



## Otimização dimensional das peças usinadas através da qualificação geométrica da máquina-ferramenta

André Roberto de Sousa<sup>1</sup> e Carlos Alberto Schneider<sup>2</sup>  
LABMETRO – Laboratório de Metrologia e Automatização  
Departamento de Engenharia Mecânica  
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina  
CP 5053, Campus UFSC, 88040-970 – Florianópolis – SC.  
e-mail: [1ars@labmetro.ufsc.br](mailto:1ars@labmetro.ufsc.br) and [2cas@certi.ufsc.br](mailto:2cas@certi.ufsc.br)

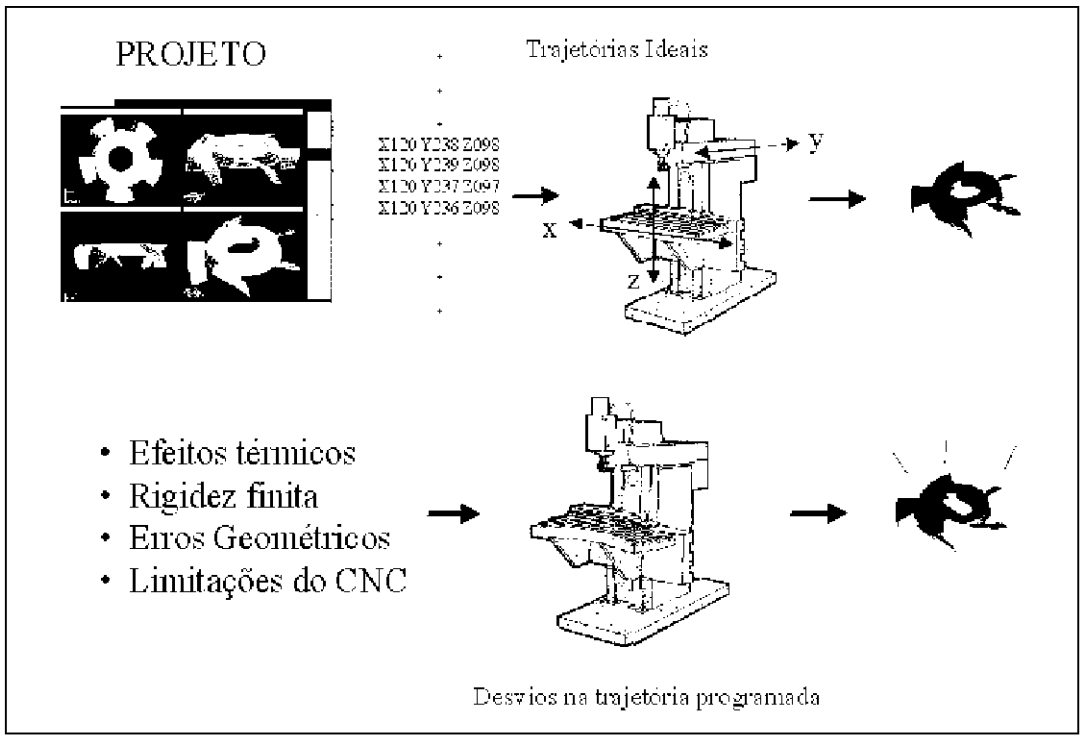
**Resumo.** *As máquinas-ferramenta apresentam não idealidades construtivas que se transferem de forma direta às peças usinadas, comprometendo sua qualidade. Para minimizar a influência destas imperfeições nas peças, é necessário qualificar geometricamente a máquina-ferramenta, o que requer o conhecimento da sua exatidão de trabalho. Neste artigo é apresentada de forma direta a influência da qualificação geométrica de um centro de usinagem sobre a conformidade geométrica das peças usinadas. Peças similares especialmente projetadas para esta tarefa foram usinadas antes e após a qualificação geométrica da máquina. A partir dos desvios dimensionais medidos nas peças, demonstra-se a melhoria obtida com a qualificação geométrica da máquina-ferramenta. Para motivar os usuários a verificações mais frequentes da exatidão de trabalho de suas máquinas, uma técnica alternativa de ensaio geométrico, em desenvolvimento, é demonstrada.*

