

# AVALIAÇÃO GEOMÉTRICA DE MÁQUINAS-FERRAMENTAS CNC ATRAVÉS DO MÉTODO DE PADRÕES CORPORIFICADOS

## **Moacir Eckhardt**

Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul  
Av. Prof. Rudi Franke, 540. Bairro Arco-Íris. CEP: 98280-000, Panambi – RS  
[moacir@unijui.tche.br](mailto:moacir@unijui.tche.br)

## **Luis Francisco Marcon Ribeiro**

Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul  
Av. Prof. Rudi Franke, 540. Bairro Arco-Íris. CEP: 98280-000, Panambi – RS  
[marcon@unijui.tche.br](mailto:marcon@unijui.tche.br)

## **Felipe Pozzatti Schwingel**

Av. Prof. Rudi Franke, 540. Bairro Arco-Íris. CEP: 98280-000, Panambi – RS  
[felipeschwingel@yahoo.com.br](mailto:felipeschwingel@yahoo.com.br)

## **Adonis Pellin**

Av. Prof. Rudi Franke, 540. Bairro Arco-Íris. CEP: 98280-000, Panambi – RS  
[pellin@gmail.com](mailto:pellin@gmail.com)

## **Gilberto Sackser**

Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul  
Av. Prof. Rudi Franke, 540. Bairro Arco-Íris. CEP: 98280-000, Panambi – RS  
[sackser@unijui.tche.br](mailto:sackser@unijui.tche.br)

## **Luiz Carlos da Silva Duarte**

Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul  
Av. Prof. Rudi Franke, 540. Bairro Arco-Íris. CEP: 98280-000, Panambi – RS  
[lduarte@unijui.tche.br](mailto:lduarte@unijui.tche.br)

**Resumo.** *A usinagem é um processo de larga utilização na geração de componentes mecânicos, sendo que a verificação das máquinas-ferramentas quanto ao comportamento geométrico é importante para o estabelecimento de seu desempenho. Diversas não idealidades presentes nas máquinas-ferramentas provocam alterações indesejadas na trajetória relativa entre a peça e a ferramenta de corte que se transferem de forma direta à geometria das peças usinadas, comprometendo sua exatidão. Atualmente, os controladores CNC (comando numérico computadorizado) apresentam recursos para compensação eletrônica de deficiências mecânicas (erros), as quais podem ser determinadas através de uma avaliação geométrica da máquina-ferramenta. Empregando o método da medição direta através do uso de padrões corporificados, os Laboratórios de Fabricação Assistida e de Metrologia da UNIJUÍ elaboraram um procedimento para qualificação geométrica de máquinas-ferramentas CNC de pequeno e médio porte. O procedimento prevê a determinação dos valores das componentes dos erros de posicionamento, retilidade, perpendicularidade e histerese sobre três eixos coordenados (X, Y e Z). As leituras realizadas são processadas eletronicamente e apresentadas no formato de relatório, contendo dados como a incerteza de medição de cada ensaio realizado. Para validação do procedimento foram realizados dois estudos de caso. Através dos ensaios são determinados os valores que devem ser inseridos no CNC da máquina-ferramenta para a compensação dos erros geométricos, conseguindo-se levar a exatidão da máquina além de suas limitações mecânica.*

**Palavras-chave:** ensaios geométrico, máquina-ferramenta, padrões corporificados.

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a competitividade entre as empresas exige que os sistemas de fabricação por elas utilizados apresentem rapidez, flexibilidade e confiabilidade. No entanto, muitos sistemas operam de forma ineficiente, sendo que na área da usinagem o problema se torna mais crítico.

Como principal equipamento do processo de usinagem, diversas otimizações têm sido pesquisadas e implementadas às máquinas-ferramentas 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<sup>(1,2)</sup>.

Inicialmente os desenvolvimentos foram no sentido de minimizar as deficiências na parte mecânica da máquina e, posteriormente através da incorporação de controladores CNC que apresentavam recursos para a compensação eletrônica de deficiências mecânicas. 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<sup>(1,3)</sup>.

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<sup>(1)</sup>.

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 do serviço, antes que produza peças fora de tolerância<sup>(1,4)</sup>.

