



**II CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**II NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING**  
12 a 16 de Agosto de 2002 - João Pessoa – PB

**Compensação automática de desgastes e auxílio à troca de ferramentas de corte em processos de torneamento**

**Fábio Ferraz Júnior**

Universidade de São Paulo (USP) / Escola de Engenharia de São Carlos (EESC)  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Núcleo de Manufatura Avançada/ Lab. de Otimização de Processos de Fabricação (NUMA/ OPF)  
Av. Trabalhador São-carlense, 400 CEP 13566-590 São Carlos – SP Brasil tel. (16) 273 9438  
fferrazj@sc.usp.br

**Reginaldo Teixeira Coelho**

Universidade de São Paulo (USP) / Escola de Engenharia de São Carlos (EESC)  
Departamento de Engenharia Mecânica  
Núcleo de Manufatura Avançada/ Lab. de Otimização de Processos de Fabricação (NUMA/ OPF)  
Av. Trabalhador São-carlense, 400 CEP 13566-590 São Carlos – SP Brasil tel. (16) 273 9267  
rtcoelho@sc.usp.br

***Resumo.** Apresentação de uma proposta de sistema de compensação automática de desgastes e auxílio à troca de ferramentas de corte em processos de torneamento. Inicialmente, o trabalho justifica a utilização de sistemas de monitoramento de máquinas e ferramentas. Aponta as principais fontes de erros de peças, quanto à qualidade superficial e dimensional, e os principais métodos para o monitoramento de estado de ferramentas. A arquitetura do sistema proposto é descrita através de seus principais componentes, bem como o procedimento experimental para teste do mesmo, e os resultados alcançados. Pelos resultados experimentais encontrados em um primeiro experimento, conseguiu-se melhorar a qualidade dimensional de um lote de peças de IT13 para IT07.*

***Palavras-chave:** monitoramento, desgaste de ferramentas, torneamento.*

## **1. INTRODUÇÃO**

Segundo Blum et al (1988), Gonçalves Filho (1994) e Diniz & Pigari (1995), o surgimento de novos materiais de difícil usinagem (cujos comportamentos ainda são desconhecidos), e como consequência o surgimento de novos materiais de ferramentas (de alto custo), juntamente com as exigências de alta produção, lotes variados, faixas de tolerâncias cada vez mais estreitas e baixo custo de produção, têm extrapolado os limites e habilidades de operadores de máquinas.

Assim, sistemas de monitoramento e controle de processos de usinagem buscam atender essa necessidade, minimizando e/ou auxiliando a atuação do homem nas máquinas-ferramenta.

Contudo, a avaria e/ou desgaste da ferramenta, durante operações de usinagem, se mostram como grandes problemas para a automação de troca de ferramentas e compensação

de desgastes. O sistema proposto, utilizando-se de um Comando Numérico Computadorizado (CNC) de arquitetura aberta e método direto (*off-line*) de monitoramento de desgaste de ferramentas de corte, torna automática a compensação de desgaste e auxilia na determinação do momento mais adequado para a troca de ferramentas, garantindo o seu máximo aproveitamento, além de peças produzidas dentro de suas especificações dimensionais e qualidades superficiais.

## 2. FONTES DE ERROS DE PEÇAS

Processos de torneamento podem efetuar tanto operações de desbaste, quanto de semi-acabamento ou acabamento. Esta última operação fornece as qualidades superficial e dimensional final da peça, cujos níveis de precisão dependem do sistema máquina-ferramenta.

Segundo Li (2001), o sistema máquina-ferramenta é composto basicamente por:

- servo drive (equipamentos de acionamento e controle)
- estrutura da máquina ferramenta
- peça
- processo de corte

As principais fontes de erros de peças, quanto à qualidade superficial e dimensional, de acordo com Chen, S. et al (1998) apud Li (2001), derivam dos componentes:

- estrutura da máquina-ferramenta: erros térmicos, geométricos, e provocados por forças de vibração.
- servo drive: dinâmica dos acionadores, e erros de programas.
- processo de corte: deflexão da máquina, ferramenta de corte e peça, desgaste e quebra de ferramentas de corte.

