

Eng. Marcelo Del Guerra

**DESENVOLVIMENTO DE APALPADOR DE
CONTATO ELÉTRICO ("TOUCH TRIGGER
PROBE") PARA ATUAÇÃO NO PROCESSO DE
TORNEAMENTO**

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP

EXEMPLAR REVISADO

Data de entrada no Serviço...18.../10.../04.....

Ass.: *Marcelo Del Guerra*

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Reginaldo Teixeira Coelho



São Carlos
2004

DEDALUS - Acervo - EESC



Class.	TESE EESC
Call.	D331d
Tombo	T252/04
Sysno	1400052

Serviço de Pós-Graduação EESC/USP
EXEMPLOS REVISADO
Data de entrada no Serviço

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

D331d Del Guerra, Marcelo
 Desenvolvimento de apalpador de contato elétrico
 ("Touch Trigger Probe") para atuação no processo de
 torneamento / Marcelo Del Guerra. -- São Carlos, 2004.


 Dissertação (Mestrado) -- Escola de Engenharia de São
 Carlos-Universidade de São Paulo, 2004.
 Área: Engenharia Mecânica.
 Orientador: Prof. Dr. Reginaldo Teixeira Coelho.

 1. Monitoramento e controle da qualidade dimensional.
 2. Apalpadores. 3. Medição durante a usinagem. 4. Tornos
 CNC. I. Título.

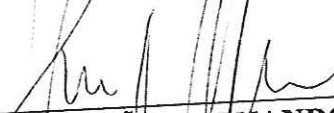
FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **MARCELO DEL GUERRA**

Dissertação defendida e julgada em 21-09-2004 perante a Comissão Julgadora:




Prof. Associado **REGINALDO TEIXEIRA COELHO (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) APROVADO




Prof. Titular **JOÃO FERNANDO GOMES DE OLIVEIRA**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) APROVADO



Prof. Dr. **JUAREZ FELIPE JUNIOR**
(Universidade Paulista/UNIP) Aprovado



Prof. Associado **JONAS DE CARVALHO**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Mecânica



Prof. Titular **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da Vida, através da qual podemos nos expressar e passar pelas experiências que nos levam a Evolução.

Aos meus Pais, por todo apoio, Compreensão, Amor e Amizade.

Ao Professor Reginaldo, por sua amizade, orientação e paciência. Pelas oportunidades profissionais, dicas e todo o apoio que me foi dado durante o desenvolver deste trabalho.

À TRW Automotive, principalmente ao Dave Jones ao Brian Nadel, à Lisa Furches e à Amy Brooks, pela confiança e por proporcionar uma experiência de trabalho da qual serei grato eternamente.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo apoio financeiro.

À todos os membros do OPF, pela amizade, pelo ótimo ambiente de trabalho e convívio, pela ajuda científica e profissional.

OUTONO

No Outono, quando os frutos abandonam as árvores que lhes fizeram nascer, e jogam-se ao chão...

No Outono, quando as folhas verdes perdem o seu viço e param de alimentar, com seu metabolismo de néctar eterno das radiações solares, a planta, e a abandonam...

No Outono, quando os pássaros migram para novas paragens, colocando o silêncio e a tristeza em torno das árvores que lhes acolheram durante as boas estações, somente para lhes ouvir o canto alegre e festivo, e sem mais nada pedir...

No Outono, quando a própria terra, que se beneficiou de sua sombra refrescante, torna-se seca e árida, negando alimentação...

No Outono, quando todos aqueles que a admiram e aproveitaram sua beleza também a abandonam, a árvore mantém-se viva e serena. Não desanima e aguarda. Conhece a sua missão e não se desespera. Não odeia e nem se vinga. Sabe que à humilhação sobrevirá a exaltação, e, por isso, aguarda com soberba Coragem o Inverno que haverá de cobri-la com nuvens cinzentas e lamacentas de humilhação, numa tentativa final de destruí-la.

Mas, na sua seiva corre o Espírito do Eterno, e ela disso bem sabe, tem consciência. E, numa atitude passiva e resignada, entende a efemeridade dos tempos.

Então, passados estes, vê nascer em seu mais distante ramo, um broto, como que lhe anunciando as recompensas por tamanha Coragem. É a primavera que surge.

E, novamente, a terra volta a lhe dar alimento, as folhas retornam com seu verde de Esperança, os pássaros em seus galhos voltam a fazer morada, as flores e os frutos a lhe enfeitar e, finalmente, as pessoas a lhe admirar. É a glória, conquanto que passageira, mas por demais nobre para ser desprezada.

Nas estações de Outono, saiba imitar a árvore.

Dr. Celso Charuri.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivos.....	3
1.2	Estrutura da Dissertação	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1	Usinagem de Alta Precisão	6
2.1.1	Principais Fontes geradoras de imprecisão em máquinas-ferramentas	7
2.1.1.1	Erros Geométricos e Cinemáticos	8
2.1.1.2	Erros Térmicos	9
2.1.1.3	Erros devido a forças de corte	10
2.1.1.4	Erros de fixação.....	10
2.1.2	Tecnologias que auxiliam a fabricação de precisão	11
2.1.2.1	O Controle Numérico Computadorizado e arquitetura aberta	11
2.1.2.2	Programas (Softwares) CAM	14
2.1.2.3	Sistemas de Movimentação	15
2.1.2.4	Motores Lineares.....	17
2.2	Qualidade Dimensional e Controle de Processos.....	20
2.2.1	Custos da Qualidade.....	21
2.2.1.1	Custos devido à falhas internas	21
2.2.1.2	Custos devido à falhas externas	22
2.2.1.3	Custos de avaliação da qualidade.....	22
2.2.1.4	Custos de prevenção.....	23
2.2.2	Ferramentas e metodologias da qualidade	23
2.2.2.1	CEP - Controle estatístico do processo	24
2.2.2.2	Aptidão do Processo	31
2.2.3	Análise de sistemas de medição	33
2.2.3.1	Repetibilidade e reprodutibilidade de sistemas de medição.....	35
2.3	Utilização de Apalpadores no Auxílio do Controle de Processos e da Qualidade Dimensional.....	40
2.3.1	Os Apalpadores	40
2.3.2	Características Gerais dos Apalpadores	41
2.3.3	Programação e Rotinas de Medição	42
2.3.4	Tecnologias Utilizadas na Geração do sinal de “trigger”	43
2.3.4.1	O “Kinematic Contact”	44
2.3.4.2	“Strain Gauges”	47
2.3.4.3	Laser	50
2.3.4.4	Sensores Piezo-Elétricos	51
3	PROPOSTA DE UM SISTEMA DE MEDIÇÃO PARA TORNOS CNC	53
3.1	Tecnologias Utilizadas.....	53

3.2	Funções de medição	58
3.3	Procedimento padrão de medição	62
4	TRABALHO EXPERIMENTAL	66
4.1	Equipamentos utilizados	66
4.2	Procedimento experimental.....	66
4.2.1	Estudo de Repetibilidade e Reprodutibilidade (R&R).....	68
4.2.2	Análises estatísticas – Teste de hipóteses	68
4.2.3	Teste de usinagem seriada.....	69
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	72
5.1	Resultados do teste de Repetibilidade e Reprodutibilidade	72
5.2	Resultados do teste de hipóteses	77
5.3	Resultados do teste de usinagem seriada.....	79
5.4	Testes de aplicações práticas	83
5.4.1	“Offset” automático do apalpador.....	83
5.4.2	Medição e correção durante a usinagem	85
6	CONCLUSÕES	87
7	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	88
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89
	ANEXOS.....	94

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1.1 - Resumo dos erros em máquinas-ferramentas e suas principais causas [FONTE: SLOCUM, (1992)]	8
FIGURA 2.1.2 - Configuração padrão de transmissão de movimento para o carro [FONTE: MODERN MACHINE SHOP ONLINE SUPLEMEN]	15
FIGURA 2.1.3 - Foto ilustrativa de uma régua óptica [FONTE: DYNAMICS RESEARCH CORPORATION].....	16
FIGURA 2.1.4 - Diferenças fundamentais entre o controle de posição com régua óptica e o controle motor-encoder. A régua óptica inclui o mecanismo de avanço no controle de posicionamento. [FONTE MODERN MACHINE SHOP ONLINE SUPPLEMENT]	17
FIGURA 2.1.5 - Acionamento por fuso de esferas recirculantes [FONTE: MODERN MACHINE SHOP ONLINE]	18
FIGURA 2.1.6 - Acionamento direto por motor linear [FONTE: MODERN MACHINE SHOP ONLINE]	18
FIGURA 2.2.1 - Ciclo de controle da qualidade de processo [FONTE CARPINETTI, (2000)]	24
FIGURA 2.2.2 - Comportamento de um processo sob controle e fora de controle estatístico [FONTE: SOUZA, (1999)].....	25
FIGURA 2.2.3 - Princípio do gráfico de controle [FONTE: SOUZA, (1999)].....	27
FIGURA 2.2.4 – Exemplo de uma carta de controle [FONTE: MONTGOMERY, (1996)]	28
FIGURA 2.2.5 - Relação entre vício, repetibilidade e exatidão [FONTE: CARPINETTI, (2000)]	34
FIGURA 2.3.1- Esquema de funcionamento de um sistema de medição acoplado a um Centro de Usinagem	41
FIGURA 2.3.2 - Exemplo de um sistema de transmissão óptico via infravermelho (TP10 - Renishaw).....	42

FIGURA 2.3.3 - Discrepância entre a posição de contato real e a percebida pelo CNC.....	44
FIGURA 2.3.4 - Princípio de funcionamento de um “Kinematic touch trigger probe” [FONTE: TOOLING & PRODUCTION (1999)].....	45
FIGURA 2.3.5 - Teste padrão da folga de percurso ou “pretravel” em XY de um Kinematic TTP [FONTE: KIM E CHUNG, (2001)].....	46
FIGURA 2.3.6 - Ponte de Wheatstone usando 4 extensômetros [FONTE: CÉLULAS DE CARGA - CONCEITOS BÁSICOS].....	47
FIGURA 2.3.7 - Tratamento do sinal do Extensômetro para geração do sinal de “trigger”.	48
FIGURA 2.3.8 - Comparação dos valores da folga de percurso entre apalpadores convencionais e Apalpadores “Strain-Gauges” – TP800 [FONTE: RENISHAW PLC, METROLOGY DIVISION].....	49
FIGURA 2.3.9 - Detalhe de um TTP que utiliza o princípio do extensômetro para geração do sinal de “trigger” [FONTE: RENISHAW PLC, METROLOGY DIVISION]	50
FIGURA 2.3.10 - Princípio de funcionamento dos “apalpadores a Laser” e a variação do ponto de incidência do feixe na fotocélula sensível quando há a deflexão da haste [FONTE: DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH].....	50
FIGURA 2.3.11 - Transmissão da força de toque para os sensores nos “piezo probes”. [FONTE: RENISHAW PLC, METROLOGY DIVISION].....	51
FIGURA 3.1.1 – Interface: recebe o sinal de rádio frequência proveniente do apalpador e envia o sinal à porta específica do CNC	54
FIGURA 3.1.2 – Interface receptora posicionada fora do “ambiente de usinagem”, facilitando a instalação	55
FIGURA 3.1.3 – Esquema de funcionamento do circuito emissor de rádio frequência	55

FIGURA 3.1.4 – Detalhe interno da parte frontal do apalpador	56
FIGURA 3.1.5 – Contato entre a haste e o alvo	56
FIGURA 3.1.6 - Ilustração do comportamento esperado de um mecanismo de retorno do alvo em uma medição.....	57
FIGURA 3.1.7 – Esquema demonstrativo do erro introduzido pelo mal posicionamento do mecanismo de retorno.....	57
FIGURA 3.1.8 – Vista do sistema de medição.....	58
FIGURA 3.2.1 - Esquema dos sinais sendo gerados a medida que o carro porta ferramentas se desloca para realizar a medição – Diagrama referente a um centro de usinagem.....	61
FIGURA 3.3.1 – Diagrama dos eventos que decorrem da sub-rotina de medição.....	63
FIGURA 4.2.1 - Inspeção automática de um mesmo colo de um eixo normalizado.....	67
FIGURA 4.2.2 - Ilustração do procedimento do ensaio para determinação de características do sistema de medição.....	67
FIGURA 4.2.3 – Resultado das 60 medições consecutivas de um dos colos usinados.	68
FIGURA 4.2.4 - Valores críticos de Z para $\alpha = 0,005$	69
FIGURA 4.2.5 - Usinagem com controle dimensional através de medição com apalpador e correção do comprimento da ferramenta de corte.....	70
FIGURA 4.2.6 – Usinagem seriada de 20 peças: Antes e depois da usinagem do colo	71
FIGURA 5.1.1 – Gráfico das médias	74
FIGURA 5.1.2 – Gráfico das Amplitudes	75
FIGURA 5.1.3 – Resultados de R&R obtidos com a utilização do Software Minitab®.....	77
FIGURA 5.2.1 - Valores críticos de Z para $\alpha = 0,005$	78
FIGURA 5.3.1 - Análise das medições realizadas nas 20 peças torneadas (Micrômetro).....	81

FIGURA 5.3.2 - Análise das medições realizadas nas 20 peças torneadas (Apalpador)	82
FIGURA 5.3.3 - Análise das medições realizadas nas 20 peças torneadas (Micrômetro e Apalpador).....	82
FIGURA 5.4.1 Diagrama de bloco da função "offset" automático	84
FIGURA 5.4.2 - Diagrama de bloco da função de medição e correção durante a usinagem	86

LISTA DE TABELAS

TABELA 2-1 - Exemplos de custos devido às falhas internas [FONTE: CARPINETTI, (2000)]	22
TABELA 2-2 - Exemplos de custos devido às falhas externas [FONTE: CARPINETTI, (2000)]	22
TABELA 2-3 - Exemplos de custos devido à avaliação da qualidade [FONTE CARPINETTI, (2000)]	22
TABELA 2-4 - Exemplos de custos devido à prevenção da qualidade [FONTE: CARPINETTI, (2000)]	23
TABELA 2-5 - Resumo das características das variações comuns e especiais [FONTE SOUZA, (1999)]	26
TABELA 2-6 – Valores de a_2 para diferentes tamanhos de amostras [FONTE: MONTGOMERY (1991)]	31
TABELA 2-7 – Classificação dos níveis de rejeição [FONTE: NBR ISO 9004 (1994)].....	33
TABELA 2-8 – Classificação de sistemas de medição quanto a R&R [FONTE: QS 9000, (1995)].....	39
TABELA 5-1 – Apalpador simulando o efeito de três operadores medindo cinco peças	73
TABELA 5-2 - Resultados do Experimento.....	79
TABELA 5-3 – Dados obtidos da usinagem seriada de 20 peças: medição do diâmetro do colo através da utilização do apalpador e micrômetro	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de normas Técnicas

CAD – Computer Aided Design

CAI – Computer Aided Inspection

CAM – Computer Aided Manufacturing

CEP – Controle Estatístico de Processo

CLP – Controlador Lógico Programável

CN – Comando Numérico

CNC – Comando Numérico Computadorizado

ERP – Enterprise Resource Planning

IHM – Interface Homem Máquina

IP – Internet Protocol

MMC – Máquina de medir por coordenadas

R&R – Repetibilidade e Reprodutibilidade

TCP – Transmission Control Protocol

TTP – Touch Trigger Probe

RESUMO

DEL GUERRA, M. (2004). *Desenvolvimento de apalpador de contato elétrico ("Touch trigger Probe") para atuação no processo de torneamento*. São Carlos. 109p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

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, de baixo custo, desenvolvido especialmente para atender as necessidades de medições em tornos CNC. Os testes em laboratório revelaram que a repetibilidade do protótipo construído foi de 0,003mm dentro de uma confiabilidade de $\pm 3\sigma$ ou 99,73%. Concluiu-se que tais características são altamente compatíveis com os requisitos necessários para a maioria dos processos de torneamento.

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

ABSTRACT

DEL GUERRA, M. (2004). *Development of a low cost touch trigger probe for CNC lathes*. São Carlos. 109p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

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 specially developed to provide the measuring characteristics required for Lathes, with the needed characteristics and low cost. The tests of the probe developed in the laboratory shown a repeatability of 0,003mm ($\pm 3\sigma$ 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.

1 Introdução

A partir da década de 80, a globalização e o aumento da competição mudaram a forma das empresas abordarem os processos de manufatura. A forte concorrência mundial e a busca constante por redução de custos, geraram a procura por processos de usinagem econômicos, capazes de atender à grande demanda e à alta qualidade. Novas tecnologias, conceitos e estratégias têm sido empregados com o objetivo de aumentar o desempenho e a eficiência das máquinas-ferramentas, SILVA, L. R. (2001).

As inovações na manufatura são cada vez mais focadas a atender demandas por baixos tempos de ciclo, "set-ups" rápidos e alta qualidade. Inovações e métodos para redução de custos precisam ser desenvolvidos com a finalidade de possibilitar a manufatura de precisão e alcançar a competitividade numa economia globalizada, MOU, J. (1997). Tais transformações têm consistido em um elemento-chave de sustentação e viabilização econômica das empresas no horizonte de médio e longo prazo.

Como resultado da utilização de novos materiais e novas tecnologias empregadas na fabricação de ferramentas de corte e de máquinas-ferramentas, a usinagem dos metais se aperfeiçoou imensamente, atingindo altas velocidades de corte, de avanço e ótimo acabamento superficial das peças produzidas, DEWES, R. C.; ASPINWALL, D. K. (1997).

