

COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS DIRETO E INDIRETO DE ENSAIO DE INTERPOLAÇÃO CIRCULAR EM MÁQUINAS-FERRAMENTA CNC

André Roberto de Sousa, asousa@ifsc.edu.br

Aurélio da Costa Sabino Netto, asabino@ifsc.edu.br

Gabriel Costa Sousa, gabrielcosta@ifsc.edu.br

Instituto Federal de Santa Catarina. Av. Mauro Ramos, 950. 88020-300, Florianópolis, SC.

Resumo. *Ensaaios geométricos de interpolação circular tal como descrito na norma ISO230-4 são métodos práticos de avaliar a exatidão de máquinas CNC e determinar erros geométricos e de controle. A qualidade com que a máquina interpola vários eixos para cumprir uma trajetória circular requer uma boa exatidão mecânica de construção e montagem, boa rigidez e resposta dinâmica, folgas mínimas e um correto funcionamento do sistema de controle. Desse modo os ensaios de interpolação circular avaliam de modo abrangente diversos parâmetros da máquina e são capazes também de quantificar de modo isolado erros geométricos e de controle da máquina. Para a realização dos testes normalmente são empregados métodos diretos de ensaio, nos quais sistemas de medição dedicados medem variações de distância entre uma parte fixa e uma móvel da máquina ao longo do movimento circular. Neste trabalho este método foi comparado com ensaios de interpolação circular por método indireto, no qual peças foram usinadas, medidas e os resultados foram utilizados para avaliar o estado da máquina. Os resultados obtidos entre os dois métodos foram comparados obtendo-se excelente correlação entre o método direto, sem carga, e o indireto, sob a carga da usinagem de acabamento.*

Palavras chave: *Ensaaios Geométricos. Máquinas-Ferramenta. ISO230-4. Interpolação circular*

1. INTRODUÇÃO

As máquinas-ferramenta apresentam limitações em sua exatidão funcional causadas por diversos fatores, e estas não idealidades se transferem às dimensões das peças usinadas comprometendo a precisão dimensional dos produtos e a eficiência de processos produtivos, gerando perdas de qualidade e produtividade (Sousa, A., 2000). São consideradas como principais fontes de erro em máquinas-ferramenta:

- Erros geométricos em componentes estruturais, erros de montagem e de ajustes mecânicos
- Folgas em elementos de acionamento e falta de rigidez para suportar esforços mecânicos
- Alterações de temperatura causadas pelo ambiente, pela máquina e pelo processo de usinagem
- Erros devidos a mal ajuste de parâmetros de controle e limitações do controlador

Há situações em que os erros apresentam característica predominantemente sistemática, gerando peças com pouca variação entre si, mas distantes das dimensões nominais. Há também processos em que os erros das máquinas se manifestam nas peças com característica predominantemente aleatória, gerando peças com grande variabilidade entre si, mas com a dimensão média próxima às dimensões nominais. Em geral, as máquinas-ferramenta com problemas de exatidão acabam causando erros com características sistemática e aleatória combinadas, comprometendo o controle a capacidade do processo.

Nesse cenário os ensaios geométricos em máquinas-ferramenta têm grande importância na prevenção e correção de problemas em processos seriados, ao permitir um diagnóstico e gerar informações para que se implementam ações de correção e manutenção nas máquinas. Nas máquinas CNC, alguns erros podem mesmo ser corrigidos por intervenção mecânica, apenas com a introdução de parâmetros de correção matemáticos no controlador da máquina. Assim, as informações obtidas a partir da qualificação geométrica da máquina-ferramenta são de vital importância para a eficiência do processo de usinagem, pois permitem:

- Identificar problemas operacionais e afastar a máquina de serviço
- Alocar a máquina para a usinagem de peças com tolerâncias compatíveis com sua exatidão de trabalho
- 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 e deveriam ser realizadas de modo periódico pelos usuários das máquinas-ferramenta.

Para orientar a realização dos ensaios geométricos em máquinas existem diversos métodos normalizados de ensaio geométrico de máquinas com o objetivo principal de diagnosticar erros nas máquinas e gerar informações para ações de manutenção que permitam manter a sua exatidão funcional dentro de limites aceitáveis. Dentre vários documentos

normativos o principal é a série ISO 230 formada por várias partes, cada uma voltada para um tipo de ensaio, como mostrado na tabela 1.

