

DESENVOLVIMENTO DE APALPADOR DE CONTATO ELÉTRICO (“TOUCH TRIGGER PROBE”) PARA ATUAÇÃO NO PROCESSO DE TORNEAMENTO

Marcelo Del Guerra

Escola de Engenharia de São Carlos – EESC – USP.

Av. Caetano Mirabelli, 125, Santa Marta. CEP: 13564-210. São Carlos – SP

e-mail: mdguerra@sc.usp.br

Reginaldo Teixeira Coelho

Escola de Engenharia de São Carlos – EESC – USP.

Av. Trabalhador Sancarlene, 400. CEP: 13566-590. São Carlos – SP.

e-mail: rtcoelho@sc.usp.br

Resumo. A utilização dos apalpadores acoplados a máquinas CNC se tornou uma realidade muito comum no mundo atual, principalmente devido à diminuição do tempo de preparação e possibilidades de realização de medições na própria máquina-ferramenta. Porém, ainda existem algumas barreiras a se transpor, como por exemplo, a dificuldade de programação, custo relativamente elevado e pouca literatura que trata exclusivamente a respeito da utilização dos apalpadores para medição nas máquinas-ferramentas. Nesse trabalho é realizada uma revisão bibliográfica sobre o uso dos apalpadores em ambiente industrial, discutindo-se as tecnologias utilizadas na geração do sinal de “trigger” e é proposto um novo modelo de apalpador de contato elétrico simples, de baixo custo para utilização em tornos CNC. Os testes em laboratório revelaram que a repetibilidade do protótipo construído foi de 0,003mm dentro de uma confiabilidade de $\pm 3s$ ou 99,73%. Concluiu-se que tais características são altamente compatíveis com os requisitos necessários para a maioria dos processos de torneamento.

Palavras-chave: Monitoramento e Controle da Qualidade Dimensional, Apalpadores, Medição durante a usinagem, Tornos CNC.

1. INTRODUÇÃO

Um dos maiores desafios no desenvolvimento de sistemas de manufatura é o controle das dimensões dos componentes fabricados e o desgaste nas ferramentas de corte, integrando essas informações com os sistemas automáticos de aquisição de dados para fins de controle da produção, controle estatístico de processos, etc. Esta integração pode ser alcançada através da utilização de dispositivos comumente chamados de “touch trigger probes”, ou apalpadores, em máquinas com comando numérico computadorizado (CNC), gerando soluções como: detecção do contato ferramenta-peça, compensação de desgastes de flanco na ferramenta, detecção de quebra da ferramenta, localização automática do ponto zero, “setup” simplificado e rápido, posicionamento rápido da ferramenta, controle dimensional, criação de dados estatísticos de processos, realização de medições e calibrações em processo mediante as especificações de projeto, dentre muitas outras.

Tornar possível a utilização dessas funções é de extrema importância no contexto dos modelos atuais de manufatura, pois possibilitam o controle peça-a-peça se necessário, garantindo que erros dimensionais sejam imediatamente detectados, diminuindo o refugo de todo um lote, ou minimizando as consequências de re-trabalho.

Para auxiliar o controle dimensional de peças torneadas, o presente trabalho tem como objetivo apresentar um apalpador simples funcionado pelo princípio de contato elétrico para aplicação na medição de diâmetro em processo de torneamento. Um protótipo inicial é apresentado com os primeiros resultados de repetibilidade e exatidão.

2. APALPADORES E SEUS PRINCÍPIOS

No final dos anos 70, praticamente todas as máquinas de medir por coordenadas (MMCs) eram vendidas com os apalpadores já acoplados, (Renishaw⁽¹⁾). O primeiro apalpador para esse fim foi desenvolvido para solucionar um requisito particular de inspeção, mas acabou por revolucionar o uso das MMCs para inspeção pós-processo de componentes manufaturados.

Posteriormente, com o avanço dos CNCs incluindo funções e rotinas específicas, e o uso de réguas de medição nos eixos das Máquinas-ferramentas, seu uso se estendeu, tornando-se um componente vital nos processos de produção automatizados, permitido às indústrias, das automotivas às aeroespaciais, produzir componentes precisos, minimizando refugos e maximizando a produtividade.

A tecnologia dos apalpadores para medições tridimensionais foi desenvolvida em 1972 por David McMurtry enquanto trabalhava na fábrica da Rolls-Royce em Bristol, UK. Seu desafio era inspecionar tubulações de combustível das turbinas Olympus usadas na fabricação do Concorde, tarefa que requeria cuidado especial no controle da deflexão dos tubos de 6mm de diâmetro.

A solução encontrada por ele foi o "Touch Trigger Probe" (TTP), que utiliza um princípio simples para identificar o contato com a peça a ser medida, (Renishaw⁽¹⁾).