Este artigo apresenta um procedimento experimental que emprega o método da medição direta através do uso de padrões corporificados para a qualificação geométrica de máquinas-ferramentas CNC de pequeno e médio porte, e relata os resultados obtidos a partir da sua aplicação em dois estudos de caso.

## 2. MÉTODOS DE ENSAIOS GEOMÉTRICOS

As máquinas-ferramentas podem ser avaliadas empregando-se vários métodos<sup>(5)</sup>, cujas características classificam-nos em métodos de qualificação e métodos de avaliação<sup>(1)</sup>. 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 longos tempos de ensaio e alto custo dos equipamentos. Os resultados destes ensaios podem ser empregados para atualizar os fatores de compensação de erros no CNC da máquina. Como exemplos de métodos de qualificação têm-se o laser interferométrico<sup>(3)</sup>, o laser de alinhamento<sup>(1)</sup> e as réguas/esquadros<sup>(1)</sup>.

Os métodos que empregam régua, esquadro e comparador são os 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. Os métodos fornecem resultados confiáveis, com baixo custo dos equipamentos e a operação é simples e relativamente rápida<sup>(1)</sup>.

Os métodos de avaliação normalmente empregam equipamentos de menor custo e a sua aplicação se dá de maneira fácil e rápida, mas fornecem apenas uma avaliação geral sobre o estado da máquina. Os erros da máquina normalmente se apresentam sobrepostos, sendo difícil e/ou pouco

confiável a separação de cada fonte de erro<sup>(1)</sup>. Estes métodos destinam-se a uma avaliação mais rápida e freqüente da máquina, e apresentam pouca utilidade para a correção de erros no CNC. O ball bar<sup>(6,7)</sup> e a peça padrão usinada são exemplos de métodos de avaliação<sup>(1)</sup>. Como exemplos de tecnologias mais recentes para o ensaio de máquinas têm-se o grid encoder<sup>(1,8)</sup> e o laser ball bar<sup>(1)</sup>.

### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL DE QUALIFICAÇÃO DE MÁQUINAS-FERRAMENTAS

A sistemática para a realização de ensaios geométricos proposta fixa as condições para realização de qualificação de máquinas-ferramentas utilizando padrões corporificados (régua e esquadro de granito) e um medidor eletrônico de deslocamento (ou comparador eletrônico). Aplica-se em todas as qualificações de máquinas-ferramentas com deslocamento máximo no eixo x de 790 mm, no eixo y de 790 mm e no eixo z de 520 mm.

#### 3.1. Determinação do Erro de Retilidade

Para a realização dos ensaios de retilidade utiliza-se o medidor eletrônico de deslocamento com dispositivo mostrador com resolução de 0,0001 mm. Como padrão de retilidade para os ensaios dos eixos x e y utiliza-se a régua de granito, enquanto que para o eixo z utiliza-se o esquadro de granito. Os eixos x e y são ensaiados com a régua localizada em 3 posições distintas e o eixo z é ensaiado com o esquadro localizado em 9 posições distintas. A figura 1 apresenta o layout de posicionamento dos padrões sobre a mesa de trabalho, para cada uma das posições previstas.

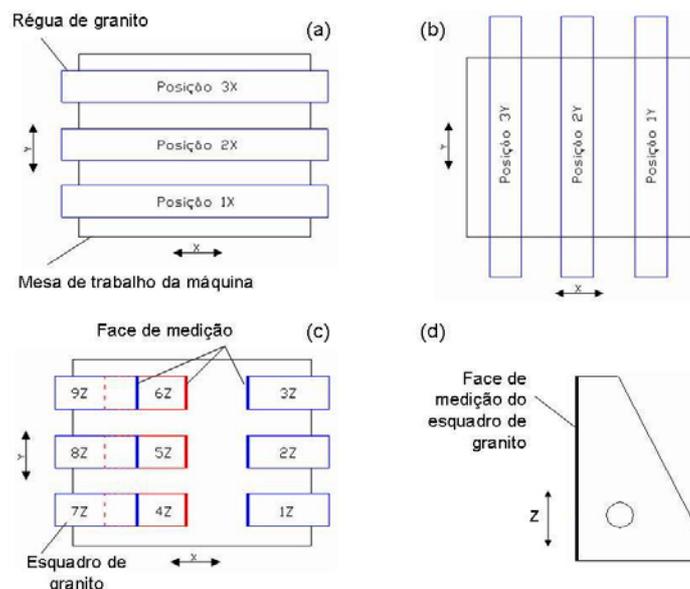


Figura 1. Ensaio de retilidade: (a) eixo x; (b) eixo y; (c) eixo z; (d) eixo z do esquadro.