Tabela 1 – Série ISO230 de normas para ensaios de máquinas-ferramenta

| Parte | Tema |
|-----------------|--|
| ISO230 Parte 1 | Exatidão geométrica de máquinas operando sem carga ou em condições quase estáticas |
| ISO230 Parte 2 | Determinação da exatidão e repetibilidade de posicionamento de máquinas CNC |
| ISO230 Parte 3 | Determinação de efeitos térmicos |
| ISO230 Parte 4 | Ensaio de interpolação circular para máquinas CNC |
| ISO230 Parte 5 | Determinação do nível de emissão de ruídos |
| ISO230 Parte 6 | Determinação de exatidão de posicionamento volumétrico (Testes de deslocamento diagonal) |
| ISO230 Parte 7 | Determinação de exatidão geométrica de eixos rotativos |
| ISO230 Parte 8 | Determinação de níveis de vibração |
| ISO230 Parte 9 | Estimativa da incerteza de medição de ensaios realizados de acordo com a série ISO230 |
| ISO230 Parte 10 | Determinação exatidão de medição de sistemas de apalpação de máquinas CNC |
| ISO230 Parte 11 | Instrumentos de Medição adequados para ensaio geométrico de máquinas ferramenta |

Além de normas específicas de ensaio de máquinas, existem documentos normativos voltados para a área de qualidade de processos de produção que trazem requisitos de exatidão para processos e máquinas. Um dos mais atuais é a IATF16949 (IATF16949, 2016), norma de qualidade do setor automotivo, que traz a orientação de que as máquinas sejam avaliadas quanto à sua capacidade de atendimento de requisitos de exatidão das peças. Ao contrário da série ISO230 que traz orientações de métodos de ensaio, a IATF16949 traz esses requisitos amparados no Controle Estatístico de Processos (Oakland, J., 2015). Desse modo, a norma estabelece que a capacidade de máquina estimada pelos índices C_m e C_{mk} deve ser avaliada para todos os processos, atendendo valores acima do índice 1,33.

De modo prático, C_m e C_{mk} são avaliados com base na medição de uma amostra de peças usinadas em sequência e em curto prazo, para que a suas medidas representem bem a capacidade natural que as máquinas possuem de atender as tolerâncias especificadas para as peças. O índice C_m é sensível apenas aos erros aleatórios do processo, enquanto o índice C_{mk} é sensível aos erros sistemáticos e aleatórios. A necessidade de que o ensaio seja realizado em curto prazo se dá para que a variação percebida se deva predominantemente à máquina, e não seja muito contaminada por efeitos de longo prazo do processo (temperatura, desgaste de ferramenta, troca de operador, etc.). A figura 1 ilustra esse processo que, por avaliar os erros da máquina partir das peças fabricadas e medidas, é considerado um método de ensaio indireto.