**Palavras-chave:** *Ensaio geométrico, Metrologia das Máquinas-ferramenta, Mecânica de precisão*

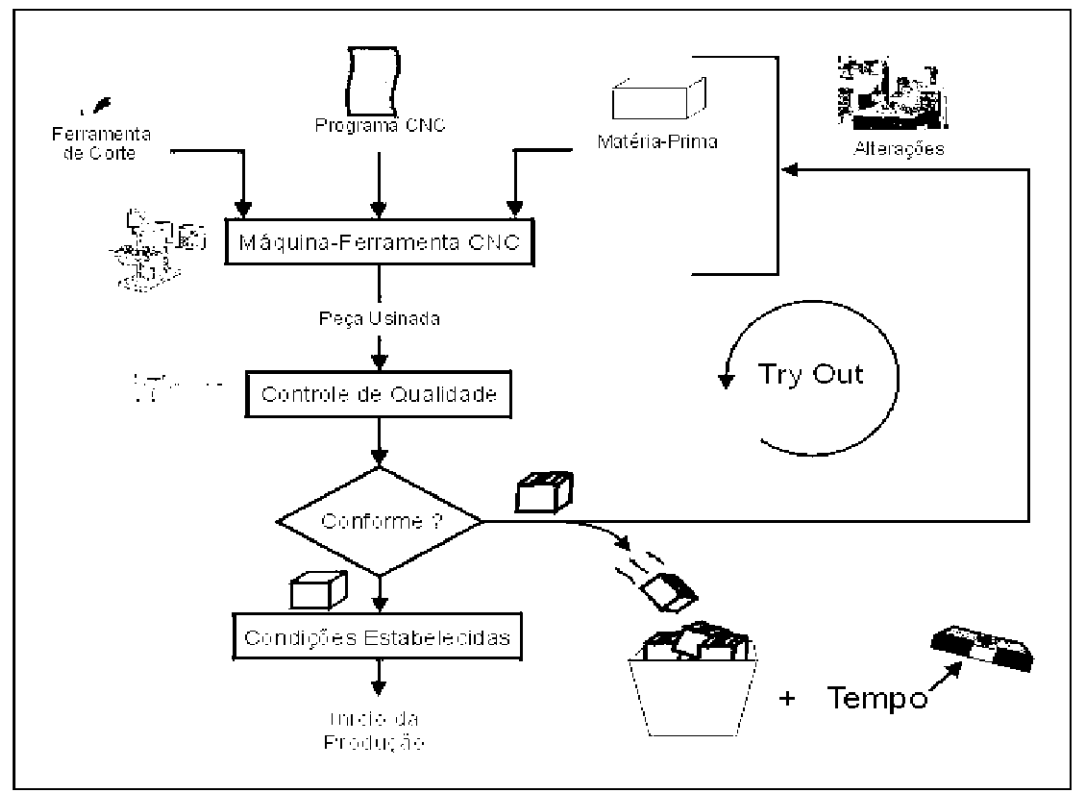
### 1. INTRODUÇÃO

A exatidão de trabalho das máquinas-ferramenta (MF) é restrita em função de diversas fontes de incerteza na sua produção e operação e, por esta razão, estas máquinas apresentam não-idealidades de diversos tipos, que se manifestam como erros de posicionamento e de orientação da ferramenta em relação à peça, afetando diretamente a qualidade final da peça usinada (Weck, 1984).

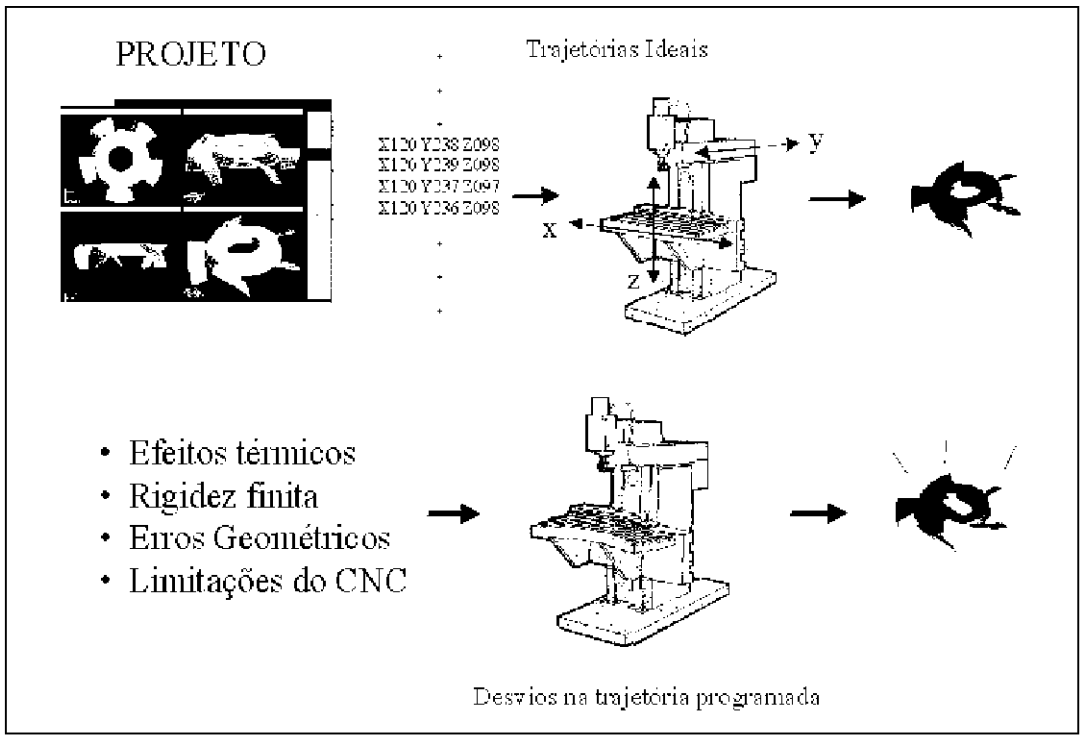
Para minimizar a influência destas imperfeições nas peças, é necessário o prévio conhecimento da exatidão de trabalho da máquina-ferramenta, conseguido através de um ensaio geométrico. A partir destas informações, a máquina pode ser afastada de serviço antes de produzir peças fora de tolerâncias, ou ser destinada à produção de peças compatíveis com sua exatidão de trabalho. Com a evolução dos controladores CNC das máquinas é possível, ainda, minimizar certas limitações mecânicas através de correções eletrônicas.