#### 3.2. Determinação da Histerese

Para a determinação da histerese no eixo x deve-se dividir o curso do eixo em 3 partes (início, meio e fim). O esquadro deve ser posicionado segundo o layout apresentado na figura 1(c). Para a realização das medições, afasta-se o comparador eletrônico 10 mm (no eixo x) da posição em que faz contato com o esquadro e posteriormente faz-se o movimento de retorno à posição inicial com deslocamento de 10 mm. A diferença apresentada deve ser registrada na planilha de coleta de dados. São efetuados 3 ciclos de medição para cada ponto do esquadro de granito.

Para a determinação da histerese no eixo y, o esquadro deve ser posicionado conforme o layout ilustrado na figura 2(a). A forma de dispor o padrão deve ser de tal forma que abranja toda a superfície xy.

Para a determinação da histerese no eixo z a única variante do experimento é o uso da régua de granito como padrão, pois as medições são feitas segundo a direção z.

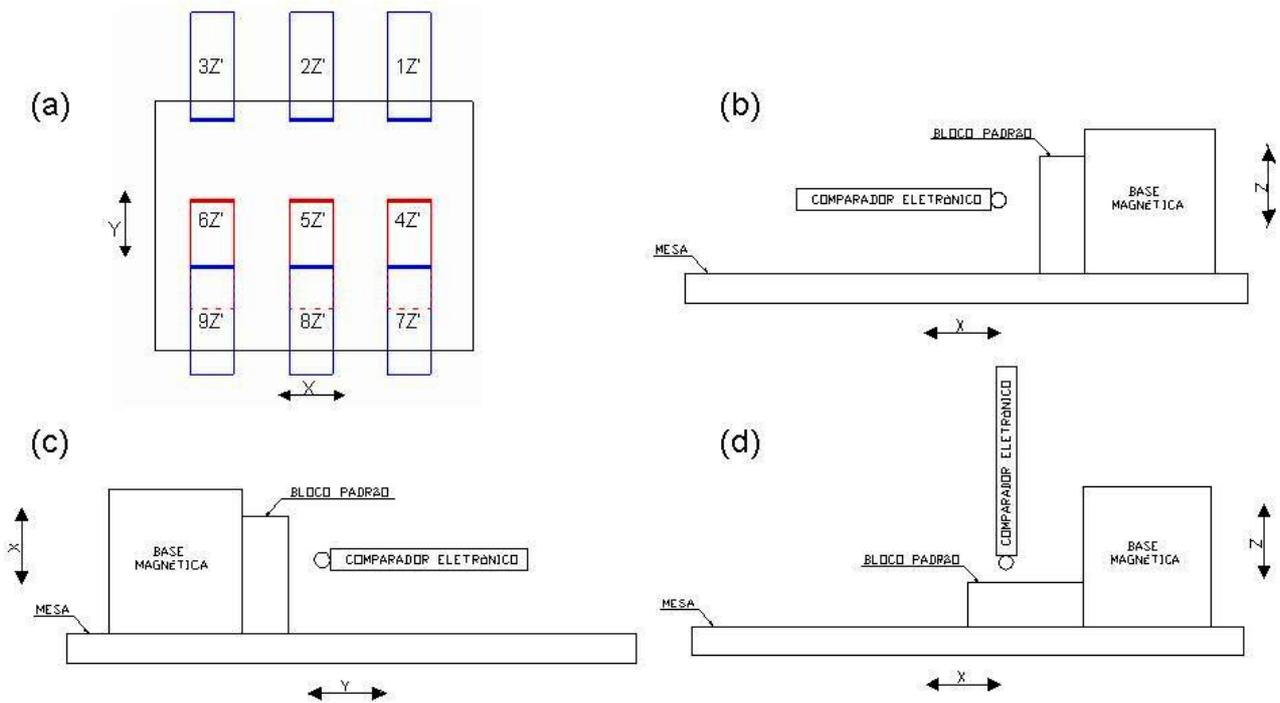


Figura 2. Layout dos ensaios de determinação de (a) histerese no eixo y; e erro de posicionamento (b) no eixo x; (c) no eixo y; e, (d) no eixo z.