Surgia então a Renishaw, líder mundial na fabricação e comercialização de tais equipamentos, tendo David como fundador e atualmente o principal executivo da empresa. Desde então, a linha de produtos se expandiu para atender a demanda por alta flexibilidade e automação dos processos de medição. Assim, outros fabricantes surgiram, porém, com o princípio de funcionamento patentado, outras tecnologias foram utilizadas.

3. CARACTERÍSTICAS GERAIS DOS TTPS

Independentemente da tecnologia utilizada, o princípio se baseia na geração (ou interrupção) de um sinal elétrico no momento em que ocorre o contato entre a haste do TTP e a peça a ser medida. Esse sinal, comumente denominado sinal de "trigger" ou "trigger signal" é então enviado a uma interface que o converte em uma forma inteligível, por exemplo, por um CNC. Após a conversão, o sinal é transmitido ao CNC que capta instantaneamente os valores dos eixos X, Y e Z da máquina-ferramenta e armazena-os para posterior leitura, cálculos ou geração de relatórios. (vide exemplo na Figura 1).

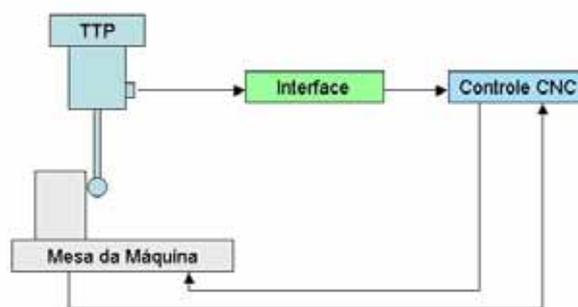


Figura 1. Esquema de funcionamento de um sistema de medição acoplado a uma máquina-ferramenta com CNC.

A transmissão do sinal de "trigger" do apalpador para a interface pode ser realizada, atualmente, através de três tecnologias distintas: infravermelho, cabo blindado ou via frequências normalizadas de ondas de rádio.

Geralmente se utiliza a transmissão via cabo blindado em apalpadores que ficam presos à mesa da máquina (em centros de usinagem e fresadoras), também chamados "toolsetter probes", pois o cabo pode ser adequadamente fixado a mesa e à estrutura da máquina, ficando livre de torções, eliminando riscos de danos provocados pelas ferramentas de corte.

A utilização da transmissão via ondas de rádio é indicada para máquinas de grande porte, pórticos ou então na inspeção de furos profundos, pois nesses casos o sinal infravermelho pode ser excessivamente atenuado, (Tooling & Production ⁽²⁾). Para aplicações convencionais, costuma-se utilizar a comunicação via infravermelho pela sua alta confiabilidade, velocidade de transmissão, baixa suscetividade a ruídos externos e baixo custo.

4. PROGRAMAÇÃO E ROTINAS DE MEDIÇÃO

Segundo Modern Machine Shop On Line ⁽³⁾, poucos trabalhos publicados discutem os méritos dos apalpadores em relação à diminuição do tempo de preparação da máquina, inserção de dimensões das ferramentas e realização de medições em processo. Porém, tais sistemas freqüentemente são vistos como caros e difíceis de operar. Conseqüentemente, tem se tornado uma ferramenta usada exclusivamente por programadores experientes em ambientes de alta produtividade.

Com o intuito de minimizar tal problema, alguns dos mais importantes fabricantes de CNCs como Fanuc, Heidenhain, Okuma, Cincinnati Milacron e Siemens têm empregado em seus comandos, softwares contendo interfaces gráficas amigáveis de fácil utilização, específicos para a realização de medições. O comando Heidenhain série TNC, por exemplo, é capaz de realizar medições tridimensionais automáticas ou manuais e possui funções de inspeção, como: checagem dimensional de furos, identificação de desvios de tolerância e medição da geometria da peça pré-acabada, determinado a profundidade de corte e o sobremetal restante para a operação de acabamento (Zhou; Harrison; Link ⁽⁴⁾).

Acoplado-se às máquinas CNC um sistema constituído por apalpadores e um software com as rotinas de medição adequadas, esta pode ser capaz de desempenhar algumas funções de uma MMC, realizando a inspeção final da peça fabricada, reduzindo, ou em alguns casos, até mesmo eliminando a necessidade de inspeções fora da máquina (Modern Machine Shop On Line ⁽⁵⁾).

Segundo Modern Machine Shop On Line ⁽⁶⁾, diferentemente do que normalmente se acredita, tomando-se certos cuidados, em alguns casos não é mais necessária a utilização de uma máquina independente das utilizadas na fabricação para realizar a inspeção de uma peça, pois os fatores que geram os erros de medição e os que geram erros de corte são distintos, podendo ser rastreados e corrigidos separadamente.