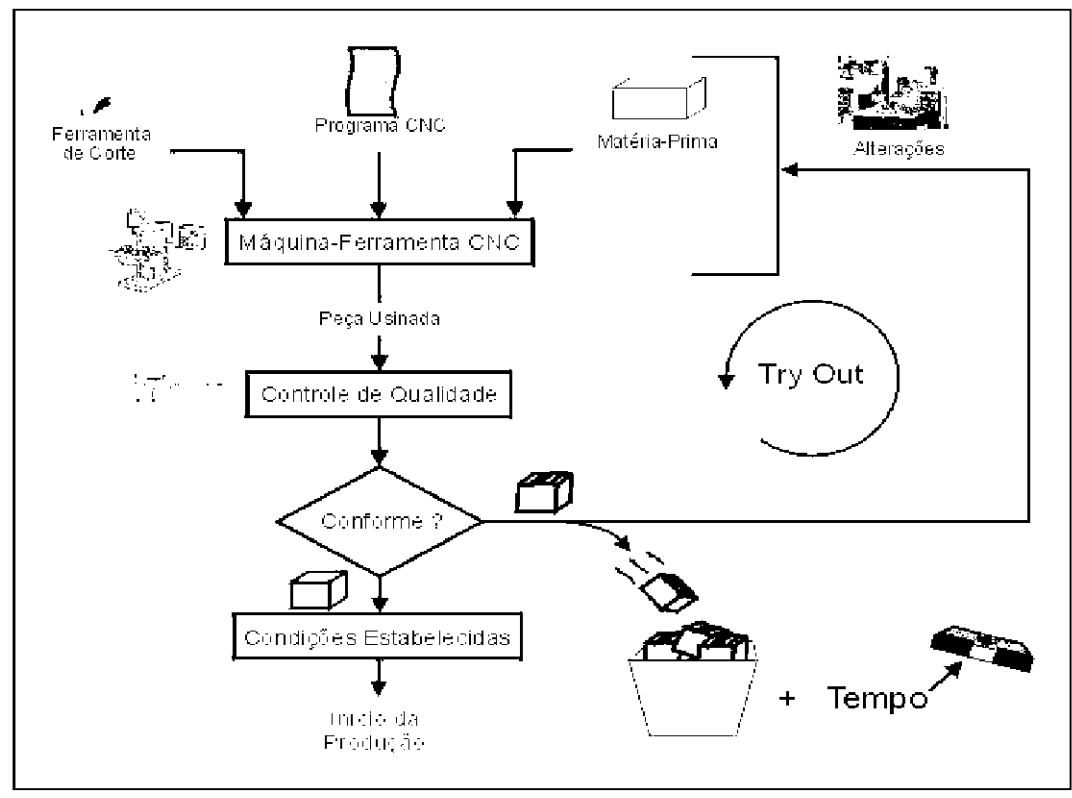
**Figura 1 - Não idealidades na máquina-ferramenta e a consequência na peça usinada**



**Figura 2 - Ciclo de try-out para o estabelecimento das condições de fabricação**



**Figura 1 - Não idealidades na máquina-ferramenta e a consequência na peça usinada**



**Figura 2 - Ciclo de try-out para o estabelecimento das condições de fabricação**

Para minimizar aqueles fatores de influência sobre a exatidão da máquina-ferramenta, diversos desenvolvimentos têm sido implementados às máquinas, que têm ficado cada vez mais rápidas e precisas, com custos decrescentes. O desenvolvimento tecnológico para minimizar estas deficiências ocorreu, em um primeiro momento, através de inovações e otimizações no projeto e fabricação dos componentes mecânicos da máquina. Esta estratégia durante certo período permitiu melhorias significativas de performance na MF mas, progressivamente, percebeu-se que os avanços conseguidos ficavam cada vez menores, para investimentos cada vez maiores, indicando que os benefícios na exatidão da MF obtida por otimizações puramente mecânicas já justificavam o custo de obtê-las (Krulwich, 1998).

