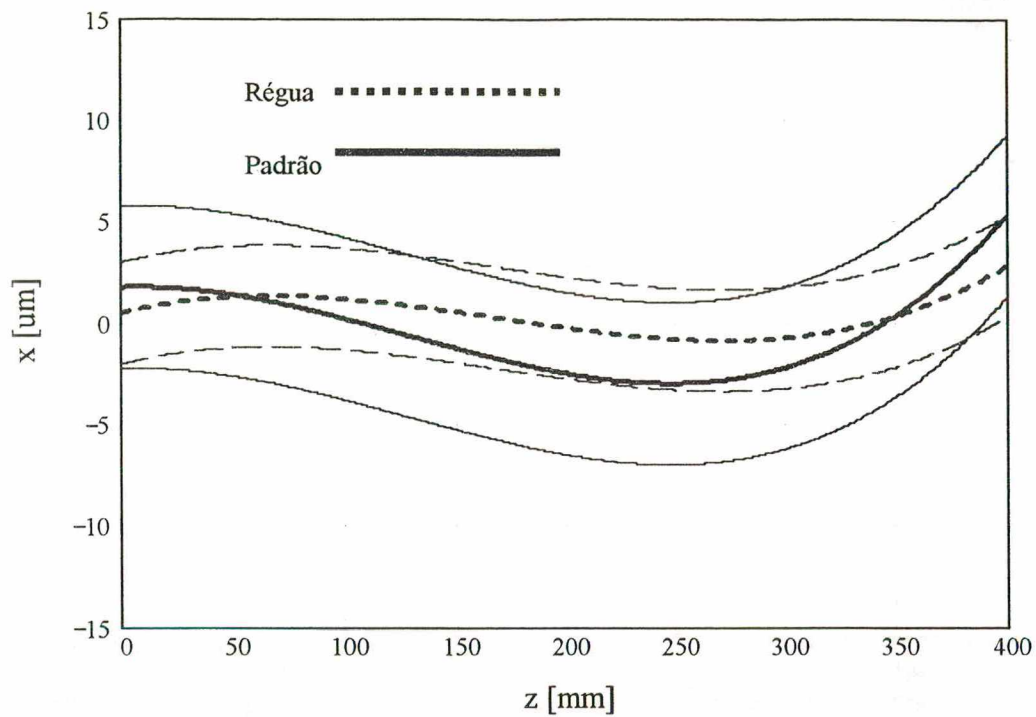


Figura 6.32 - Comparação dos resultados obtidos com padrão vertical e com a régua, nos ensaios de retlineidade

c) Perpendicularidade

A incerteza na medição das esferas de alinhamento provoca uma incerteza na determinação do plano primário de alinhamento e, conseqüentemente, da definição do eixo Z do sistema de coordenadas local. Como a determinação do erro de perpendicularidade utiliza o eixo Z local como referência, essa incerteza acaba influenciando, em 1ª ordem, o resultado do erro de perpendicularidade. A figura 6.33 ilustra esse problema.

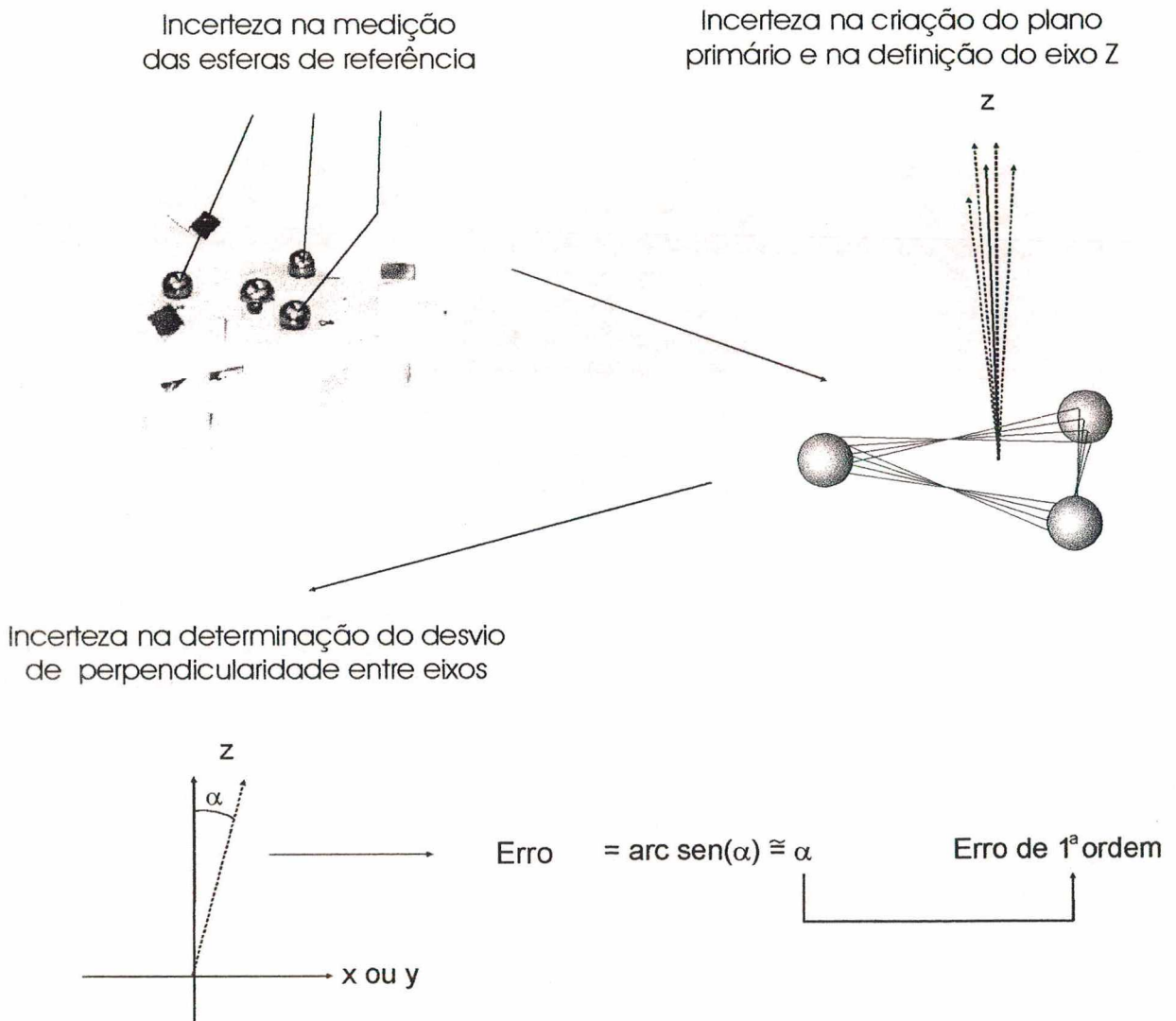


Figura 6.33 – Influência da incerteza de medição das esferas de alinhamento, no erro de perpendicularidade

O principal causador dessa incerteza é o apalpador e sua incerteza 3D ($\pm 2,5 \mu\text{m}$), que leva a uma repetitividade pobre. A diminuição do nível de incerteza neste ensaio requereria uma incerteza de apalpação de $\pm 1 \mu\text{m}$, obteníveis em apalpadores de máquinas de medir por coordenadas e em máquinas-ferramenta com apalpadores medidores.

Fonte de Incerteza	Incerteza	Distribuição de Probabilidade	Coefficiente de sensibilidade	Incerteza Padrão [$\mu\text{m}/\text{m}$]	Graus de liberdade	
Repetitividade	8 $\mu\text{m}/\text{m}$	Normal	1	4,00	17	
Resolução	2 $\mu\text{m}/\text{m}$	Retangular	1	1,15	∞	
Padrão	8 $\mu\text{m}/\text{m}$	Normal	1	4,00	54	
Apalpador (3D)	10 $\mu\text{m}/\text{m}$	Normal	1	5,00	58	
Medição de temperatura	1 $\mu\text{m}/\text{m}$	Retangular	1	0,60	∞	
				Incerteza Combinada	7,5	113 (efetivo)
				Incerteza Expandida (95%)	15 $\mu\text{m}/\text{m}$	

Figura 6.34 - Cálculo da incerteza nos ensaios de perpendicularidade com o padrão vertical

A figura 6.35 mostra a comparação do resultado obtido com o esquadro em comparação aos resultados obtidos com o padrão vertical. As tendências nos resultados se aproximam, tanto no xwz como no ywz, mas a incerteza do resultado com o padrão vertical é significativamente mais alta da que no método clássico.

	Desvio de Perpendicularidade [$\mu\text{m}/\text{m}$]
Esquadro e Comparador	$75 \pm 6 \mu\text{m}$
Padrão Vertical	$87 \pm 15 \mu\text{m}$

a) Desvio de perpendicularidade entre os eixos X e Z

	Desvio de Perpendicularidade [$\mu\text{m}/\text{m}$]
Esquadro e Comparador	$25 \pm 6 \mu\text{m}$
Padrão Vertical	$35 \pm 15 \mu\text{m}$

b) Desvio de perpendicularidade entre os eixos Y e Z

Figura 6.35 - Comparação dos resultados obtidos com padrão vertical e com o esquadro, nos ensaios de perpendicularidade

6.4 Correção Eletrônica da Máquina-ferramenta testada

Os ensaios com a placa no plano principal da Máquina-Ferramenta (XY) permitiram determinar, dentre outros, os erros de posicionamento linear nos eixos X e Y. Para verificar de forma direta a influência desses erros na peça usinada e, principalmente, para verificar a eficiência da correção eletrônica da máquina, realizada com base nos erros determinados no ensaio com a placa, o experimento visualizado na figura 6.36 foi conduzido.

Uma placa de aço com vários furos foi usinada, com o acabamento dos furos sendo realizado por mandrilamento. Parte dos furos da placa foi usinada com a máquina em sua condição original e parte dos furos foi usinada após a alteração do parâmetro de correção eletrônica no CNC da máquina. Como já citado neste trabalho, o controlador Heidenhain TNC360 permite a correção linear de erros de posicionamento e, desta forma, foi determinada a melhor reta (mínimos quadrados) que se ajusta às curvas de erros levantadas nos ensaios com a placa e calculado o

coeficiente angular para a compensação de sua inclinação. Esse parâmetro foi introduzido no controlador de forma que parte dos furos fosse usinada com a correção eletrônica.

A placa usinada foi, então, medida em uma máquina de medir por coordenadas, onde se avaliou a posição dos centros dos furos em relação às suas posições nominais. Pela seqüência de usinagem empreendida foi possível avaliar o efeito da correção eletrônica sobre o erro de posicionamento no eixo X da máquina-ferramenta, que pode ser observado na figura 6.37.