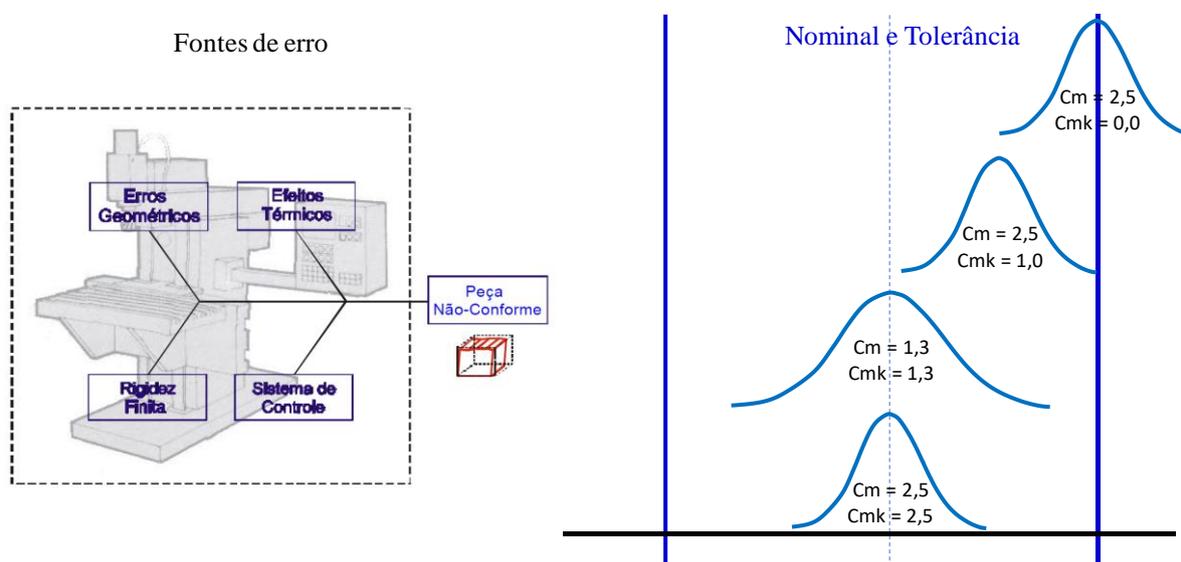


Figura 1 – Efeitos dos erros geométricos sobre índices de capacidade de máquina

2. ENSAIOS DE INTERPOLAÇÃO CIRCULAR: ISO230-4

Como visto na tabela 1, a ISO230 traz na sua parte 4 as orientações para a realização de ensaios de interpolação circular em máquinas CNC. Esta parte da ISO 230 detalha métodos de teste e avaliação do desvio circular bidirecional, do desvio radial bidirecional médio, do desvio circular e do desvio radial das trajetórias circulares que são produzidos pelos movimentos simultâneos de dois eixos lineares.

Para a realização do ensaio é necessário dispor de um sistema capaz de ser instalado na máquina de modo a medir os desvios radiais causados pelo erro de trajetória de uma parte fixa em relação a uma parte móvel da máquina. Para esta tarefa o sistema indicado pela norma é uma barra de esferas telescópica (*telescoping ball bar*, ISO230-11) com um transdutor linear de alta exatidão capaz de medir a variação na distância das duas esferas da barra. Uma das esferas é fixada em uma parte fixa da máquina e a outra esfera é fixada na parte móvel que irá realizar o movimento circular em torno da parte fixa. Os desvios radiais são medidos e processados, matematicamente e graficamente, para indicar erros mecânicos e de controle da máquina. A figura 2 ilustra este conceito.

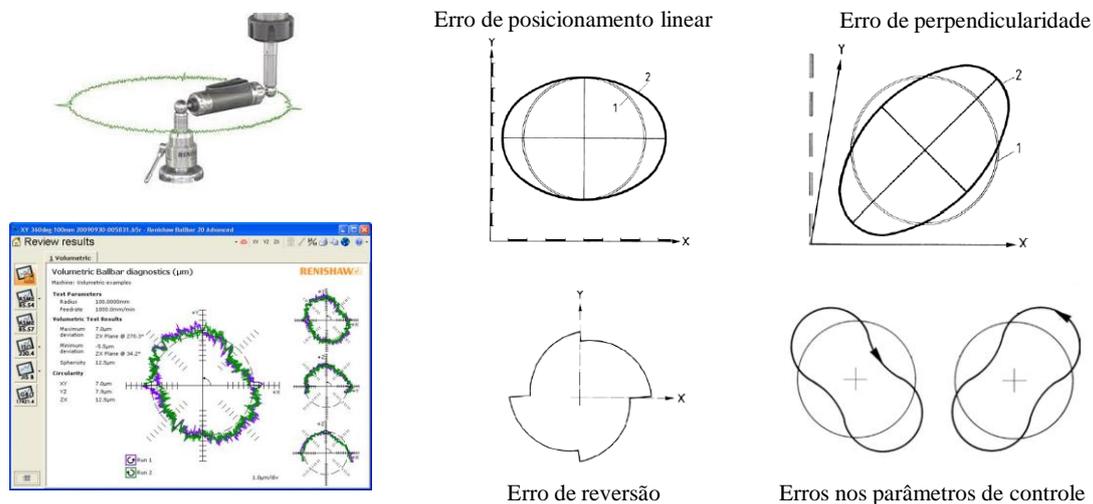


Figura 2 – Ensaio de interpolação circular com barra de esferas telescópica (ISO230-4, 2005; Renishaw, 2018)

O teste circular é de operacionalização fácil e rápida, com a vantagem de ser um ensaio dinâmico, podendo determinar erros também do sistema de acionamento e controle da máquina. O ensaio gera vários indicadores numéricos como erros de circularidade da trajetória e diferença entre o raio medido e o programado. Como principais erros paramétricos gerados no ensaio podem ser citados o erro de posicionamento linear, o erro de perpendicularidade entre os eixos, o erro de retitude, os erros de controle nos servo-acionamentos e o erro de histerese de movimentação dos eixos (*backlash*).