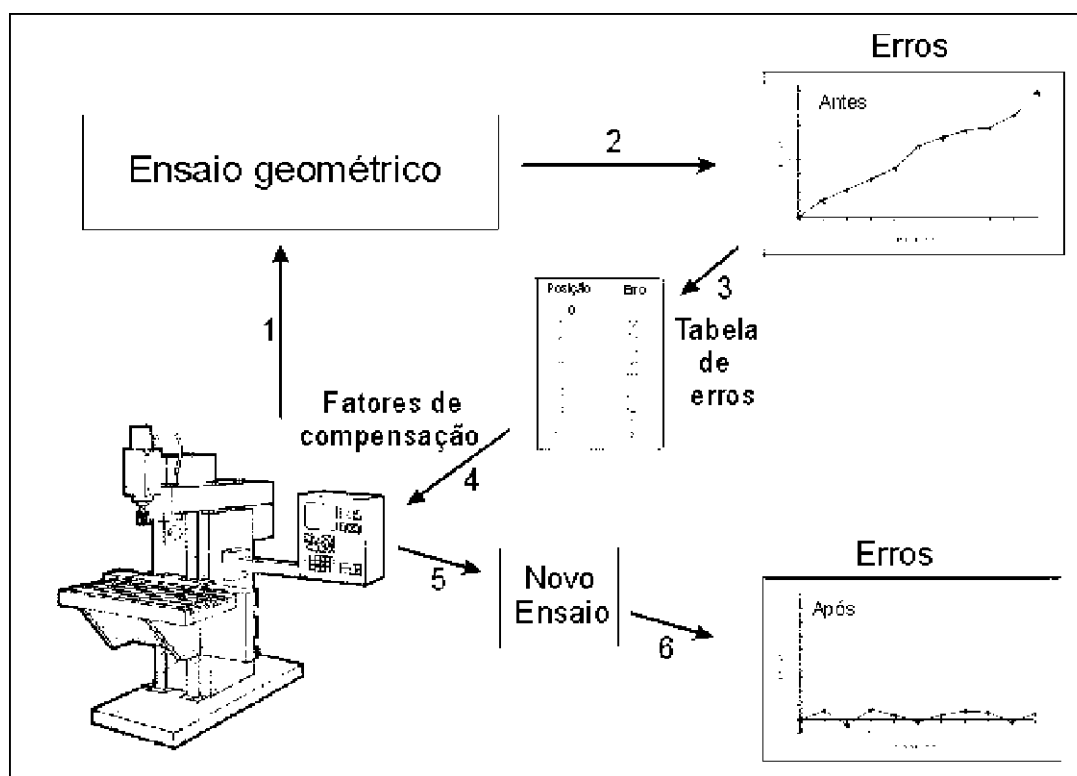
Paralelamente, os avanços da micro-eletrônica iam se incorporando às máquinas-ferramenta e, em um segundo momento, a otimização na exatidão de trabalho nas máquinas foi proporcionada pela micro-eletrônica, complementando a otimização mecânica, mas a custos bem inferiores. A partir da década de 80 alguns controladores CNC para máquinas-ferramenta passaram a oferecer recursos eletrônicos para a compensação de deficiências mecânicas e, atualmente, todos os controladores presentes no mercado apresentam, em maior ou menor grau (Sousa et al., 1996), recursos para a compensação de erros, bastante acessíveis ao usuário mas que permanecem inexplorados pela grande maioria, que não realizam a qualificação geométrica de suas máquinas.

### **3. QUALIFICAÇÃO GEOMÉTRICA DE MÁQUINAS-FERRAMENTA**

A qualificação geométrica de máquinas-ferramenta é uma estratégia para a garantia da qualidade das peças usinadas justificando-se em normas como a QS9000 onde a detecção de peças fora de tolerância apenas tolera o desperdício, enquanto a prevenção de peças fora de tolerância evita o desperdício. Ao se verificar periodicamente a exatidão de trabalho de uma máquina-ferramenta, pode-se afastá-la de serviço caso esteja com erros acima do tolerado, determinar danos causados por uma colisão e identificar partes da máquina que necessitam de manutenção, compatibilizar a exatidão de trabalho de diferentes máquinas com as tolerâncias de diferentes peças direcionando sua utilização, ou ainda otimizar sua exatidão através da compensação de erros pelo CNC.

Quando a máquina permite, a compensação de erros via CNC é o método que otimiza a exatidão mais rápida e eficientemente, com o menor custo. O procedimento de correção pode ser visualizado na figura 3, onde a máquina é testada e tem seus erros levantados. Estes valores são introduzidos no controlador da máquina, que os usará com fatores de correção, compensando em tempo real (*on the fly*) os erros anteriormente medidos.

Os principais recursos de compensação de erros geométricos existentes nos controladores CNC encontram-se listados na tabela 1, onde foram consultados alguns dos controladores para 3 eixos mais presentes no mercado. Pode-se observar que, em maior ou menor grau, todos eles permite compensar erros geométricos, o que demonstra a disponibilidade dos recursos de compensação existentes nas máquinas atuais. No entanto, apesar desta disponibilidade, a grande maioria dos usuários realiza ensaios freqüentes nem atualiza os fatores de compensação, desperdiçando uma potencial exatidão de trabalho de suas máquinas. As principais razões para esta negligência são, além da própria desinformação do usuário, dificuldades operacionais com as técnicas de ensaio utilizadas no processo de qualificação geométrica.