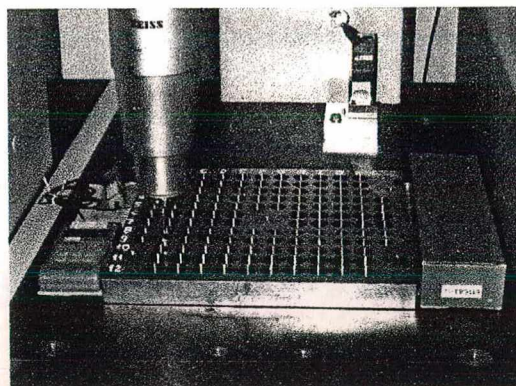
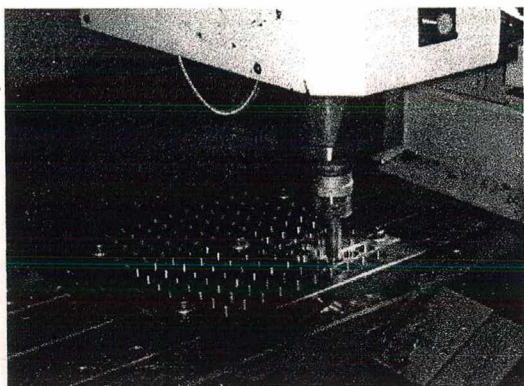


Figura 6.36 - Usinagem e Medição de uma placa de furos para a verificação da eficiência da correção eletrônica da máquina-ferramenta

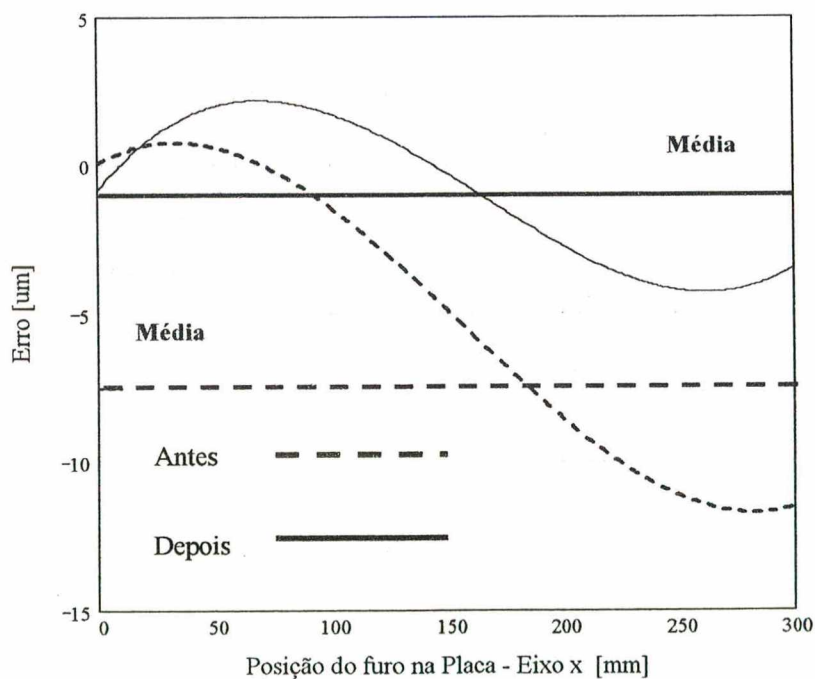


Figura 6.37 - Melhoria na posição dos furos obtida com a correção eletrônica do eixo X da Máquina-ferramenta

Os resultados permitem observar que os erros encontrados nas posições dos furos usinados antes da correção refletem os erros que haviam sido determinados nos ensaios geométricos com a placa de furos. Os erros na posição dos furos usinados após a correção no CNC foram reduzidos significativamente, ficando como resíduo erros devidos, principalmente, ao comportamento não linear da curva de erros. Um controlador com recursos para a correção de erros ponto a ponto teria permitido redução de erros ainda maior. Outros fatores de incerteza como efeitos térmicos sobre a peça e a máquina-ferramenta foram co-responsáveis pelos erros residuais.

Esses resultados confirmam a eficiência da correção de erros ao reduzir em 75% os erros de posicionamento e também comprovam a confiabilidade metrológica do ensaio com a placa de furos, com uma grande praticidade e rapidez no ensaio. O ensaio que permitiu levantar os erros para a correção implementada (placa de furos no plano horizontal) demora cerca de 1 hora. São qualidades importantes para motivar os usuários a empreenderem ensaios mais freqüentes em suas máquinas.

Em todos os ensaios realizados sobre a máquina-ferramenta, seja com métodos clássicos ou com a metodologia propostas, os tempos de ensaio foram monitorados e as implicações econômicas da aplicação dos métodos foram analisadas para que comparações econômicas e operacionais fossem realizadas. Como já citado neste trabalho, de pouco adianta um método de ensaio ser altamente confiável metrologicamente se apresenta um alto custo ou dificuldades operacionais que desmotivem sua utilização. Essas análises metrológica, operacional e econômica encontram-se no capítulo 7, junto às conclusões sobre a pesquisa desenvolvida.

CAPÍTULO 7 - ANÁLISES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo sintetiza a comparação metrológica entre métodos de ensaio descrita no capítulo 6, adicionando os aspectos operacional e econômico das técnicas pesquisadas neste trabalho. Essa análise retrospectiva fundamenta os argumentos para a validação dos métodos de ensaio desenvolvidos neste trabalho, indica as principais limitações a serem superadas, e destaca suas contribuições técnico-científicas.

7.1 Análise Metrológica

A análise metrológica dos resultados considera a incerteza com que os resultados foram obtidos, em comparação aos resultados e incertezas obtidos nos ensaios geométricos com a instrumentação clássica. É importante ressaltar que a máquina-ferramenta utilizada para os ensaios é nova e apresenta uma condição de conservação muito boa, além de estar razoavelmente ajustada. Essa condição está bem longe do estado normal de máquinas-ferramenta comumente encontradas nos parques fabris, como foi indicado no capítulo 2. Essa realidade fez com que a validação metrológica das técnicas de ensaio desenvolvidas ocorresse em uma situação bastante exigente.

Para maior clareza, a análise do método de ensaio com padrões corporificados foi subdividida de acordo com o padrão utilizado para a pesquisa do sistema QUALIMAQ.

a) Placa de furos

As opções de geometria e material da placa de furos mostraram-se adequadas, não comprometendo a aplicação do método. A placa com furos cilíndricos mostrou-se um padrão corporificado estável, de fabricação fácil e, conseqüentemente, custo atrativo. A configuração geométrica mais simples facilita o ensaio, diminuindo o tempo de medição e, conseqüentemente, minimiza as variações de temperatura durante os ensaios.

A opção pelo Alumínio como material do padrão mostrou-se compatível com o nível de incerteza requerido para o ensaio, com vantagens metrológicas e operacionais em relação ao aço. O menor peso, a resistência à oxidação e a menor possibilidade de distorção térmica justificam essa afirmação. Como já citado, o tempo de apalpação da placa é curto o bastante para que oscilações de temperatura não causem alterações dimensionais na placa. Dessa forma, o ensaio é realizado numa temperatura estável e a dilatação da placa e da máquina-ferramenta são compensadas a partir das medições de temperatura durante os ensaios, e esse efeito sistemático é corrigido. A placa foi calibrada 3 vezes ao longo do trabalho (intervalo de 2 anos), em uma máquina de medir por coordenadas e os resultados indicaram que a posição dos centros dos furos variou dentro de $\pm 1,5 \mu\text{m}$, portanto abaixo da incerteza do processo de calibração.

Em relação à utilização da placa de furos nos 3 planos de trabalho da máquina-ferramenta, os resultados foram muito distintos entre si, mas correspondem ao previsto metrologicamente. A utilização da placa de furos para os ensaios geométricos realizados no **plano principal (horizontal)** da máquina-ferramenta mostrou-se metrologicamente confiável, para a determinação dos erros de posicionamento linear, retilinearidade e perpendicularidade. Em todos os ensaios realizados nesse plano, os resultados obtidos apresentaram boa concordância com os ensaios realizados com métodos clássicos, bem como incertezas semelhantes.

A comparação entre os resultados obtidos com os métodos clássicos e com a placa de furos, em si, não expressa uma vantagem incontestável das técnicas clássicas. Os procedimentos de ensaio são distintos e a maior incerteza apresentada com a placa de furos pode vir a ser, ao final, uma expressão mais realista da condição da máquina-ferramenta. O fato da placa de furos avaliar os erros geométricos ao longo de uma área da máquina-ferramenta faz com que a variação dos erros ao longo dessa área aumente a componente de incerteza tipo A. Ao final, essa componente de incerteza inflaciona a incerteza nos resultados dos ensaios com a placa de furos, mas essa expressão é mais realista do estado geométrico da máquina. Os métodos clássicos de ensaio (laser, esquadro, régua) fazem essa avaliação ao longo de uma linha somente, ficando menos influenciadas pela variação dos erros ao longo da área de trabalho das máquinas, o que contribui para uma menor incerteza de medição do ensaio.

Ao longo de todos os ensaios realizados no plano horizontal, a repetitividade foi a componente de incerteza predominante, o que acabou por anular uma vantagem inicial da menor incerteza tipo B dos métodos clássicos, em relação à incerteza tipo B do ensaio com a placa de furos. A boa repetitividade dos erros ao longo das linhas e colunas da placa abre a possibilidade de

serem utilizados um número menor de furos, o que diminui o tempo de ensaio e a conseqüente influência de variações de temperatura.

A figura 6.1 mostra uma comparação mais direta do laser com a placa de furos no ensaio de posicionamento nos eixos X e Y, ao se considerar na placa somente os furos centrais, nessas duas direções, que correspondem às linhas onde os ensaios de posicionamento com o laser. Observa-se uma melhor concordância, em relação à média das 5 linhas de furos na placa.