5. TECNOLOGIAS UTILIZADAS NA GERAÇÃO DO “TRIGGER SIGNAL”

Conforme Shen; Moon ⁽⁷⁾, rigorosamente, o sinal de "trigger" não é gerado quando a haste do apalpador entra em contato com a peça. O apalpador irá continuar seu movimento, haverá uma deflexão da haste até que atinja um valor mínimo necessário para ativar o sistema sensor do apalpador. A distância percorrida entre o instante do toque e a geração efetiva do sinal é chamada de Folga de Percurso ou ("pretravel"). Essa distância deve ser minimizada ou, se possível, ser mantida constante, para efeitos de acuracidade e repetibilidade da medição, respectivamente.

São basicamente quatro os princípios físicos utilizados para gerar o sinal que indica o contato com a peça. Esses princípios são: O contato elétrico, ou falta dele, (“Kinematic Contact”), Luz (Interferometria a laser), deformação (Strain-Gauges) e o efeito Piezo Elétrico.

5.1. Kinematic Contact

Atualmente é o tipo de apalpador mais difundido mundialmente. Desenvolvido por David McMurtry, foi o princípio que revolucionou o uso das máquinas de medição por coordenadas.

Conforme ilustrado na Figura 2, trata-se de um mecanismo cinemático formado por três pequenas peças cilíndricas que permanecem assentadas sobre seis rolos ou esferas devido à pressão exercida pela mola sobre elas. Uma corrente elétrica normalmente passa pelos seis rolos e as três peças cilíndricas em série. Quando a pressão de contato com a peça a ser medida ultrapassa a resistência da mola em manter o mecanismo na posição estável, este irá mover-se fazendo com que a resistência de um ou mais contatos sejam alteradas, cortando a corrente elétrica que passava por

eles, gerando o sinal de "trigger". Depois de realizada a medição e afastando-se o apalpador da peça, a mola novamente força o mecanismo a posição inicial de estabilidade e restabelece a corrente elétrica entre eles, (Mayer; Ghazzar; Rossy⁽⁸⁾).

Conforme Reid⁽⁹⁾, não é verdade que o sinal de "trigger" desse tipo de apalpador só ocorre quando um dos contatos elétricos é interrompido. Na realidade o sinal é gerado pela alteração da resistência elétrica do contato.

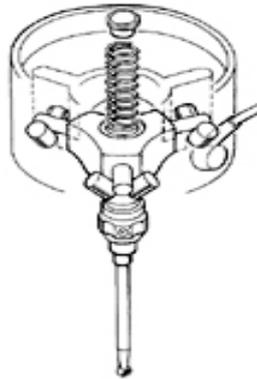


Figura 2. Princípio de funcionamento de um "Kinematic touch trigger probe" (fonte: Tooling & Production⁽²⁾)

5.1.1 Vantagens

Dentre as vantagens apresentadas pelo uso do "Kinematic Contact", destaca-se: Princípio simples de funcionamento; robustez do conjunto eletro-mecânico; amplamente utilizado e pesquisado.

5.1.2 Desvantagens

Por se tratar de um equipamento eletro-mecânico, este está sujeito ao desgaste e corrosão dos contatos elétricos.

Além disso, uma característica típica desse tipo de apalpador é que a precisão da medição varia quando o mesmo se aproxima da peça em diferentes direções, (Reid⁽¹⁰⁾). Isso se deve ao fato de que a força necessária para gerar o sinal de "trigger" é dependente da direção de aproximação, pois o mecanismo se apóia em três direções com um ângulo de 120° entre elas, (Kim; Chung⁽¹¹⁾).

A força dinâmica necessária para abrir um dos contatos elétricos do apalpador é dependente da velocidade de aproximação, (Miguel; King; Abackerli⁽¹²⁾).

Segundo Shen e Moon⁽⁷⁾, devido à fabricação e leves variações no processo de montagem, apalpadores do mesmo modelo e projeto podem apresentar diferenças quanto às características da folga de percurso.

Erros se acumulam quando são utilizadas hastes de comprimento superior a 30mm. Isso se deve ao fato da força de toque necessária para a geração do sinal de "trigger" ser relativamente alta, o que prejudica bastante a utilização de hastes longas causando grande deflexão.

Com relação à aquisição do equipamento, seus custos são relativamente altos se comparados a outros modelos. Isso ocorre, pois apesar de existirem apalpadores mais precisos a um custo mais baixo, este é o equipamento mais conhecido e procurado, estando seu fabricante associado à alta confiabilidade, e apenas estes, por serem os detentores da patente do mecanismo, são autorizados a produzi-lo.

5.2. Strain-Gauges

Os apalpadores por extensômetros tratam de informações analógicas advindas da variação da resistência que ocorre quando a haste do apalpador toca a peça.

Para que esse valor analógico seja capaz de gerar o sinal de "trigger", é necessário que haja um tratamento eletrônico desse sinal, estabelecendo-se um limite a partir do qual é disparado o sinal.