Como exemplo de novas tecnologias, o desenvolvimento da usinagem com altas velocidades de corte trouxe o advento das máquinas denominadas de "Alta Velocidade". As solicitações cinemáticas e dinâmicas a que são submetidas tais máquinas durante a usinagem, trouxeram consigo a evolução de grande parte dos componentes envolvidos no processo, incluindo a própria estrutura da máquina-ferramenta, o eixo-árvore, sistemas de movimentação, programas CAD/CAM, aprimoramento dos comandos numéricos, velocidade de processamento, capacidade de armazenamento de dados, dentre outros.

A aplicação de novas tecnologias e componentes expandiu as fronteiras na utilização das máquinas-ferramentas, tornando-as capaz de cumprir

sozinhas, tarefas antes realizadas por várias máquinas e processos separadamente.

No campo da qualidade, a meta de fazer com que a diferença entre o valor nominal e o valor real na peça seja pequena o bastante para garantir que todas as partes estejam dentro das especificações já pode ser vislumbrada. Não através de medições e comparações, mas usando as medições "em processo" para controlar a fabricação continuamente.

Segundo YANDAYAN, T.; BURDEKIN, M. (1997), métodos de inspeção automáticos podem ser a solução para o aumento da demanda por qualidade dimensional nas peças usinadas e a redução dos custos envolvidos. Tais métodos de inspeção devem ser capazes de realizar o controle dimensional durante o processo de usinagem e re-alimentar o sistema com as informações necessárias para as correções. Ainda segundo YANDAYAN, T.; BURDEKIN, M. (1997), a estratégia para atingir alta qualidade, produtividade e "lead times" reduzidos é trazer o controle da qualidade para próximo da máquina-ferramenta, o que pode ser atingido através da utilização de medições em processo, inspecionando as partes na medida em que são produzidas.

A utilização dos apalpadores ou "Touch Trigger Probes" acoplados às máquinas-ferramentas tem-se mostrado a solução mais prática na realização do controle de processos automatizados, pois possibilita uma integração entre a ferramenta, a peça e o comando numérico, sendo de fácil instalação e robustos. Tal integração é capaz de prover 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 dimensional mais rigoroso, podendo-se até chegar ao controle peça-a-peça,

garantindo que erros dimensionais sejam imediatamente detectados, diminuindo o refugo, ou minimizando as conseqüências de re-trabalho.

1.1 Objetivos

Os sistemas de medição existentes na atualidade são voltados para aplicações em Centros de Usinagem, os quais requerem maior precisão, e são "adaptados" aos tornos, sem cumprir o objetivo de alinhar custo-benefício. A presente proposta visa o desenvolvimento e utilização de tecnologia conhecida que viabilize a fabricação de apalpadores especialmente desenvolvidos para as necessidades dos processos de Torneamento, inicialmente para medição de diâmetros em Tornos CNC, tendo como principais características: robustez, confiabilidade operacional e, principalmente, baixo custo.

Para tanto, o trabalho tem os seguintes objetivos:

Apresentar os princípios utilizados para o desenvolvimento de um apalpador voltado para aplicação na medição de diâmetro em processo de torneamento;

Construir um protótipo inicial baseado no princípio do contato elétrico.

Testar o protótipo em um torno INDEX GU600 apresentando os resultados de repetibilidade e resolução atingida.

Testar o protótipo em um ambiente de usinagem seriada, visando inferir a respeito da possibilidade do sistema realizar o controle do processo a partir da medição do erro e correção do comprimento da ferramenta para a próxima usinagem, estabilizando o processo ao redor do valor nominal estabelecido para a peça.

Implementação e testes de aplicações práticas atribuídas aos apalpadores.

1.2 Estrutura da Dissertação

O presente documento, apresentado à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, está dividido nos capítulos abaixo:

- **Capítulo 1: Introdução:** Posiciona o leitor a respeito da importância da utilização de apalpadores nas máquinas-ferramentas perante o panorama da indústria de manufatura moderna, bem como as possíveis utilizações e vantagens no uso desse equipamento. Trata também do objetivo desse trabalho e, ao final, de uma breve descrição dos capítulos que compõe esse documento.
- **Capítulo 2: Revisão Bibliográfica:** Mostra tópicos importantes relacionados ao trabalho. O primeiro tópico faz uma descrição a respeito da Usinagem de Alta Precisão, citando as principais fontes de erros geradoras de imprecisão e as tecnologias que auxiliam a fabricação de precisão. O segundo tópico trata do Controle de Processos e Qualidade Dimensional, dando a definição de Qualidade, os tipos de custos envolvidos na qualidade, introduzindo ferramentas e metodologias da qualidade e análises de sistemas de medição. Finalmente, no terceiro tópico, é feito um apanhado geral a respeito da utilização dos apalpadores no Auxílio do Controle de Processos e da Qualidade Dimensional, discorrendo sobre seu histórico, características gerais, sua programação e rotinas de medição e as tecnologias utilizadas na geração do sinal de "trigger".
- **Capítulo 3: Proposta de um sistema de medição para tornos CNC:** Descreve quais foram as tecnologias e considerações utilizadas no desenvolvimento do novo modelo de apalpador. Discorre a respeito das funções de medição existentes no CNC utilizado e os procedimentos padrão de medição desenvolvidos e adotados para o presente trabalho.
- **Capítulo 4: Trabalho experimental:** Trata dos equipamentos utilizados e discorre a respeito do planejamento dos experimentos realizados para avaliar o sistema quanto a suas características de repetibilidade, reprodutibilidade e resolução e ensaios para determinar seu desempenho durante a execução de operações normalmente esperadas dos TTPs utilizados em máquinas-ferramentas, como o "off-set" automático e a medição e correção durante a usinagem.

- **Capítulo 5: Resultados e Discussões:** Trata de mostrar e discutir os resultados obtidos nos experimentos.
- **Capítulo 6: Comentários e Conclusões:** Conclusões sobre o trabalho realizado
- **Capítulo 7: Sugestões para Trabalhos Futuros:** Proposição de idéias e melhorias para a continuação dos trabalhos.

2 Revisão Bibliográfica

Esta revisão bibliográfica visa apresentar e analisar os temas mais relevantes ligados ao tema "Apalpadores", tratando de temas como fabricação de componentes precisos, máquinas CNC modernas e suas características, qualidade, ferramentas estatísticas para controle de qualidade, para então inserir os apalpadores nesse contexto.

2.1 Usinagem de Alta Precisão

As inovações impostas pelos consumidores têm forçado as empresas a manter melhorias tecnológicas constantes, alcançando grande eficiência e altos níveis de integração. Tudo isso, porém, recai sobre um ponto: a necessidade de utilização de componentes de precisão. É seguro afirmar que o sucesso de cada uma dessas empresas em sobreviver no mercado está intimamente ligado à capacidade de se produzir tais componentes a baixo custo. A exatidão das peças produzidas é uma das considerações mais importantes ao se fabricar um componente, (RAMESH, MANAN E POO 2000). Alguns parâmetros-chave, como ferramentas de corte, condições de usinagem, resolução das máquinas-ferramentas, tipo de material usinado, dentre outros, representam um papel importante na obtenção da qualidade dimensional requerida.

Segundo o autor ARNONE, (1998), o termo Usinagem de Alta Precisão é definido como a capacidade de produção de componentes complexos com tolerâncias na faixa de $\pm 0.005\text{mm}$ a $\pm 0.010\text{mm}$. Tolerâncias abaixo desses valores já recaem no campo da Usinagem de Ultra Precisão, o qual requer a utilização de um conjunto de métodos, ambientes e tecnologias totalmente diferenciadas das utilizadas normalmente no chão de fábrica e, portanto não será objeto de estudo do presente trabalho. Naturalmente, as fronteiras que separam a Usinagem de Alta Precisão da Usinagem de Ultra Precisão não são tão rígidas. Foram adotadas de modo que tais faixas de tolerâncias sejam atingidas com a utilização dos métodos de manufatura padrão e de máquinas CNC convencionais, cujo custo não seja superior a US\$100.000. Este grupo de

máquinas representa a grande maioria das compras feitas atualmente. Sendo assim, quando se fala de máquinas CNC convencionais, a partir da segunda metade da década de 90, está se falando de máquinas que tem plena capacidade de produzir peças com tolerâncias na faixa de $\pm 0.005\text{mm}$ a $\pm 0.010\text{mm}$, faixa essa na qual se encaixa a grande maioria das operações de usinagem requeridas pelas indústrias metal mecânicas.

A utilização de métodos de monitoramento de processos através da análise de parâmetros como corrente elétrica vibração mecânica, forças de corte, sinais de emissão acústica, sistemas de visão, ciclos de apalpamento, dentre outros, são amplamente utilizados para a realização de controle de processos a fim de garantir uma maior qualidade e precisão dimensional das peças produzidas. Contribuem, desta forma, para a melhoria da qualidade dimensional das peças produzidas.

2.1.1 Principais Fontes geradoras de imprecisão em máquinas-ferramentas

Segundo a norma INMETRO, (1995), **Erro** é o desvio observado entre o Valor Verdadeiro de uma dada grandeza e o valor resultado de uma medição, sendo que o Valor Verdadeiro é definido como o valor exato da medida, que seria obtido por uma medição perfeita. Os Valores verdadeiros são, por natureza, indeterminados sendo substituídos por valores aceitos como verdadeiros, ou Valor Verdadeiro Convencional. Ainda segundo INMETRO, (1995), **Exatidão de medição** (do inglês "accuracy of measurement"), é um conceito qualitativo que representa o grau de concordância entre o resultado da medição e um valor verdadeiro da grandeza mensurada. **Repetibilidade** (ou repetitividade) representa o grau de concordância entre os resultados de medições sucessivas de um mesmo mensurado, efetuado sob as mesmas condições de medição, que incluem: mesmo procedimento de medição, mesmo observador, mesmo instrumento de medição utilizado nas mesmas condições, mesmo local e ainda repetição em curto período de tempo. Repetibilidade é um conceito que pode ser expresso quantitativamente, em função das

características da dispersão dos resultados. **Resolução** é a menor diferença entre indicações de um dispositivo mostrador que pode ser significativamente percebida. Para dispositivo digital, é a variação na indicação quando o dígito menos significativo varia de uma unidade. Assim, uma máquina-ferramenta será tão precisa quanto melhores forem as suas características referentes à exatidão, resolução e repetibilidade

Para fins de praticidade, os erros de uma máquina-ferramenta podem ser divididos em quatro classes: Erros Geométricos e Cinemáticos, Erros térmicos ou devidos a variações térmicas, Erros de Fixação e Erros devido às variações nas forças de corte. A FIGURA 2.1.1 mostra um apanhado geral desses erros e quais são os principais fatores causadores de cada de cada um deles.

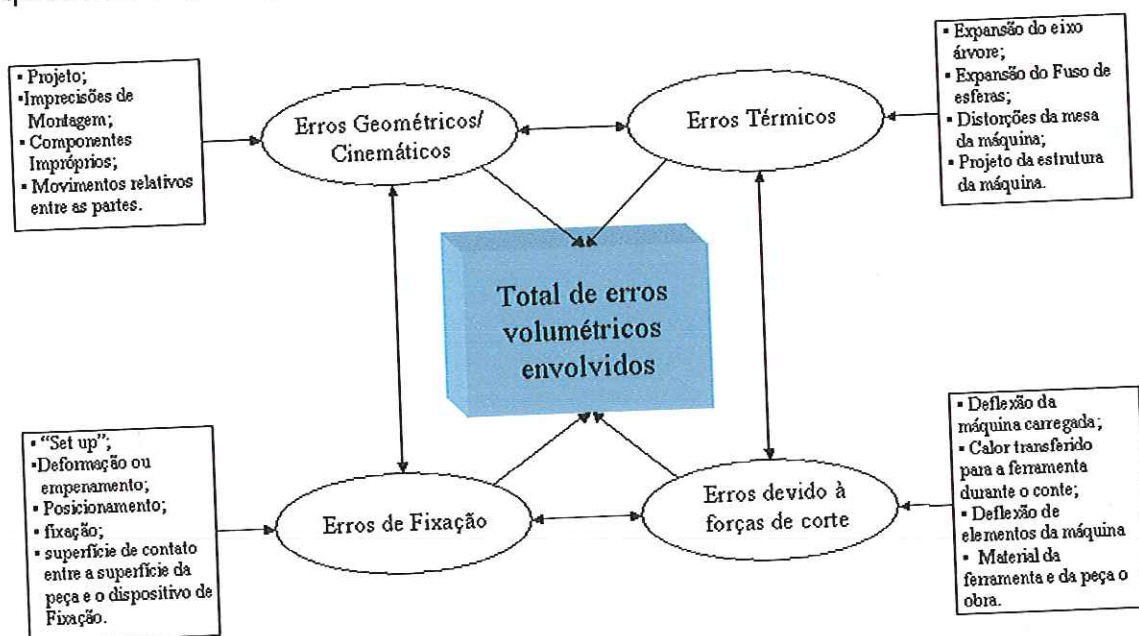


FIGURA 2.1.1 - Resumo dos erros em máquinas-ferramentas e suas principais causas [FONTE: SLOCUM, (1992)]

A seguir serão detalhadas as principais fontes de erros causadoras de imprecisão nas máquinas-ferramentas.

2.1.1.1 Erros Geométricos e Cinemáticos

Erros geométricos são aqueles gerados por erros de projeto, fabricação, montagem e qualidade dos componentes usados na máquina. Devido às suas características, são responsáveis por grande parte do grau de exatidão final de uma máquina-ferramenta. Tais tipos de erros podem ser suaves e contínuos ou

podem apresentar comportamentos aleatórios ou ainda apresentar histereses. São afetados por fatores como retilineidade de guias, circularidade de mancais, pré cargas em rolamentos, etc. Além disso, os erros geométricos e cinemáticos possuem vários componentes como erros de desalinhamento, retilineidade e paralelismo de movimentação entre os eixos, ângulo de inclinação do eixo árvore, erros de perpendicularidade e folgas, NI, (1997).

Os erros cinemáticos levam em conta os erros de movimentos relativos de vários componentes que precisam se movimentar de acordo com requisitos de movimentação precisos. Esses erros são particularmente significativos durante movimentos combinados de vários eixos, onde a coordenação de movimentos de rotação e translação é de máxima importância. Tais erros ocorrem durante a execução de movimentos lineares, circulares e principalmente durante a utilização de algoritmos interpoladores.

2.1.1.2 Erros Térmicos

Outro importante fator na geração de erros na usinagem é relacionado à inexatidão de posicionamento da ferramenta por conta das deformações térmicas. É bem conhecido que erros devido a fatores térmicos respondem por 40 a 70% dos erros dimensionais e de forma de uma peça em Engenharia de Alta Precisão, BRYAN, (1990).

Ainda, segundo o trabalho de BRYAN, (1990), são identificadas seis fontes de influência térmica:

- Aquecimento devido ao processo de remoção de material;
- Aquecimento gerado pela própria máquina (motores elétricos, transmissões, etc);
- Aquecimento ou resfriamento provenientes do sistema de refrigeração;
- Influência do aquecimento ou resfriamento do ambiente;
- Influência das pessoas;
- Memória térmica de qualquer ambiente anterior.

Grande parte do aquecimento é proveniente da própria máquina-ferramenta. Seu uso contínuo causa aquecimento devido ao atrito entre as partes moveis como nos carros, guias, motores, bombas, etc. O Aquecimento causa expansão em diversos elementos da máquina, gerando movimentos relativos entre tais elementos, levando a inexatidão de posicionamento da ponta da ferramenta.

Como a geração de calor nos pontos de contato é imprevisível, essa fonte de erro é uma das mais difíceis de se eliminar. Na manufatura de componentes precisos, erros devido a deformações térmicas de elementos da máquina têm grande influência na limitação da exatidão das peças produzidas.

2.1.1.3 Erros devido a forças de corte

Sob condições onde as forças de corte são consideráveis, essa é uma grande fonte de erros nas máquinas-ferramentas. Como resultado da ação dessas forças, a posição da ponta da ferramenta varia com relação à peça de acordo com a deformação dos vários elementos da máquina e da peça. Dependendo da rigidez da estrutura sob condições particulares de corte, a exatidão de uma máquina-ferramenta pode variar. Assim, para uma máquina com uma determinada rigidez, condições severas de corte geralmente produzem mais erros do que um corte sob condições leves. Por outro lado, forças de corte excessivas também podem deformar a peça sendo usinada, o que resulta em variações dimensionais.

2.1.1.4 Erros de fixação

Erros de fixação são causados durante a preparação da máquina para a produção da peça ou então devido a erros geométricos dos elementos de fixação. Em casos onde a área de contato entre a peça e o elemento de fixação é restrito, podem ocorrer erros devido a deformações geradas na peça. Além disso, o desalinhamento da peça depende de vários fatores como posição dos elementos de fixação, seqüência de fixação, intensidade da fixação, tipo de superfície, etc.