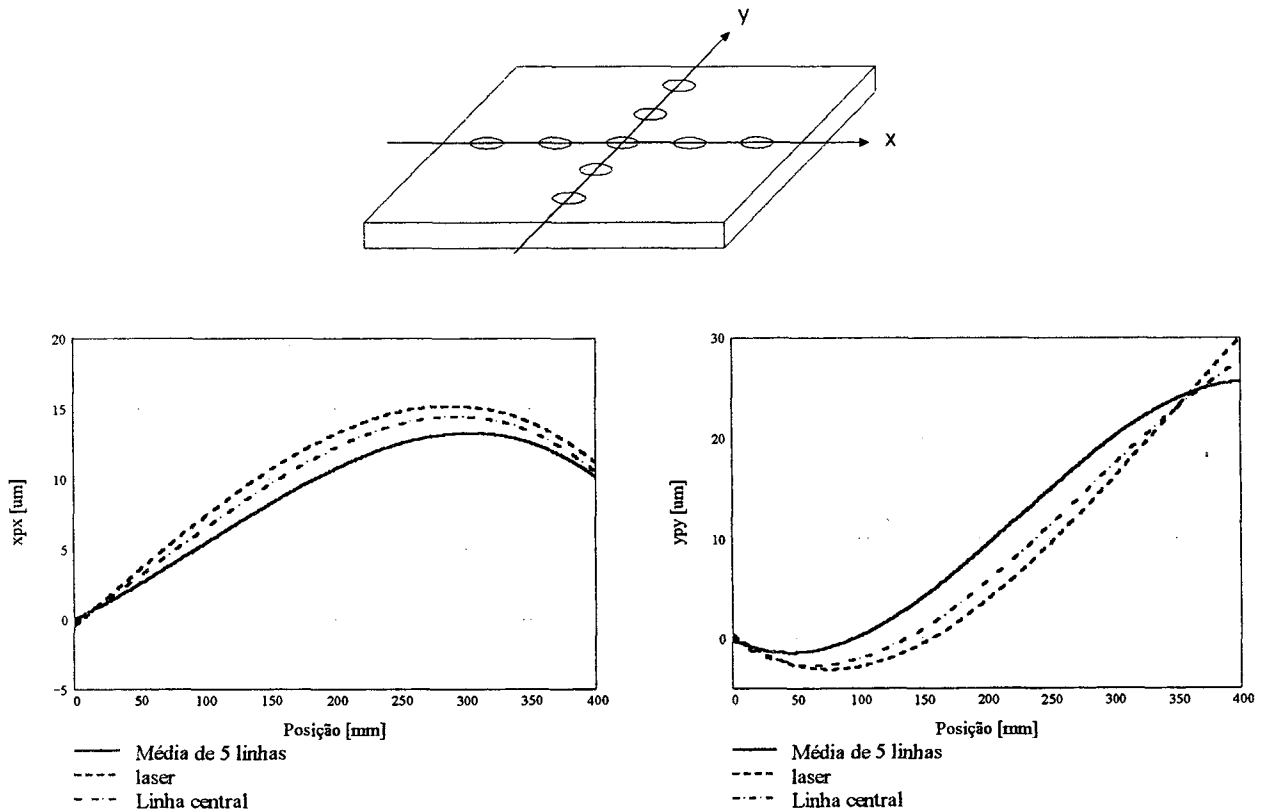


Figura 7.1 – Comparação dos resultados do ensaio de posicionamento realizados com o laser interferométrico e com a placa de furos, considerando as linhas de furos centrais da placa

Ao contrário dos ensaios com a placa de furos no plano principal, e como previsto, nos **planos verticais (XZ e YZ)** os resultados foram ruins e a incerteza de apalpação foi o fator predominante na composição da incerteza do ensaio, comprometendo a aplicação da placa de furos. A longa haste horizontal, acoplada a um apalpador que não foi projetado para essa adaptação, foi a causa de uma alta incerteza de apalpação, que levou a uma baixa repetitividade

nos resultados e que, ao final, provocou uma incerteza de medição incompatível com as exigências. O fato da placa de furos ter que ser colocada tão longe da coluna do eixo Z também é um fator crítico para o aumento de incerteza. Em todos os ensaios observou-se uma repetitividade pobre, apesar da tendência nos resultados, em alguns ensaios, ter se aproximado dos resultados com técnicas clássicas.

Ao final, pode-se afirmar que a placa de furos é aplicável para o ensaio dos eixos X e Y de máquinas-ferramenta de pequeno e médio portes (até 1 m de eixo), com incerteza de posicionamento linear mínima de $\pm 5 \mu\text{m}$. Com essa característica, esse método de ensaio é aplicável a uma ampla faixa de máquinas-ferramenta existente no mercado.

A previsível deficiência da placa de furos para o ensaio dos planos verticais da máquina foi atendida pela aplicação do padrão vertical desmontável, como descrito a seguir. Dessa forma, o sistema QUALIMAQ é composto pela placa de furos para o ensaio no plano principal da máquina e pelo padrão vertical, para o ensaio dos outros planos.

b) Padrão vertical

Os resultados obtidos com o padrão vertical desmontável ao longo do trabalho foram bastante positivos, comprovando a eficiência da montagem cinemática na remontagem de dispositivos, e abrem a possibilidade quanto à utilização dessa configuração geométrica para o ensaio de Máquinas multi-eixos. O tempo de ensaio é bastante reduzido e a flexibilidade com que a sua configuração pode ser alterada permite a sua aplicação para o ensaio de máquinas de diferentes dimensões. O padrão pode ser reprojetoado para verificar não somente o eixo vertical, mas a incerteza 3D de máquinas. O fato de o ensaio obedecer ao princípio de Abbe (mensurando e escala de medição alinhados) é uma outra virtude do método.

A necessidade de manuseio do padrão para as montagens e remontagens requer cuidados quanto à transmissão de calor necessitando, entre outros cuidados, de luvas de material isolante térmico e um local adequado para a colocação das bases triangulares no momento do ensaio, para evitar a proximidade com fontes de calor. Termômetros de contato foram utilizadas nas bases para as compensações de dilatação térmica.

A incerteza obtida nos ensaios de posicionamento e retilidade foi da mesma ordem dos ensaios realizados com métodos clássicos, bem como a tendência dos resultados foi semelhante, embora o eixo Z estivesse muito bem ajustado quanto a esses erros. A avaliação da máquina na mesma posição em que os ensaios com as técnicas clássicas foram realizados contribui para essa concordância nas tendências.

A sua utilização para a determinação da perpendicularidade é restrita em função da incerteza de apalpação, que provoca erros de 1ª ordem. Nos ensaios de posicionamento linear e retilidade, essa incerteza é de 2ª ordem, com pouca influência sobre os resultados. A utilização de apalpadores com menor incerteza (já existentes no mercado) certamente viabiliza a utilização do padrão desmontável para esse ensaio bem como reduzirá a incerteza para os demais.

Ao longo do período de testes (8 meses) o padrão apresentou boa estabilidade dimensional, verificada nas 3 calibrações realizadas nesse intervalo, quando não se observou alteração dimensional acima da incerteza de calibração do padrão. Apesar desse resultado, a sua estabilidade de longo prazo não é assegurada, principalmente em função das montagens e desmontagens necessárias para a sua utilização. Apesar da alta dureza dos elementos de contato, pode-se afirmar que o padrão irá requerer calibrações mais frequentes do que o recomendado para os padrões corporificados clássicos (blocos-padrão, padrões escalonados, ...), em função do número de montagens.

Os bons resultados obtidos com a remontagem cinemática no padrão despertaram o interesse para a sua utilização no ensaio geométrico de máquinas-ferramenta onde técnicas clássicas são de difícil aplicação, como nas máquinas-ferramenta de cinemática paralela.

c) Dispositivos para a medição de histerese

Os padrões corporificados projetados e testados para determinar a histerese estática dos eixos da máquina mostraram-se incompatíveis para com o nível de incerteza requerido para a operação. A histerese estática normalmente apresenta magnitudes bastante pequenas, e a incerteza com a utilização do anel e do bloco padrão já superavam a histerese encontrada nos ensaios.

Embora a determinação da histerese estática seja útil para identificar folgas nos fusos de acionamento dos eixos da máquina, os resultados do ensaio devem ser considerados mais do

aspecto qualitativo do que quantitativo. A existência de uma alta histerese normalmente indica desgastes nos fusos de acionamento e/ou desajustes na porca do sistema de esferas recirculantes e permite tomar as ações mecânicas corretivas.

No entanto, a utilização da magnitude do erro medido estaticamente para uma correção eletrônica é questionável em vista de alguns fatores:

- O CNC utiliza a média da histerese para corrigir todo o eixo, quando normalmente a histerese varia de forma acentuada ao longo de todo o eixo;
- A medição de histerese estática é feita praticamente sem carga sobre o sistema de acionamento. Mesmo os pequenos esforços de corte das operações de acabamento alteram de forma significativa a histerese. Isso foi comprovado em ensaios simples, ao apalpar seguidas vezes um mesmo ponto de um bloco-padrão, alternando a direção da força exercida manualmente sobre o sistema de acionamento. Uma histerese de 10 μm foi determinada, onde os ensaios com o laser indicaram 3 μm .

Em função disso, a forma mais eficiente para a minimização do efeito da histerese sobre a geometria das peças usinadas é realizada através de certos cuidados no próprio procedimento de usinagem [127]. Por exemplo, operações de acabamento devem ser realizadas aproximando-se a ferramenta sempre no mesmo sentido. Da mesma forma, a utilização de processos de mandrilamento para o acabamento de furos, no lugar do fresamento tangencial por interpolação, permite minimizar a influência da histerese sobre o erro de forma.

Ao contrário dos outros erros geométricos da máquina-ferramenta, a histerese é o único que pode ser evitado somente através da racionalização do processo de usinagem, sem a necessidade de correções eletrônicas ou alterações no programa CNC.

Para determinar a histerese em uma estratégia semelhante ao ensaio com laser interferométrico, uma forma rápida de ensaio foi configurada, utilizando um transdutor de deslocamento semelhante ao comparador eletro-óptico utilizado nos ensaios de retitude e perpendicularidade. O procedimento de ensaio pode ser visto na figura 7.2 e consiste em deslocar a máquina para um determinado ponto, aproximando-se em sentido crescente e após isso em sentido decrescente, para esse ponto programado. O comparador fica em contato com a mesa/coluna da máquina que está em movimentação e mede a diferença entre a posição atingida em sentido crescente em relação à posição atingida em sentido decrescente. Na ausência de

histerese essas posições seriam idênticas e, portanto, a diferença nula. Esse procedimento é repetido em diferentes posições ao longo dos eixos da máquina.

A incerteza do ensaio é reduzida, tendo como fontes de incerteza principais o medidor de deslocamento e a repetitividade da máquina-ferramenta (incerteza tipo A). Um sistema de carga pode ser acoplado ao ensaio, para aplicar uma força conhecida de modo a reproduzir os esforços existentes durante as operações de usinagem, e assim realizar o ensaio em uma condição mais realista do que o ensaio estático.

Embora essa configuração dispense o uso de padrões corporificados, uma característica do QUALIMAQ, a sua utilização pode ser agregada ao sistema quando de um ensaio para determinar a histerese, principalmente para obter uma informação qualitativa para determinar excesso de folga dos elementos de acionamento da máquina.