### 3.4. Determinação do Erro de Perpendicularidade e de Posicionamento

O ensaio de perpendicularidade utiliza os dados médios das retilidades dos eixos x, y e z respectivamente. Os coeficientes angular e linear da reta de regressão (obtida pelo método de mínimos quadrados) são determinados pelo processamento dos dados do gráfico de retilidade.

Para a determinação do erro de posicionamento no eixo x, monta-se o experimento conforme o layout apresentado na figura 2(b), no início do curso do eixo x.

Para a realização das medições, move-se o comparador eletrônico da seguinte forma: 90 % do curso do eixo em x no sentido positivo; 90 % do curso do eixo em y no sentido negativo; 75 % do curso do eixo em z no sentido positivo; 50 % do curso do eixo em x no sentido negativo; 40 % do curso do eixo em y no sentido positivo; 20 % do curso do eixo em z no sentido negativo. Posteriormente faz-se o comparador eletrônico retornar, percorrendo o caminho oposto ao recomendado e registra-se, então, a diferença apresentada.

Para a determinação do erro de posicionamento no eixo y (figura 2(c)) e no eixo z (figura 2(d)) o processo é basicamente o mesmo, com algumas modificações na trajetória de avanço e retorno sugerida para o deslocamento do comparador eletrônico.

## 4. APLICAÇÃO DO PROCEDIMENTO - ESTUDOS DE CASO

Para validação do procedimento foram realizados ensaios de qualificação em duas máquinas-ferramentas CNC: um centro de usinagem Dyna, pertencente ao Laboratório de Fabricação Assistida da Unijuí, e uma fresadora Hermle, pertencente ao Colégio Evangélico Panambi.

As máquinas possuem as seguintes características:

- Fabricante: Dyna; Modelo: 2016; Volume de trabalho: 508x406x508 mm; Divisão de escala: 0,001 mm; Estado de conservação e funcionamento: Bom;

- Fabricante: Hermle; Modelo: UWF 721; Volume de trabalho: 460x360x400 mm; Divisão de escala: 0,001 mm; Estado de conservação e funcionamento: Bom.

Os resultados obtidos nos ensaios de qualificação são apresentados nas tabelas 1 a 4 abaixo.

Tabela 1. Resultados do Ensaio de Retilidade

DENOMINAÇÃO	AVANÇO ( $\mu\text{m}$ )			RETORNO ( $\mu\text{m}$ )			INCERTEZA DE MEDIÇÃO ( $\mu\text{m}$ )
	MÉDIA	MÁXIMO	MÍNIMO	MÉDIA	MÁXIMO	MÍNIMO	
<b>Centro de Usinagem DYNA 2016</b>							
Erro de Retilidade no eixo x	0,4	12,9	-36,6	0,7	13,2	-36,2	3,0
Erro de Retilidade no eixo y	-10,6	0,5	-38,8	-10,7	0,6	-38,4	
Erro de Retilidade no eixo z	-3,1	15,5	-32,7	-3,9	15,0	-33,2	
<b>Fresadora Hermle UWF 721</b>							
Erro de Retilidade no eixo x	8,2	15,6	-2,3	10,9	17,9	-2,3	3,0
Erro de Retilidade no eixo y	6,8	31,8	-10,9	4,0	31,8	-11,8	
Erro de Retilidade no eixo z	-60,3	4,0	-210,0	-60,9	3,6	-210,0	

Tabela 2. Resultados do Ensaio de Histerese

DENOMINAÇÃO	MÉDIA ( $\mu\text{m}$ )	MÁXIMO ( $\mu\text{m}$ )	MÍNIMO ( $\mu\text{m}$ )	INCERTEZA DE MEDIÇÃO ( $\mu\text{m}$ )
<b>Centro de Usinagem DYNA 2016</b>				
Histerese no eixo x	0,1	5,8	-5,9	3,0
Histerese no eixo y	0,1	3,8	-2,8	
Histerese no eixo z	0,1	2,2	-2,0	
<b>Fresadora Hermle UWF 721</b>				
Histerese no eixo x	-0,5	3,2	-1,8	3,0
Histerese no eixo y	0,0	2,0	-1,2	
Histerese no eixo z	0,5	1,0	-0,2	