2.1.2 Tecnologias que auxiliam a fabricação de precisão

Apesar de todos os avanços alcançados até hoje, é muito difícil eliminar todas as fontes de erros de uma máquina-ferramenta. Independentemente do esforço que se faça, economicamente existe um limite a partir do qual torna-se inviável a fabricação de máquinas mais exatas. Erros devido à deformação térmica, deformações devido a forças de corte, dentre outros, não podem ser completamente eliminados, por melhor que seja o projeto, RAMESH, MANAN E POO, (2000). Além disso, a compensação desses tipos de erros se mostra pouco eficaz em um ambiente de manufatura seriada. Hoje, mais do que nunca, existe uma grande exigência na identificação e minimização de todas as fontes de erros nas máquinas-ferramentas. Grande esforço foi empregado nessa área no decorrer da última década. Segundo FURUKAWA E MORONUKI, (1987), como resultado, as máquinas atuais são capazes de atingir repetibilidades da ordem de 0.005mm, devido, principalmente, a melhorias de projeto e avanços nas tecnologias e materiais empregados. Por exemplo, o uso de guias lineares nos eixos geométricos das máquinas teve como resultado uma grande diminuição do atrito, eliminando problemas como deformações geradas nas guias convencionais.

A seguir apresentam-se os sistemas, equipamentos e tecnologias que permitem às máquinas-ferramentas modernas atingir tais níveis de exatidão e qualidade das peças produzidas.

2.1.2.1 O Controle Numérico Computadorizado e arquitetura aberta

Conforme BUZATTO, (1999), a automação de máquinas e processos passou por diversas fases desde que os relês e contadores começaram a ser usados. Com o advento dos relês de estado sólido baseados em semicondutores, houve um grande avanço eliminando-se muitos dos problemas relacionados aos relês eletromecânicos, como queima de contatos, ruídos, desgaste mecânico, espaço ocupado, etc. A introdução de microprocessadores no controle industrial deu origem aos conceitos de lógica

programável, onde a arquitetura de controle poderia ter seu fluxograma alterado a qualquer momento através de uma simples substituição do programa. No campo de controles, de um modo geral, o Controlador Lógico Programável, CLP, foi um produto que criou uma cultura própria, substituindo totalmente os painéis de relês. Ao mesmo tempo, na área de controle de máquinas-ferramentas, o controle numérico passou a se chamar CNC, Controle Numérico Computadorizado e utilizava arquiteturas baseadas em padrões de mercado, tais como Multibus, VME e similares. Tratava-se de economizar em desenvolvimento de hardware, investindo-se no desenvolvimento de módulos específicos apenas quando não disponíveis no mercado. Outras empresas desenvolveram os seus próprios barramentos e formatos visando maior desempenho. Os programas de usinagem eram padronizados através da utilização dos códigos "G" e "M", porém todo o restante do controle era baseado em lógicas e configurações proprietárias as quais só o fabricante dos comandos tinha acesso.

Não tardou muito para que os PCs também passassem a ser usados no controle de processos e automação industrial. Inicialmente utilizados para administrar e supervisionar tarefas "off-line" como gerenciamento de programas CNC, passaram a ser utilizados para coleta de dados de chão-de-fábrica, interligação em redes e, mais recentemente, em lugar da própria CPU do CNC. Dentre as vantagens de tal configuração destacam-se a flexibilidade e baixo custo de desenvolvimento. Qualquer fornecedor de hardware padrão IBM PC pode prover o mínimo necessário para se montar um CNC completo. O armazenamento de programas é praticamente ilimitado, não mais restrito à memória local do hardware proprietário. Além disso, a interligação em rede se torna mais simples, utilizando-se de padrões de comunicação como Ethernet e protocolos TCP/IP. Devido a essa integração com ambiente PC, torna-se muito mais fácil a programação e adaptação da interface homem-máquina ou IHM, através da programação via Visual Basic, C++, dentre outros.

Algumas empresas definiram-se pelo uso de uma arquitetura híbrida na qual o cerne do CNC permanece fechado, e algumas áreas foram abertas à participação do fabricante da máquina para alterações, visando melhor adaptação aos seus conceitos e estratégias. Em geral, esta área é a interface

homem-máquina. Como exemplo de empresas que utilizam-se de arquiteturas híbridas pode-se citar a Siemens, Fanuc, Num e Rockwell.

A arquitetura híbrida utiliza-se das vantagens de cada parte. Do ambiente PC, utiliza-se da flexibilidade e facilidade de criação de aplicações onde inúmeras ferramentas encontram-se disponíveis e as tecnologias são dominadas por muitos. Para contornar o problema da confiabilidade de componentes, os fabricantes desenvolvem CPUs compatíveis com o padrão Windows/Intel, porém com hardware próprio e confiáveis. As tarefas do CNC são executadas, nessa configuração, por um hardware dedicado, onde a experiência do fabricante, acumulada ao longo dos anos, pode ser aplicada na totalidade, onde se destacam a velocidade de processamento de bloco, algoritmos de correção em tempo real, interpolações complexas, simultaneidade de movimentos, etc.

Os autores PRITSCHOW, ALTINTAS E JOVANE, (2001), dizem que atualmente o conceito de Arquiteturas de controles abertos é bem conhecido no campo das máquinas-ferramentas. Desde o início dos anos noventa, muito trabalho se realizou ao redor de todo o mundo no sentido de viabilizar vendedores de controles, fabricantes de máquinas-ferramentas e usuários finais a se beneficiar de uma maior flexibilidade e agilidade. O alvo principal de todo esse esforço foi voltado para a facilidade de implementação e integração de controles clientes-específicos por meio de arquitetura aberta e métodos de configuração em um ambiente vendedor-neutro, padronizado.

O autor MINTCHELL, (2000), fala que os PCs, com sua capacidade de comunicação, revolucionaram as fronteiras de utilização dos CNCs, fazendo com que as máquinas-ferramentas deixassem de ser "ilhas" isoladas. Informações podem ser obtidas em tempo real através de toda a fábrica e até mesmo remotamente. Usuários são capazes de obter acesso a informações sobre a produção simplesmente acessando uma página da internet, por exemplo. Tal compatibilidade e disponibilidade de informações através da utilização de protocolos padrão geraram uma integração completa dos processos empresariais, possibilitando a integração das áreas de compras aos processos produtivos, à manutenção, às vendas, etc.

Como outros exemplos das possibilidades que podem ser geradas, MINTCHELL, (2000) fala que a integração dos dados conseguida com o advento da arquitetura aberta promove a união dos sistemas CAD/CAM aos sistemas ERP/planejamento, possibilitando a execução de sistemas globais "B2B" de dentro da máquina-ferramenta. O controle da máquina pode enviar um e-mail para o pessoal de manutenção ou ao engenheiro de produção quando uma falha ocorre. Dados adquiridos através de processos de inspeção com a utilização de apalpadores podem ser coletados e transmitidos para bases de dados SQL ou Oracle, criando um histórico peça-a-peça sobre os processos.

2.1.2.2 Programas (Softwares) CAM

Para auxiliar no projeto de peças complexas, os programas CAD ("Computer aided Design") surgiram como uma ferramenta imprescindível. Segundo SOUZA E COELHO, (2003), os softwares CAD são utilizados para o design do produto, no auxílio de projeto e detalhamento da peça a ser fabricada. Após as etapas de modelamento do produto e a finalização do projeto no CAD, a utilização de um software CAM ("Computer aided Manufacture"), principalmente em se tratando de peças complexas, é fundamental no auxílio para geração dos programas NC que serão executados em uma máquina-ferramenta para a manufatura da peça. Para verificar se a geometria usinada pelo programa CN gerado pelo software CAM esta condizente com o modelo do CAD, dados geométricos da peça (nuvem de pontos cartesianos no espaço) podem ser adquiridos por uma Máquina de Medir por Coordenadas. As informações capturadas neste processo serão comparadas com o modelo CAD através de um sistema CAI ("Computer Aided Inspection"), que irá gerar um relatório quantificando e posicionando os desvios de forma ocorridos no processo de usinagem. Ainda segundo SOUZA E COELHO, (2003), desta forma, as geometrias construídas com softwares CAD representam um elo de ligação entre outros sistemas computacionais de auxílio a engenharia. São as informações geométricas provenientes do CAD que estes sistemas utilizam como base de cálculo.

A utilização de ferramentas computacionais como as descritas foram responsáveis por uma verdadeira revolução na indústria de manufatura, seja pela diminuição do tempo necessário para o desenvolvimento de um produto ou pela possibilidade de fabricação de peças com desings mais belos e atraentes ao público consumidor.

Desta forma, parece natural que a integração dessas ferramentas seja feita de modo a minimizar o tempo decorrido no processo de desenvolvimento/fabricação. Como exemplo, a inserção no software CAD/CAM de ferramentas capazes de gerar automaticamente as sub-rotinas de medição com os apalpadores para máquinas-ferramentas, da mesma maneira que gera o programa CN de usinagem, possibilitaria a criação da nuvem de pontos com a peça ainda fixada à máquina-ferramenta dispensando, em muitos casos, a necessidade da utilização das Máquinas de Medir por Coordenadas e agilizando tanto o processo de desenvolvimento e aprovação como a manufatura seriada como um todo. Outra vantagem seria a eliminação da necessidade de se programar manualmente as rotinas de medição, processo esse que vem se mostrando uma tarefa delicada e bastante sujeita a erros do programador.

2.1.2.3 *Sistemas de Movimentação*

Apesar dos projetos de máquinas ferramentas variar imensamente, a configuração mecânica dos sistemas de controle de movimentação é bem padronizada. Na maioria dos casos, o fuso de esferas recirculantes se estabeleceu como a solução padrão na transformação do movimento rotacional do servo motor em movimento linear, FIGURA 2.1.2.

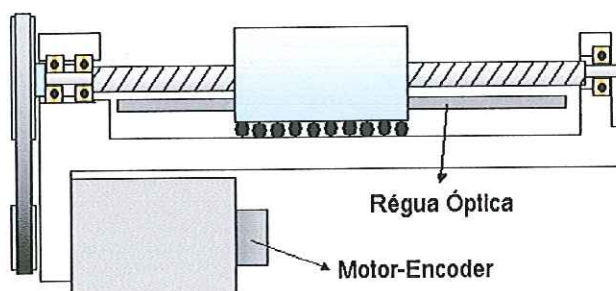


FIGURA 2.1.2 - Configuração padrão de transmissão de movimento para o carro [FONTE: MODERN MACHINE SHOP ONLINE SUPLEMEN]

O fuso de esferas é normalmente fixo na direção axial em apenas uma das extremidades com rolamentos de contato angular pré-carregados, os quais absorvem as forças da guia. A transmissão de movimento do servo motor para o fuso é normalmente feita através do uso de polias, proporcionando um projeto compacto e adequado às altas velocidades de movimentação. Em máquinas “não européias”, é muito comum o uso de acoplamentos diretos do motor ao fuso de esferas.

A malha do sistema de controle de posicionamento, via *encoder* rotacional e fuso de esferas, é composta apenas pelo servo motor. Em outras palavras, não existe um controle de posicionamento efetivo, pois apenas a posição do rotor do servo motor é controlada. Para ser capaz de extrapolar a medida do *encoder* para a posição efetiva do carro, o sistema mecânico existente entre o servo motor e o carro deve ser extremamente repetitivo e seu comportamento deve ser muito bem conhecido.

Em máquinas-ferramentas modernas, convencionou-se utilizar equipamentos chamados “linear encoders” ou réguas ópticas, FIGURA 2.1.3, para realizar um controle de posição efetivo do carro. Esses equipamentos possuem capacidade de detectar movimentos do carro, da ordem de grandeza de 0,0001 mm e são usados para realimentar o servo motor.



FIGURA 2.1.3 - Foto ilustrativa de uma régua óptica [FONTE: DYNAMICS RESEARCH CORPORATION]

Conforme mostra a FIGURA 2.1.4, uma malha de controle de posição que utiliza réguas ópticas inclui todo o sistema mecânico de avanço para a obtenção do controle. Assim, a régua óptica detecta os erros mecânicos

ocorridos durante o movimento e esses são compensados pelo CNC, segundo MODERN MACHINE SHOP ONLINE SUPPLEMENT.

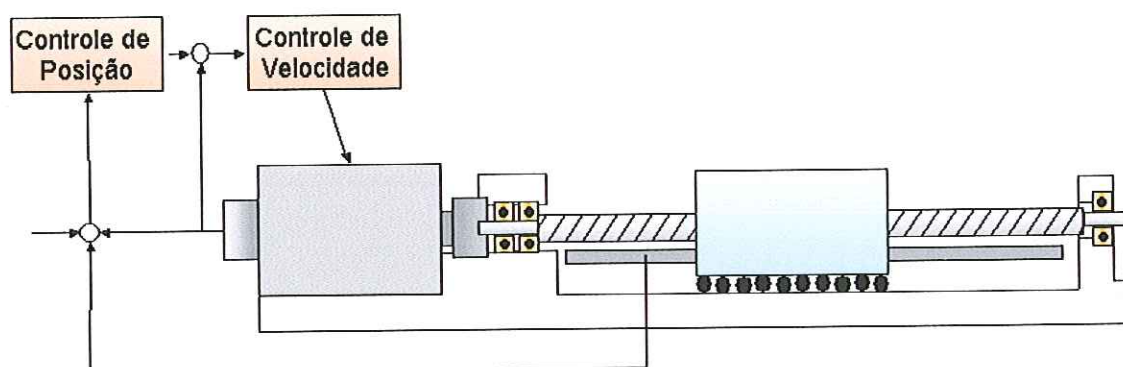


FIGURA 2.1.4 - Diferenças fundamentais entre o controle de posição com régua óptica e o controle motor-encoder. A régua óptica inclui o mecanismo de avanço no controle de posicionamento. [FONTE MODERN MACHINE SHOP ONLINE SUPPLEMENT]

Na prática, diferentes termos são usados para distinguir entre esses dois métodos de controle de posição. As comunidades alemãs e parte da comunidade americana costumam classificá-los como métodos de controle direto e indireto. Já o conceito japonês, designa os termos "controle em malha fechada" e "controle em malha semi-fechada" para distinguir entre os métodos que utilizam e os que não utilizam régua óptica, respectivamente. As réguas ópticas são um excelente exemplo de como a performance de um sistema pode ser melhorada através da utilização de técnicas de controle ao invés de se investir na fabricação de elementos de máquinas mais precisos e conseqüentemente, mais caros. Exemplos desse tipo têm se tornado uma constante nos projetos modernos, pois além de se obter uma melhoria da performance, consegue-se uma grande simplificação dos projetos e conseqüentemente diminuição de custos.

2.1.2.4 Motores Lineares

Os motores lineares possuem uma história longa e diversa. Bem conhecidos pela sua potência e velocidade, são capazes de impulsionar trens de passageiros a velocidades acima de 480Km/h e ainda alcançar posicionamentos com precisões micrométricas. Com essas características, parece natural a sua integração nas máquinas-ferramentas. Apesar disso, fabricantes de máquinas-ferramentas têm se mostrado receosos em adotar

essa tecnologia em larga escala. Atualmente, tal tecnologia é bastante utilizada na usinagem de alumínio, latão e bronze, pois os cavacos da usinagem não são atraídos pelas altas forças magnéticas geradas pelos motores.

As razões que fazem com que a utilização dos motores lineares ainda seja restrita nas máquinas-ferramentas é que esta apresenta características não experimentadas pelos motores elétricos comuns, como alta necessidade de dissipação de calor, armazenamento de energia, forças magnéticas, dentre outros.

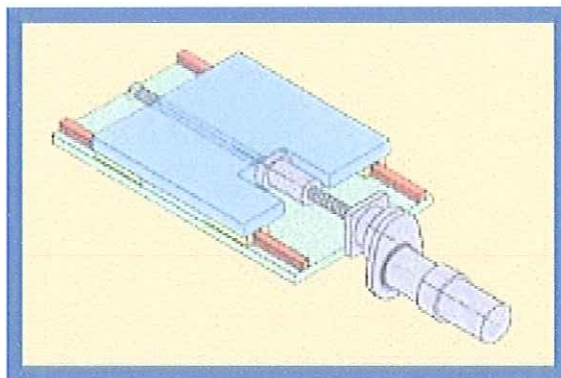


FIGURA 2.1.5 - Acionamento por fuso de esferas recirculantes [FONTE: MODERN MACHINE SHOP ONLINE]

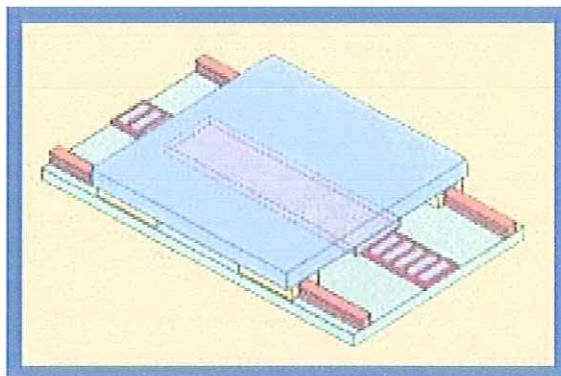


FIGURA 2.1.6 - Acionamento direto por motor linear [FONTE: MODERN MACHINE SHOP ONLINE]

Os motores lineares convertem diretamente a força magnética em movimento linear, sem a necessidade dos mecanismos convencionais de conversão de movimentos rotacionais em lineares. Sem a necessidade desses mecanismos, os motores lineares estão também livres dos erros inerentes a eles, como as folgas e erros na inversão dos movimentos. Assim, são capazes de realizar um posicionamento mais preciso com maiores acelerações e

desacelerações. Por possuírem grande rigidez, proporcionam a combinação de precisão, alta velocidade e altas acelerações, o que os tornam mecanismos ideais para usinagem de alta velocidade e usinagem de alta precisão.