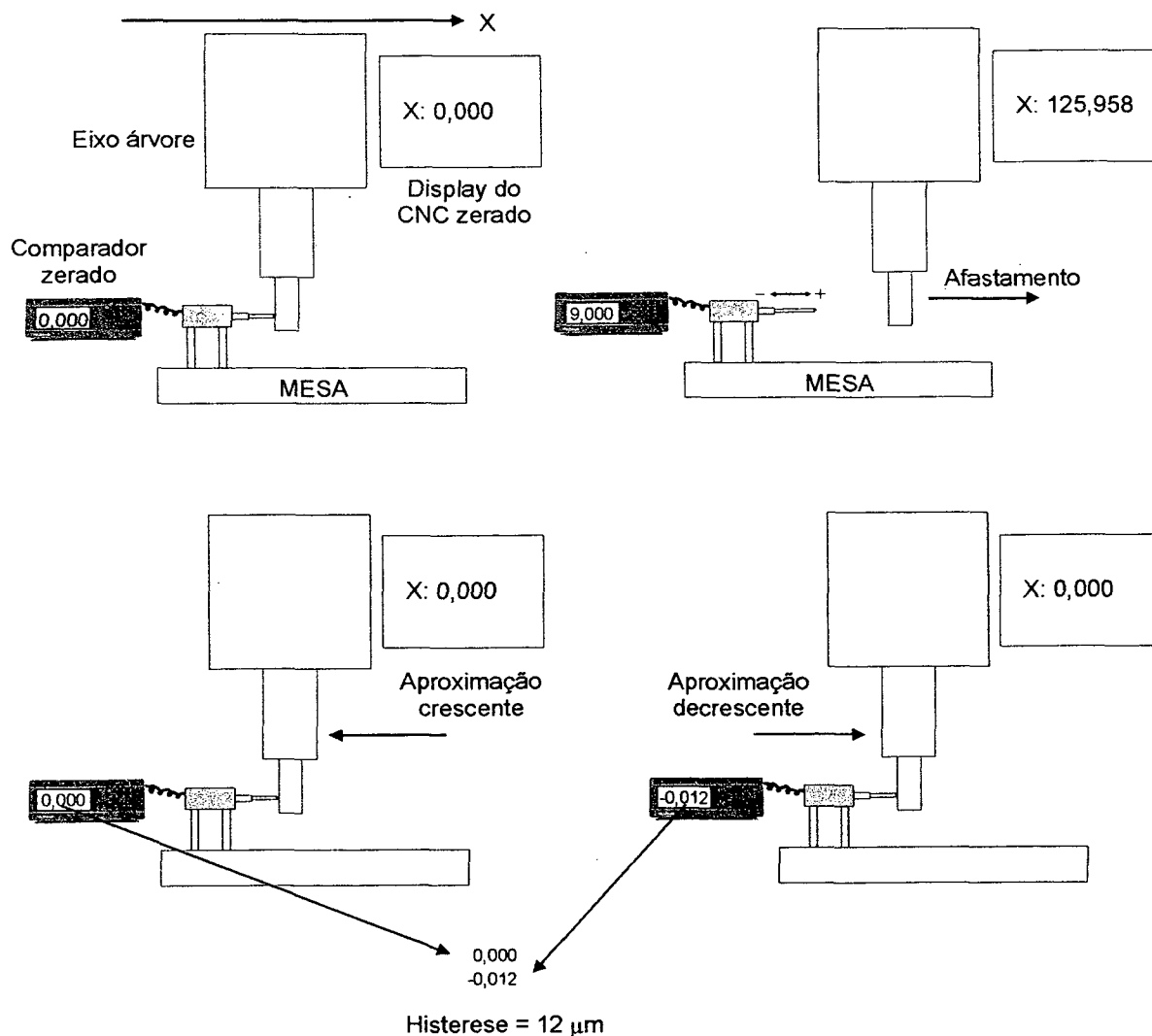


Figura 7.2 – Determinação da histerese estática utilizando medidor de deslocamento

Uma análise geral acerca dos ensaios permite afirmar pela validade dos resultados, considerando que o trabalho de desenvolvimento das técnicas foi bastante direcionado à possibilidade de corrigir erros pelo CNC. Como visto, em uma máquina com 3 eixos de movimentação, essa correção é possível para os erros de posicionamento linear, reticidade e perpendicularidade e a determinação dessas componentes de erro ocorre de forma confiável com a placa de furos no plano principal (eixos X e Y) e com o padrão desmontável nos planos verticais, com certa restrição para o erro de perpendicularidade em função da incerteza de apalpação. Em um tempo de ensaio estimado em 2,0 horas, são realizados esses ensaios geométricos com uma confiabilidade metrológica, na maior parte dos ensaios, da mesma ordem do ensaio com técnicas clássicas.

7.2 Análises Operacional e Econômica

Como já afirmado, não é suficiente para um método de ensaio fornecer resultados completos e com incerteza de medição baixa, se a sua aplicação requer um esforço operacional intenso ou se os custos envolvidos com a aquisição e utilização da tecnologia são muito altos. Os requisitos metrológicos, operacionais e econômicos devem ser atendidos conjuntamente e foram considerados durante o desenvolvimento do sistema QUALIMAQ. Neste momento, é feita uma análise comparativa com técnicas clássicas para descrever as vantagens operacionais e econômicas, que o sistema QUALIMAQ apresenta em relação aos métodos clássicos de ensaio.

A comparação operacional foi possível pois, durante toda a experimentação com técnicas clássicas e com o sistema QUALIMAQ, os tempos necessários à realização dos ensaios foram monitorados e são os indicadores mais claros da eficiência operacional dos métodos. A figura 7.3 indica essa comparação, podendo-se observar a grande diferença nos tempos necessários aos ensaios de posicionamento linear, reticidade e perpendicularidade nos 3 eixos da máquina-ferramenta. Vale ressaltar que os ensaios com a placa de furos e com padrão vertical determinam, simultaneamente, várias componentes de erro geométrico, que só são obtidas com a instrumentação clássica em ensaios individuais para cada componente. Um outro aspecto a destacar no ensaio com a placa de furos, reside no fato de que a placa avalia a máquina ao longo de 5 linhas, enquanto o mesmo ensaio com a instrumentação clássica é realizado ao longo de uma linha, somente. O ensaio com a instrumentação clássica ao longo dessas 5 linhas demandaria um tempo impraticável.

A comparação econômica foi realizada considerando o custo dos equipamentos e também o custo decorrente da inoperância da máquina-ferramenta durante o tempo do ensaio. A figura 7.4 indica a comparação entre os custos de aquisição dos equipamentos e a figura 7.5 compara os custos de ensaio por máquina, considerando um usuário com instrumentação própria que realize 100 ensaios por ano, considerando a máquina-ferramenta utilizada neste trabalho (fresadora CNC).

ENSAIO GEOMÉTRICO	<i>Instrumentação clássica</i>	<i>QUALIMAQ</i>
POSICIONAMENTO	Laser Interferométrico 8 h	Placa de Furos – Plano XY 1 h Padrão vertical – Planos XZ e YZ 1 h
RETILINEIDADE	Esquadro de granito 2 h	
PERPENDICULARIDADE	Esquadro de granito 4 h	
TEMPO TOTAL	14 h	2,0 h

Figura 7.3 – Comparação entre tempos de ensaio com técnicas clássicas e com o método pesquisado

Instrumentação clássica	CUSTO (kRS)	<i>QUALIMAQ</i>	CUSTO (kRS)
Laser Interferométrico (kit de posicionamento)	104	Placa de Furos calibrada	8
Esquadro de granito	5	Padrão vertical calibrado	3
Apalpador de Medição	3	Apalpador comutador*	2
Software de Processamento	2	Software de Processamento	10
114		23	

*Para Máquinas-ferramenta já com apalpador esse investimento, obviamente, é nulo

Figura 7.4 – Comparação entre custos de aquisição de sistemas de ensaio geométrico

ITEM DE CUSTO	<i>Instrumentação clássica</i> <i>(Capital = kR\$ 114)</i>	<i>QUALIMAQ</i> <i>(Capital = kR\$ 23)</i>
DEPRECIACÃO (10% a.a.)	11,4	2,3
CAPITAL IMOBILIZADO (12% a.a.)	13,7	2,6
MANUTENÇÃO (incluindo calibração)	8,0	4,0
PESSOAL	30,0	15,0
MÁQUINA PARADA (R\$ 40,00/hora)	56,0	10,0
CUSTO DO ENSAIO	1,19	0,29

Figura 7.5 – Comparação entre custos do ensaio para usuários com sistema próprio, realizando 100 ensaios/ano

Em ambas comparações a vantagem econômica dos ensaios com padrões corporificados é muito grande em relação aos métodos clássicos. Ao se considerar a vantagem operacional visualizada na figura 7.3 e o fato de que as confiabilidades metrológica dos métodos foram semelhantes, pode-se afirmar que o ensaio geométrico da máquina-ferramenta com padrões corporificados apresentou uma relação custo/benefício bem melhor do que os métodos clássicos de ensaio, como será ressaltado nas conclusões finais do trabalho.

7.3 Conclusões

A pesquisa realizada neste trabalho resultou no desenvolvimento de modelos matemáticos, padrões corporificados e estratégias de ensaio e processamento de resultados que possibilitaram realizar ensaios geométricos com confiabilidade metrológica semelhante às obtidas com técnicas clássicas, mas com vantagens operacionais expressivas.

Os modelos matemáticos simulados e implementados para o cálculo dos erros geométricos da máquina-ferramenta a partir da medição dos padrões mostraram-se plenamente confiáveis, inclusive quando comparados com o software de referência do PTB, centro de pesquisa idealizador da utilização de padrões bidimensionais para a calibração de máquinas de medição por coordenadas. Na comparação os desvios entre os algoritmos estiveram sempre abaixo de 1 μm , aceitável em função de truncamentos de dígitos nos cálculos e, principalmente, por diferenças nas estratégias utilizadas para os processamentos.

A flexibilidade dos algoritmos permite auxiliar o operador na realização dos ensaios, complementar funções de medição eventualmente inexistentes no CNC da máquina-ferramenta e configurar a saída de dados para otimizar o processo de correção eletrônica de erros. Os cálculos da incerteza de medição dos ensaios contidos nos algoritmos de processamento seguiram as diretrizes normalizadas mas alternativas foram testadas e implementadas para adequar-se às particularidades de determinados ensaios.

Os procedimentos de ensaio e a configuração dos padrões corporificados buscaram garantir a confiabilidade metrológica, agregando vantagens econômicas e operacionais que, conjuntamente, se configurem em uma alternativa mais vantajosa e atrativa para ensaios geométricos de máquinas-ferramenta de pequeno e médio porte. A flexibilidade com que os padrões podem ser fabricados/configurados permitem a adequação do sistema QUALIMAQ para o ensaio de máquinas com diferentes estruturas mecânicas e configurações cinemáticas.

Especificamente com o padrão vertical, houve uma contribuição expressiva, ao se validar o princípio da montagem/remontagem cinemática, já consagrada em dispositivos de posicionamento, para aplicação em padrões metrológicos. Toda a fundamentação teórica e simulações matemáticas envolvidas no projeto, especificação de materiais, fabricação e estabelecimento de procedimentos de ensaio, resultaram em um padrão com confiabilidade metrológica suficiente para aplicação no ensaio de máquinas-ferramenta e flexibilidade suficiente para adaptar-se a diversos tipos de máquinas. Tais resultados permitem afirmar que o seu contínuo desenvolvimento possibilitará a sua aplicação, inclusive, para a calibração de máquinas de medição.

Um outro aspecto diferencial do trabalho diz respeito à utilização da placa de furos em alumínio, cuja utilização foi possibilitada a partir da confrontação de suas propriedades físicas com as demandas particulares do tipo ensaio pesquisado. A viabilização desse material, incomum em um padrão dimensional em função de seu coeficiente de dilatação térmica, permitiu agregar

vantagens metrológicas e operacionais importantes. A obtenção de uma boa repetitividade dos erros ao longo da placa abrem a possibilidade para a simplificação da placa de furos, utilizando um número menor de furos, o que permite otimizar a sequência de medição ampliar a vantagem operacional do método.