5.2.1 Vantagens

Uma das grandes vantagens desse tipo de apalpador é a característica de possuir valores da folga de percurso muito inferiores a outros modelos, pois a própria deformação da haste é responsável por gerar o sinal de “trigger”. Por este motivo podem ser extremamente sensíveis ao toque. Por isso possibilita a utilização de hastes de até 200mm de comprimento, Figura 3.

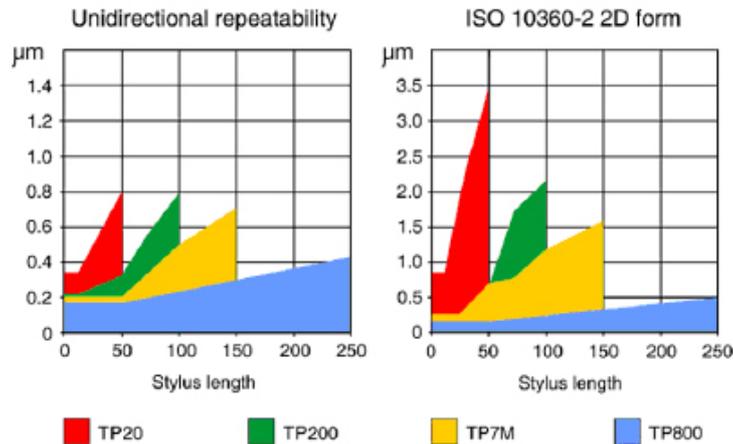


Figura 3. Comparação dos valores da folga de percurso entre apalpadores convencionais e Apalpadores “Strain-Gauges”– TP800 [Fonte:Renishaw ⁽¹⁾]

Trata-se de um apalpador que utiliza eletrônica de estado sólido, proporcionando vida bastante longa e baixo desgaste. Por ser baseado em um princípio analógico que pode ser devidamente calibrado são capazes de detectar o contato através da aplicação de forças da ordem de 0,2N.

5.2.2 Desvantagens

Dentre as desvantagens desse tipo de equipamento destacam-se o preço elevado, utilização de eletrônica extremamente avançada o que torna o equipamento delicado e pouca literatura trata especificamente desses apalpadores.

5.3. Laser

Esse tipo de apalpador utiliza uma chave óptica como sensor para gerar o sinal de “trigger” Um feixe de laser emitido por um LED é colimado por um sistema de lentes e emitido sobre uma célula diferencial fotovoltaica sensível, passando pela haste de medição, (Dr. Johannes Heidenhain ⁽¹³⁾)

No momento do contato, há uma deflexão da haste que gera uma mudança no ponto onde o laser incide sobre a superfície sensível. Quando essa variação ultrapassa uma tolerância pré-estabelecida, o sinal de “trigger” é então gerado.

5.3.1 Vantagens

Uma característica marcante desse equipamento é o seu preço, baixo se comparado a outros modelos que desempenham performance semelhante.

5.3.2 Desvantagens

Nos “apalpadores a laser”, para que haja uma variação no ponto de incidência do laser e conseqüentemente a geração do sinal de “trigger”, primeiramente a haste deve deformar, semelhantemente ao que ocorre nos “Kinematic Probes” no que se refere à abertura dos contatos elétricos. Por esse motivo, esses dois tipos de apalpadores possuem características semelhantes no que se refere ao comportamento da folga de percurso, como utilização não indicada para hastes maiores que 30mm e precisão dependente da direção de aproximação com a peça.

5.4. Sensores Piezo Elétricos

Baseia-se no princípio pelo qual ao se exercer uma pressão sobre um cristal piezoelétrico, este gera uma diferença de potencial entre as superfícies pressionadas.

Utilizando-se dessa característica, é possível disparar o sinal de “trigger” a partir dessa diferença de potencial gerada no momento do toque da haste com a peça a ser medida.

5.4.1 Vantagens

São extremamente precisos e repetitivos. Como os apalpadores “piezoelétricos”, podem ser calibrados para serem capazes de disparar o sinal de “trigger” ao detectar forças da ordem de 0,2N.

5.4.2 Desvantagens

Podem sofrer interferência de ruídos de baixa frequência como pancadas ou acionamento de motores, interferência da frequência da rede elétrica, dentre outros.

6. PROPOSTA DE UM MODELO BASEADO EM CONTATO ELÉTRICO

A proposta visa o desenvolvimento e utilização de tecnologia conhecida que viabilize a fabricação de apalpadores que tenham como principais características: robustez, confiabilidade operacional e baixo custo, para uso em Tornos CNC.

Para tanto, partiu-se do princípio de que utilizando construção mecânica precisa e deslizamentos suaves, é possível construir um sistema capaz de resolver grande parte das necessidades de aplicações convencionais.