Essas fontes de erros vêm sendo minimizadas, chegando-se ao extremo com a possibilidade de processos de torneamento de ultraprecisão. Melhorias de projetos de estruturas de máquinas, além da contribuição de prognósticos realizados por modelos matemáticos, minimizam erros geométricos, e influências térmicas e de vibrações. Erros devido a distúrbios de forças de corte e inércia de controladores/ acionadores são reduzidos através de interpolações com funções de desaceleração e com o gradual avanço tecnológico dos mesmos. E, finalmente, os erros de processos de corte vêm sendo minimizados com a utilização de sistemas de monitoramento de máquinas e ferramentas, e com o uso de modelos matemáticos que buscam o prognóstico de distúrbios do processo.

## 3. MÉTODOS PARA O MONITORAMENTO DE ESTADO DE FERRAMENTAS

As avarias e os desgastes de ferramentas são os maiores fatores que influem a qualidade e o ritmo de produção, conforme Blum et al (1988). Além disso, segundo Diniz & Pigari (1995), com o emprego de ferramentas de corte de alto custo, sua utilização otimizada torna-se imprescindível; entretanto, vem-se utilizando, em processos convencionais de usinagem, métodos estatísticos para trocas de ferramentas, que são ineficientes por não garantir a utilização total de sua vida.

Todos esses fatores, entre outros, contribuem para o surgimento de diversos tipos de métodos para o monitoramento de condições de ferramentas de corte, podendo estes serem divididos em, segundo Blum et al (1988):

- Método Direto (*off-line*) : medição direta do desgaste ou detecção da quebra da ferramenta, após a interrupção da usinagem.
- Método Indireto (*on-line*) : medição indireta do desgaste ou detecção da quebra da ferramenta, através de sinais que possuem correlações com o processo de corte. Portanto, a medição é realizada durante a usinagem.

Na Tabela (1), tem-se alguns dos principais sensores utilizados em sistemas de monitoramento de condições de ferramentas de corte, com o respectivo método empregado, segundo Mathew & Dan (1990) apud Souza (1999), Jemielniak (1999)\*<sup>1</sup>, Byrne et al (1995)\*<sup>1</sup>, Blum et al (1988)\*<sup>2</sup>.

Tabela 1. Métodos para o monitoramento de estado de ferramentas de corte

MÉTODO	PROCEDIMENTO	MEDIDA	SENSOR
<b>DIRETO</b>	Óptico	Forma ou posição da borda	Câmera de TV, sensor óptico, espectrofotômetro, cintilador
	Partículas do desgaste e radioatividade	Tamanho da partícula de concentração	Medidor de radioatividade
	Resistência peça-ferramenta	Alteração na resistência elétrica da junção	Ohmímetro
	Tamanho da peça	Dimensão da peça sendo usinada	Apalpador, sensor: óptico, eletromagnético, ultra-sônico
	Distância peça-ferramenta	Distância entre ferramenta ou suporte à peça	Micrômetro, medidor de deslocamento (LVDT)
<b>INDIRETO</b>	Força de Corte	Alterações na Força	Dinamômetro, <i>strain gage</i>
	Emissão Acústica	Energia nas ondas de deformação ou <i>stress</i>	Transdutor piezoelétrico
	Som e Ultra-som	Ondas acústicas	Microfone
	Vibração	Vibração da ferramenta/porta-ferramenta	Acelerômetro
	Temperatura	Variação da temperatura no ponto de corte	Termopar, Pirômetro
	Potência	Corrente ou consumo de potência do motor de acionamento	Amperímetro, sensor de corrente (efeito Hall)
	Rugosidade	Rugosidade da peça	Agulha mecânica, sensor ótico, laser
	Torque * <sup>1</sup>	Alterações de Torque	Sensor de torque
Velocidade de rotação * <sup>2</sup>	Alterações devido às variações de torques	Tacômetro	