**Figura 3 - Compensação de erros pelo CNC da máquina-ferramenta**

**Tabela 1.** Recursos de compensação de erros geométricos presentes em diferentes controladores

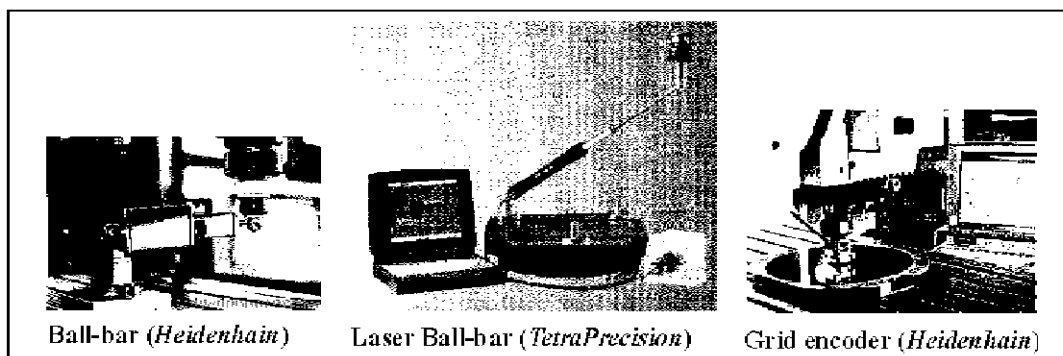
<b>Controlador</b>	A	B	C	D	E	F	G	H
<b>Erro</b>								
Folga/Histerese	X	X	X	X	X	X	X	X
Posicionamento	X	X	X	X	X	X	X	X
Retilidade		X	X	X		X		X
Perpendicularidade		X	X	X		X		X

Não basta ao método de ensaio ser viável metrologicamente, fornecendo resultados completos e confiáveis. A sua aplicação tem que se justificar, ainda, dos pontos de vista operacional e econômico. De pouco adianta um método de ensaio altamente confiável mas difícil de implementar e caro. Estes três requisitos devem ser atendidos simultaneamente.

As técnicas clássicas de ensaio de máquinas (figura 4) não atendem plenamente a esses requisitos. Normalmente essas técnicas de ensaio que fornecem resultados bastante completos e confiáveis mas são pouco práticas de utilização e de custo elevado. Por outro lado existem técnicas de baixo custo e de fácil e rápida aplicação, mas que fornecem somente uma avaliação geral do estado máquina sem conseguir chegar aos erros individuais. Recentemente, diversas pesquisas têm sido desenvolvidas e várias técnicas de ensaio (figura 5) têm sido lançadas no mercado buscando superar esta limitação (Ziegert, 1994; Liotto, 1997). Embora avanços tenham ocorrido, o desafio tecnológico de desenvolver uma técnica confiável, prática e de baixo custo permanece.