6.1. O sistema

O princípio de funcionamento do equipamento proposto consiste no fechamento de um contato elétrico entre uma haste (Terra) e um alvo (Pólo Positivo). Quando isso ocorre, o sinal de “trigger” é emitido via rádio frequência até a Interface, que comuta um sinal de zero para um potencial de 24 volts a uma entrada do CNC.

Como o carro porta ferramenta continua o seu movimento por inércia após o contato entre a haste e o alvo, esse último deve possuir um mecanismo de retorno para absorver essa movimentação, sendo capaz de garantir a integridade física da haste e também a sua própria superfície. Figura 4

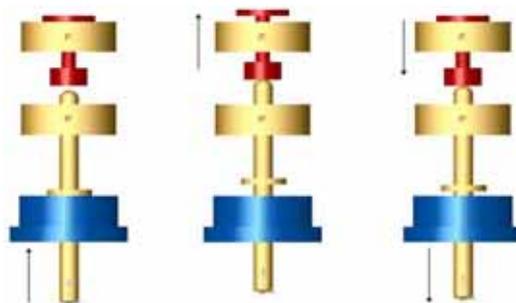


Figura 4. Ilustração do comportamento esperado de um mecanismo de retorno do alvo em uma medição.

Conseqüentemente, a repetibilidade desse tipo de apalpador está diretamente ligada à precisão de posicionamento do mecanismo de retorno do alvo à posição anterior a medição, pois caso contrário, haverá uma alteração no valor do comprimento do apalpador e o próximo contato será fechado em uma posição diferente da anterior, alterando o valor medido. Por esse motivo, o trabalho se dedicou especialmente ao desenvolvimento de um dispositivo capaz de garantir um reposicionamento micrométrico do alvo após o contato com a haste.

O apalpador foi construído nas dimensões adequadas para sua fixação no porta ferramentas, podendo assim, ser chamado em qualquer ponto do programa CN para executar uma medição.

6.2. Cálculo da Repetibilidade e Reprodutibilidade (R&R) do sistema

O equipamento utilizado para os experimentos com o apalpador foi um TORNO INDEX, modelo GU600, com potência de 22Kw. O comando numérico é um SIEMENS 810D que possui funções específicas para realização de medições.

Para determinação da Repetibilidade e Reprodutibilidade do sistema (Torno + Apalpador), um experimento foi realizado tomando-se um eixo cujo diâmetro havia sido previamente normalizado. Em seguida foi feita uma usinagem com uma ferramenta de metal duro VBMT160404UC6010, rebaixando 0,010mm o seu diâmetro, tomando os devidos cuidados com os parâmetros de corte para minimizar o desgaste da ferramenta durante o processo.

O eixo foi então inspecionado usando-se um micrômetro e foram repetidas 60 medições consecutivas com o apalpador, no mesmo colo onde havia sido feita a medição manual, havendo avanço e retorno somente no eixo X. As medidas dos diâmetros foram gravadas nos parâmetros R do CNC e passadas para um PC. Os procedimentos de rebaixo de 0,010mm e inspeção foram repetidos cinco vezes, obtendo-se cinco amostras de dados relativos às medidas de cada um dos colos com rebaiços consecutivos de 0,010mm, ver Figura 5.

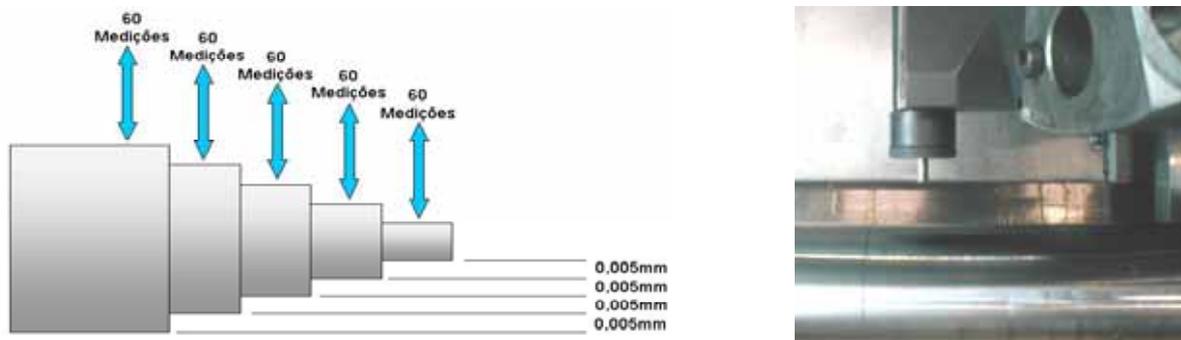


Figura 5. Ilustração do procedimento do ensaio para determinação de características do Apalpador e inspeção automática de um colo do eixo normalizado

Segundo QS9000⁽¹⁴⁾, o método da “Média e Amplitude” é o método mais indicado para o cálculo de R&R de instrumentos de medição. A repetibilidade do instrumento pode ser estimada a partir da amplitude média das medidas coletadas por um mesmo operador, enquanto que a reprodutibilidade pode ser estimada a partir da amplitude de variação do resultado médio das leituras efetuadas por diferentes operadores.