A competição tem forçado os fabricantes de máquinas-ferramentas a continuamente buscar soluções para aumentar as taxas de remoção de material. Os recentes avanços na tecnologia das ferramentas de corte também têm possibilitado a busca por soluções de movimentações mais rápidas e eficientes, aumentando a taxa de remoção de material. Os motores lineares apresentam menor vibração e menor desgaste, transmitem força por um campo magnético ao invés de fazê-lo através de acoplamentos mecânicos. Um carro acionado por um motor linear não necessita de nenhum contato entre as partes móveis, exceto no sistema de guias. O contato reduzido entre as superfícies móveis resulta na redução do desgaste e vibrações reduzidas. Possuem também maior precisão a altas taxas de avanço.

A folga no sistema de transmissão do fuso de esferas recirculantes impõe um limite quanto ao controle de posição do eixo. Este limite é uma medida de confiabilidade do sistema de controle. Máquinas-ferramentas acionadas por motores lineares podem ser controladas usando muitas vezes o ganho de suas partes rotativas. Isto conduz a um posicionamento e interpolação da máquina mais preciso mesmo que a altas taxas de avanço.

Conforme diz MODERN MACHINE SHOP ONLINE, High Speed Machine Home, motores lineares também exigem refrigeração, calor é um subproduto de qualquer motor elétrico, entretanto, um motor linear se caracteriza por uma conexão direta com a estrutura da máquina-ferramenta e, portanto, um caminho direto para a transferência de calor. Para minimizar a temperatura que induz alterações de dimensões, máquinas com motores lineares requerem freqüentemente mecanismos de refrigeração mais caros do que aqueles utilizados em máquinas com motores rotativos. Há também maiores necessidades de potência - Os motores lineares não proporcionam nenhum meio de troca da velocidade por força, como no caso de um motor rotativo que pode ser acoplado a uma caixa de engrenagens quando se necessita de torque mais alto. Um motor linear deve ser especificado nas dimensões proporcionais às maiores forças que a máquina pode fornecer.

2.2 Qualidade Dimensional e Controle de Processos

Os produtos oferecidos ao mercado são resultantes de uma série de processos realizados por diferentes equipes de pessoas dentro de uma mesma empresa. Dentre os processos, pode-se considerar primeiramente aqueles diretamente relacionados com as fases do ciclo de vida de um produto.

Segundo a referência NBR ISO 9004 (1994), essas fases são:

- Pesquisa de mercado: Cujo objetivo é fornecer subsídios ao planejamento do produto para que as expectativas dos clientes sejam incorporadas aos produtos em desenvolvimento;
- Projeto e desenvolvimento do produto: Responsável por traduzir as expectativas verbalizadas pelos clientes em características de projeto, tais como concepção, projeto para manufatura e montagem, especificações, tolerâncias, etc;
- Planejamento e desenvolvimento do processo: Responsável pela seleção dos processos de manufatura mais apropriados, projeto de equipamentos, seleção de métodos de trabalho, projeto da fábrica, etc.;
- Aquisição de materiais: Responsável pelo desenvolvimento de fornecedores que melhor atendam aspectos como qualidade, prazo e quantidades;
- Fabricação: Responsável pelo planejamento e controle da produção;
- Inspeção e testes: Responsável por monitorar a qualidade dos processos de fabricação e inspeção final;
- Acondicionamento e armazenamento;
- Vendas e distribuição;
- Instalação e colocação em operação;
- Assistência técnica e serviços associados

Ao conjunto de atividades que tem por objetivo incorporar qualidade ao produto, os autores JURAN E GRAYNA, (1993), convencionaram chamar de Função Qualidade. Ainda, segundo estes autores, um dos aspectos de

contribuição chave à qualidade do produto é a qualidade decorrente da conformidade com o projeto do produto. Nesta fase de fabricação, busca-se atingir as especificações de projeto do produto, e de produtividade do processo, definidas nas fases de projeto. Este envolve planejamento, "lay-out" de máquinas, projeto de equipamentos e ferramentas, parâmetros de controle de processos, etc.

A qualidade nesta fase, também chamada de Qualidade de Conformação, pode então assumir duas conotações distintas:

- Atendimento às especificações do projeto (Qualidade de produto);
- Atendimento às especificações de máxima produtividade e mínimo custo (Eficiência do processo).

A isenção de deficiências tem um efeito significativo no custo, através da redução de refugos, re-trabalho, reclamações, perda de clientes, e outros resultados de deficiências. Isenção de deficiências se refere à qualidade de conformação. Assim, um aumento da qualidade de conformação geralmente acarreta em redução de custos e conseqüentemente menor número de reclamações e maior satisfação do cliente.

2.2.1 Custos da Qualidade

De um modo geral, tais custos decorrem da falta de qualidade, alguns dos quais serão discutidos a seguir.

2.2.1.1 Custos devido à falhas internas

São custos associados a defeitos (erros, não conformidades, etc.), que são detectados antes do despacho do produto. Estes custos não mais existiriam se os produtos fossem isentos de defeitos.

A TABELA 2-1 mostra alguns exemplos de custos decorrentes de falhas internas:

Falhas Internas
Refugo: Material, horas de trabalho, etc.
Re-trabalho: Horas de re-trabalho.
Re-inspeção, re-teste: Horas de trabalho de re-inspeção em produtos re-trabalhados.
Inspeção total: Horas de trabalho em inspeção total de lotes com nível de qualidade inaceitável.
Redução de preço de venda devido a baixa qualidade.

TABELA 2-1 - Exemplos de custos devido às falhas internas [FONTE: CARPINETTI, (2000)]

2.2.1.2 Custos devido à falhas externas

São custos associados a defeitos encontrados no produto depois de comercializado. Esses custos também desapareceriam caso os produtos fossem isentos de defeitos. Exemplos desses custos são:

Falhas Externas
Custo de assistência técnica no período de garantia.
Custos de rompimento de contrato por não atendimento das especificações de qualidade.
Custos com ações judiciais.

TABELA 2-2 - Exemplos de custos devido às falhas externas [FONTE: CARPINETTI, (2000)]

2.2.1.3 Custos de avaliação da qualidade

São custos decorrentes das atividades de verificação do grau de conformidade com os requisitos de qualidade. Exemplos desses custos são:

Avaliação da Qualidade
Inspeção e testes de recebimento.
Inspeção em processo.
Inspeção final e teste.
Auditoria de qualidade.
Manutenção da rastreabilidade e acuracidade de equipamentos de inspeção e teste.

TABELA 2-3 - Exemplos de custos devido à avaliação da qualidade [FONTE CARPINETTI, (2000)]

2.2.1.4 Custos de prevenção

São os custos decorrentes das atividades necessárias para reduzir ao mínimo os custos devido às falhas e os custos de avaliação. Exemplos desses custos são:

Custos de Prevenção
Planejamento da qualidade: são os custos de todas as atividades que coletivamente criam o planejamento amplo e detalhado das metas da qualidade.
Revisão de novos produtos em desenvolvimento: são os custos decorrentes das atividades de incorporação e garantia da qualidade do produto na fase de desenvolvimento.
Controle de processo: São os custos decorrentes das atividades de controle de qualidade de processo.
Auditorias da qualidade: são os custos de avaliação da execução de atividades de qualidade.
Qualificação e desenvolvimento de fornecedores: são os custos de avaliação da qualidade de fornecedores previamente a sua seleção e durante o contrato
Treinamento: São os custos de treinamento em programas de qualidade.

TABELA 2-4 - Exemplos de custos devido à prevenção da qualidade [FONTE: CARPINETTI, (2000)]

2.2.2 Ferramentas e metodologias da qualidade

Segundo CARPINETTI, (2000), as ferramentas estatísticas que são usadas no planejamento, controle e melhoria da qualidade são genericamente classificadas em: Controle Estatístico de Processo, Delineamento de Experimentos e Inspeção por Amostragem. A utilização de tais técnicas pelas indústrias manufatureiras normalmente segue um padrão no qual, em um baixo nível de maturidade, quando praticamente não existe consciência dos problemas de qualidade, há a utilização de técnicas incipientes de inspeção por amostragem para detectar produtos que apresentem variabilidade além dos limites especificados. Conforme há uma evolução na maturidade na área de qualidade, o uso de técnicas de inspeção por amostragem é intensificado. Isso ocorre até o ponto em que se percebe que, para diminuir ainda mais a variabilidade da qualidade do produto é preciso melhorar a qualidade do processo. A partir desse ponto, passam a ser usadas técnicas de controle estatístico de processos. Técnicas como gráficos de controle podem ser

usadas para monitorar a saída do processo e com isso, detectar a presença de variações esporádicas que estejam alterando sua variabilidade.

Num nível ainda maior de maturidade, as indústrias usam intensivamente técnicas de delineamento de experimentos para reduzir a variabilidade inerente dos processos e produtos e com isso melhorar a qualidade. A seguir será detalhado o Controle Estatístico do Processo (CEP). Tal técnica é amplamente utilizada na indústria manufatureira em todo o mundo, pois além de produzir resultados duradouros e ser uma ferramenta para a melhoria contínua, proporciona um método importante de gerenciamento do controle da qualidade.

2.2.2.1 CEP - Controle estatístico do processo

Trata-se de uma técnica usada para manter o processo dentro dos limites estabelecidos através da análise estatística de dados, no próprio processo. Discute basicamente os tipos de variação que afetam um processo e utiliza ferramentas para a análise, tais como histogramas, cartas de controle e avaliação de sistemas de medição, FIGURA 2.2.1.

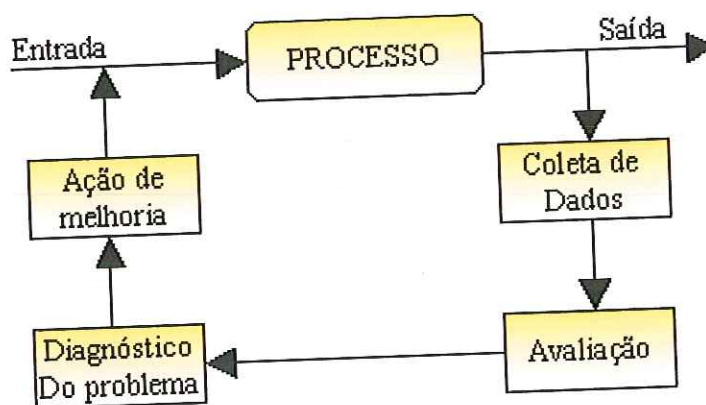


FIGURA 2.2.1 - Ciclo de controle da qualidade de processo [FONTE CARPINETTI, (2000)]

Como sempre há variação em tudo na natureza, o objetivo de se produzir itens idênticos jamais será alcançado, pois como já foi dito anteriormente, por melhor que seja o processo produtivo, sempre existirão variações. Qualquer processo possui certo grau de variabilidade decorrente do fato de que nem todos os parâmetros que compõe um processo são completamente estáveis ao longo do tempo. Assim, existem dois tipos distintos de variações em qualquer processo:

As variações Comuns ou aleatórias: que são aquelas provocadas por causas naturais ao processo e determinam sua distribuição característica ou seguem um padrão típico.

As variações Especiais ou anormais: que são provocadas por causas estranhas, imprevisíveis às variações naturais do processo.

Diz-se que um processo está "Sob Controle" quando o seu comportamento é previsível, ou seja, sua distribuição característica permanece inalterada ao longo do tempo. Quando a distribuição característica do processo se altera ao longo do tempo, fazendo com que saia de controle, diz-se que o mesmo está "Fora de Controle". Tal fato impossibilita o planejamento com base nos resultados e impede a realização de análises mais sofisticadas sobre as causas comuns inerentes ao processo, pois estas estão encobertas pelos efeitos das causas especiais. Porém, tais causas podem ser facilmente identificáveis e isoláveis através de análises das tendências apresentadas pelo processo.

A FIGURA 2.2.2 ilustra os dois tipos de processos.

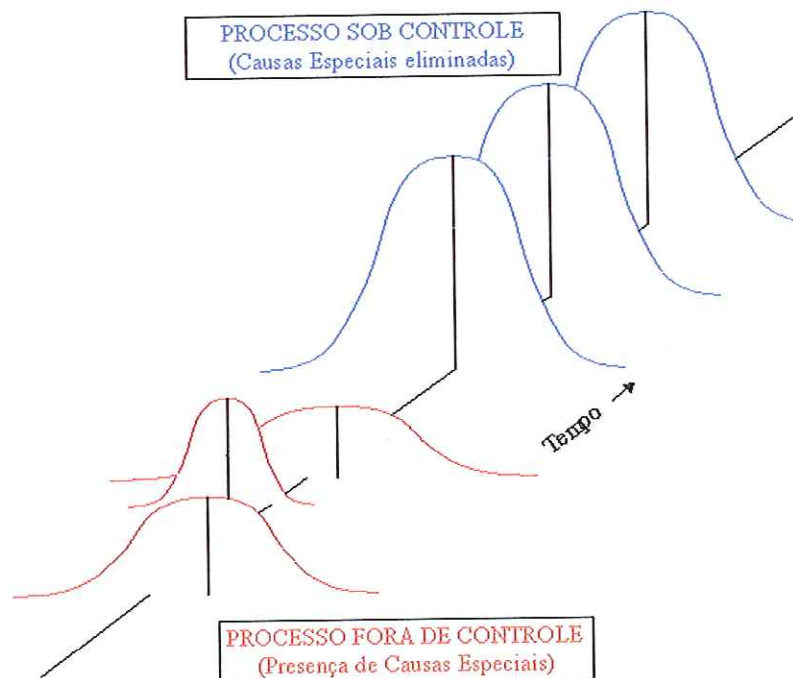


FIGURA 2.2.2 - Comportamento de um processo sob controle e fora de controle estatístico [FONTE: SOUZA, (1999)]

Na TABELA 2-5 encontra-se um resumo das diferenças e características das variações Comuns e Especiais bem como algumas ações a serem tomadas em cada caso.

Tipo de variação	Estado do Processo	Causa da variação	Previsibilidade do processo	Ação a ser tomada	Estratégia de gerenciamento
Comum	Sob controle	Inerentes ao processo	Previsível, geralmente segue uma distribuição Normal	Redução da variabilidade	Manter padrão e investir na redução da variabilidade
Especial	Fora de controle	Específica, identificável	Imprevisível	Eliminar causa específica	Identificar e agir nas causas especiais para estabilizar o processo

TABELA 2-5 - Resumo das características das variações comuns e especiais [FONTE SOUZA, (1999)]

Para que se obtenham resultados efetivos das ações corretivas, é necessário que as medidas adotadas sejam dirigidas à causa e não ao efeito, pois caso contrário, o fator gerador de erros não desaparecerá, voltando a afetar o processo em um curto espaço de tempo. As ações devem ter por objetivo diminuir as variações comuns e centrar o processo para torná-lo capaz de atender às especificações. Dessa forma, a maneira mais eficaz de controlar um processo é agir inicialmente nas "Causas Especiais", que afetam seu padrão natural de desempenho. Em seguida, deve-se avaliar as variações "Naturais" que atuam sobre o processo, realizando ações que buscam minimizá-las para que, em ações de melhoria contínua, o processo seja capaz de atender às mudanças e melhorias nas especificações de projeto.

"Cartas de Controle" estatístico de processo vêm sendo utilizadas com sucesso no monitoramento do desempenho de processos industriais. Seu objetivo é monitorar a variabilidade existente nos processos, distinguindo causas comuns das causas especiais. Essas últimas devem ser identificadas e corrigidas para que o processo permaneça dentro de um padrão esperado de desempenho. As Cartas de Controle utilizam como dados de entrada medições de variáveis que tem influencia na qualidade dos itens manufaturados. Medições são realizadas em pontos espaçados no tempo e registradas nas cartas. Esses registros resultam em gráficos temporais que apresentam os valores de medição da variável no eixo vertical, e os pontos no tempo nos

quais as medições são efetuadas, no eixo horizontal, MICHEL E FOGLIATO, (2002).

O processo de fabricação é avaliado através da sua Aptidão, ou da máquina, em fabricar determinados componentes dentro dos limites especificados. Assim, um processo é dito sob controle se a distribuição for Normal e estável (média e desvio padrão se mantêm constantes ao longo do tempo), como mostra a FIGURA 2.2.3.

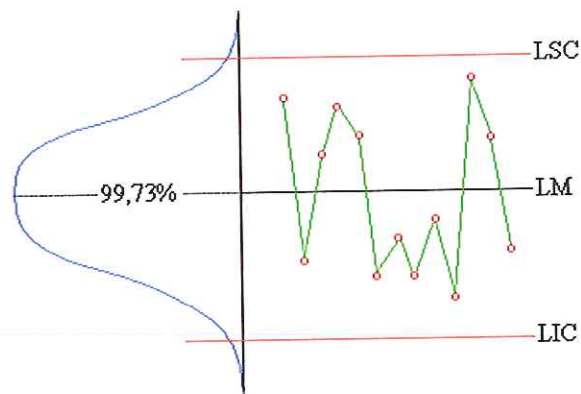


FIGURA 2.2.3 - Princípio do gráfico de controle [FONTE: SOUZA, (1999)]

Conforme dizem MICHEL E FOGLIATO, (2002), as cartas de controle apresentam uma linha central, que representa a média da variável de interesse quando o processo está sob controle (ou livre de causas especiais) e duas outras linhas, que representam os limites de controle do processo. Tais limites são definidos de forma a compreender à maior parte dos valores da estatística amostral plotada, estando o processo sob controle.