#### 4. ARQUITETURA E DESCRIÇÃO DO SISTEMA

O sistema proposto (de compensação automático de desgastes de ferramentas de corte) baseia-se em um monitoramento direto (*off-line*) através de medições de diâmetros de peças usinadas, utilizando-se de um sensor de deslocamento (LVDT) preso ao porta ferramentas. Esse sensor foi utilizado devido à ausência de outro que pudesse medir a peça logo após a operação, ainda na máquina, embora não possa ser empregado neste tipo de torno, cujo magazine pode girar. Para aplicações em ambiente industrial, um sensor mais adequado deverá ser empregado. Essas medidas são “capturadas” pelo software do sistema, desenvolvido em LabView, que executa uma seqüência lógica para a determinação da compensação a ser realizada (parâmetro de compensação devido ao desgaste – PCDD), e outra para a classificação das peças como:

- peça acabada : dentro dos limites de especificação
- peça para retrabalho : acima do limite superior de especificação – LSE
- peça refugada : abaixo do limite inferior de especificação – LIE

Esse PCDD, calculado após cada peça usinada, é repassado para o CNC do torno (de arquitetura aberta), através de uma rede Fast-Ethernet e de um protocolo padrão de comunicação, o NetDDE (*Networking Dynamic Data Exchange*). Assim, permite que a próxima peça seja usinada já com a compensação do desgaste da ferramenta.

Na Figura (1) tem-se um esquema da arquitetura sistema.

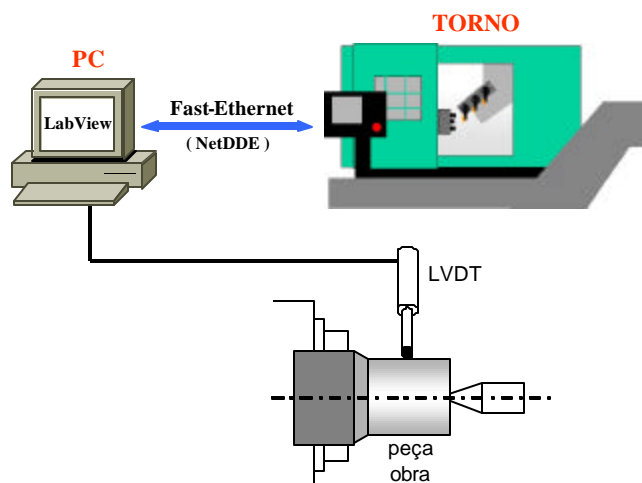


Figura 1. Esquema da arquitetura do sistema

O software do sistema permite a configuração dos LSE e LIE para a classificação e totalização adequadas das peças como acabadas, re-trabalhadas e refugadas, no decorrer do processamento do lote. Permite ainda a configuração da máxima compensação de desgaste da ferramenta de corte (Máx. Comp.) a ser realizada, tendo em vista que um aumento exagerado da mesma pode levar a uma qualidade superficial não adequada, entre outros possíveis problemas na peça obra e até mesmo na máquina-ferramenta. Quando a máxima compensação de desgaste da ferramenta de corte é alcançada, o sistema imediatamente indica no seu *front-end* (tela) a necessidade da troca da mesma.

No cálculo do PCDD tem-se como referência a medida do diâmetro da primeira peça do lote ( $D_{\text{especific}}$ ), usinada pela ferramenta de corte, o que é de se esperar que seja uma peça ideal para ser adotada como referência. Como o sistema utiliza medidas relativas (e não absolutas), as medidas de diâmetros realizadas pelo LVDT ( $D_{\text{peça}}$ ) não precisam representar exatamente as medidas reais das peças, evitando a determinação demorada e difícil do *off-set* do LVDT no porta-ferramenta. Assim, é necessário somente a medida relativa dos diâmetros das peças em relação ao diâmetro de

referência da primeira peça, ou seja,  $D_{peça} - D_{especif} = erro$ , que indica o quanto as peças estão desviando da peça referência (primeira peça do lote).

Na Figura (2) tem-se o algoritmo do programa, onde nota-se a seqüência lógica para a determinação do PCDD e para a classificação da peça usinada.