Dado que o ensaio é realizado sem carga, há divergências se o teste representa a real condição da máquina-ferramenta. Embora as condições de usinagem que definem as dimensões finais da peça sejam de acabamento, com baixos esforços de corte, o processo não é totalmente sem carga como no ensaio circular. Para a avaliação de similaridade entre o método com a barra telescópica e a usinagem em condições de acabamento, neste trabalho foram realizados ensaios circulares pelo método indireto, em que peças circulares foram usinadas por interpolação circular e medidas para comparação de erros com a barra telescópica, como detalhado a seguir.

3. METODOLOGIA EMPREGADA NOS EXPERIMENTOS

Para a comparação de método direto (barra telescópica) com método indireto (peça usinada) no ensaio de interpolação circular, selecionou-se uma máquina-ferramenta CNC do laboratório de automação da manufatura do departamento de mecânica do IFSC, na qual os dois métodos de ensaio foram realizados. Dado que a máquina está em um ambiente controlado, foi possível manter similaridade nas condições ambientais nos dois testes. O conceito e imagens dos ensaios encontram-se na figura 3.

3.1 Ensaios com a barra telescópica

Para estes ensaios foi empregado como barra telescópica o sistema *Ballbar* da empresa Renishaw, com recursos para setup rápido na máquina, capacidade de realização do ensaio de modo automatizado e extração dos parâmetros de erro recomendados pela norma ISO230-4. O *ballbar* foi fixado na mesa da máquina (esfera móvel) e no eixo árvore (esfera fixa), e o movimento circular interpolando os eixos X e Y foi realizado pela mesa em torno do eixo árvore. Os ensaios com o *ballbar* foram iniciados com a máquina em estado frio e foram definidas as condições de movimentação ajustadas neste ensaio (Raio de 100 mm e velocidade de avanço de 2000 mm/min), as quais foram mantidas na usinagem das peças. Após a montagem do *ballbar* foram realizados 50 testes em sequência, sendo cada teste composto de 2 trajetórias circulares em sentido horário e 2 em sentido anti-horário. Todo o procedimento de teste foi automatizado, sincronizando-se a aquisição de dados do *ballbar* com os ciclos de movimentação da máquina.

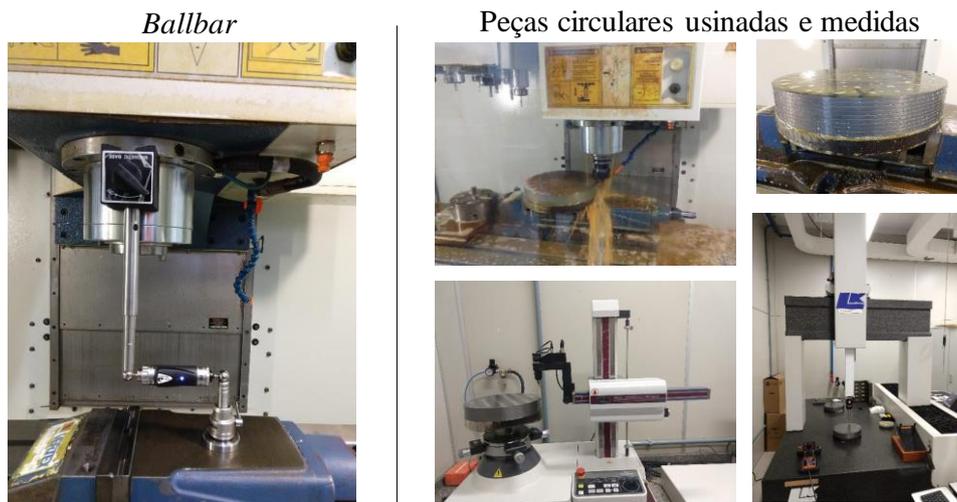


Figura 3 – Procedimentos de ensaio circular com o *ballbar* e com as peças usinadas

3.2 Ensaios com peças usinadas

Para manter similaridade com o ensaio com o *ballbar*, programou-se a usinagem de peças de ferro fundido com trajetórias circulares de raio próximo a 100 mm, com o mesmo avanço do ensaio anterior. Empregou-se como ferramenta de corte uma fresa de metal duro revestida de $\varnothing 20$ mm, com 4 dentes. As condições de corte foram definidas em valores compatíveis com condições de usinagem de acabamento preservando a vida útil da ferramenta ($a_e = 0,2$ mm, $a_p = 4$ mm, $V_f = 2000$ mm/min e $V_c = 100$ m/min). As peças foram usinadas com a máquina na mesma condição térmica do *ballbar*, sob mesma temperatura ambiente. Para tornar o ensaio prático de realização e dispensar várias fixações e localizações de peças, projetou-se uma única peça com 10 diâmetros escalonados em diâmetros de 0,4 mm, sendo usinadas duas peças desta geometria, permitindo assim a avaliação de 20 trajetórias circulares. Após a usinagem, os diâmetros das peças foram medidos em uma máquina de medir por coordenadas LK G80, e os desvios de circularidade foram medidos em uma máquina de medir formas Mitutoyo RA1600. Os diâmetros foram calculados pelo método dos mínimos quadrados e a circularidade pelo método de zona mínima, sendo aplicado nos pontos um filtro gaussiano passa baixa de 500 UPR.