Esses e outros avanços resultantes da pesquisa permitiram obter resultados que configuram os ensaios geométricos com padrões corporificados como uma alternativa promissora para ensaios periódicos em máquinas-ferramenta de pequeno e médio porte. As comparações metrológicas realizadas ao longo do capítulo 6 e as comparações operacionais e econômicas realizadas neste capítulo podem ser visualizadas resumidamente nas figuras 7.6, 7.7 e 7.8, atestando de forma conclusiva essa afirmação. Com 1/6 do custo e em 1/7 do tempo necessários para realizar os mesmos ensaios com técnicas clássicas, consegue-se resultados com uma confiabilidade metrológica da mesma ordem, na maior parte dos ensaios. Algumas vantagens adicionais merecem ser destacadas, como o fato do método fornecer resultados já formatados para a correção de erros no CNC, além dos resultados expressarem melhor a condição momentânea da máquina-ferramenta. Essa última vantagem ocorre tanto pelo fato de que várias componentes de erro são obtidas em uma mesma medição, como pela maior rapidez da aquisição dos dados que permite o ensaio da máquina em uma condição térmica mais estável.

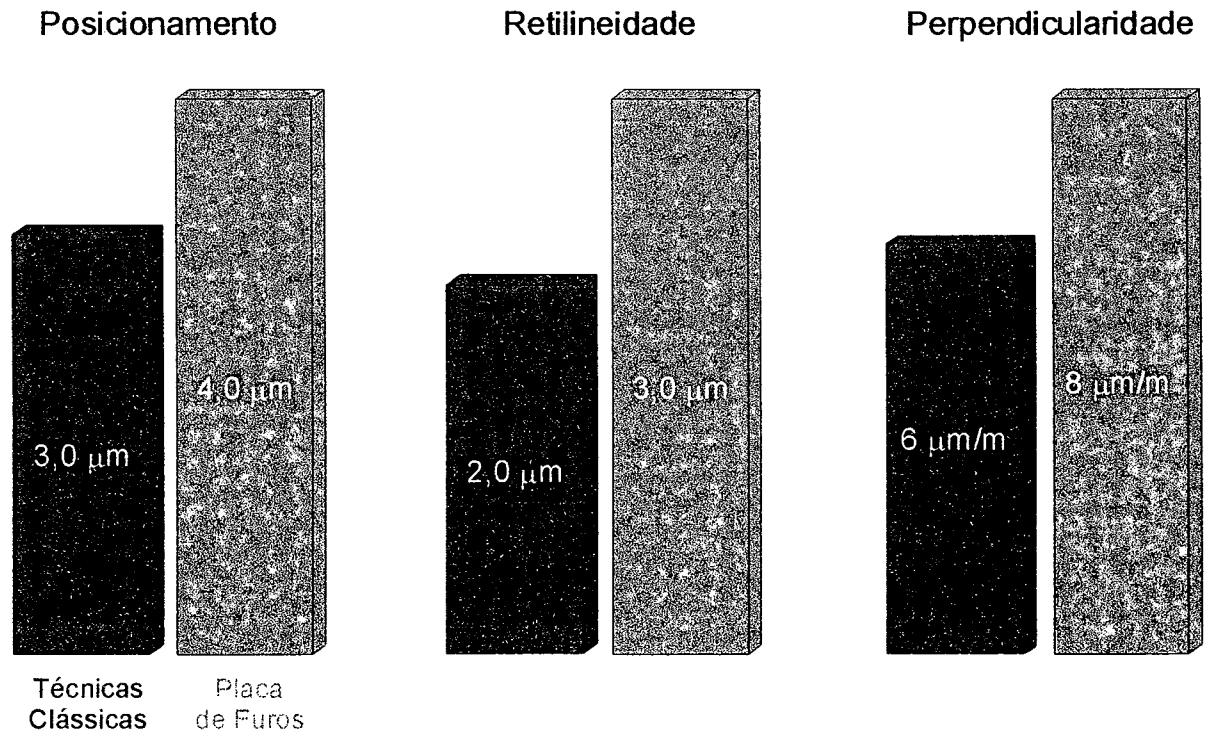


Figura 7.6 – Comparação metrológica entre técnicas clássicas e a Placa de furos no plano principal da máquina-ferramenta

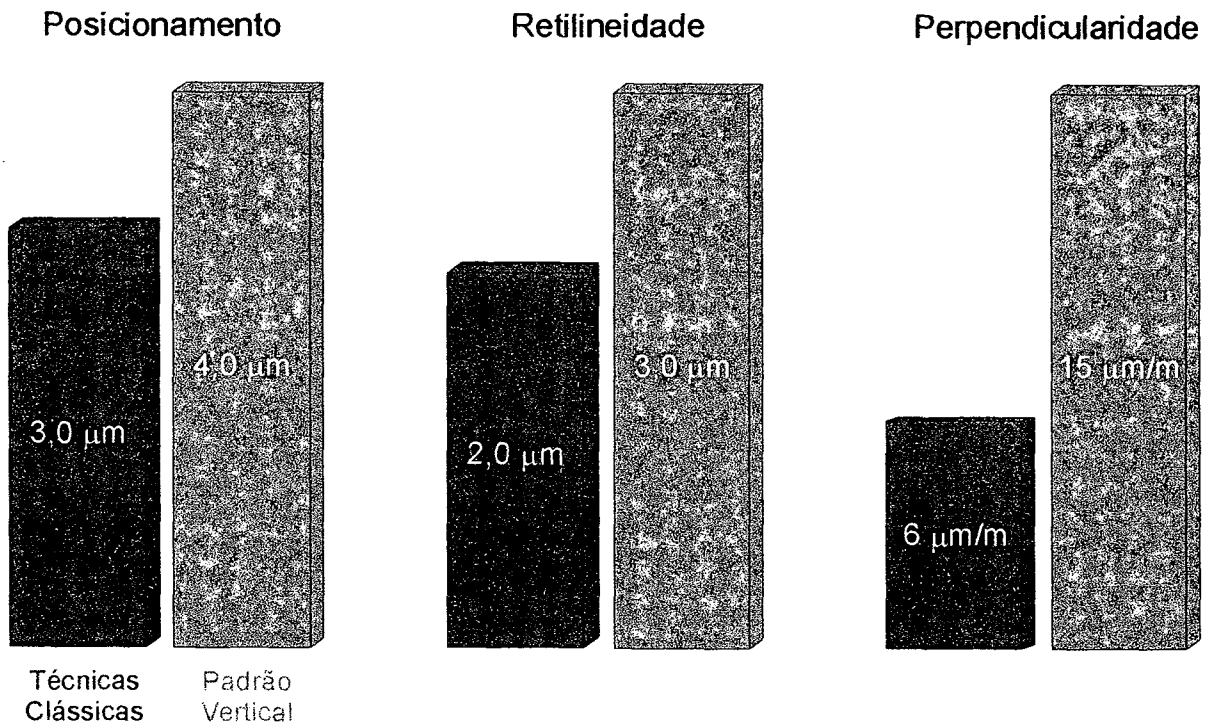


Figura 7.7 – Comparação metrológica entre técnicas clássicas e o Padrão vertical nos planos verticais da máquina-ferramenta

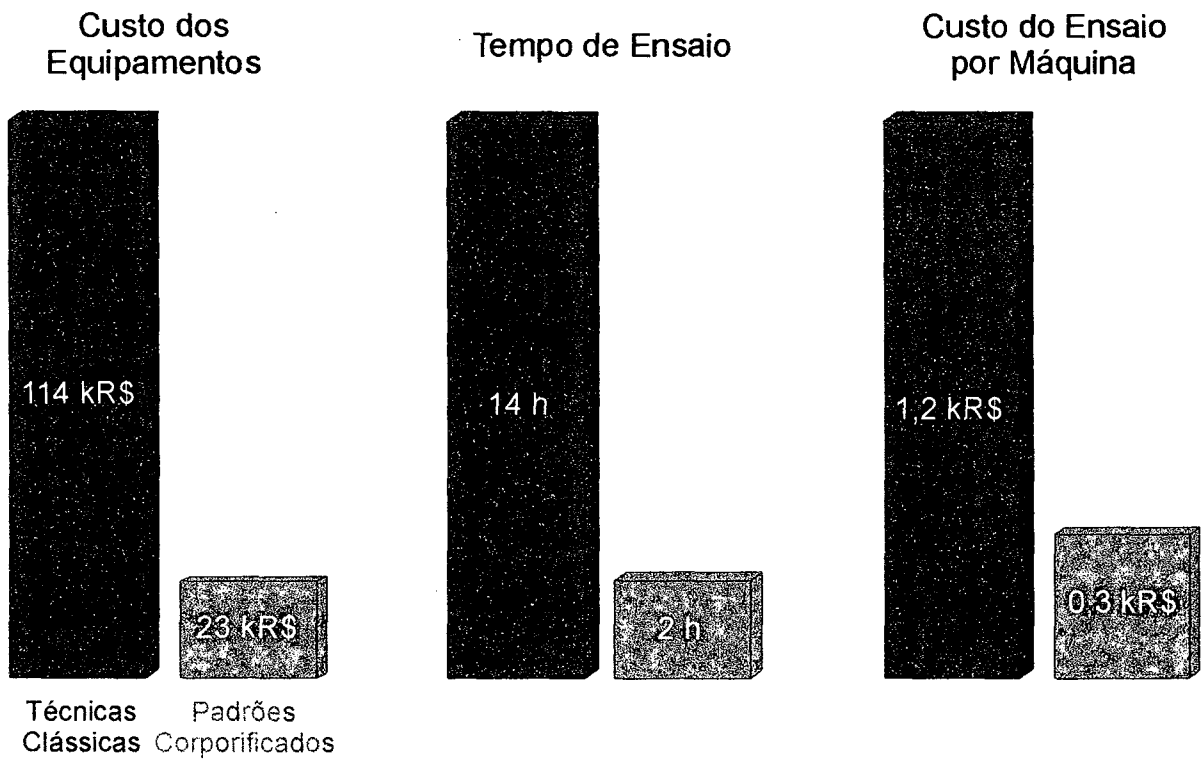


Figura 7.8 – Comparação operacional e econômica entre os métodos de ensaio

Certamente existem aspectos a serem otimizados, como o peso das peças, a simplificação da geometria dos padrões, minimização de influências térmicas e a redução da incerteza de apalpação, que devem ser considerados em uma evolução do sistema QUALIMAQ.

Juntamente com novas possibilidades surgidas com as qualidades do método desenvolvido, essas otimizações dão origem a novas aplicações da técnica, a saber:

- Utilizar o método de ensaio pesquisado para otimizar a exatidão da medição por coordenadas nas máquinas-ferramenta. Os erros determinados comporiam uma matriz de correção de erros a ser incluída nos processamentos matemáticos para a obtenção dos resultados de medição.
- Estabelecer quantitativamente a influência da deformação térmica da Máquina-ferramenta sobre sua exatidão de trabalho. A rapidez com que o ensaio pode ser realizado habilita o método para ensaios durante o aquecimento da máquina. Isso permite quantificar a sua instabilidade térmica e determinar o tempo de estabilização térmica, dentre outros desdobramentos importantes.
- Desenvolver estratégias para explorar a utilização do apalpador na Máquina-ferramenta para a melhoria da sua exatidão da usinagem: comparação com réplicas calibradas, medições diferenciais, etc.
- Pesquisar um sistema automatizado para a auto-correção geométrica da máquina-ferramenta. A colocação do padrão na máquina, a sua medição, a determinação dos erros geométricos e a atualização da tabela de compensação no CNC seriam realizados de forma autônoma pela máquina.