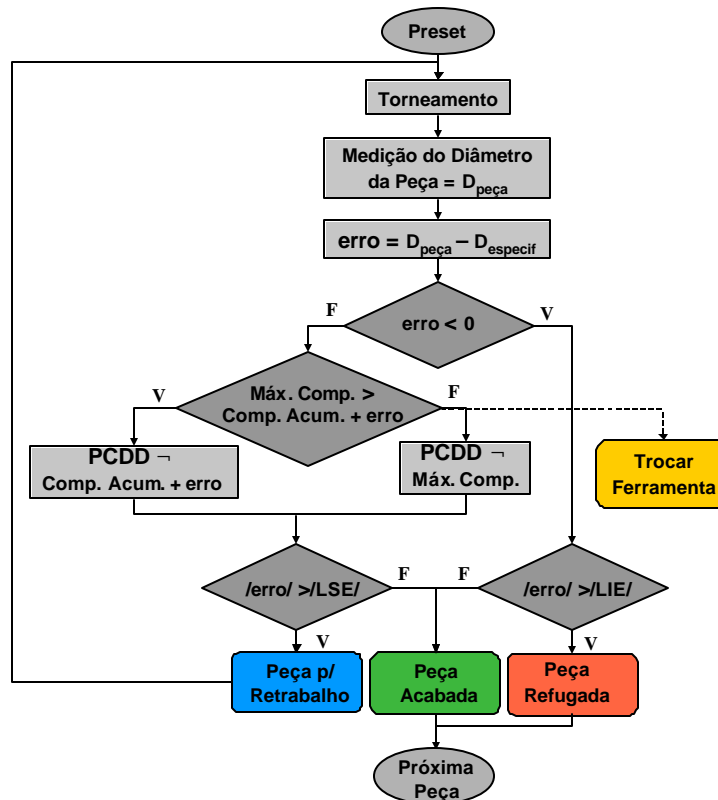


Figura 2. Algoritmo para cálculo do PCDD e classificação de peças

## 5. COMPONENTES DO SISTEMA

Tem-se, a seguir, algumas observações dos principais componentes do sistema.

### 5.1. Torno de CNC de Arquitetura Aberta

O torno utilizado foi o CNC INDEX GU-600, de comando Siemens Sinumerik 810D. Trata-se de um sistema de controle de arquitetura aberta para comunicação, e para a integração com seu software HMI (*Human Machine Interfacing*). Permite comunicação via rede Fast-Ethernet TCP/IP e integração através do protocolo NetDDE.

O sistema pode ser utilizado também em tornos controlados por CLPs (Controladores Logicamente Programáveis) de arquitetura aberta, cujos protocolos de integração podem ser NetDDE ou OPC ( *OLE – Object Linking and Embedding - for Process Control* ) de concepção mais atualizada.

Utilizando-se de sistemas de controles abertos, o sistema vem acompanhando tendências mundiais. O grande número de máquinas de propósitos especiais e o alto nível de automação têm levado a um aumento considerável de sistemas de controle abertos baseados em padrões comerciais neutros (Pritschow et al, 2001). Estes permitem a utilização de aplicações customizadas, atendendo a necessidades específicas de usuários, como interfaces homem/ máquina, coletas de dados de máquina e processo, modificações de parâmetros de usinagem e atuações *on-line* nos controles da

máquina-ferramenta, e até mesmo o compartilhamento desses dados via Intranet e/ou Internet (Ferraz Jr. & Coelho, 2001).

## 5.2. Sensor de Deslocamento (LVDT)

O sensor utilizado para a medição dos diâmetros da peça foi um sensor de deslocamento (LVDT- *Linear Variable Differential Transformer*) da Macro Sensors (GHSA 750 125), com curso de aproximadamente 12 mm; não é o mais indicado para a ocasião, mas para efeito de testes atendeu as expectativas.

Pode utilizar-se também de probes, de maior resolução, o que daria mais precisão nas compensações de desgastes da ferramenta de corte.