4. RESULTADOS E CONCLUSÕES

Os resultados encontrados para a variação do diâmetro em relação ao valor programado e para os desvios de circularidade dos ensaios com o *ballbar* e com as peças usinadas podem ser vistos na figura 4. Podem ser observadas a variação ocorrida nos valores de diâmetro, provavelmente devido ao aquecimento dos eixos da máquina ao longo dos ensaios. O desvio de circularidade não refletiu esta tendência, mantendo-se aproximadamente constante ao longo dos ensaios, próximo a 18 μ m. A destacar a grande repetibilidade do sistema *ballbar*, apresentando variações sub micrométricas entre avaliações sucessivas. Os resultados estão mostrados com a mesma escala para facilidade de comparação entre os métodos.

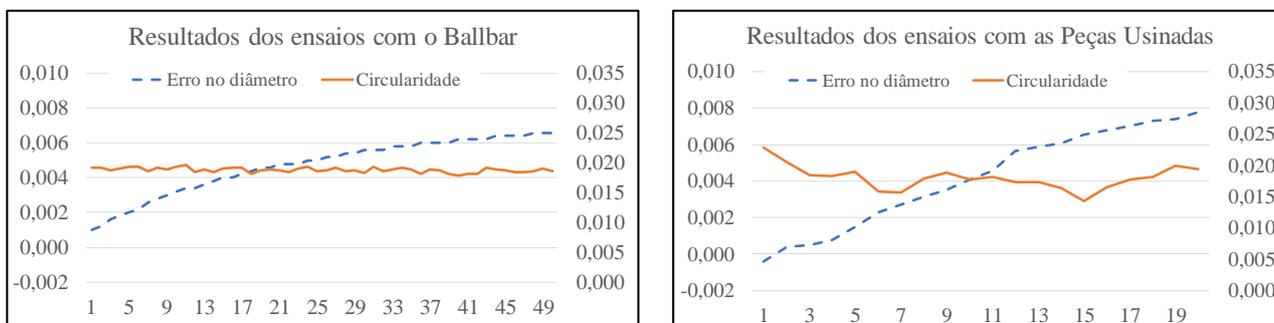


Figura 4 – Variação no diâmetro e desvios de circularidade encontrados nos ensaios com *ballbar* e peças usinadas

Observa-se nos resultados obtidos nas medições das peças usinadas uma variação maior tanto no diâmetro como na circularidade. A variação maior no diâmetro deve-se provavelmente ao maior tempo de execução dos ensaios, e ao fato dos mesmos serem efetuados sob esforço de corte, ambos fatores contribuindo para a dilatação térmica da máquina. A

maior variação na circularidade deve-se às irregularidades superficiais encontradas na superfície das peças usinadas, causados por inconstâncias nas condições de corte.

A partir das indicações individuais de ambos os ensaios se calculou o resultado da medição e a sua incerteza e, com esses valores se avaliou o erro normalizado (ABNT, 2011) como parâmetro para indicação da similaridade estatística entre os resultados médios, resultando este um valor menor do que 1,0 (Tabela 2) e confirmando esta hipótese de similaridade. Na análise de incerteza foram consideradas como fontes de incerteza a repetibilidade dos resultados, a incerteza dos sistemas de medição e a variação de temperatura durante as medições.

Tabela 2 – Resultados médios do erro de diâmetro, de circularidade e erros normalizados

| | Ballbar | Peça usinada |
|------------------|---------------------|--------------------|
| Erro no diâmetro | 0,0047 ± 0,0010 mm | 0,0042 ± 0,0029 mm |
| Erro normalizado | 0,18 (adimensional) | |
| Circularidade | 0,019 ± 0,001 mm | 0,018 ± 0,002 mm |
| Erro normalizado | 0,36 (adimensional) | |

Análise gráfica dos resultados obtidos com o *ballbar* e com a medição do erro de forma na máquina de medir RA1600 demonstram similaridade também quanto aos erros de trajetória. A figura 5 mostra estes resultados nos dois métodos, com a mesma indexação angular, destacando-se em ambos os erros de reversão de eixo.