A FIGURA 2.2.4 ilustra um exemplo de Carta de Controle Estatístico para médias de um processo tipicamente sob controle.

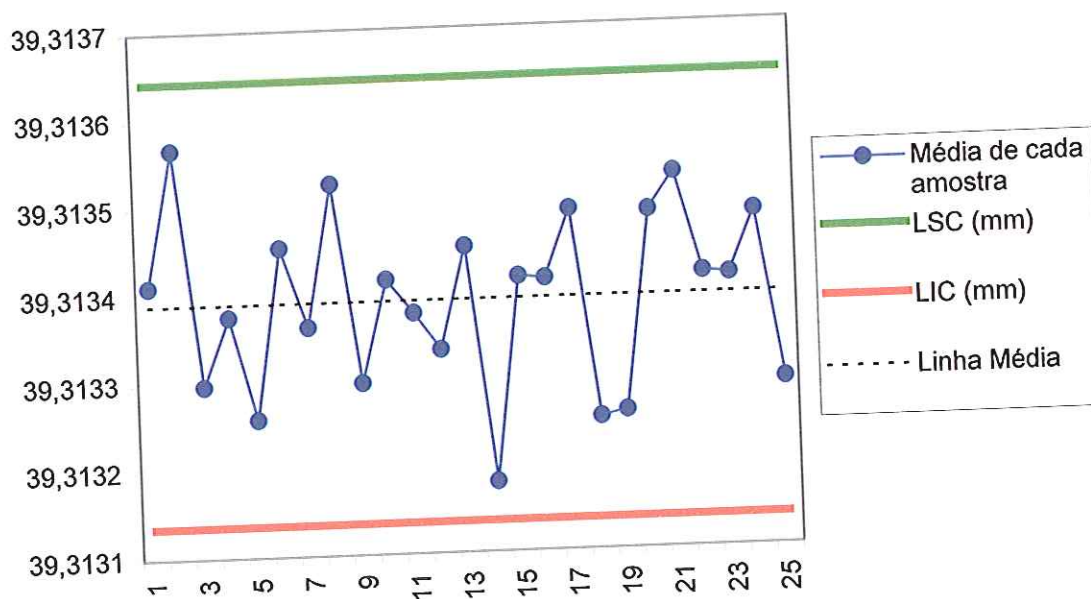


FIGURA 2.2.4 – Exemplo de uma carta de controle [FONTE: MONTGOMERY, (1996)]

Segundo MONTGOMERY, (1996), a média do processo é indicada pela Linha Média (LM). A média mais L vezes o desvio padrão das médias das amostras define o Limite Superior de Controle (LSC) e a média menos L vezes o desvio padrão das médias das amostras define o Limite Inferior de Controle (LIC).

Assim, os valores da LM, LSC e LIC são dados por:

$$LSC = \mu + L\sigma_x;$$

$$LM = \mu;$$

$$LIC = \mu - L\sigma_x;$$

Onde L é a distância em desvios-padrão entre os limites de controle e a linha média e $\sigma_x = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ é o desvio padrão das médias das amostras. O valor de L mais comumente utilizado em cartas de controle é $L=3$, o que pode ser justificado pelos bons resultados obtidos na prática industrial, MONTGOMERY, (1996). Dessa maneira, convencionou-se que o processo ou equipamento que seja capaz de produzir peças de tal forma que 99,73% das médias das amostras coletadas no decorrer do tempo satisfaçam às especificações é dito

Capaz, ou seja, está dentro do intervalo de mais ou menos três vezes o desvio padrão das médias das amostras. A probabilidade de um ponto (média de amostra coletada ao longo do tempo no processo) cair fora dos limites de controle é de 0,27% . Se isso ocorrer, ações preventivas devem ser tomadas no sentido de evitar novas ocorrências e deve ser pesquisada a existência de causas especiais, diminuindo assim a sua incidência. O processo é dito Fora de Controle quando um ou mais pontos da carta caem fora dos limites de controle ou quando apresentam um comportamento não aleatório. O conjunto de regras que determinam o que é um comportamento aleatório é definido nas Regras de Corrida ou "Run Rules" e a política de controle pode ou não considerá-las para o monitoramento do processo. Os limites de controle representam o padrão natural do comportamento do processo e são calculados a partir dos dados do próprio processo. Já os Limites de Especificação representam o padrão desejado para o processo e são normalmente definidos pela engenharia, normas técnicas, leis, dentre outros.

Para a aplicação prática das Cartas de Controle, não se conhece o valor da média, μ , e do desvio padrão, σ , de toda a população envolvida no processo, uma vez que essa população só existirá após a fabricação do lote de peças. Assim, esses valores devem ser inferidos a partir de amostras retiradas aleatoriamente durante o desenvolvimento do processo. Tal estimativa deve ser baseada em pelo menos 20 a 25 amostras.

A estimativa da média μ é dada por:

$$\bar{\bar{X}} = \frac{\bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \dots + \bar{X}_n}{n};$$

Onde \bar{X}_n é a média da n ésima amostra coletada e n é o número de amostras. Assim, $\bar{\bar{X}}$, também chamado de média das médias, é utilizado como estimativa para a linha média da Carta de Controle. Esse valor se aproxima da média μ à medida que se aumenta o número de amostras.

A estimativa do desvio padrão, σ , é baseada no método da amplitude das amostras e sua expressão é dada através da relação:

$$\hat{\sigma} = \frac{R}{d_2}$$

Onde $R = x_{\max} - x_{\min}$ e d_2 é um valor tabelado para diferentes tamanhos amostrais. Quando se tem várias amostras com suas respectivas amplitudes R_1, R_2, \dots, R_m , o desvio padrão da população é estimado por:

$$\hat{\sigma} = \frac{\bar{R}}{d_2}$$

Porém, para amostras que contenham mais de 10 elementos, esse método perde eficiência rapidamente. Por essa razão, é altamente recomendável trabalhar com amostras de tamanho em torno de 5 para a construção dos gráficos.

Ainda, para a construção de gráficos utilizando $L=3$ no cálculo dos limites de controle, tem-se que:

$$A_2 = \frac{3}{d_2 \sqrt{n}}$$

Como A_2 é uma constante tabelada que depende somente do tamanho da amostra, as expressões para o cálculo dos LSC e LIC ficam:

$$LSC = \bar{\bar{X}} + A_2 \times \bar{R};$$

$$LM = \bar{\bar{X}}$$

$$LIC = \bar{\bar{X}} - A_2 \times \bar{R};$$

A TABELA 2-6 mostra os valores de A_2 para os diferentes tamanhos de amostra:

Tamanho das Amostras	Valor da Constante A_2
1	---
2	1.880
3	1.023
4	0.729
5	0.577
6	0.483
7	0.419
8	0.373
9	0.337
10	0.308

TABELA 2-6 – Valores de a_2 para diferentes tamanhos de amostras [FONTE: MONTGOMERY (1991)]

Resumidamente, pode-se dizer que enquanto os Limites Superior e Inferior de Especificação (LSE e LIE) representam as exigências de projeto necessárias para que o produto seja capaz de atender à sua finalidade, os Limites Superior e Inferior de Controle (LSC e LIC) resultam do processo de fabricação empregado e refletem aquilo que o processo é capaz de realizar.

2.2.2.2 Aptidão do Processo

A aptidão do processo anteriormente citada pode ser mais bem explicada através dos Índices de Capacidade (Cp) e Capabilidade (Cpk).

Segundo CARPINETTI, (2000), o estudo da capabilidade do processo envolve a dispersão do resultado em torno de um valor central e a sua comparação com a máxima variação aceitável para um determinado parâmetro de qualidade resultante desse processo. Índices de capabilidade de processo são essenciais para o planejamento e controle da qualidade de fabricação em desenvolvimento e homologação de processos, fornecendo informações como, adequação de processos, necessidade de promover ajustes ou estudos para a redução da variabilidade do processo e determinação de desempenho necessário para novos processos.

É importante salientar que a avaliação da aptidão do processo só pode ser realizada após o estado de controle ser atingido, ou seja, após a eliminação de todas as Causas de Variações Especiais que estejam atuando sobre o processo. Ainda que um processo que esteja sob controle estatístico não seja necessariamente um processo cuja capabilidade seja aceitável, a primeira

condição é um pré-requisito indispensável para a avaliação da capacidade do processo.

Como dito anteriormente, é amplamente aceito que a dispersão real do processo seja definida como a faixa correspondente à média mais ou menos 3 vezes o desvio padrão para uma confiabilidade de 99,73% ou 6 sigma no total.

O autor SPIRING, (1997), aponta o índice Cp como a medida mais comum de capacidade. A dispersão relaciona os limites de especificação com a variação natural do processo e é também chamado de PCR "Process Capability Ratio". Assim, a capacidade do processo Cp é a aptidão do processo em produzir peças com 0,27% delas fora da tolerância. O índice é definido como:

$$C_p = \frac{\text{dispersão permitida para o Processo}}{\text{dispersão real do Processo}} = \frac{LSE - LIE}{6\sigma}$$

KANE (1986), relata que um Cp=1 indica que o processo é tido como capaz, porém convencionou-se que um processo é dito Capaz quando $LSE - LIE \geq 8\sigma$ (99,99%), o que resulta em um $C_p \geq 1,33$, conforme afirmam os autores JURAN, GRZYNA, E BINGHAN, (1979).

Somente a determinação do índice Cp não é suficiente para a definição total do processo, visto que não informa a respeito do posicionamento dos dados em torno da média. Assim, define-se o índice de Capacidade do Processo (Cpk), dado por:

$$C_{pk} = \min\left(\frac{LSE - \bar{X}}{3S_x}; \frac{\bar{X} - LIE}{3S_x}\right)$$

Onde S_x é o desvio-padrão da amostra. O índice Cpk, portanto, determina a distância entre a média do processo e o limite de especificação mais próximo.

CARPINETTI (2000) acrescenta que a diferença fundamental entre os índices Cp e Cpk é que o segundo é sensível a desvios da média em relação ao valor nominal, enquanto que Cp considera apenas a variabilidade do

processo. Assim, um valor médio, centrado no valor nominal para aquele parâmetro apresentará índices Cp e Cpk iguais. Assim, a diferença entre os valores dos dois índices significa que o processo está descentrado.

Idealmente, a zona de tolerância deve corresponder a $\pm 4\sigma$ e centrada, o que garante um índice Cpk=1,33. A norma QS 9000 recomenda esse valor de Cpk para processos estáveis.

A TABELA 2-7 apresenta os níveis de rejeição para três situações típicas:

Índice de Capabilidade	Rejeição (ppm)	Classificação
$Cpk < 1$	$p > 2700$	Incapaz (Vermelho)
$1,0 \leq Cpk \leq 1,33$	$64 < p \leq 2700$	Parcialmente capaz (Amarelo)
$Cpk \geq 1,33$	$P \leq 64$	Capaz (Verde)

TABELA 2-7 – Classificação dos níveis de rejeição [FONTE: NBR ISO 9004 (1994)]

2.2.3 Análise de sistemas de medição

A avaliação e o monitoramento do comportamento de um processo começam pela coleta ou medição de dados do processo, utilizando-se de algum sistema de medição. Um sistema de medição ideal seria aquele que produzisse somente resultados corretos, entretanto, novamente nota-se que, como em qualquer processo, as medições também irão produzir resultados com erros ou uma certa margem de incerteza. Ao se realizar sucessivas medições de um mesmo resultado, tem-se uma dispersão de valores em torno de um ponto central. Essa dispersão, advinda do processo de medição, pode ser modelada por uma distribuição normal, da mesma forma que a dispersão dos resultados de um processo de fabricação. Desse modo, um instrumento de medição de grande precisão é aquele que apresenta pouca variabilidade dos seus resultados quando sujeito apenas a causas crônicas. Portanto, a variabilidade total presente em um conjunto de dados, coletados de um processo produtivo e medidos por meio de um instrumento, pode ser dividida em duas partes:

Variabilidade inerente ao processo produtivo;

Variabilidade inerente ao instrumento de medição.

Por esse motivo, para que os dados coletados sejam confiáveis, o conhecimento do grau de variação introduzido pelo sistema de medição deve ser devidamente quantificado. O valor médio do resultado da medição é obtido a partir de medições sucessivas da grandeza (quando a medição for manual, as medições devem ser feitas preferencialmente por mais de um operador). O vício de um instrumento pode ser conhecido e compensado através de procedimentos de aferição e calibração, que consistem em comparar o valor médio indicado pelo instrumento de medição e o valor verdadeiro da grandeza (padrão de referência). A capacidade de medição pode também ser classificada através da exatidão do instrumento. A exatidão quantifica a proximidade entre o valor fornecido pelo instrumento e o padrão de referência. A FIGURA 2.2.5 ilustra o relacionamento existente entre vício, repetibilidade e exatidão. O centro do alvo representa o valor verdadeiro da grandeza a ser medida e os pontos representam os resultados de sucessivas medições do instrumento de medição. Assim, um instrumento exato é aquele com alta repetibilidade e baixo vício, (d). As outras três situações apresentam um instrumento de baixa exatidão, ou seja, alto vício e baixa repetibilidade (a), baixa repetibilidade e baixo vício (b) e alta repetibilidade e alto vício (c).

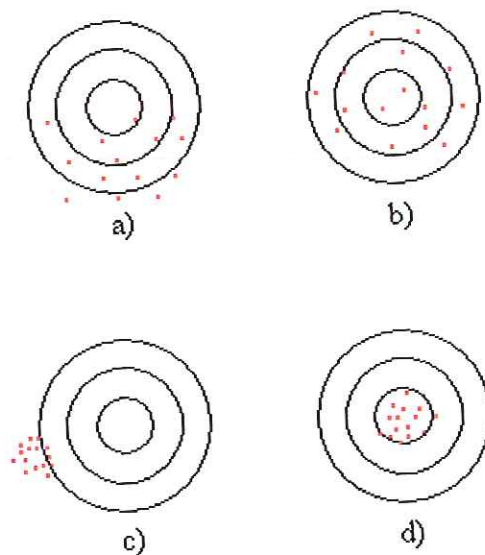


FIGURA 2.2.5 - Relação entre vício, repetibilidade e exatidão [FONTE: CARPINETTI, (2000)]

Outro aspecto importante é a **Resolução** do instrumento, que conforme INMETRO, (1995), é a menor diferença entre indicações de um dispositivo mostrador que pode ser significativamente percebida. Para dispositivo digital, é

a variação na indicação quando o dígito menos significativo varia de uma unidade. Para a completa caracterização da capacidade de medição de um instrumento, deve-se considerar ainda características como reprodutibilidade, linearidade e estabilidade. O significado de tais características é apresentado abaixo:

Reprodutibilidade: Segundo INMETRO, (1995), é dada pelo grau de concordância entre os resultados das medições de um mesmo mensurado, efetuadas sob condições variadas de medição. As condições alteradas podem incluir: princípio de medição, método de medição, observador, instrumento de medição, padrão de referência, local, condições de utilização, tempo, etc.

Estabilidade: Segundo INMETRO, (1995), é a aptidão de um instrumento de medição em conservar constantes suas características metrológicas ao longo do tempo.

Linearidade: Segundo CARPINETTI, (2000), corresponde à variação do vício do resultado de medição quando considerada uma faixa da escala do instrumento.

2.2.3.1 Repetibilidade e reprodutibilidade de sistemas de medição

A variabilidade total presente em um conjunto de peças inspecionadas com a utilização de um instrumento de medição é resultante da combinação da variabilidade relativa ao processo produtivo e da variabilidade referente ao próprio instrumento de medição, ou seja:

$$\sigma^2_{total} = \sigma^2_{processo} + \sigma^2_{medição}$$

Onde:

σ^2_{total} é a variância total do conjunto de dados;

$\sigma^2_{processo}$ é a variância relativa ao processo produtivo

$\sigma^2_{\text{medição}}$ é a variância relativa ao instrumento de medição

Tem-se ainda que a variabilidade relativa ao instrumento de medição é resultante da repetibilidade e da reprodutibilidade desse instrumento. Dessa maneira, tem-se:

$$\sigma^2_{\text{medição}} = \sigma^2_{\text{repe}} + \sigma^2_{\text{repro}}$$

Onde:

σ^2_{repe} é a variância devido ao equipamento;

σ^2_{repro} é a variância devido ao operador;

Dessa forma, deve-se estimar a contribuição do instrumento na variabilidade total do conjunto de dados medidos, além da sua repetibilidade e reprodutibilidade. Segundo QS 9000, (1995), o método da "Média e Amplitude" é o mais indicado para o estudo da repetibilidade e reprodutibilidade. O estudo é feito a partir da coleta de uma amostra de dados do processo (entre 5 a 10 elementos). Em seguida essas peças são medidas repetidas vezes com um mesmo instrumento e por mais de um operador.

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. A seqüência de medição das peças deve ser aleatória, ou seja, o operador A mede as 10 peças em ordem aleatória. Em seguida, os operadores B e C devem mediar as mesmas 10 peças em uma ordem também aleatória. Isso minimiza o efeito de alguma fonte de variabilidade não identificada interferir nos resultados.