## 5.3. Software de Aquisição e Manipulação de Dados

O software utilizado para a programação do sistema foi o LabView. Este permitiu a leitura de medidas realizadas pelo LVDT, execução dos algoritmos de compensação e classificação de peças, comunicação com o torno via Fast-Ethernet e protocolo NetDDE e criação de interface (*front-end*) entre o operador e o sistema proposto, Fig.(3), tudo de modo automático e sem a necessidade da atuação do operador após o *start* do sistema. Poderia, no entanto, ser empregado qualquer outro tipo de software que possuísse os mesmos recursos utilizados.

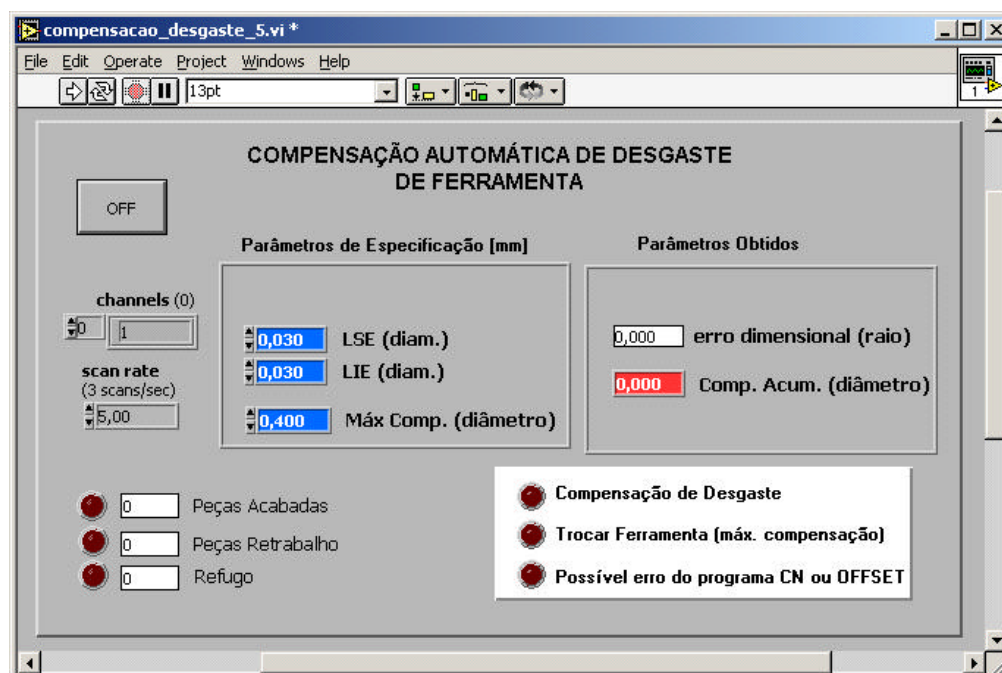


Figura 3. *Front-end* do sistema

## 6. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Com o propósito de testar o sistema de compensação automática de desgaste, procurou-se realizar operações de torneamento de modo que garantisse um acentuado desgaste da ferramenta. Optou-se, assim, em usar corpos de prova de aço ABNT 4340 temperado (45-50 HRc), com insertos SNMG 12 04 08-QM classe coromant H13A – Sandvik, em condições de corte propositalmente escolhidas acima das recomendadas, afim de acelerar o desgaste. As condições foram:  $V_c=70$  m/min ,  $f=0,1$  mm/r ,  $a_p=0,263$  mm  $l=40$ mm, mantidas para ambas as etapas em que foi dividido o experimento.

Para a primeira etapa, 30 corpos de prova, Fig. (4), foram torneados em condições de corte muito suaves, para uma mesma dimensão. Medido esse lote encontrou-se diâmetros de  $50,661 \text{ mm} \pm 2 \text{ }\mu\text{m}$ . Esse lote foi então submetido às condições de usinagem acima sem a utilização do sistema, ou seja, sem a compensação do desgaste da ferramenta. Após essa, fez-se medições de seus diâmetros com micrômetro Mitutoyo. O objetivo dessa primeira etapa foi o de acompanhar o erro dimensional das peças usinadas, devido ao desgaste da ferramenta.