Com o intuito de simular o efeito causado pela ação de diferentes operadores, as medições foram realizadas três vezes consecutivas em cada colo (gerou-se 3 conjuntos de 60 resultados para cada colo) e foi tomada uma amostra aleatória de 5 elementos de cada um desses conjuntos, simulando assim, o efeito de três operadores diferentes, que realizam 5 medições em cada colo.

O operador 1 representa o primeiro conjunto de 60 medições colhidas em cada um dos 5 colos. O operador 2 representa o segundo conjunto de 60 medidas colhidas em cada um dos 5 colos e o operador 3 representa o terceiro conjunto de 60 medidas colhidas em cada um dos 5 colos. Para cada um desses conjuntos de 60 medidas foram tomadas 5 amostras aleatórias, simulando efeito de três operadores diferentes que realizam 5 medições em cada colo. A Tabela 1 apresenta os resultados:

Tabela 1. Apalpador simulando o efeito de três operadores medindo cinco peças

OP1	Cola1	Cola2	Cola3	Cola4	Cola5
medição 1	39,33162	39,32545	39,31334	39,30672	39,29861
medição 2	39,33162	39,32517	39,31334	39,30744	39,29783
medição 3	39,33162	39,32574	39,31357	39,30707	39,29744
medição 4	39,33129	39,32517	39,31443	39,30638	39,29783
medição 5	39,33129	39,3249	39,31443	39,30605	39,29744
R	0,000332	0,00084	0,001094	0,001387	0,001171
\bar{x}	39,33148	39,32529	39,31382	39,30673	39,29783

OP2	Cola1	Cola2	Cola3	Cola4	Cola5
medição 1	39,33129	39,32545	39,31334	39,30672	39,29744
medição 2	39,33129	39,32574	39,31379	39,30744	39,2982
medição 3	39,33129	39,32574	39,31334	39,30744	39,29861
medição 4	39,33195	39,32574	39,314	39,30783	39,2982
medição 5	39,33129	39,3249	39,31334	39,30744	39,29861
R	0,000664	0,00084	0,000664	0,001113	0,001171
\bar{x}	39,33142	39,32551	39,31356	39,30737	39,29821

OP3	Cola1	Cola2	Cola3	Cola4	Cola5
medição 1	39,33162	39,32574	39,31334	39,30672	39,2982
medição 2	39,33129	39,32545	39,31379	39,30707	39,29744
medição 3	39,33256	39,32605	39,31334	39,30672	39,2982
medição 4	39,33129	39,3249	39,31334	39,30638	39,299
medição 5	39,33129	39,32517	39,31334	39,30672	39,29783
R	0,00127	0,001153	0,000449	0,000683	0,001562
\bar{x}	39,33161	39,32546	39,31343	39,30672	39,29813

Utilizando-se das relações para cálculo dos limites do gráfico de \bar{X} , tem-se os limites para o gráfico: LS=39,3157mm, LM= 39,3151mm e LI= 39,3146mm.

Com esses valores, o Gráfico das médias é apresentado a seguir, Figura 6, a qual retrata a habilidade do instrumento em fazer distinção entre diferentes dimensões das peças resultantes dos processos.