Os limites para o gráfico de \bar{X} são calculados através das relações:

$$LS = \bar{\bar{X}} + A_2 \times \bar{\bar{R}}$$

$$LM = \bar{\bar{X}}$$

$$LI = \bar{\bar{X}} - A_2 \times \bar{\bar{R}}$$

Onde $\bar{\bar{X}}$ representa a media das médias dos valores obtidos por cada operador, A_2 é um valor tabelado e $\bar{\bar{R}}$ representa a média das médias das amplitudes dos resultados obtidos por cada operador para cada peça. O gráfico de $\bar{\bar{X}}$ retrata a habilidade do instrumento em fazer a distinção entre diferentes dimensões das peças resultantes do processo. Como nesse tipo de estudo os limites para o gráfico de R são calculados com base na variação existentes entre as medidas realizadas para o mesmo item, não levando em conta a variação existente entre diferentes itens, espera-se que esse gráfico apresente uma situação de descontrole estatístico. Isso se deve ao fato de que quanto mais pontos estiverem fora dos limites de controle, melhor será a habilidade do processo de medição para distinguir as diferenças resultantes do processo produtivo.

Já os limites para o gráfico de R são calculados através das relações:

$$LS = D_4 \times \bar{\bar{R}}$$

$$LM = \bar{\bar{R}}$$

$$LI = D_3 \times \bar{\bar{R}}$$

Onde D_3 e D_4 são valores tabelados. O gráfico de R representa a variabilidade devida ao instrumento de medição e avalia a consistência do processo de medição em si. Esse gráfico representa as diferenças entre medidas feitas no mesmo item, utilizando-se o mesmo instrumento, pelos diversos operadores.

A presença de pontos que caiam fora dos limites do gráfico de controle indica a presença de fontes de variação não aleatórias atuando sobre o processo de medição.

- Cálculo de Repetibilidade de instrumentos de medição

Segundo CARPINETTI, (2000), a variância devido ao equipamento de medição pode ser estimada pela expressão:

$$\hat{\sigma}_{repe} = \frac{\bar{R}}{d_2}$$

O valor d_2 é tabelado e depende do tamanho da amostra. Esses valores podem ser encontrados em MONTGOMERY, (1991).

Dessa maneira, a repetibilidade de um instrumento é dada por:

$$6 \times \hat{\sigma}_{repe}$$

O que corresponde a 99,73% dos resultados.

- Cálculo da Reprodutibilidade de instrumentos de medição

A reprodutibilidade do instrumento quantifica a variabilidade dos dados obtidos quando diferentes operadores utilizam o mesmo instrumento. Caso os resultados médios obtidos pelos operadores sejam diferentes entre si, isso significa que o instrumento é sensível às diferenças de leitura ou de operação. Segundo CARPINETTI, (2000), para estimar a reprodutibilidade, temos:

$$R_x = \bar{x}_{\max} - \bar{x}_{\min}$$

Onde \bar{x}_{\max} e \bar{x}_{\min} representam, respectivamente, os valores máximos e mínimos médios, obtidos pelos operadores. Dessa maneira, a variância devido ao operador pode ser estimada pela equação:

$$\hat{\sigma}_{repro} = \sqrt{\left(\frac{R_x}{d_2}\right)^2 - \frac{(\hat{\sigma}_{repe})^2}{nr}}$$

Onde n representa o número de vezes que cada item é medido e r o número de itens medidos. Portanto, a reprodutibilidade do instrumento é dada por:

$$6 \times \hat{\sigma}_{repro}$$

A estimativa da capacidade do sistema de medição é dada pela repetibilidade e reprodutibilidade do instrumento (R&R), dada pela equação:

$$R \& R = 6 \times \hat{\sigma}_{med} = 6 \times \sqrt{\hat{\sigma}_{repe}^2 + \hat{\sigma}_{repro}^2}$$

É desejável indicar a repetibilidade e reprodutibilidade do instrumento (R&R) em função de um percentual em relação à variabilidade total de um conjunto de dados (σ_{total}):

$$\%R \& R = \frac{R \& R}{6\hat{\sigma}_{total}} 100$$

Assim, segundo a norma QS 9000. (1995), a adequação do sistema de medição quanto à R&R pode ser classificada de acordo com a TABELA 2-8:

%R&R	Classificação
$\%R\&R \leq 10\%$	Adequado
$10 < \%R\&R \leq 30\%$	Considerar possíveis modificações visando melhorias
$\%R\&R > 30$	Inadequado. Sistema de medição necessita de melhorias.

TABELA 2-8 – Classificação de sistemas de medição quanto a R&R [FONTE: QS 9000, (1995)]

2.3 Utilização de Apalpadores no Auxílio do Controle de Processos e da Qualidade Dimensional

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, juntamente com o comando 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 de manufatura atuais, pois possibilitam até o controle peça-a-peça, quando requerido, garantindo que erros dimensionais sejam imediatamente detectados, diminuindo o refugo.

2.3.1 Os Apalpadores

O primeiro apalpador foi desenvolvido para solucionar um requisito particular de inspeção, mas acabou por revolucionar o uso das máquinas de medir a coordenadas (MMCs) para inspeção pós-processo de componentes manufaturados. No final dos anos 70, praticamente todas as MMCs eram vendidas com os apalpadores já acoplados, (RENISHAW PLC, METROLOGY DIVISION). Posteriormente, com o avanço dos CNCs incluindo funções e rotinas específicas, e o uso de réguas ópticas 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 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 no 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 PLC, METROLOGY DIVISION). Após negociação da patente com a Rolls-Royce, surgiu a Renishaw, atual líder Mundial na fabricação e comercialização de tais equipamentos, tendo David como fundador e atual CEO. Desde então, a linha de produtos se expandiu para atender a demanda por alta flexibilidade e automação dos processos de medição. Paralelamente, vários fabricantes surgiram, porém, com o princípio de funcionamento patentado, diferentes tecnologias precisaram ser desenvolvidas.

2.3.2 Características Gerais dos Apalpadores

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 "trigger signal" ou sinal de "trigger", é então enviado a uma interface que o converte em uma forma inteligível pelo CNC. Após a conversão, o sinal é transmitido ao CNC que capta instantaneamente os valores dimensionais dos eixos X, Y e Z da máquina-ferramenta e armazena-os para posterior leitura, cálculos ou geração de relatórios, FIGURA 2.3.1.

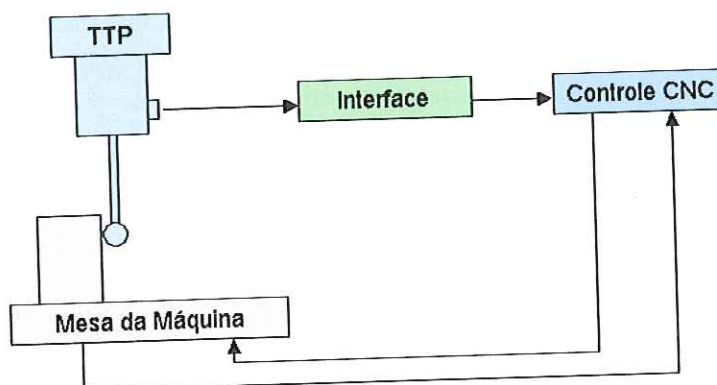


FIGURA 2.3.1- Esquema de funcionamento de um sistema de medição acoplado a um Centro de Usinagem

A transmissão do sinal de “trigger” do apalpador para a interface pode ser realizada basicamente através de três tecnologias distintas: infravermelho, cabo blindado ou via frequências normalizadas de ondas de rádio. Geralmente se utiliza a transmissão via cabos blindados em apalpadores que ficam presos à mesa da máquina (em centros de usinagem e fresadoras), também chamados “toolsetter probes”, pois estes realizam pequena ou nenhuma movimentação, sendo que a ferramenta se movimenta para tocá-lo. Desse modo o cabo pode ser adequadamente fixado à 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, 1999). Para aplicações convencionais, costuma-se utilizar a comunicação via infravermelho pela sua alta confiabilidade, velocidade de transmissão e baixa suscetividade a ruídos externos, FIGURA 2.3.2.

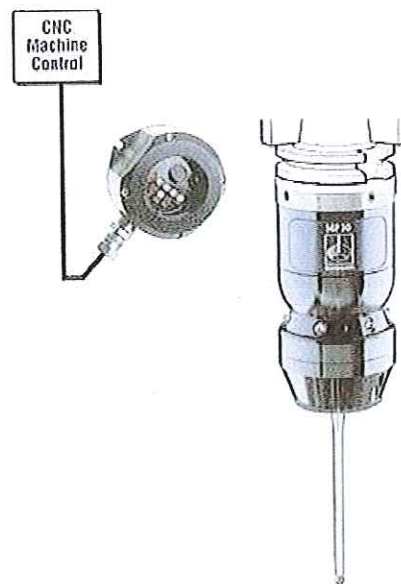


FIGURA 2.3.2 - Exemplo de um sistema de transmissão óptico via infravermelho (TP10 - Renishaw)

2.3.3 Programação e Rotinas de Medição

Poucos discutem os méritos dos apalpadores em relação à diminuição do tempo de preparação da máquina, inserção de dimensões das ferramentas e

realização de medições na própria máquina. Porém, na prática, tais sistemas frequentemente são vistos como caros e difíceis de operar. Conseqüentemente, tem se tornado uma ferramenta usada exclusivamente por programadores experientes em ambientes de alta produtividade (MODERN MACHINE SHOP ON LINE, 2001). Com o intuito de tornar a utilização dos apalpadores mais efetiva e acessível a uma grande gama de usuários, os 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 da qualidade dimensional de furos, identificação de desvios de tolerância e medição da geometria da peça pré-acabada, determinado a profundidade de corte e o sobre-metal restante para a operação de acabamento (ZHOU, HARRISON E LINK, 1996).

Atualmente, algumas máquinas-ferramentas modernas têm precisão de posicionamento comparável as MMCs de mesmo porte. Acoplando-se a essas máquinas um sistema constituído por apalpadores e um software com as rotinas de medição adequadas, esta pode ser capaz de desempenhar perfeitamente as funções de uma MMC, realizando a inspeção final da peça fabricada, reduzindo, ou até mesmo eliminando a necessidade de inspeções fora da máquina (MODERN MACHINE SHOP ONLINE, 2001). Diferentemente do que normalmente se acredita, tomando-se certos cuidados, atualmente 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 (MODERN MACHINE SHOP ONLINE, 2001).

2.3.4 Tecnologias Utilizadas na Geração do sinal de "trigger"

Rigorosamente, o sinal de "trigger" não é gerado quando a haste do apalpador entra em contato com a peça. Como pode ser observado na FIGURA 2.3.3, o apalpador irá continuar seu movimento, haverá uma deflexão

da haste até 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"), (SHEN E MOON, 1996). Essa distância deve ser minimizada ou, se possível, deve ser mantida constante, para efeitos de exatidão e repetibilidade da medição, respectivamente.

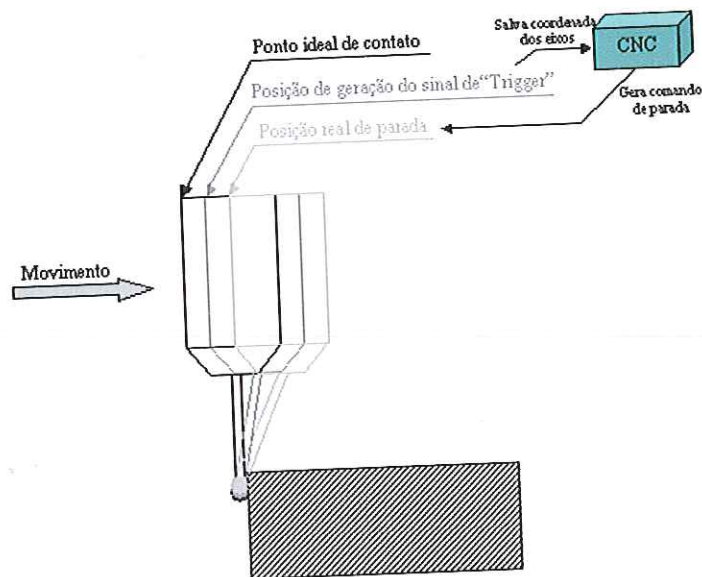


FIGURA 2.3.3 - Discrepância entre a posição de contato real e a percebida pelo CNC

Existem basicamente quatro princípios físicos distintos que são utilizados pelos diversos fabricantes de apalpadores 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.

2.3.4.1 O "Kinematic Contact"

2.3.4.1.1 Princípio de funcionamento

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 2.3.4, trata-se de um mecanismo cinemático formado por três pequenos cilindros que permanecem assentados sobre seis rolos, ou esferas, devido a pressão

exercida pela mola sobre os cilindros. Uma corrente elétrica normalmente passa pelas seis esferas e os três cilindros em série. Quando ao contato com a peça a ser medida, a força sobre a haste ultrapassa a resistência da mola em manter o mecanismo na posição estável, os cilindros irão mover-se 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, (RENÉ et al., 1996). Segundo REID (1995), o sinal de "trigger" desse tipo de apalpador não só ocorre quando um dos contatos elétricos é interrompido, mas já tem início pela alteração da resistência elétrica do contato.

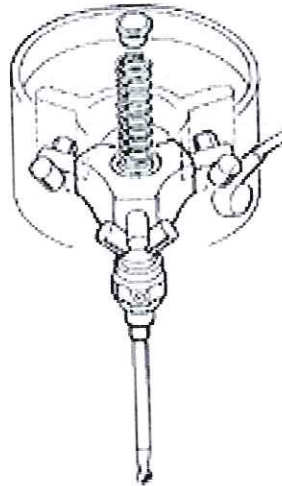


FIGURA 2.3.4 - Princípio de funcionamento de um "Kinematic touch trigger probe" [FONTE: TOOLING & PRODUCTION (1999)]

Dentre as vantagens apresentadas pelo uso do "Kinematic Contact", destaca-se: Princípio simples de funcionamento; robustez do conjunto eletromecânico; amplamente utilizado e pesquisado. 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, 1993). 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, conforme afirmam KIM E CHUNG, (2001). Isso está ilustrado na FIGURA 2.3.5.

Diâmetro do Anel Padrão: 30mm
Diâmetro da esfera de medição: 6mm
Velocidade de medição: 30mm/min
Tamanho da amostra: 360 pontos
Número de ciclos: 9
Máximo erro de medição: 52 μ m
Erro de circularidade máximo: 16 μ m
• : Erro medido no Raio

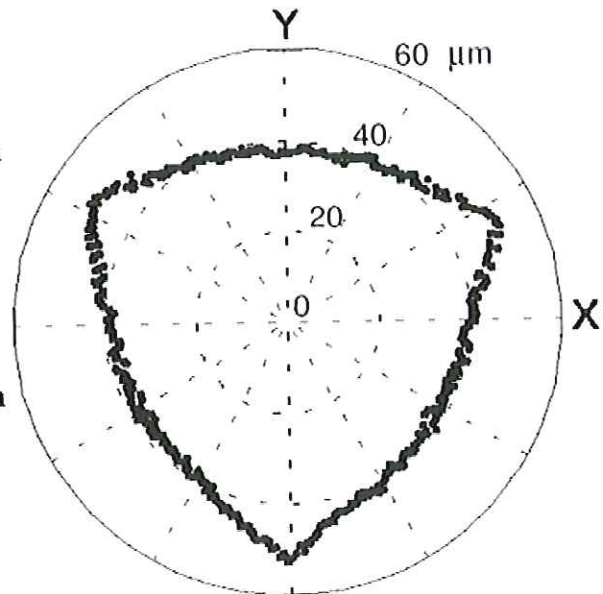


FIGURA 2.3.5 - Teste padrão da folga de percurso ou "pretravel" em XY de um Kinematic TTP [FONTE: KIM E CHUNG, (2001)]

Além disso, a força dinâmica necessária para abrir um dos contatos elétricos do apalpador é dependente da velocidade de aproximação, (MIGUEL, KING E ABACKERLI, 1998). 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, (SHEN E MOON, 1996). A magnitude dos Erros varia 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. 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.

2.3.4.2 "Strain Gauges"

2.3.4.2.1 Princípio de Funcionamento

O princípio de funcionamento baseia-se na variação da resistência ôhmica de um sensor denominado extensômetro ou "strain gage", quando submetido a uma deformação. Utiliza-se comumente em células de carga quatro extensômetros ligados entre si segundo uma ponte de Wheatstone e o desbalanceamento da mesma, em virtude da deformação dos extensômetros, é proporcional à força que a provoca. É através da medição deste desbalanceamento que se obtém o valor da força aplicada FIGURA 2.3.6.

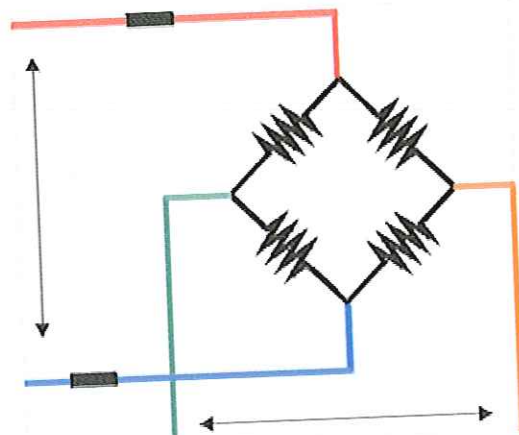


FIGURA 2.3.6 - Ponte de Wheatstone usando 4 extensômetros [FONTE: CÉLULAS DE CARGA - CONCEITOS BÁSICOS]

Os extensômetros são colados a uma peça metálica (alumínio, aço ou liga cobre-berílio), denominada corpo da célula de carga e inteiramente solidários à sua deformação. A força atua, portanto sobre o corpo da célula de carga e a sua deformação é transmitida aos extensômetros, que por sua vez medirão sua intensidade.