Para a segunda etapa torneou-se novamente os mesmos 30 corpos de prova em condições de corte suaves, resultando agora em diâmetros de  $48,240 \text{ mm} \pm 2 \text{ }\mu\text{m}$ . Utilizou-se então, nesta segunda etapa, o sistema proposto e o mesmo procedimento de medição dos diâmetros. Assim, o objetivo dessa segunda etapa foi o de comparar os erros dimensionais das peças usinadas obtidas nas duas etapas, avaliando-se o desempenho do sistema.

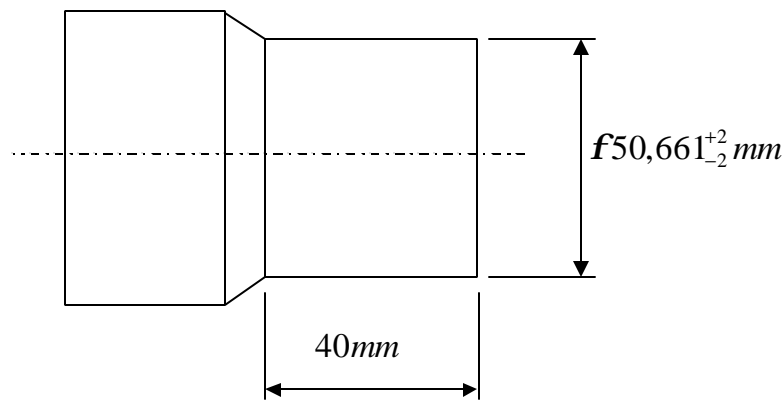


Figura 4. Corpo de prova da primeira etapa

## 7. RESULTADOS

Do procedimento experimental, obtiveram-se os seguintes resultados (diâmetros dos 30 corpos de prova):

1. da primeira etapa (sem compensação de desgaste)
  - **$D = 50,136 \text{ mm (+334}\mu\text{m)}$**
  - $t_c$  (tempo de corte) = 55 seg.
  
2. da segunda etapa (com compensação de desgaste pelo sistema)
  - **$D = 47,715 \text{ mm (+27}\mu\text{m)}$**
  - $t_c$  (tempo de corte) = 55 seg.
  - $t_{comp.}$  (tempo de medição) = 3 seg.

Para a comparação das duas etapas, obteve-se, para cada corpo de prova usinado, o erro do diâmetro obtido no torneamento ( $D_{peça}$ ) em relação ao diâmetro de especificação ( $D_{especif} = D_{inicial} - 2.a.p$ ). Assim, na Figura (5) tem-se uma comparação entre a usinagem de peças sem a compensação do desgaste da ferramenta de corte (1° etapa) com a usinagem de peças utilizando-se da compensação realizada pelo sistema proposto (2° etapa), através desse erro (erro =  $D_{peça} - D_{especif}$ ).

É possível notar, na curva sem compensação, a evolução do erro dimensional ao longo das peças usinadas, e na outra, com compensação, o “controle” do erro dimensional realizado pelo sistema. Particularmente, na peça 2 os erros dimensionais nas duas etapas são aproximadamente iguais, pois

o sistema passa a compensar o desgaste somente à partir da peça 3, após calcular o primeiro PCDD, que no caso seria igual a :

$$\text{erro} = D_{\text{peça}} - D_{\text{especif}} = D_{\text{peça 2}} - D_{\text{peça 1}}$$