Em relação ao caráter técnico-científico do trabalho de pesquisa realizado, pode-se recomendar que a metrologia dimensional na indústria, classicamente relacionada às operações de controle de qualidade pós-processo de componentes e produtos, deve abranger mais o processo produtivo atuando mais diretamente sobre os meios de fabricação. Embora a medição dimensional pós-processo seja necessária para certificar que o processo esteja produzindo peças dentro das tolerâncias, essa conformidade só ocorre de forma eficiente se o processo é capaz, e para isso a máquina-ferramenta contribui grandemente.

Ao longo do desenvolvimento do atual trabalho de pesquisa, percebeu-se essa pouca ênfase também no campo da pesquisa científica. Pesquisas sobre otimização metrológica de máquinas-ferramenta são bem menos freqüentes, em relação a máquinas de medir por coordenadas, por exemplo, embora ambos equipamentos possuam muitas características afins. Um indicador positivo em relação a isso é que, embora em número ainda restrito, as pesquisas de metrologia aplicadas a máquinas-ferramenta estão crescendo progressivamente nos últimos anos.

O presente trabalho se propôs a atuar nessa direção, ao pesquisar métodos alternativos para tornar o ensaio geométrico de máquinas-ferramenta mais eficiente e atrativo, com uma confiabilidade metrológica adequada à operação. O desenvolvimento de métodos com tais qualidades, uma busca contínua de muitas técnicas de ensaio, contribui para motivar os usuários de máquinas-ferramenta a praticarem ensaios periódicos em suas máquinas, tomando as ações preventivas e corretivas a partir das informações obtidas de tais verificações. Do contrário, muitas possibilidades e recursos tecnológicos das máquinas-ferramenta, como a correção de erros pelo CNC, permanecerão inexplorados.

Como os aspectos ligados ao tema estudado possuem uma forte conexão com a realidade industrial, os sistemas gerados na pesquisa possuem grande potencial de aplicabilidade, não só o método especificamente, mas os conhecimentos e as inovações geradas ao longo do trabalho. Um dos exemplos é a crescente tendência de aplicação de recursos de CAA (*computer aided accuracy*) nas máquinas-ferramenta CNC. Como já descritos ao longo do trabalho, muitos sistemas de CAA estão sendo desenvolvidos com o objetivo de corrigir em tempo real, limitações que as máquinas-ferramenta apresentam. Na forma de Pós-processadores que corrigem o programa CNC ou alterando trajetórias via controlador, esses sistemas são alimentados por informações dos erros da máquina-ferramenta. O desenvolvimento de técnicas que facilitem a determinação desses erros será, em grande parte, responsável pelo sucesso desses sistemas nas máquinas do futuro.

CAPÍTULO 8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] **Benes, James.** *An Industry evolves: lathes to computers.* American Machinist, pp. 43 - 132, Janeiro, 1996.
- [2] **McKeown, Peter.** *The role of precision engineering in manufacturing of the future.* Proceeding - CIRP, Vol. 36/2, pp.495-501, 1987.
- [3] **Teegarden, Jack.** *Five steps to quality inherent manufacturing.* Modern machine shop, Janeiro, 1998.
- [4] **Erdel, Bert.** *O impacto da usinagem de precisão a alta velocidade na produção.* Máquinas e Metais, pp. 36-41, Janeiro, 1997.
- [5] **Gregorich, Jonh.** *Flexibility and responsiveness pay off for Connecticut Job Shop.* Modern machine shop, Janeiro, 1998.
- [6] **Trapet, E. and Wäldele, F.** *Coordinate Metrology - Flexibility in conflict with accuracy?* Anais - Seminário Internacional de Metrologia, Florianópolis - SC, 1997.
- [7] **Grasson, Thomas.** *Balancing high-volume production with small lots.* American Machinist, Janeiro, 1998.
- [8] **Ueno, Shigeru.** *A máquina da próxima geração tem múltiplas funções e é rápida e precisa.* Máquinas e Metais, pp. 42-53, Janeiro, 1996.
- [9] **Renishaw's preinspection solution gives Boeing's productivity a flying start.** Artigo obtido na internet, 1999: www.renishaw.com/calibration/applications/boeing.html
- [10] **Grasson, Thomas.** *Machine tool builder's future goes on display.* American Machinist, pp. 154 - 167, Janeiro, 1997.
- [11] **Grasson, Thomas.** *A grass-roots revolution in metalworking is underway.* American Machinist, pp. 74 - 79, Janeiro, 1997.
- [12] **Erdel, Bert.** *O impacto da usinagem a alta velocidade na produção.* Máquinas e Metais, pp. 36 - 41, Janeiro, 1997.
- [13] **Wada, Ryuji.** *Há de haver um conceito bem diferente do atual para as máquinas de amanhã.* Máquinas e Metais, pp. 20-43, Janeiro, 1997.
- [14] **Inokuma, Takahiko.** *Tecnologia de máquinas da próxima geração: a visão dos fabricantes japoneses.* Máquinas e Metais, pp.124-144, Janeiro, 1996.
- [15] **Weck, M.** *Handbook of Machine tools - Metrological analysis and performance tests.* Vol. 4, John Wiley and Sons, 1984.

- [16] **Krulwich, D.** *Rapid mapping of volumetric machine errors using distance measurements*. Proceedings of the International Seminar on Improving Machine Tool Performance, vol.2, pp.487, 1998.
- [17] **Sousa, A, Schneider, C. A. and Scavone, R.** *A compensação de erros geométricos via CNC é rápida e eficiente, mas pouco praticada*. Máquinas e Metais, Maio, 1997.
- [18] **Sousa, A. and Schneider, Carlos A.** *Melhoria das peças usinadas através da qualificação geométrica da máquina-ferramenta*. Anais do Congresso Norte-Nordeste de Engenharia Mecânica, 1998.
- [19] **Park, Hisup.** *Assessing machine tool performance*. American Machinist, Junho, pp. 39-42, 1992.
- [20] **Chapman, Mark.** *Machine tool calibration - don't compromise*. Quality today, pp. 22 - 24, Janeiro, 1996.
- [21] **Scavone, R.** *Avaliação das necessidades das indústrias de máquinas-ferramenta em relação aos ensaios de qualificação geométrica*. Relatório final da pesquisa, Fundação CERTI, 1996.
- [22] **Ziegert, j. and Mize, C.** *The laser ball bar: a new instrument for machine tool metrology*. Precision Engineering, Vol.4, No.16, 1994.
- [23] **Liotto, G. and Wang, C. P.** *Laser Doppler displacement meter allows new diagonal measurement for large aspect ratio machine tool easily and accurately*. Proceeding of LAMDAMAP III, Laser Metrology and Machine Performance, 1997.
- [24] **Ford, D. G and Postlethwaite, S. R.** *Accuracy improvement for three axis CNC machining centres by geometric, load and thermal error compensation*. Proceeding of LAMDAMAP IV, Laser Metrology and Machine Performance, Julho, 2000.
- [25] **Lynch, Mike.** *CNC tech talk: Have you ever heard of touch sensor?* Modern machine shop, Janeiro, 1997.
- [26] **Stemmer, G. E.** *Ferramentas de Corte*. Ed.da UFSC, Florianópolis , 1992.
- [27] *Requisitos do Sistema da Qualidade - QS9000*. Manual de referências do sistema da qualidade QS9000, 1995.
- [28] **Drescher, Joe and Malloch, Charles.** *Application of performance testing to maintain and improve machine tool accuracy*. International Manufacturing Engineering Conference - Proceedings, pp. 151 - 153, 1996.
- [29] **Goodfellow, S. and Starr, A.** *Maintenance planning for condition monitoring in a high-speed machining shop*. Proceeding of LAMDAMAP IV, Laser Metrology and Machine Performance, Julho, 1999.
- [30] **Donatelli, G, Barp, A, and Schneider, C. A.** *The influence of measurement errors on the values of process capability indices*. Proceedings.IMEKO Symposium: Metrology for Quality Control in Production, p.133, 1999.
- [31] **Griffith, W.** *Checklist para usinagem de alta velocidade e alta precisão*. Máquinas e Metais, pp. 82-88, Janeiro, 1994.

- [32] **Wirtz, A. and Gächter, C.** *From unambiguously defined geometry to the perfect quality control loop.* Proceeding - CIRP, Vol. 42/1, pp. 615-617, 1993.
- [33] *Nissan continues to improve machine tool's efficiency by using laser and ballbar technology.* Artigo obtido na internet, 1998: www.renishaw.com/calibration/applications/nissan/nissan.html
- [34] **Trapet, Eugen.** *Development of optimised test workpiece methods to assess geometrical errors and uncertainties of machine tools.* 1998.
- [35] **Park, Hisup.** *Testes de desempenho de máquinas garantem a qualidade da produção.* Máquinas e Metais, pp. 24 - 34, Janeiro, 1992.
- [36] **Anderson, P. H.** *Methodology for evaluating the production accuracy of machine tools.* Tese de Doutorado - Tampere University of Technology, Publications 102, 1992.
- [37] **Klabunde, S. and Schmidt, R.** *How accurate is your machine center ?* Modern machine shop, Janeiro, 1998.
- [38] **Valentina, Luiz D.** *Ensaio Geométricos em Máquinas-ferramenta com laser de alinhamento.* Dissertação de Mestrado, UFSC, 1986.
- [39] **Shen, Y. L. and Duffie, N. A.** *Comparison of combinatorial rules for machine error budgets.* Proceeding - CIRP, Vol. 42/1, pp.619-622, 1993.
- [40] **Venugopal, Raghunath and Barash, Moshe.** *Thermal effects on the accuracy of numerically controlled machine tools.* Proceeding - CIRP, Vol. 35/1, pp.255-258, 1986.
- [41] **Chen, Jenq.** *A study of thermally induced machine tool errors in real cutting conditions.* International Journal of Machine Tools and Manufacturing , Vol. 36, No 12, pp. 1401-1411, 1996.
- [42] **Spur, G. and Haas, P.** *Thermal behaviour of NC machine tools.* International Journal of Machine Tools and Manufacturing , pp. 203-209, 1990.
- [43] **Weck, M., McKeown, P., and Bonse, R.** *Reduction and compensation of thermal errors in machine tools.* Abstracts - CIRP, Vol. 44, pp.589 - 597, 1995.
- [44] **Balsamo, A.** *A method for thermal-deformation corrections of CMMs.* Proceeding - CIRP, Vol. 39/1, pp. 557-560, 1990.
- [45] **Hatamura, Y. and Nagao, T.** *Development of an intelligent machining center incorporating active compensation for thermal distortion.* Proceeding - CIRP, Vol.42/1, pp. 549-552, 1993.
- [46] **Spur, Günter.** *Otimização térmica através de projeto e técnicas compensatórias.* Máquinas e Metais, Janeiro, 1994.
- [47] **Moriwaki, T.** *Thermal deformation and its on line compensation of hydrostatically supported precision spindle.* Proceeding - CIRP, Vol. 37/1, pp. 393-396, 1988.