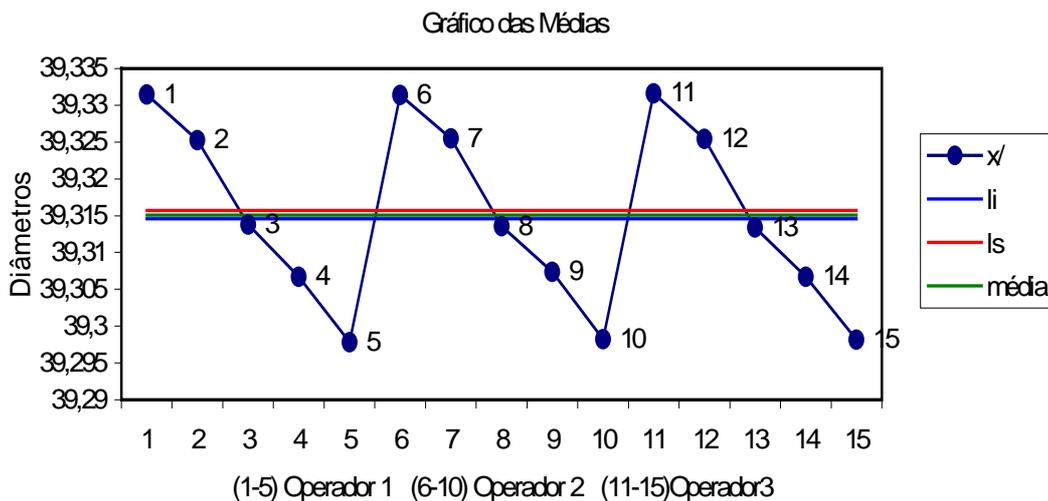


Figura 6. Gráfico das médias

O fato de o gráfico apresentar os pontos fora dos limites já era esperado e desejável. Segundo Carpinetti ⁽¹⁵⁾, como para esse tipo de estudo os limites do gráfico são calculados com base na variação existente entre as medidas feitas para o mesmo item, não levando em conta variações existentes entre itens diferentes, espera-se que o gráfico apresente uma situação de descontrole estatístico. Assim, quando os itens são diferentes, quanto mais pontos fora dos limites de controle, maior é a habilidade do processo de medição em distinguir as diferenças resultantes desses itens.

Das relações para cálculo dos limites do gráfico de R, tem-se: LS=0,00203mm, LM= 0,00096 e LI= 0mm.

O gráfico das amplitudes é apresentado a seguir, Figura 7, representando diretamente a variabilidade dos resultados devido à medição, avaliando a consistência do processo de medição. Os valores de R representam as diferenças entre medidas feitas no mesmo item, pelo emprego do mesmo instrumento, simulando-se 3 operadores.

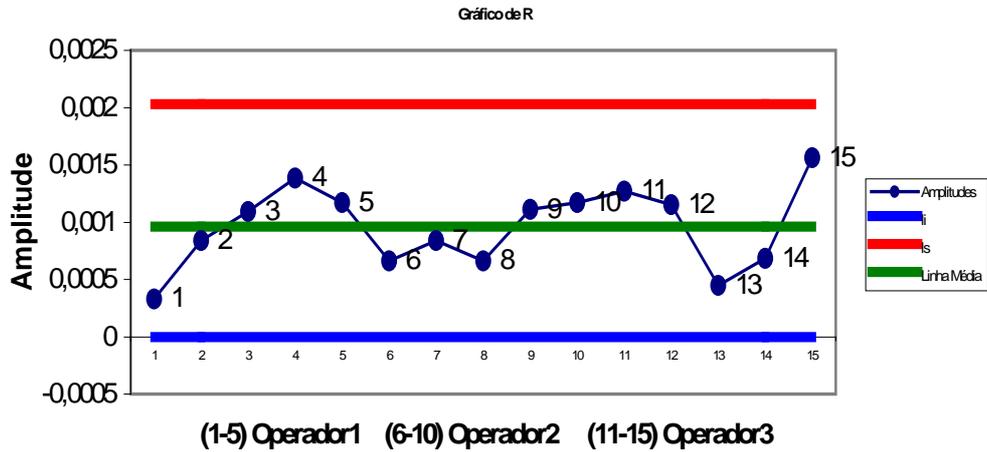


Figura 7. Gráfico das Amplitudes

O gráfico das amplitudes mostra uma situação de controle estatístico, indicando que a variabilidade dos resultados é decorrente apenas de causas crônicas e mostra que o processo automático de medição (simulado por operadores) não influencia relevantemente nos resultados.

A estimativa para o cálculo da repetibilidade do instrumento, representando 99,73% dos resultados é dada pela expressão:

$$repetibilidade = 6\hat{\sigma}_{repe} = 6\left(\frac{\bar{R}}{d_2}\right) = 6\left(\frac{0,00096}{2,326}\right) = 0,0026mm \quad (1)$$

Uma estimativa para o cálculo da reprodutibilidade do instrumento é dada através da seguinte relação:

$$reprodutibilidade = 6\hat{\sigma}_{repro} = 6\left(\sqrt{\left(\frac{\bar{R}_x}{d_2}\right)^2 - \frac{(\hat{\sigma}_{repe})^2}{nr}}\right) = 0,00046mm \quad (2)$$

A estimativa das características do sistema de medição quanto à R&R é dada por:

$$R \& R = 6 \times \sqrt{\hat{\sigma}_{repe}^2 + \hat{\sigma}_{repro}^2} = 0,00264 \quad (3)$$

$$\% R \& R = \frac{R \& R}{6\hat{\sigma}_{total}} 100 = \frac{0,00264}{6 \times 0,01255} \times 100 = 3,51\% \quad (4)$$

Esse estudo indica que 3,51% da variabilidade total do conjunto de dados apresentados é referente a possíveis erros do equipamento de medição (Apalpador + Máquina-ferramenta) e 96,49% da variabilidade é relativa à diferença real existente entre as peças.

7. CONCLUSÃO

A utilização dos apalpadores integrados às Máquinas Ferramentas se tornou uma realidade nos últimos anos. Além das dificuldades de programação e operação de tais equipamentos, outro ponto que impede sua ampla utilização é o custo de aquisição, que inviabiliza o seu uso para micro, pequenas e médias empresas, justamente essas, que mais poderiam desfrutar das vantagens de tais equipamentos, por lidarem com lotes menores e mais variados, cujos processos facilmente saem de controle.