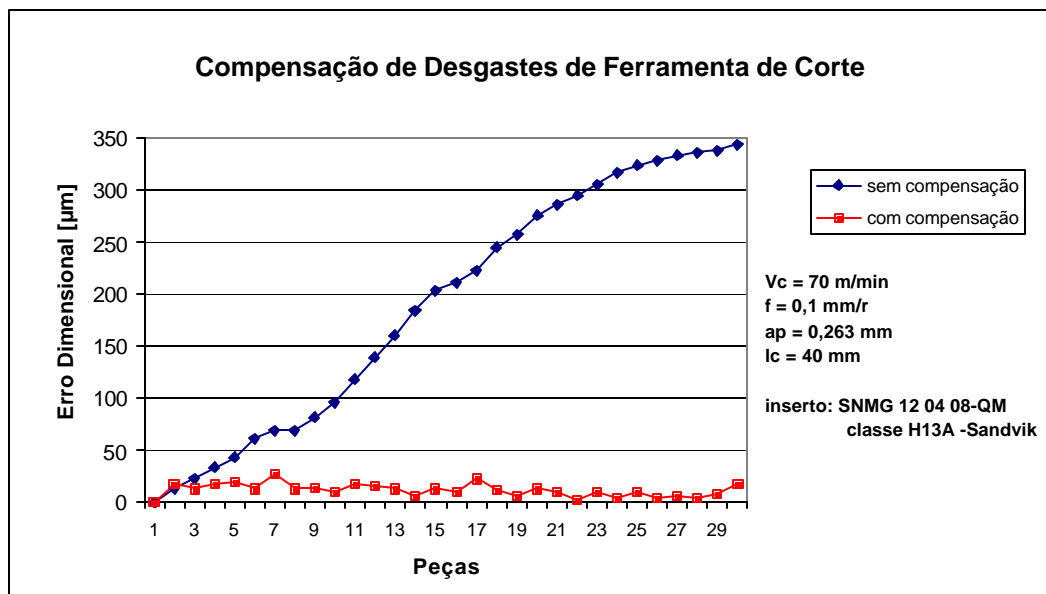


Figura 5. Comparação entre torneamentos com compensação e sem.

## 8. DISCUSSÃO

Nota-se, diante dos resultados obtidos com esse primeiro experimento, uma melhora considerável da qualidade dimensional de peças, obtida com o sistema proposto de compensação de desgastes de ferramentas de corte. Um lote de peças, cujas dimensões poderiam estar 100% dentro de qualidade IT13 (+460µm para uma faixa de diâmetro de mais de 50 a 80 mm) [ABNT], produzidas sem a compensação de desgastes (1º etapa), passaram à qualidade IT07 (+27µm para uma faixa de diâmetro de mais de 40 a 50 mm) [ABNT] com a utilização da compensação (2º etapa), usando-se o mesmo critério.

Quanto à qualidade superficial, para não compromete-la, o sistema dependerá do conhecimento do operador na determinação da máxima compensação de desgaste da ferramenta a ser realizada.

Como auxílio na troca de ferramenta, o sistema permite o acompanhamento da compensação de desgaste da ferramenta, indicando o quanto já foi realizada, além de advertir o operador quando alcançada a máxima compensação de desgaste pré configurada. Este mesmo sistema poderia ser capacitado a realizar o controle estatístico de processo, já alimentando uma base de dados e montando, em tempo real, as cartas de controle dimensional de processo. Nesse experimento, todas as peças do lote foram medidas devido à situação extrema em que a ferramenta foi submetida, levando a altos desgastes. Assim, pôde-se acompanhar melhor o desgaste sofrido pela ferramenta de corte. Para situações mais reais, as condições de corte podem ser mais brandas, diminuindo-se o desgaste. Deste modo, pode-se espaçar mais as medições, diluindo-se o tempo de medição em um número maior de peças, propiciando menores influências no tempo de produção. No experimento, realizando-se medições de todas as peças, o aumento de tempo foi de aproximadamente 5,5% no corte de cada peça.. Esses aspectos deverão ser explorados em trabalhos futuros.

## 9. CONCLUSÃO

De acordo com os resultados apresentados nesse primeiro teste, a compensação automática de desgaste da ferramentas de corte e o auxílio à troca da mesma demonstrou sua capacidade de melhorar a qualidade dimensional das peças produzidas. O sistema foi capaz de produzir



automaticamente, sem intervenção do operador, um lote de peças com 100% delas dentro de qualidade dimensional ISO IT07. Sem o sistema de compensação, o mesmo lote teria uma qualidade IT13.