- [48] **Spur, G. and Hoffmann, E.** *Thermal behaviour optimisation of machine tools*. Proceeding - CIRP, Vol. 37/1, pp.401-405, 1988.
- [49] **Bryan, J.** *International status of thermal error research*. Proceeding - CIRP, Vol.39/2, 645-656, 1990.
- [50] **Jedrzejewski, J. and Kowal, Z.** *Numerical optimisation of thermal behaviour of machine tools*. Proceeding - CIRP, Vol. 39/1, pp. 379-382, 1990.
- [51] *Development of methods for the numerical error correction of machine tools*. Final project report - European Communities. Eindhoven University of Technology, 1992.
- [53] **Spur, G. and Hoffmann, E.** *Thermal behaviour optimisation of machine tools*. Proceeding - CIRP, Vol. 37/1, pp.401-405, 1988.
- [54] *ISO 230 Part 1: Geometric accuracy of machines operating under no-load or finishing conditions*. 1996.
- [55] *ISO 230 Part 2: Determination of the accuracy and repeatability of positioning of numerically controlled machine tool axes*. 1996.
- [56] *ISO 230 Part 3: Evaluation of thermal effects in machine tools*. 1996.
- [57] **Braasch, Jan.** *Position Measurement on Machine Tools*. Proceedings. 13th Annual meeting of American Society for Precision Engineering, p.437, 1998.
- [58] **Beard, Tom.** *CNC's in the fast lane*. Modern machine shop, pp. 52 - 62, Janeiro, 1989.
- [59] **Boucher, P. and Dumar, D.** *Improvement of productivity with predictive control in speed and position*. Proceeding - CIRP, Vol. 38/1, pp.339-342, 1989.
- [60] **Lynch, Mike.** *The key concepts of Computer Numerical Control*. Modern machine shop, 1998.
- [61] **Albert, Mark.** *What is a motion card ?* Modern machine shop, Janeiro, 1997.
- [62] **Theuws, F.** *Enhancement of machine tool accuracy: theory and implementation*. Publication of Eindhoven University of Technology, 1997.
- [63] **Kao, J. Y. and Yeh, Z. M.** *A study of backlash on the motion accuracy of CNC lathes*. International Journal of Machine Tools and Manufacturing, Vol. 36, No 5, pp.539-550, 1996.
- [64] *Rate your machine center*. American Machinist, pp. 37-40, Janeiro, 1991.
- [65] **Eman, K. F. and Wu, B. T.** *A generalized geometric error model for multi-axis machines*. Proceeding - CIRP, Vol. 36/1, pp. 253-256, 1987.
- [66] **Kiridena, V. and Ferreira, P. M.** *Kinematic modelling of quasistatic errors of three-axis machining centers*. International Journal of Machine Tools and Manufacturing, Vol. 34, pp. 85-100, 1994.

- [67] **Tokumo, Shigeaki.** *Características de projeto e fabricação de centros de usinagem*. Máquinas e Metais, pp. 32 - 42, Janeiro, 1990.
- [68] *Arquivo de relatórios de ensaio de qualificação geométrica: 1990-1998*. Fundação CERTI, Florianópolis, 1999.
- [69] *A list of the most important type dependent geometric and thermal errors of machine tools*. BCR-90/006, Maho AG, Junho 1990.
- [70] *Qualificação de Máquinas-ferramenta e de máquinas de medir convencionais e CNC*. Coletânea de relatórios, Fundação CERTI, 1990.
- [71] **Tallmadge, Phil.** *Today's "Low-End" Machines offer High-End value*. Modern machine shop, Janeiro, 1998.
- [72] **Kurtoglu, A.** *The accuracy improvement of machine tools*. Abstracts - CIRP, 1990.
- [73] **Ikawa, N., Donaldson, R. R., and Komanduri, R.** *Ultra precision metal cutting - The past, the present and the future*. Proceeding - CIRP, Vol. 40/2, pp. 587-594, 1991.
- [74] **Marot, G. and Longuemard, J. P.** *Proposal for a configuration of stability parameters control in tomorrows machine tools*. Proceeding - CIRP, Vol. 39/1, pp.405-408, 1990.
- [75] **Sheppard, M.** *O mercado vai influir sobre os projetos de máquinas desta década*. Máquinas e Metais, pp. 22-32, Janeiro, 1994.
- [76] **Sohlenius, Gunnar.** *A produção consciente impõe requisitos novos ao projeto de máquinas-ferramenta*. Máquinas e Metais, pp. 44 - 68, Janeiro, 1996.
- [77] **Yagishita, H. and Sakai, Y.** *On synchronous motion accuracy and torsional rigidity in a threading machine*. Proceeding - CIRP, Vol. 37/1, pp. 361-364, 1988.
- [78] **Haferkorn, Wolfgang.** *Parâmetros para o projeto de um centro de usinagem avançado*. Máquinas e Metais, pp. 30 - 47, Janeiro, 1993.
- [79] **Sato, Kaiji and Murayama, Yoshihisa.** *Control and elimination of lead screw backlash for ultra precision positioning*. JSME International Journal, Vol. 38, No 1, pp 36 - 41, 1995.
- [80] **Chen, Jenq.** *Computer aided accuracy enhancement for multi-axis CNC machine tool*. International Journal of Machine Tools and Manufacturing, Vol. 35, No 4, pp. 593-605, 1995.
- [81] **Schuett, T.** *Advanced controls for high speed milling*. Modern machine shop, Janeiro, 1996.
- [82] *Digital Controls more accurate, repeatable than analog NC*. Artigo obtido na internet, 1998: www.heidenhain.com/articl~4.html

- [83] **Grasson, Thomas.** *I/O, I/O, it's off to work we go.* American Machinist, pp. 62 - 72, Janeiro, 1997.
- [84] **Heidenhain TNC 360 - Axis error compensation.** Manual de operações, pp. 4/21 - 4/27, 1995.
- [85] **Zelinski, Peter.** *The shop with a nervous system.* Modern machine shop, Janeiro, 1997.
- [86] **Casagrande, Edson.** *Microprocessadores e o controle de movimento digital.* Máquinas e Metais, pp. 40-44, Janeiro, 1990.
- [87] **Beard, Tom.** *Low cost machine - High efficiency machining.* Modern machine shop, Maio, 1996.
- [88] **Schuett, Todd.** *Low cost machine meet high-end controls.* Modern machine shop, Janeiro, 1998.
- [89] **Kaiser, Greg.** *Getting better accuracy with non-precision ball screws.* American Machinist, pp. 50 - 53, Janeiro, 1993.
- [90] **Wu, S. M. and Ni, J.** *Precision machining without precise machinery.* Abstracts - CIRP, Vol. 38/1, pp. 533 - 536, 1989.
- [91] *CNC Fagor 8050 TC.* Fagor, Inc. - Material de divulgação, 1998.
- [92] *Sinumerik CNC 810 D - Siemens.* Artigo obtido na internet, 1999: www.aut.siemens.de/sinumerik
- [93] *GE Fanuc Automation - Series 15-B CNC.* Artigo obtido na internet, 1998: www.ge.com/gemis/gefanuc/cnc
- [94] *Okuma CNC - Pitch error compensation.* Manual de operações, Section 3: Parameters, 1998.
- [95] *Allen-Bradley - Computerized Numerical Control.* Artigo obtido na internet, 1999: www.ab.com/cnc
- [96] *CNC control features and options.* Artigo obtido na internet, 1999: www.ge.com/gemis/gefanuc/CNC/469000.html
- [97] *Fast CNC boosts machine tool accuracy.* American Machinist, pp. 14, Janeiro, 1994.
- [98] **Howard, Salt.** *Improving Machine tool linear accuracy with laser scales.* Modern machine shop, Março, 1996.
- [99] **Braasch, Jan.** *The measure of a machine.* American Machinist, pp. 54 - 58, Janeiro, 1997.
- [100] *Improving machine tool linear accuracy with laser scales.* Artigo obtido na internet, 1999: www.renishaw.com/calibration/applications
- [101] *Improving machine tool linear accuracy with laser scales.* Artigo obtido na internet, 1999: www2.kemmlerude.com/kemmlerude/ren.mtscale.htm

- [102] *HS10 Laser Scale System*. Material de divulgação do fabricante. Renishaw, Inglaterra, 1997.
- [103] **Oshida, Masayoshi**. *Muito se fala de equipamentos CNC abertos. O que esperar deles ?* Máquinas e Metais, pp. 121-124, Janeiro, 1997.
- [104] **Pritschow, G. and Junghans, G.** *Controle de sistema aberto, um desafio ao futuro da indústria de máquinas*. Máquinas e Metais, pp. 20-38, Janeiro, 1998.
- [105] **Albert, Mark**. *Software is the CNC*. Modern machine shop, Janeiro, 1997.
- [106] **Benes, James**. *No need to start over thanks to open architecture*. American Machinist, pp. 62 - 66, Janeiro, 1997.
- [107] **SIMON - Sensor Fused Intelligent Monitoring System for Machining**. Artigo obtido na internet, 1998: www-wm.wzl.rwth-aachen.de/simon/index.html
- [108] **Valenti, Michael**. *Machine tool get smarter*. Mechanical Engineering, Vol. 117, No 11, pp. 70-75, 1995.
- [109] **Veldhuis, S. and Elbestawi, M. A.** *A strategy for the compensation of errors in five axis machining*. Proceeding - CIRP, Vol. 44/1, pp.373-377, 1995.
- [110] **Blumfield, A. and Shpitalni, M.** *A generator for creating adaptative post processors*. Proceeding - CIRP, Vol. 41/1, pp. 527-530, 1992.
- [111] **Albert, Mark**. *Down to the micro, Up to the stars*. Modern machine shop, Agosto, 1997.
- [112] **Gages, Edmunds**. *Corrections made In-Process with Post-process closed-loop automatic feedback gaging*. Modern machine shop, Janeiro, 1996.
- [113] **Smith, Kim**. *DNC puts the probe to work*. Modern machine shop, Janeiro, 1995.
- [114] **Pritschow, G. and Junghans, G.** *Controle de sistema aberto, um desafio ao futuro da indústria de máquinas*. Máquinas e Metais, pp. 20-38, Janeiro, 1998.
- [115] **Wu, Charles**. *Técnicas desenvolvidas dentro de casa: benefícios e problemas*. Máquinas e Metais, pp. 34-46, Janeiro, 1994.
- [116] *Machine tool performance models and machine data repository*. Artigo obtido na internet, 1998: www.mel.nist.gov/namt/projects/mtool/toolover.htm
- [117] *NAMT machine tool performance: models and data repository project*. Artigo obtido na internet, 1998: www.mel.nist.gov/namt/mtool/images/images.htm
- [118] **Wilhelm, R. G., Srinivasan, N., and Farabaugh, F.** *Part form errors predicted from machine tool performance measurements*. Abstracts - CIRP, Vol. 46, pp. 471 - 474, 1997.
- [119] **Asao, T.** *Precision turning by means of simplified predictive function of machining error*. Proceeding - CIRP,

1998.