Diferentemente dos "Kinematic Probes" que lidam com uma informação: "contato aberto" ou "contato fechado" através da abertura ou fechamento de uma "chave" mecânica, os apalpadores por extensômetros tratam de informações analógicas advindas da variação de suas resistências quando a haste do apalpador toca a peça. O resultado advindo de três células de carga

contendo micro-extensômetros de silício são combinados de maneira a gerar uma resultante.

Para que essa resultante seja capaz de gerar o sinal de "trigger", é necessário que haja um tratamento eletrônico desse sinal procurando por um valor que exceda o limite determinado ("Threshold"), estabelecendo-se um limite a partir do qual é disparado o sinal, FIGURA 2.1.1.

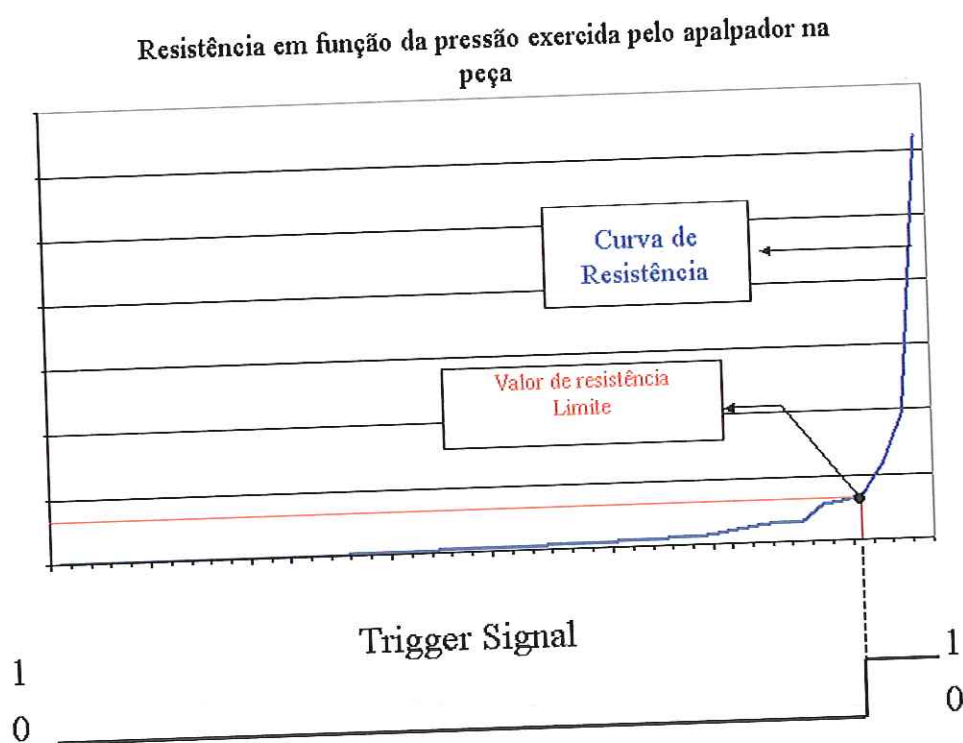


FIGURA 2.3.7 - Tratamento do sinal do Extensometro para geração do sinal de "trigger".

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", evento este que ocorre anteriormente a geração da força necessária para a abertura dos contatos elétricos, no caso dos Kinematic probes. Por este motivo podem ser extremamente sensíveis ao toque.

Conforme ilustrado na FIGURA 2.3.8, onde TP20 (vermelho) indica um apalpador do tipo "Kinematic Probe" e TP800 (azul) indica um apalpador que utiliza "Strain Gauges", verifica-se que esse último possibilita a utilização de hastes mais longas, da ordem de 200mm de comprimento, mantendo a

repetibilidade inferior a um micrón, enquanto que o TP20 já apresenta incertezas de medição maiores, mesmo utilizando-se hastes de 50mm de comprimento.

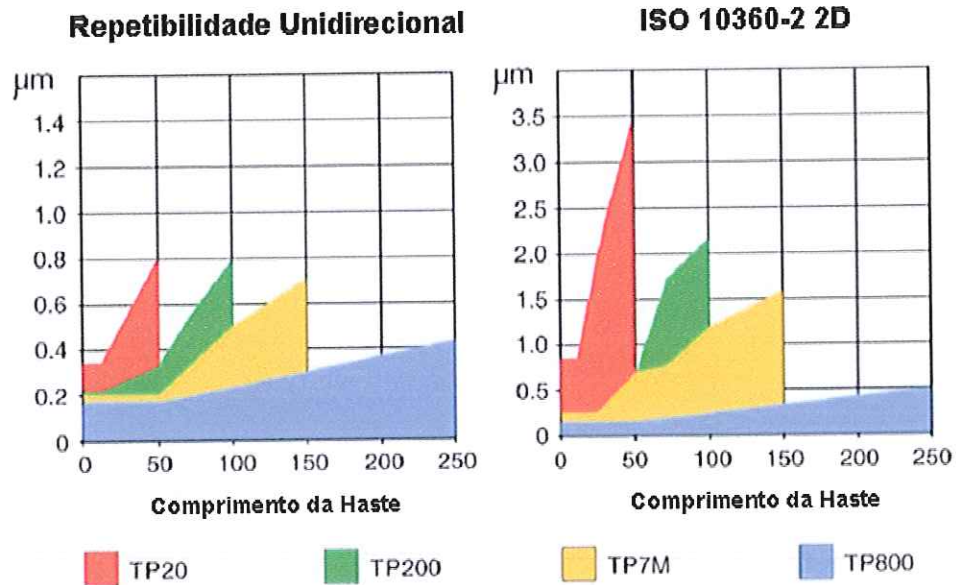


FIGURA 2.3.8 - Comparação dos valores da folga de percurso entre apalpadores convencionais e Apalpadores "Strain-Gauges" – TP800 [FONTE: RENISHAW PLC, METROLOGY DIVISION]

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. Dentre as desvantagens desse tipo de equipamento destacam-se o preço elevado, utilização de tecnologia eletrônica extremamente avançada, o que torna o equipamento delicado e pouca literatura trata especificamente desses apalpadores. A FIGURA 2.3.9 mostra um exemplo de apalpador que utiliza esse princípio.



FIGURA 2.3.9 - Detalhe de um TTP que utiliza o princípio do extensômetro para geração do sinal de "trigger" [FONTE: RENISHAW PLC, METROLOGY DIVISION]

2.3.4.3 Laser

2.3.4.3.1 Princípio de Funcionamento

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 FIGURA 2.3.10.

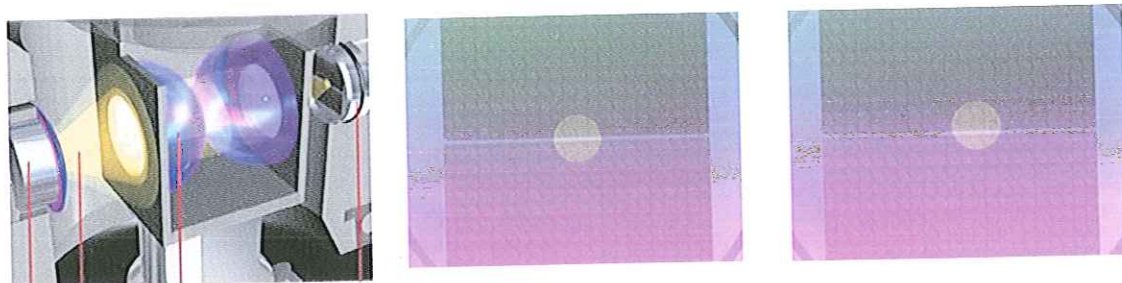


FIGURA 2.3.10 - Princípio de funcionamento dos "apalpadores a Laser" e a variação do ponto de incidência do feixe na fotocélula sensível quando há a deflexão da haste [FONTE: DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH]

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.

Os "apalpadores a laser" são extremamente precisos e pouco suscetíveis a desgastes. Outra característica marcante desse equipamento é o seu preço, baixo se comparado a outros modelos que desempenham performance semelhante. Nos "apalpadores a laser", para que haja uma variação no ponto de incisão 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.

2.3.4.4 Sensores Piezo-Elétricos

2.3.4.4.1 Princípio de Funcionamento

Baseia-se no princípio pelo qual ao se exercer uma pressão sobre um cristal piezo elétrico, 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 FIGURA 2.3.11.

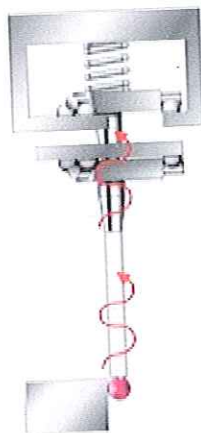


FIGURA 2.3.11 - Transmissão da força de toque para os sensores nos "piezo probes". [FONTE: RENISHAW PLC, METROLOGY DIVISION]

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

Por serem extremamente sensíveis, podem sofrer interferência de ruídos de baixa frequência como pancadas, interferência da frequência da rede elétrica, acionamento de motores, dentre outros.

3 Proposta de um Sistema de medição para Tornos CNC

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, principalmente, 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.

3.1 Tecnologias Utilizadas

Abaixo são descritos os componentes do sistema de medição desenvolvido, bem como as razões que guiaram a escolha de cada tecnologia, sempre levando em conta fatores como simplicidade e adequação ao mercado de pequenas e médias empresas. O princípio de funcionamento do apalpador proposto consiste no fechamento de um contato elétrico entre uma haste retrátil (Terra) e um alvo, (Pólo Positivo), localizado no interior do corpo do equipamento, funcionando como superfície de referência. Quando isso ocorre, o sinal de "trigger" é emitido via circuito de rádio frequência até a Interface receptora, que é responsável por comutar um potencial de 24 volts em uma entrada apropriada do CNC no instante em que o sinal é recebido, indicando que devem ser gravadas as dimensões presentes nos eixos coordenados e a nova linha do comando CN deve ser executada. Abaixo, FIGURA 3.1.1, encontra-se uma foto da interface receptora desenvolvida.

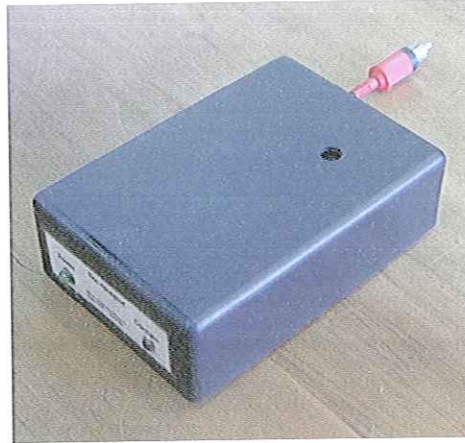


FIGURA 3.1.1 – Interface: recebe o sinal de rádio frequência proveniente do apalpador e envia o sinal à porta específica do CNC

Apesar da transferência do sinal de “trigger” via infravermelho mostrar-se inicialmente a melhor opção para aplicações convencionais, conforme afirmado anteriormente, para o projeto do novo sistema foi escolhida a transmissão do sinal de “trigger” via ondas de rádio levando-se em conta características do processo e os seguintes fatores:

- Alta flexibilidade devido à ausência de cabos que dificultaria a movimentação e indexação do apalpador no porta-ferramentas;
- Tecnologia de simples utilização e plenamente estabelecida e desenvolvida em eletrônica “de estado sólido” e componentes “SMD” (“surface Mounted Device”, designação usual para componentes eletrônicos miniaturizados), podendo-se utilizar em sua aplicação, componentes de baixo custo e robustos;
- Viabilidade de posicionar a interface receptora fora do “ambiente de usinagem”, tornando a instalação do equipamento mais simples, rápida e sem a necessidade de grandes ajustes, ver FIGURA 3.1.2;



FIGURA 3.1.2 – Interface receptora posicionada fora do “ambiente de usinagem”, facilitando a instalação

O circuito emissor de rádio frequência é situado no interior do corpo do apalpador e emite uma frequência normalizada de ondas de rádio AM a 315Mhz quando alimentado por uma tensão de 3 a 12 volts DC.

Com o intuito de permitir que o tempo decorrido entre o contato haste/alvo e o momento em que a entrada do CNC é comutada fosse o menor possível, não foi usada nenhuma codificação e decodificação do sinal de rádio. Uma codificação poderia adicionar um atraso na captura dos valores dimensionais dos eixos no instante do toque com a peça.

Eletricamente, a haste é aterrada no corpo do apalpador, o alvo é isolado e conectado ao pólo positivo da bateria, assim, no momento em que a haste toca o alvo, há a passagem de corrente elétrica, alimentando o circuito emissor e gerando o sinal de “trigger”, conforme ilustrado na FIGURA 3.1.3.

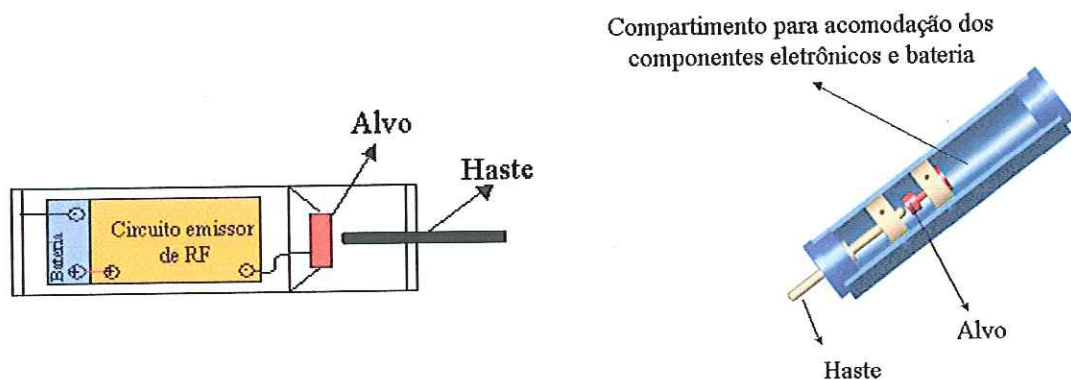


FIGURA 3.1.3 – Esquema de funcionamento do circuito emissor de rádio frequência

O movimento de deslizamento da haste é guiado por duas buchas alinhadas e formando um ângulo de 90° com a superfície do alvo. Os dois furos, o primeiro na tampa e segundo na carcaça, foram usinados na mesma operação, de forma que a garantir alinhamento, FIGURA 3.1.4.

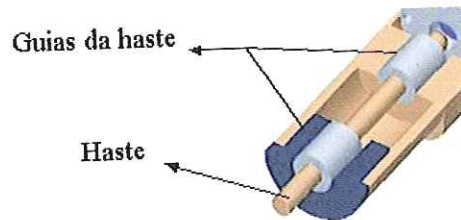


FIGURA 3.1.4 – Detalhe interno da parte frontal do apalpador

Para garantir que o contato entre a haste e o alvo ocorra em uma área restrita e que a localização dessa pequena área apresente a menor variação possível, foi inserida uma esfera de aço de 1mm de diâmetro na extremidade da haste, conforme FIGURA 3.1.5.

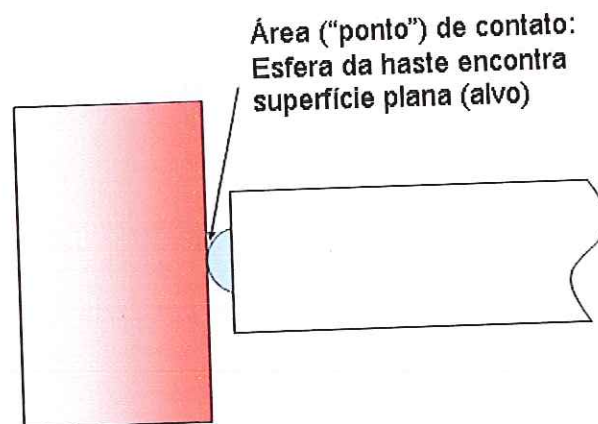


FIGURA 3.1.5 – Contato entre a haste e o alvo

Devido ao fato de que o carro porta-ferramenta continua o seu movimento após o contato entre a haste e o alvo devido a inércia para frear a massa do carro da máquina (Percurso em Vazio), o alvo 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, conforme ilustrado na FIGURA 3.1.6. Por esse motivo, um sistema de retorno do alvo teve de ser desenvolvido.

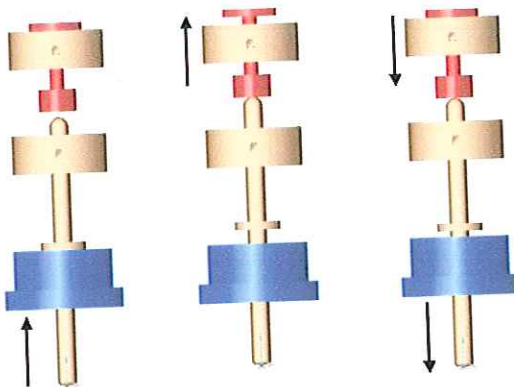


FIGURA 3.1.6 - Ilustração do comportamento esperado de um mecanismo de retorno do alvo em uma medição.