**Figura 4 - Técnicas clássicas de ensaio geométrico**

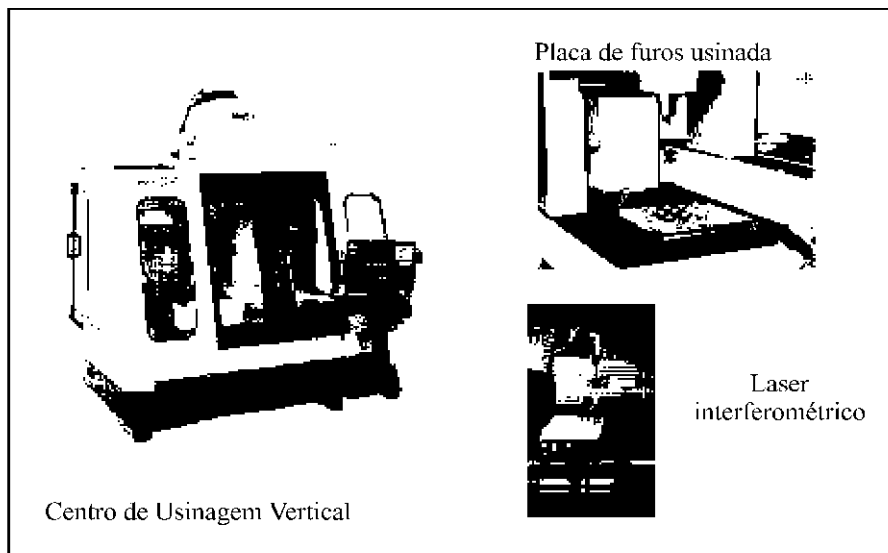


**Figura 5 - Técnicas de ensaio recentemente lançadas**

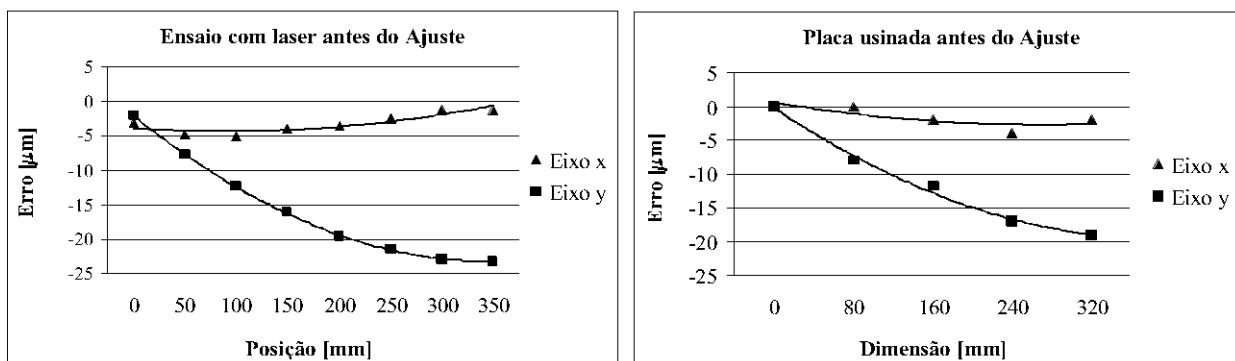
#### 4. OTIMIZAÇÃO DIMENSIONAL DAS PEÇAS USINADAS

Para demonstrar de forma prática a melhoria das peças com a qualificação geométrica da máquina-ferramenta, peças iguais foram usinadas **antes** e **após** os ensaios de posicionamento com laser interferométrico e compensações de erro pelo CNC. Uma das peças foi usinada na condição em que a máquina-ferramenta se encontrava, após o que foram feitos os 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. Após verificada a eficiência dos ajustes, uma nova 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 a posição dos centros dos furos nas duas direções (**x** e **y**) do plano horizontal da máquina-ferramenta. A figura 6 mostra a máquina testada, o laser interferométrico utilizado para o ensaio de posicionamento dos eixos e a máquina de medir por coordenadas onde as placas usinadas, foram medidas.

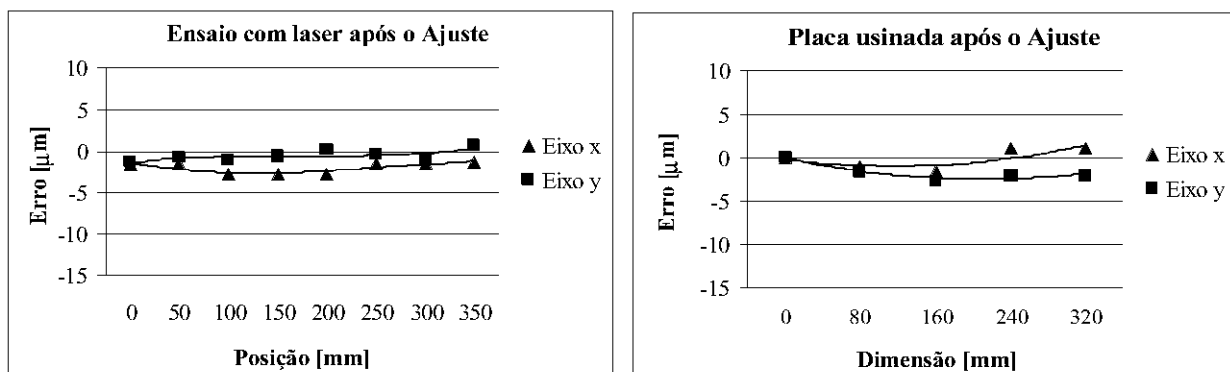
Os resultados dos ensaios com laser e da medição das placas, antes e após os ajustes, podem ser vistos nas figura 7 e 8, indicando que o eixo **y** da máquina encontrava-se acima do limite especificado pelo fabricante, sendo sensível a redução ocorrida com a correção via CNC. Os erros na direção **x** já encontravam-se dentro das especificações da máquina. Todas as curvas apresentam uma dispersão de  $\pm 4\mu\text{m}$ .



**Figura 6 - Verificação da exatidão de trabalho de um centro de usinagem**



**Figura 7 - Exatidão de trabalho da máquina antes do ajuste**



**Figura 8 - Exatidão de trabalho da máquina após o ajuste**

Estes resultados indicam simultaneamente que os erros presentes na máquina-ferramenta, medidos com o laser, se transferem diretamente às peças usinadas e, também, que a correção de erros pelo CNC otimizou significativamente a exatidão de trabalho da máquina no eixo y, que estava com erros acima do especificado para a máquina.

Apesar desta eficiência na otimização da exatidão de trabalho estes ensaios demandaram um esforço operacional bastante grande. Para o ensaio da máquina com o laser foram necessários 8 horas de trabalho, por pessoal bastante qualificado para a tarefa.

A boa concordância dos resultados da placa usinada com o laser, indica que a própria peça poderia ser utilizada para atestar a exatidão de trabalho da máquina, a custos e tempos bem inferiores ao laser. Para o acabamento de cada peça foram gastos 14 minutos na máquina-ferramenta e a medição de cada placa demorou cerca de 20 minutos na máquina de medir. Métodos alternativos como esse urge ser desenvolvidos para motivar os usuários a verificações mais freqüentes de sua máquinas.