- [120] *Machine tool's error compensation by postprocessor*. Artigo obtido na internet, 2000: <http://cc.oulu.fi/~mrahman/project.html>
- [121] Sousa, A. and Schneider, C. A. *Qualificação geométrica da Máquina-ferramenta ajuda na melhoria dimensional das peças*. Máquinas e Metais, Abril, 2000.
- [122] Fletcher, S., Postlethwaite, S. R., and Ford, D. G. *Machine tool error identification and compensation advice system*. Proceeding of LAMDAMAP IV, Laser Metrology and Machine Performance, Julho, 1999.
- [123] Tullar, Paul. *Machine Tool evaluation produces results*. American Machinist, Janeiro, 1998.
- [124] *Maschinendiagnose und Qualitätssicherung*. Relatório de Ensaio Geométrico do Laboratório GMQ - Magdeburg, Alemanha, Setembro, 1994.
- [125] *Exco Engineering*. Artigo obtido na internet, 1999 www.renishaw.com/calibration/applications/exco.html
- [126] Sousa, A. and Schneider, C. A. *Otimização dimensional das peças usinadas através da qualificação geométrica da máquina-ferramenta*. Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica - COBEM99, Novembro, 1999.
- [127] Reshetov, D. N and Portman, V. T. *Accuracy of Machine Tool*. The American Society for Precision Engineering Press, 1988.
- [128] Weck, M. *Handbook of Machine tools - Metrological analisys and performance tests*. Vol. 4, Jonh Wiley and Sons, 1984.
- [129] Hocken, R. *Software Correction of Precision Machines*. Apostila de Mini-curso.Saint Louis, Estados Unidos, 1998.
- [130] White, A. and Postlethwaite, S. R. *An identification and study of mechanisms causing thermal errors in CNC machine tools*. Proceeding of LAMDAMAP IV, Laser Metrology and Machine Performance, Julho, 1999.
- [131] Patel, M. U. *Innovative thermal error correction of a vertical machining centre spindle head*. Proceeding of LAMDAMAP IV, Laser Metrology and Machine Performance, Julho, 1999.
- [132] Sousa, A. and Schneider, C. A. *A comparison between laser interferometric and calibrated artifacts for the geometric test of machine tools*. Proceedings of the Internacional Symposium on Laser Metrology for Precision Measurement in Industry, Outubro, 1999.
- [133] Geisler, L., Sousa, A. and Scavone, R. *Utilização do laser interferométrico na qualificação da máquina-ferramenta*. Anais do Seminário internacional de Metrologia para Controle de Qualidade, Florianópolis, 1997.

- [134] **Sousa, A.** *Relatório de Estágio de Curta duração no Exterior. Relatório para a Fundação CAPES, financiadora do Programa, 1999.*
- [135] **Gonçalves, José R.** *Inventário sobre as máquinas-ferramentas em operação no país. Máquinas e Metais, , Dezembro, 1999.*
- [136] **Trapet, E. and Wäldele, F.** *A reference object based method to determine the parametric error components of coordinate measuring machines . Measurement, Vol. 9, No 1, pp. 17 - 21, 1991.*
- [137] **Zhang, G. X. and et alii.** *A displacement method for machine geometry calibration. Proceeding - CIRP, Vol. 37/1, pp. 515 - 518, 1988.*
- [138] **Daams, H. J. and Hunzinger, H.** *Laserinterferometers improve the performance of machine tools. European Production Engineering, Vol. 17, No. 3, pp.76-78, 1992.*
- [139] **Christy, Duane.** *Laser Calibration of machine tools. Proceeding - Eastern manufacturing technology conference, Part 1, 1987.*
- [140] **Pfeifer, T. and Schneider, C. A.** *Einsatz neuer Laser-Technologien zur Messung der Abweichung von der Geradlinigkeit. Westdeutscher Verlag GmbH, Opladen, 1978.*
- [141] **Scavone, R.** *Qualificação geométrica de máquinas-ferramenta. Apostila de Mini-curso, Florianópolis - SC, 1997.*
- [142] **Hotter, David.** *Software hat trick for CNC. American Machinist, pp. 69 - 70, Janeiro, 1995.*
- [143] **Dessein, G., Lagarrigue, P., and Rubio, W.** *Proposition d'une méthode expérimentale d'usinage pour le diagnostic de centres d'usinage. Mécanique Industrielle et Matériaux, Vol. 50, No, Janeiro, 1997.*
- [144] **Kunzmann, H., Lock, V., and Trapet E.** *Umfassende beurteilung der fertigungsabweichungen von fräsmaschinen mit prüfwerkstücken. 1998.*
- [145] **Veiga, C.** *Ensaio de aceitação com peças modelo em um centro de usinagem CNC. 1998.*
- [146] **Hewlett Packard 5528A - Laser Measurement System.** Manual de Operações - Laser Interferométrico, 1988.
- [147] **Schneider, C. A.** *Entwicklung eines Laser-Geradheits-Messsystems. Tese de Doutorado - RWTH - Aachen, Alemanha, Novembro, 1978.*
- [148] **The OmniGage.** Artigo obtido na internet, 1999: www.tetraprec.com
- [149] **Tikka, Heikki.** *Method for determining uncertainty of specified coordinate measurement. Tampere University of technology. Publication 100, 1992.*
- [150] **Scavone, R., Schneider, C. A., Pfeiffer, G., and Giágio, M. A.** *Metrologia e controle preventivo da qualidade para usuários de máquinas-ferramenta. Máquinas e Metais, Abril, 1996.*

- [151] **Knaap, W.** *Accuracy of length measurement and positioning: statical measurement and contouring mode.* Proceeding - CIRP, Vol. 37/1, pp. 511-514, 1988.
- [152] **Noronha, J. L.** *Qualificação de máquinas de medir por coordenadas com padrões corporificados.* Dissertação de Mestrado, Engenharia Mecânica, UFSC, 1994.
- [153] **Hansen, H. N. and Chiffre, L.** *A combined optical and mechanical reference artefact for coordinate measuring machines.* Abstracts - CIRP, Vol. 46, pp. 467 - 470, 1997.
- [154] **Balsamo, A., Trapet, E., and Jonge, L.** *Results of the CIRP-Euromet intercomparison of ball plate-based techniques for determining CMM parametric errors.* Abstracts - CIRP, Vol. 46, pp. 463 - 466, 1997.
- [155] **Kunzmann, H., Trapet E., and Wäldele, F.** *Results of the international comparison of ball plate measurements in CIRP and WECC.* Abstracts - CIRP, Vol. 44/1, pp. 479 - 482, 1995.
- [156] **Kruth, J. P. and Vanherck, P.** *Self calibration method and software error correction for three-dimensional coordinate measuring machines using artefacts measurements.* Measurement, Vol. 14, pp.157 - 167, 1994.
- [157] **Zhang, G. X. and Zang, F.** *A method for machine geometry calibration using 1-D ball array.* Proceeding - CIRP, Vol. 40/1, pp. 519 - 522, 1991.
- [158] **Trapet, E. and Wäldele, F.** *Determination of the parametric errors of coordinate measuring machines and machine tools using reference objects.* IMEKO Symposium on Dimensional Metrology, 1989.
- [159] **Matsuda, Jiro and Yano, Hiroshi.** *An analysis of measurement errors of three coordinate measuring machines.* Bulletin of NRML, Vol. 38, No 1, pp.19-27, Janeiro, 1989.
- [160] **Kunzmann, H., Trapet E., and Wäldele, F.** *A uniform concept for calibration, acceptance test, and periodic inspection of coordinate measuring machines using reference objects.* Proceeding - CIRP, Vol. 39/1, pp. 561-564, 1990.
- [161] **Veiga, C.** *Medição por coordenadas em máquinas-ferramenta com comando numérico - Método diferencial.* Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, UFSC, 1986.
- [162] **Beard, Tom.** *In touch with quality and productivity.* Modern machine shop, Janeiro, 1998.
- [163] **Marchitto, E.** *Há vantagens no uso de sensores em máquinas.* Máquinas e Metais, pp. 92 - 103, Janeiro, 1996.
- [164] *Solução por palpadores para Máquinas operatizes CNC: Benefícios.* Renishaw Inc. Material de divulgação, 1994.
- [165] **Lynch, Mike.** *Why machine probes are becoming more popular.* Modern machine shop, Janeiro, 1997.
- [166] **Albert, Mark.** *Integrating inspection and machining.* Modern machine shop, Janeiro, 1990.

- [167] **Zelinski, Peter.** *Break the accuracy barrier.* Modern machine shop , Março, 1997.
- [168] **Sousa, A. and Schneider, C. A.** *An indirect method to verify and enhance machine tool accuracy.* Proceeding of LAMDAMAP IV, Laser Metrology and Machine Performance, Julho, 1999.
- [169] **Gonçalves, José R.** *Há 16.250 máquinas CNC em operação no Brasil, mas logo pode haver mais.* Máquinas e Metais, pp. 18 - 44, Janeiro, 1997.
- [170] **Gonçalves, José R.** *Inventário sobre as máquinas-ferramentas que estão em operação no país.* Máquinas e Metais, pp. 122 - 130, Dezembro, 1994.
- [171] *Os centros de usinagem disponíveis no mercado brasileiro.* Máquinas e Metais, Maio, 1997.
- [172] **Luckmann, Carlos and Lensch, Volker.** *Máquinas-ferramenta CNC: Pesquisa mostra qual a base instalada brasileira.* Máquinas e Metais, Abril, 1992.
- [173] **Lee, H. S. and Moritz, E.** *Functional description of machine tools and its application to marketability analyses.* Journal of Engineering Design, Vol. 7, No 1, pp. 83-94, 1996.
- [174] **Klen, E. R.** *Calibração de Máquinas de Medir por Coordenadas utilizando Placas de esferas - Uma técnica econômica, rápida e metrologicamente eficiente.* Dissertação de Mestrado em Metrologia Científica e Industrial, Engenharia Mecânica, UFSC, 2000.
- [175] *Diretriz VDI/VDE 2617 Part 3: Accuracy of Coordinate Measuring Machines - Characteristic Parameters and their Checking Components of Measurement Deviation of the Machine.*
- [176] *Diretriz DKD para especificação e calibração de placas de esferas ou de furos como padrões para máquinas de medir por coordenadas.* Documentação interna - Laboratório de Medição por Coordenadas - Fundação CERTI, 1995.
- [177] **Hatch, J. E.** *Aluminum - Properties and Physical Metallurgy.* American Society for Metals, 1984.
- [178] *Introduction to Positioning Equipment.* Technical Report, Newport Inc, 1997.
- [179] *Guia para a expressão da incerteza de medição.* Segunda edição Brasileira do "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement", ABNT, INMETRO, SBM. Rio de Janeiro, 1998.