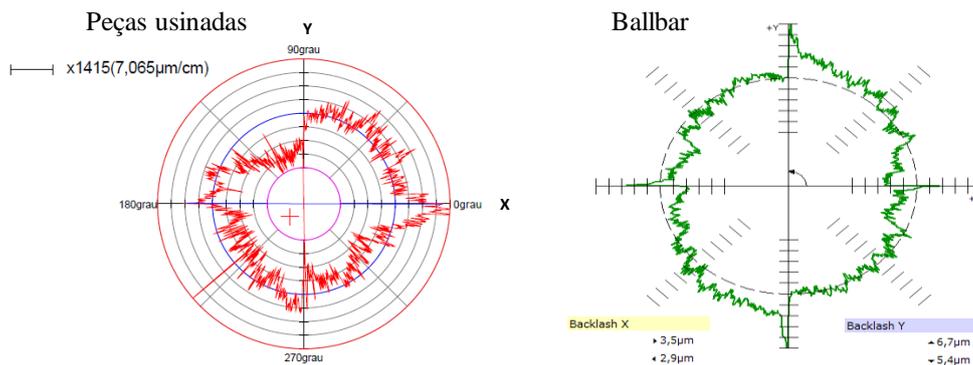


Figura 5 – Erros de trajetória e reversão nos métodos testados

O método direto com o *ballbar*, realizado sem carga, apresentou resultados compatíveis com os resultados das peças usinadas sob esforços de corte em condições de acabamento. A incerteza do resultado do ensaio com as peças usinadas é maior devido à variação dimensional das peças e à inclusão da incerteza de medição das peças. A repetibilidade do ensaio com o *ballbar* mostrou-se muito boa, recomendando o sistema para ensaios frequentes de estabilidade das máquinas-ferramenta. Outra vantagem do *ballbar* é o tempo de ensaio, cerca de 1/10 do tempo necessário para usinar e medir as peças. A utilização de ambos os métodos se mostrou válida e, assim sendo, necessárias para os ensaios que demonstrem capacidade de máquinas atendendo requisitos de normas de qualidade.

5. REFERÊNCIAS

- Sousa, A. Padrões corporificados e a tecnologia de medição por coordenadas inovando a qualificação geométrica de máquinas-ferramenta. Tese de Doutorado, UFSC, 2000.
- ISO 230-4: 2005 Test code for machine tools - Part 4: Circular tests for numerically controlled machine tools.
- IATF16949 – Sistema de Gestão da Qualidade Automotiva - Automotive Industry Action Group, 2016.
- Renishaw. Sistema ballbar: <https://www.renishaw.com.br/pt/sistema-ballbar-qc20-w--11075>, acessado em 20/12/2018.
- Oakland, J., Statistical Process Control, 2015. ISBN-13: 978-0750644396.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) (2011). ABNT NBR ISO/IEC 17043. Avaliação de conformidade - requisitos gerais para ensaios de proficiência. Rio de Janeiro: ABNT.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

COMPARISON BETWEEN DIRECT AND INDIRECT METHODS FOR CIRCULAR TESTS IN CNC MACHINE TOOLS

André Roberto de Sousa, asousa@ifsc.edu.br
Aurélio da Costa Sabino Netto, asabino@ifsc.edu.br
Gabriel Costa Souza, gabriel@ifsc.edu.br

Instituto Federal de Santa Catarina. Av. Mauro Ramos, 950. 88020-300, Florianópolis, SC.

Abstract. *Circular tests in machine tools as defined by ISO230-4 standard are practical methods of evaluating the accuracy of CNC machines and determining geometric and control errors. The accuracy with which the machine interpolates several axes to perform a circular path requires a good mechanical precision, good stiffness and dynamic response, minimum clearances and a correct operation of the control system. In this way the circular interpolation tests evaluate various parameters of the machine and are also capable of quantifying geometric and control errors on the machine. For testing purposes, direct test methods are employed where dedicated measuring systems monitor variations in distance between parts of the machine along the circular movement. In this work this method was compared with tests of circular interpolation by indirect method, in which parts were machined, measured and the results were used to evaluate the errors of the machine. The results obtained between the two methods were compared revealing an excellent correlation between the direct and indirect methods.*

Keywords: *Geometric Tests. Machine Tools. ISO230-4. Circular Tests.*