Tabela 3. Resultados do Ensaio de Perpendicularidade

DENOMINAÇÃO	ÂNGULO FORMADO ENTRE OS DOIS EIXOS (graus)	INCERTEZA DE MEDIÇÃO ( $\mu\text{m}$ )
<b>Centro de Usinagem DYNA 2016</b>		
Perpendicularidade entre os eixos X e Y:	90,1°	3,0
Perpendicularidade entre os eixos X e Z:	90,0°	
Perpendicularidade entre os eixos Y e Z:	90,1°	
<b>Fresadora Hermle UWF 721</b>		
Perpendicularidade entre os eixos X e Y:	89,9°	3,0
Perpendicularidade entre os eixos X e Z:	90,3°	
Perpendicularidade entre os eixos Y e Z:	90,3°	

Tabela 4. Resultados do Ensaio de Posicionamento

DENOMINAÇÃO	MÉDIA ( $\mu\text{m}$ )	INCERTEZA DE MEDIÇÃO ( $\mu\text{m}$ )
<b>Centro de Usinagem DYNA 2016</b>		
Erro de Posicionamento no eixo x	1,0	3,0
Erro de Posicionamento no eixo y	0,0	
Erro de Posicionamento no eixo z	1,2	
<b>Fresadora Hermle UWF 721</b>		
Erro de Posicionamento no eixo x	-1,1	3,0
Erro de Posicionamento no eixo y	-0,3	
Erro de Posicionamento no eixo z	0,2	

## 5. CONCLUSÕES

Com o procedimento desenvolvido tem sido possível realizar a avaliação geométrica de máquinas-ferramentas. No entanto algumas limitações têm surgido, sobretudo pelas dificuldades de posicionamento dos padrões na mesa de trabalho das máquinas-ferramentas. Os padrões corporificados, em função do volume que ocupam, representam obstáculos para a movimentação da máquina, aumentando o risco da ocorrência de colisões e dificultando a simulação da trajetória da ferramenta. Além disso, não raramente o apoio da régua de granito nas mesas de trabalho das máquinas tem apresentado instabilidade, com parte da sua base localizada fora da mesa, exigindo dessa forma o uso de mecanismos de fixação da régua na mesa.

A fixação do transdutor de deslocamentos na árvore da máquina é outra limitação. As fixações utilizadas têm apresentado problemas de rigidez, sendo responsável por parte da incerteza de

medição estimada. Além disso, o posicionamento do sensor muito afastado do eixo da árvore da máquina produz também uma limitação na capacidade de varredura do volume total de trabalho da máquina-ferramenta. Pode-se dizer que, devido a estes fatores, o volume que se pode medir é significativamente menor que o volume de trabalho da máquina-ferramenta.

Apesar das limitações relatadas, os resultados encontrados refletem as condições em que as mesmas são empregadas. A Fresadora Hermle possui um elevado tempo de uso e sua utilização está basicamente voltada para operações de desbaste e fabricação de peças/componentes com intervalos de tolerância elevados. Por sua vez, o Centro de Usinagem DYNA possui menor tempo de uso e é utilizado basicamente em atividades de ensino e na produção de peças para manutenção. No caso da fresadora, algumas correções poderiam ser introduzidas no comando da máquina, principalmente no que se refere ao erro de retilineidade apresentado pelo eixo z.

## 6. AGRADECIMENTOS

À SC&T - Secretaria de Ciência e Tecnologia do Estado do Rio Grande do Sul, pelos recursos para a aquisição dos padrões e instrumentos.

À UNIJUÍ, pela disponibilização de tempo e de infra-estrutura laboratorial para a pesquisa;

Ao Colégio Evangélico Panambi, pela colaboração na realização de ensaios.