## 5. UMA TÉCNICA ALTERNATIVA PARA O ENSAIO DE CENTROS DE USINAGEM

Neste momento encontra-se em desenvolvimento conjunto pelo LABMETRO/UFSC e Fundação CERTI, em parceria com a DIADUR, uma técnica de ensaio de centros de usinagem que consiste na utilização de um apalpador de medição *Heidenhain* acoplado à máquina e de padrões corporificados especialmente construídos para essa tarefa, e previamente calibrados em máquinas de medir por coordenadas. Estes padrões são medidos na própria máquina-ferramenta, um software processa as coordenadas dos pontos tocado e determina as componentes dos erros, que são formatados para a atualização dos fatores de compensação do CNC.

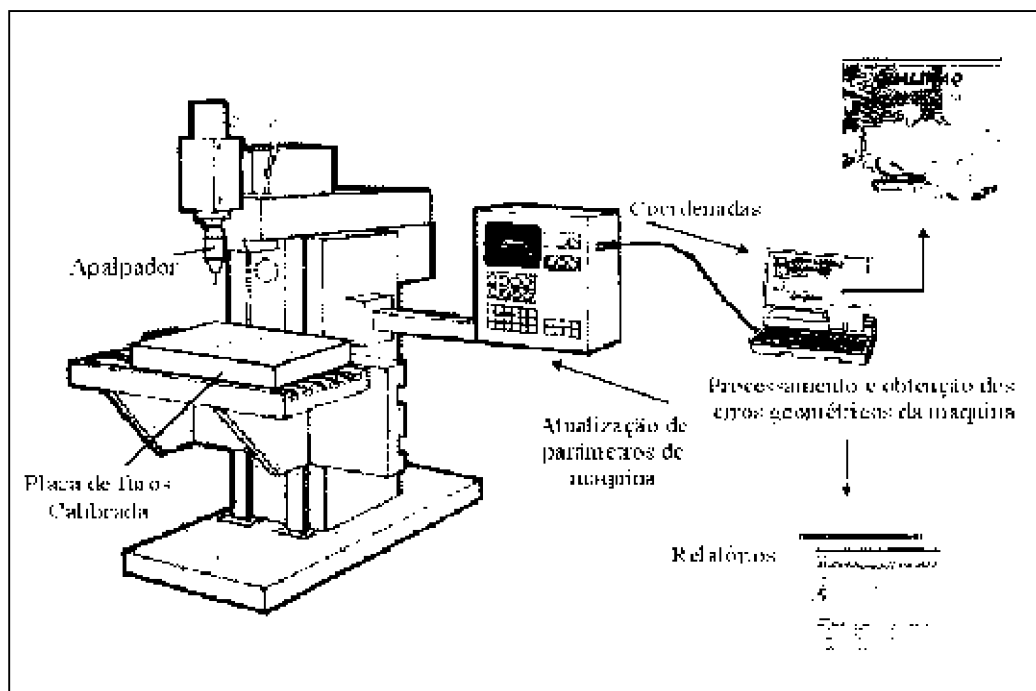
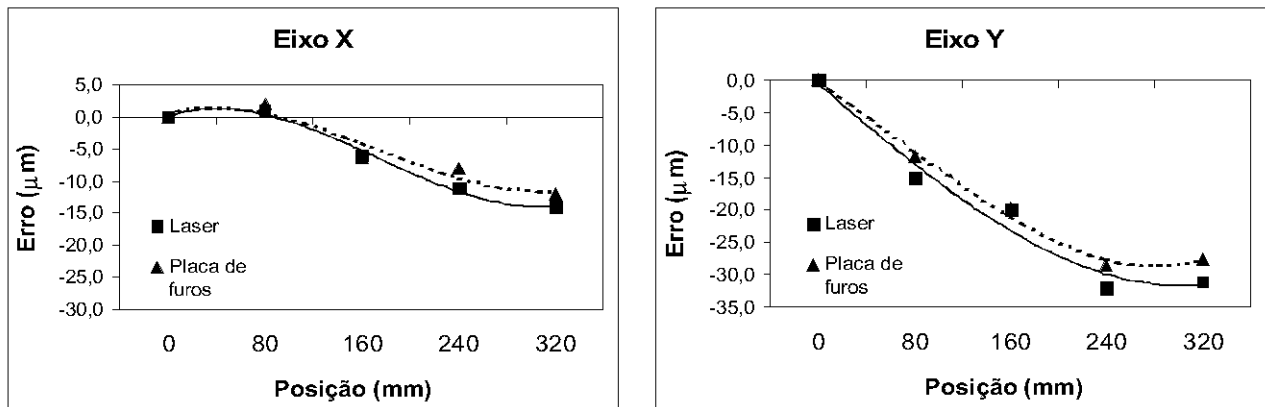


Figura 9 - O sistema de ensaio em desenvolvimento



A grande vantagem apresentada pelo método reside no baixo custo dos equipamentos, na facilidade de aplicação, reduzido tempo de ensaio, com baixa incerteza de medição. Os resultados iniciais indicam para o atendimento destas expectativas. Nas figura 10 pode-se observar uma comparação entre os resultados de ensaios de posicionamento em uma mesma máquina (fresadora CNC ROMI POLARIS), utilizando técnicas clássicas e o método proposto. Deve-se ressaltar que, para o ensaio de posicionamento, retlineidade e perpendicularidade foram gastos 12 horas de trabalho utilizando técnicas clássicas e 55 minutos com o método em desenvolvimento.