Assim, contribui para minimizar e/ou auxiliar a atuação do homem nas máquinas-ferramentas, garantindo o máximo aproveitamento de ferramentas de corte, além de peças produzidas dentro de suas especificações dimensionais e qualidades superficiais.

## **10. AGRADECIMENTOS**

Os autores gostariam de agradecer à INDEX – Tornos Automáticos fabricante do torno INDEX GU 600, à SIEMENS pela doação do comando numérico Sinumerik 810D, e à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo apoio financeiro.

## **11. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). NB (Norma Brasileira) – 86 : “Norma de Sistema de Tolerâncias e Ajustes”.

Blum, T., Suzuki, I., Inasaki, I., 1988, “Development of a Condition Monitoring System for Cutting Tools Using an Acoustic Emission Sensor”, Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering, Vol. 22, No.4, pp.301-308.

Byrne, G. et al., 1995, “Tool condition monitoring – the status of research and industrial application”, Annals of the CIRP, Vol. 44, No.2, pp.541-67.

Chen, S. et al., 1998, “Error source diagnostic using a turning process simulator”, Transactions ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 120, pp. 409-416.

Diniz, A. E., Pigari, A., 1995, “Monitoramento do processo de torneamento em desgaste via emissão acústica”, Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica – COBEM.

Ferraz Jr., F., Coelho, R. T., 2001, “Desenvolvimento de um sistema de monitoramento e supervisão para o processo de torneamento via TCP/ IP”, Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica – COBEM

Gonçalves Filho, E. V., 1994, “Comando Numérico de Máquinas Ferramentas”, São Carlos, 45p. Apostila – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Jemielniak, K., 1999, “Commercial tool condition monitoring systems”, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.15, pp.711-21.

Li, X., 2001, “Real-time prediction of workpiece errors for a CNC turning centre, part 1. measurement and identification”, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 17, pp.649-53.

Mathew, J., Dan, L., 1990, “Tool wear and failure monitoring techniques for turning: a review”, International Journal of Machine Tools Manufacturing, Vol. 30, No. 4, pp.579-598.

Pritschow, G. et al., 2001, “Open Controller Architecture – Past, Present and Future”, Annals of the CIRP, Vol. 50, No. 2, pp.1-7.

Souza, A. J., 1999, “Desenvolvimento e implementação de funções de automação inteligentes num torno CNC utilizando técnicas de monitoramento por emissão acústica”, São Carlos, 82p. Tese (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

## **AUTOMATIC COMPENSATION OF WEAR AND AID TO THE REPLACEMENT OF CUTTING TOOLS IN TURNING PROCESSES**

### **Fábio Ferraz Júnior**

University of São Paulo (USP) / School of Engineering at São Carlos (EESC)

Dept. of Mechanical Engineering

Nucleus of Advanced Manufacturing/ Lab. of Optimization of Fabrication Processes (NUMA/OPF)

Av. Trabalhador São-carlense, 400 13566-590 São Carlos – SP Brazil Ph: (++55)16 273 9438

fferrazj@sc.usp.br

### **Reginaldo Teixeira Coelho**

University of São Paulo (USP) / School of Engineering at São Carlos (EESC)

Dept. of Mechanical Engineering

Nucleus of Advanced Manufacturing/ Lab. of Optimization of Fabrication Processes (NUMA/OPF)

Av. Trabalhador São-carlense, 400 13566-590 São Carlos – SP Brazil Ph: (++55)16 273 9267

rtcoelho@sc.usp.br

***Abstract.** This work presents a proposal for an automatic wear compensation system and aid to the replacement of cutting tools in turning processes. Initially, the work justifies the use of monitoring systems for machines and tools. It aims the main sources of workpiece errors, in relation to superficial and dimensional quality, and the main methods of tools state monitoring. The architecture of the proposed system is described through its main components, as well as the experimental procedure for test of the system, and the reached results. In the first experiments, the system was capable of improving the dimensional quality of a batch of 30 workpieces from an ISO IT13 quality to ISO IT07*

***Keywords:** monitoring, tool wear, turning.*