## 7. REFERÊNCIAS

1. SOUZA, André Roberto de. **Padrões Corporificados e Tecnologia de Medição por Coordenadas** – Inovando a Qualificação Geométrica de Centros de Usinagem. 2000. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.
2. SOUSA, André; SCHNEIDER, Carlos A. Melhoria das peças usinadas através da qualificação geométrica da máquina-ferramenta. **Anais do Congresso Norte-Nordeste de Engenharia Mecânica**, 1998.
3. DAAMS, H. J.; HUNZINGER, H. Laserinterferometers improve the performance of machine tools. **European Production Engineering**, vol. 17, n. 3, p. 76-78, mar.1992.
4. SCAVONE, Roberto, SCHNEIDER, Carlos Alberto, PFEIFER G., GIÁGIO, M. A. **Metrologia e Controle Preventivo da Qualidade para Usuários de Máquinas-Ferramentas**. Florianópolis, SC: Fundação CERTI, Universidade Federal de Santa Catarina.
5. TULLAR, Paul. Machine Tool evaluation produces results. **American Machinist**, p. 63-65, apr. 1996.
6. HEIDENHAIN. **Ball Bar**. Disponível em: <<http://www.heidenhain.com/inspectn.htm>>. Acesso em: 12 novembro 2001.
7. CHAPMAN, Mark. **Machine tool calibration** - don't compromise. **Quality Today**, p. 22-24, may 1996.
8. HEIDENHAIN. **Grid Encoder**. Disponível em: <<http://www.heidenhain.com/products/toolinspection/kgm.htm>>. Acesso em: 12 novembro 2001.

# GEOMETRIC EVALUATION OF CNC MACHINE TOOLS BY MATERIAL GAUGES METHOD

## **Moacir Eckhardt**

Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul  
Av. Prof. Rudi Franke, 540. Bairro Arco-Íris. CEP: 98280-000, Panambi – RS  
[moacir@unijui.tche.br](mailto:moacir@unijui.tche.br)

## **Luis Francisco Marcon Ribeiro**

Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul  
Av. Prof. Rudi Franke, 540. Bairro Arco-Íris. CEP: 98280-000, Panambi – RS  
[marcon@unijui.tche.br](mailto:marcon@unijui.tche.br)

## **Felipe Pozzatti Schwingel**

Av. Prof. Rudi Franke, 540. Bairro Arco-Íris. CEP: 98280-000, Panambi – RS  
[felipeschwingel@yahoo.com.br](mailto:felipeschwingel@yahoo.com.br)

## **Adonis Pellin**

Av. Prof. Rudi Franke, 540. Bairro Arco-Íris. CEP: 98280-000, Panambi – RS  
[pellin@gmail.com](mailto:pellin@gmail.com)

## **Gilberto Sackser**

Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul  
Av. Prof. Rudi Franke, 540. Bairro Arco-Íris. CEP: 98280-000, Panambi – RS  
[sackser@unijui.tche.br](mailto:sackser@unijui.tche.br)

## **Luiz Carlos da Silva Duarte**

Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul  
Av. Prof. Rudi Franke, 540. Bairro Arco-Íris. CEP: 98280-000, Panambi – RS  
[lduarte@unijui.tche.br](mailto:lduarte@unijui.tche.br)

***Abstract.** The machining is a process of wide use in the manufacturing of mechanical components. The verification of the machine tools as well as the geometric behavior are important for the establishment of their performance. Some deviations found in the machine-tools cause unwelcome alterations in the relative trajectory between the part and the tool that is transferred directly to the geometry of the machined parts, compromising its exactitude. Nowadays, the CNC (computerized numerical command) controllers present resources for electronic correction of mechanical deficiencies (errors), which can be determined through a geometric evaluation of the machine tool. Using the method of the direct measurement through the use of standards, the Laboratório de Fabricação Assistida and the Laboratório de Metrologia of UNIJUÍ elaborated a procedure for geometric evaluation of CNC machine tools of small and medium sizes. The procedure deals with the determination of the errors of positioning, straightness, squareness and hysteresis on the coordinate system (X, Y and Z). The collected data are processed automatically and presented through a report that contains the uncertainty of measurements of each test performed. For the validation of the procedure two case studies had been made. The values that need to be inserted in the CNC were determined through the tests, which allow the correction of geometric error. This way it is possible to improve the precision of the machine overcoming its mechanical limitations.*

**Keywords.** *geometric tests, machine tool, material gauges*