**Figura 10 – Concordância de resultados entre o laser interferométrico e o método proposto**

## 6. CONCLUSÕES

A melhoria obtida para as peças usinadas neste trabalho, com a prática de ensaios geométricos em máquinas-ferramenta e compensações de erro via CNC, ilustram de forma prática o potencial da exatidão de trabalho das máquinas CNC que é desperdiçado pelo fato dos usuários não manterem uma prática freqüente de ensaios, às vezes nem no ato da compra da máquina. A possibilidade de diminuir o volume de peças refugadas e retrabalhadas, com a prática destes ensaios, não tem sido observada como deveria pelos usuários nacionais.

As causas para esta desconsideração (desconhecimento da problemática e dificuldades com os ensaios geométricos) foram abordadas, levando à constatação da necessidade do desenvolvimento de técnicas de ensaio que motivem os usuários a ensaios periódicos.

Neste sentido, uma técnica alternativa de para o ensaio de centros de usinagem está em desenvolvimento, procurando aliar baixa incerteza de medição, com praticidade operacional e baixo custo. Os resultados iniciais indicam que a técnica mostra-se promissora, constituindo-se como uma boa opção para motivar os usuários a verificações periódicas de suas máquinas.

Neste momento de abertura dos mercados à competição internacional, é imperativo que a indústria nacional se preocupe com a excelência daquilo que produz. Cada vez mais o aumento de qualidade e produtividade deixa de ser apenas uma estratégia de crescimento para se tornar, um meio de sobrevivência frente à intensa concorrência estrangeira. Este trabalho procurou esclarecer sobre o uso de recursos práticos, eficientes e disponíveis, para que esse ganho de produtividade ocorra na área de usinagem.

### *Agradecimentos*

- DIADUR Ind. e Com. LTDA, subsidiária brasileira da empresa Dr. Johannes Heidenhain GmbH, pela parceria na realização desta pesquisa.
- Laboratório de Mecânica de Precisão – Engenharia Mecânica – UFSC, pela disponibilização de sua estrutura física e pessoal de apoio.

### **7. REFERÊNCIAS**

- Krulwich, D. *Rapid mapping of volumetric machine errors using distance measurements*. Proceedings of the International Seminar on Improving machine tool performance, vol. 2, p. 487, 1998.
- Liotto, G. & Wang, C.P., 1997, Laser Doppler displacement meter allows new diagonal measurement for large aspect ratio machine tool easily and accurately. Proceedings of Lamdamap III, Laser Metrology and Machine Performance.
- Weck, M., 1984, Handbook of Machine Tools, Vol. 4 – Metrological Analysis and Performance Tests.
- Park H. & Little, T. A., 1992, Testes de Desempenho de máquinas garantem a qualidade da produção. Máquinas e Metais, Outubro.
- Pfeifer, T. & Schneider, C.A., 1978 Einsatz neuer Laser-Technologien zur Messung der Abweichung von der Geradlinigkeit. Westdeutscher Verlag GmbH, Opladen.
- Scavone, R., 1996, Avaliação das necessidades da indústria em relação aos ensaios de qualificação geométrica de máquinas-ferramenta. Relatório final de pesquisa de mercado, Fundação CERTI.
- Sousa, A. R., Schneider, C.A. & Scavone, R., 1997. A compensação de erros geométricos via CNC é rápida e eficiente, mas pouco praticada. Máquinas e Metais, Maio 1997.
- Ziegert, J. & Mize, C., 1994, The laser ball bar: a new instrument for machine tool metrology. Precision Engineering, vol. 4, N° 16.

### **Precision enhancement of machined pieces by periodical Machine tool Geometrical tests and CNC error compensation**

**Abstract.** *The geometric errors of the machine tools are transferred directly to the machined pieces, affecting their accuracy and process productivity. With the CNC development, some of these mechanical errors can be compensated electronically, taking the machine accuracy beyond its mechanical limitations. To take advantage of this means, the users should periodically calibrate their machines, as the geometric accuracy varies according to normal use and/or after some collision, for example. In this paper the direct influence of this CNC error compensation resources on the precision of machined workpieces is demonstrated. A vertical machine centre was tested with laser interferometer and the CNC error compensation table was updated. Similar workpieces were machined before and after the laser test and, then, measured on a coordinate measuring machine. The comparison of these pieces demonstrates the direct influence of machine tool accuracy on the workpieces and highlights the efficiency of periodic geometrical test and CNC error compensation on machine tools.*

**Key words:** *Machine tool metrology, Precision Engineering, Geometric tests*