O presente trabalho mostrou que é possível a construção de sistemas de medições comparativamente mais simples, porém ainda assim capazes de realizar medições com alta confiabilidade e resolução suficiente para a maioria das aplicações de usinagem em Tornos CNC a um custo aplicável.

8. REFERÊNCIAS

1. RENISHAW PLC, METROLOGY DIVISION, New Mills, Wotton-under-Edge, Gloucestershire, UK, Technical Literature. Disponível em <<http://www.renishaw.com>>. Acesso em 9 de setembro de 2004.
2. TOOLING & PRODUCTION. **RF technology enhances touch probe**, Oct 1999. Disponível em <<http://www.manufacturingcenter.com/tooling/archives/1099/1099rf.asp>>. Acesso em 9 de setembro de 2004.
3. MODERN MACHINE SHOP ON LINE. **System simplifies probing operations on VMCs**. Sep. 2001. Disponível em <<http://www.mmsonline.com/articles/1002scan1.html>>. Acesso em 9 de setembro de 2004.
4. ZHOU, E.P.; HARRISON, D.K.; LINK, D. Effecting in-cycle measurement with pretepic CNC machine tools, **Computers in Industry**, Vol. 28 (1996), pp. 95-102.
5. MODERN MACHINE SHOP ON LINE. **Probing for Process Improvement**, 2001. Disponível em <<http://www.mmsonline.com/articles/mtg0005.html>>. Acesso em 9 de setembro de 2004.
6. MODERN MACHINE SHOP ON LINE. **CNC Machine Tool In-Process Inspection**, 2001. Disponível em <<http://www.mmsonline.com/articles/110105.html>>. Acesso em 9 de setembro de 2004.
7. SHEN, Y.; MOON, S. Error compensation of coordinate measurements in computer-integrated manufacturing using neural networks, **Journal of Materials Processing Technology**, Vol. 61 (1996), pp. 12-17.
8. MAYER, J. R.; GHAZZAR, A.; ROSSY, O. 3D characterisation, modelling and compensation of the pre-travel of a kinematic touch trigger probe, **Measurement**, Vol 19, No 2, (1996), pp.83-94.
9. REID, C. Performance characteristics of touch trigger probes, **Quality Today. Buyers Guide**, 1995, pp. 152-155.
10. REID, C. Probe technology – beyond accuracy, **Proc. Of Applying Imaging and Sensoring Technology to CMM Applications**, SME, Nashville, Tennessee, 1993.
11. KIM, K. D.; CHUNG, S. C. Synthesis of the measurement system on the machine tool, **International Journal of Production Research**, Vol. 19, No. 11, (2001), pp. 2475-2497
12. MIGUEL P. C.; KING, T.; ABACKERLI, A. “A review on methods for probe performance verification”, **Measurement**, Vol. 23, (1998), pp. 15-33.
13. DR. Johannes Heidenhain GmbH, Traunreut, Germany. Disponível em <<http://www.heidenhain.com>>. Acesso em 9 de setembro de 2004.
14. QS 9000. (1995). Measurement System Analysis – Reference Manual
15. CARPINETTI, L. R. C.(2000). Controle da qualidade de processo. **Apostila**, São Carlos: EESC-USP.

DEVELOPMENT OF A LOW COST TOUCH TRIGGER PROBE FOR CNC LATHES

Marcelo Del Guerra

Escola de Engenharia de São Carlos – EESC – USP.

Av. Caetano Mirabelli, 125, Santa Marta. CEP: 13564-210. São Carlos – SP

e-mail: mdguerra@sc.usp.br

Reginaldo Teixeira Coelho

Escola de Engenharia de São Carlos – EESC – USP.

Av. Trabalhador Sancarlene, 400. CEP: 13566-590. São Carlos – SP.

e-mail: rtcoelho@sc.usp.br

Abstract. *The use of Touch Trigger Probes attached to CNC machines has become a world standard, especially due the reduction of setup time and the ability to promote work piece measurements on machine. However, some barriers like measurement routines programming difficulties, high costs of these equipments and the low number of technical literature about this subject, still need to be transposed. This work presents a review on the applications of Touch Trigger Probes on Companies shop floor, discussing the nowadays technologies used to generate the trigger signal. A new Touch Trigger Probe model based on a simple electrical contact is proposed, with the needed characteristics and low cost, to be used in CNC Lathes. The tests of the probe developed in the laboratory shown a repeatability of 0,003mm ($\pm 3s$ or 99,73%). Those characteristics are high compatible with the most needs of the industry.*

Keywords: *Dimensional Quality Monitoring and Control, Touch-Trigger-Probes, On-Machine Measuring systems, CNC Lathes*