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. Se este se retrair devido à pressão exercida pela haste e não for capaz de retornar a sua posição original, haverá uma alteração no valor do comprimento do apalpador. Conseqüentemente o valor do "offset" ajustado no CNC não mais representa o valor real e o próximo contato será fechado em uma posição diferente da anterior, adicionando um erro ao valor medido, FIGURA 3.1.7.

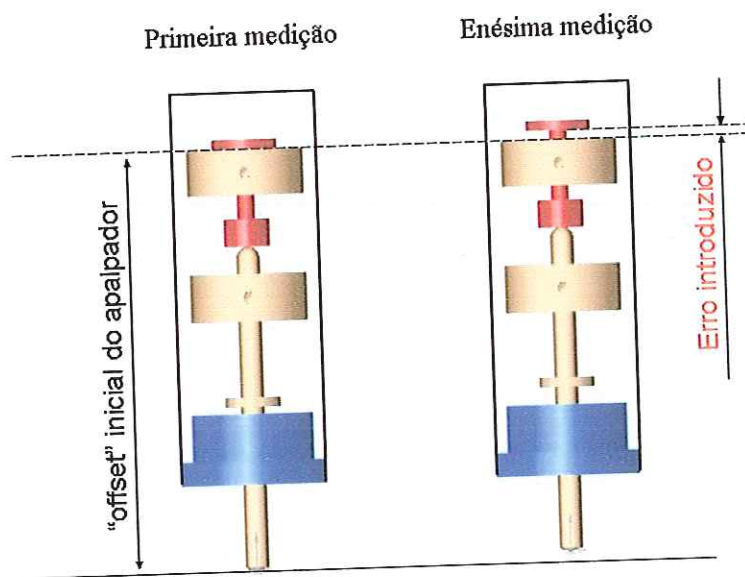


FIGURA 3.1.7 – Esquema demonstrativo do erro introduzido pelo mal posicionamento do mecanismo de retorno

Por esse motivo, uma parte importante do trabalho foi dedicada ao desenvolvimento de um dispositivo capaz de garantir um re-posicionamento micrométrico do alvo após o contato com a haste.

Os apalpadores foram construídos nas dimensões adequadas para sua fixação no porta ferramentas, podendo assim, ser chamado em qualquer ponto do programa CN para executar uma medição, FIGURA 3.1.8.

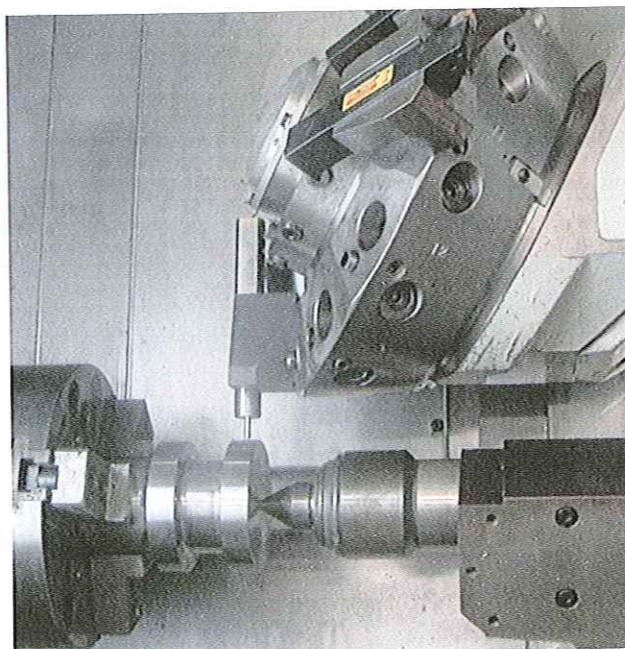


FIGURA 3.1.8 – Vista do sistema de medição

3.2 Funções de medição

Como discutido no item 2.3.2, independentemente da tecnologia, o princípio utilizado nas medições 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 “trigger signal” ou sinal de “trigger”, é então enviado a uma interface que o converte em uma forma inteligível pelo CNC. Após a conversão, o sinal é transmitido ao CNC que capta instantaneamente os valores dimensionais dos eixos X, Y e Z da máquina-ferramenta e armazena-os para posterior leitura, cálculos ou geração de relatórios.

O comando Siemens-810D, utilizado na execução do presente trabalho, conta com funções e comandos específicos para a realização de medições utilizando apalpadores. No caso desse comando CNC, o processo de medição é habilitado através do comando MEAS, que funciona da mesma maneira que um comando G01, porém com uma característica extra, denominada “deletion of distance to go”. Essa função se caracteriza pelo fato de “monitorar” o sinal

de uma entrada específica do CN (pinos 9 e 10 da interface de entradas e saídas X121 do módulo NCU) enquanto realiza a movimentação determinada pelo comando MEAS.

Caso o potencial dessa entrada mude de 0V para 24V ou de 24V para 0V (subida ou descida do degrau), ou seja, ocorrência do sinal de "trigger", o CNC capta instantaneamente o valor dos eixos coordenados, armazenando-os nas variáveis de sistema \$AA_MW[<axis>]. Ao mesmo tempo, a distância que falta para ser percorrida durante a execução do comando é "deletada" e a próxima linha do programa CN é executada. As variáveis de máquina podem ser então acessadas e seus valores atribuídos a parâmetros R ou então outras variáveis declaradas no programa CN. A variável de sistema \$AC_MEA[<No>] indica o status da função medir. Ela é apagada no início da medição. Assim que o apalpador cumpre o critério de ativação (subida ou descida do degrau), a variável muda de valor, podendo ser checada a qualquer momento dentro do programa.

A seguir encontra-se um exemplo da utilização da função MEAS em um programa CN:

```
.....  
N10 G90 G71 G60 G94           ;prog. abs; mm; pos. exato; f em mm/min  
N20 G53 D0 X330 F5000        ;afasta em X p/ troca de ferramenta  
N30 G53 D0 Z420 F5000        ;afasta em Z p/ troca de ferramenta  
N40 T11 D1                   ;carrega apalpador  
N50 G1 Z=POSICAO F5000       ;lê posição em Z p/ medição  
N60 G1 X=(R10+2) F1000       ;aproximação rápida (diâmetro NOM. em R10)  
N70 MEDE: MEAS=1 X=(R10-2) F200 ;medição do diâmetro  
N80 STOPRE                   ;trava medição  
N90 R15=$AA_MW[X]           ;grava em R15 o diâmetro medido  
.....
```

Na linha "N70" observa-se que em detrimento do comando G01, é utilizado o comando MEAS seguido de "=1", que indica que o sinal de "trigger" deve ser "disparado" quando o potencial do pino 10 da interface X121 mudar de 0V para 24V (subida do degrau). Lembrando que o valor nominal da peça a

ser medida está armazenado em "R10", a função de medição começa a "procura" pela peça em "R10+2"mm (comando dado na linha "N60") e termina a procura em "R10-2"mm, ponto final do comando MEAS. Da mesma forma que ocorre com o comando G01, deve-se estabelecer uma velocidade de avanço, nesse caso denominada ("probing speed") ou velocidade de medição.

Assim, a geração do sinal de "trigger" entre "R10+2"mm e "R10-2"mm indica que a peça foi encontrada entre essa faixa. O valor do diâmetro é então armazenado, a distância que falta ser percorrida é cancelada e o programa "pula" para a linha "N80". Em seguida, pode-se utilizar o valor da medição para futuros cálculos. No exemplo acima, esse valor é armazenado no parâmetro "R15", como pode ser observado na linha "N90". A FIGURA 3.2.1 mostra um esquema da geração dos sinais elétricos e mudança do status dos parâmetros usados durante a medição.

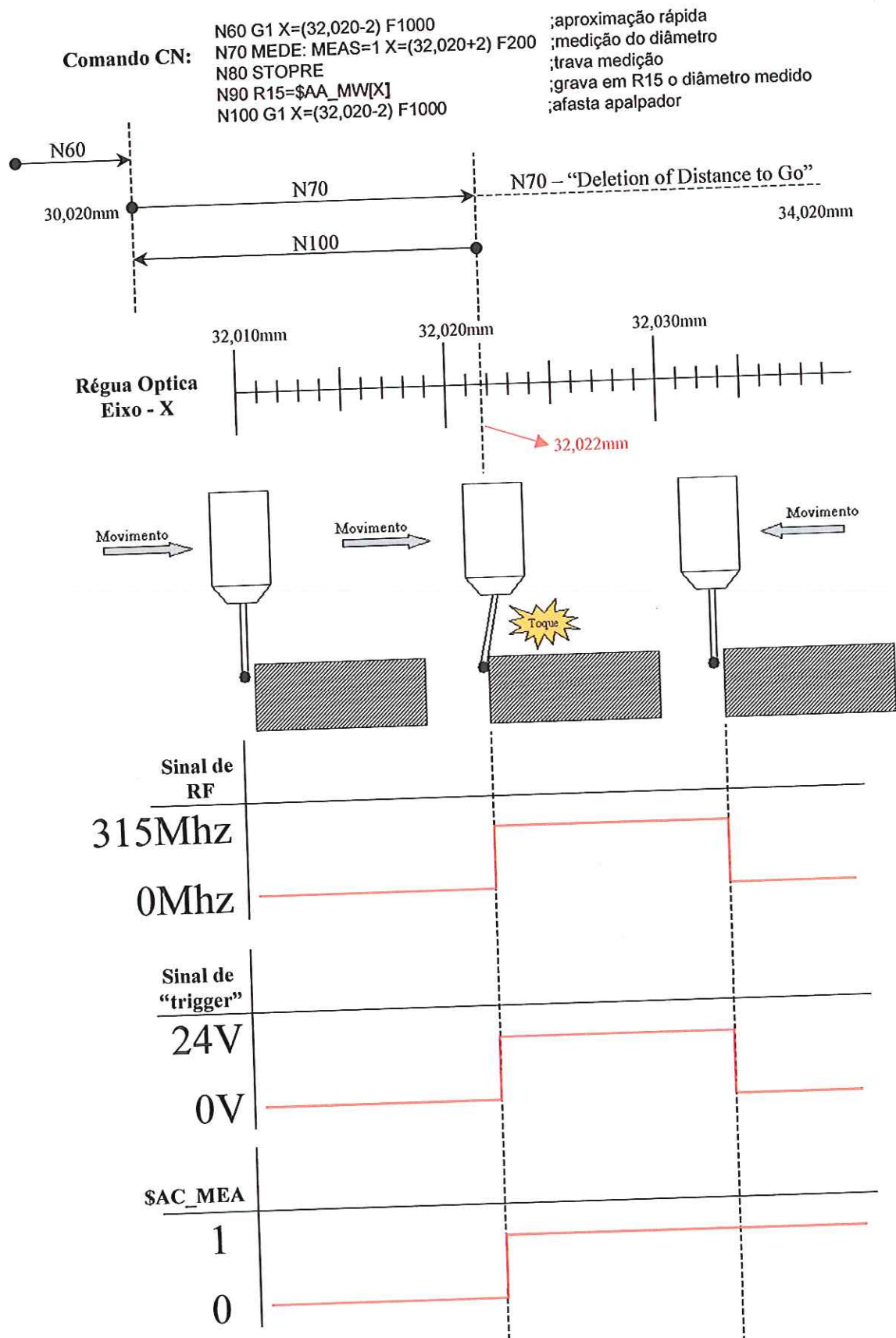


FIGURA 3.2.1 - Esquema dos sinais sendo gerados a medida que o carro porta ferramentas se desloca para realizar a medição – Diagrama referente a um centro de usinagem

3.3 Procedimento padrão de medição

Foi estabelecido um procedimento de utilização do equipamento de medição, visando padronizar a tarefa, diminuir riscos de colisão e manter sob controle parâmetros como, velocidade de aproximação, medição, e afastamento do apalpador, percurso de "procura" pela peça, posicionamento do carro para carregar o equipamento de medição, etc. Tais procedimentos se baseiam nos resultados de experiências acumuladas durante a realização de testes, tais como colisões do apalpador contra a peça e perda de controle dimensional devido variação da velocidade de medição estabelecida no programa CN.

A FIGURA 3.3.1 mostra o diagrama padrão das etapas utilizadas no presente trabalho para a medição de peças utilizando apalpadores. O cumprimento dessas etapas é de extrema importância na medida em que cria uma metodologia capaz de ser implementada em programa CN através de sub-rotinas e utilização de parâmetros de máquina, de forma que seja transparente ao operador, minimizando a possibilidade de ocorrências de erros e facilitando a utilização do apalpador por parte dos mesmos, sem a necessidade do uso de pessoal qualificado especificamente nessa área.

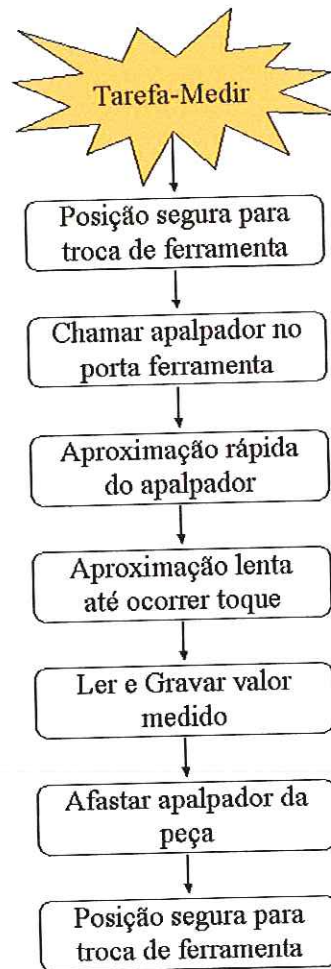


FIGURA 3.3.1 – Diagrama dos eventos que decorrem da sub-rotina de medição

O detalhamento das etapas é dado a seguir:

- **Posição segura para troca de ferramenta:** Sempre que uma sub-rotina de medição for executada, o primeiro cuidado a se tomar é afastar o carro porta-ferramenta da peça, de maneira a garantir que ao indexar o apalpador, não haja colisão. Esse procedimento deve ser executado tanto no início quanto no fim da sub-rotina.
- **Chamar apalpador no porta ferramenta:** Estando o carro porta-ferramenta posicionado adequadamente, chama-se o número da ferramenta correspondente ao apalpador.
- **Aproximação rápida do apalpador:** Nessa etapa é utilizado um avanço rápido até uma posição próxima a posição de medição da peça, visando atingir tal ponto o mais rápido possível para economizar tempo de ciclo. Essa aproximação deve ser feita

primeiramente em Z (paralelamente à superfície a ser medida) e depois em X (perpendicularmente à superfície a ser medida), evitando o movimento combinado dos eixos por motivo de segurança contra colisões. Devido ao fato dessa linha de programa estar inserida na sub-rotina de medição, usada para medir peças de diâmetros diferentes, é de extrema importância que essa movimentação seja parametrizada com relação a uma estimativa da dimensão da peça a ser medida. Por exemplo: G01 X=(diâmetro_peça+2) F1000. Ainda para evitar colisões, é importante salientar que esse procedimento deve ser executado após a calibração ("off-set") do comprimento do apalpador.

- **Aproximação lenta até ocorrer toque:** Nesse ponto, é executada a medição propriamente dita. Isso é feito "procurando-se" a peça em X (perpendicularmente à superfície a ser medida) enquanto espera-se pelo sinal de "trigger". A movimentação é feita com baixa velocidade de avanço, através do comando específico para a realização de medições ("MEAS" para os comandos Siemens e G31 no caso de comandos Fanuc). O fim da "procura" pela peça deve ter como objetivo um ponto pouco menor que o diâmetro a ser medido, com a finalidade de defletir o apalpador e gerar o sinal de "trigger". Ao mesmo tempo, por ser projetado para absorver pequenas movimentações (3mm) sem sofrer danos, essa parada logo além do ponto onde a peça "deveria estar" garante a integridade do apalpador no caso de falha na emissão do sinal de "trigger".
- **Ler e gravar valor medido:** O valor da posição da ponta da haste do apalpador no momento em que ocorre o sinal de "trigger" é armazenado na variável de máquina \$AA_MW[X], no caso dos comandos Siemens. Para tornar esse valor acessível e utilizá-lo para cálculos futuros dentro de programas CN, deve-se atribuí-lo a uma variável de programa ou então a um dos parâmetros "R" disponíveis para uso do operador. A utilização de parâmetros "R", apesar de ser extremamente simples, deve ser utilizada com

extremo cuidado, pois seus valores podem ser facilmente alterados por engano pelo operador, diretamente na tela de parâmetros R.

- **Afastar apalpador da peça:** A movimentação executada durante essa etapa do procedimento (movimentação perpendicular à superfície medida) deve ser realizada com o intuito de “liberar” o apalpador do contato com a peça. Da mesma maneira que ocorre no caso da aproximação rápida do apalpador, devido ao fato dessa linha de programa estar inserida na sub-rotina de medição, usada para medir peças de diâmetros diferentes, é de extrema importância que a movimentação seja parametrizada com relação à dimensão da peça ou então, nesse caso, com relação ao valor medido pelo apalpador. Por exemplo: $G01 X=(\text{diametro_medido}+30) F1000$, onde `diametro_medido` é a variável que recebeu o valor de `$AA_MW[X]`.
- **Posição segura para troca de ferramenta:** Tendo liberado o apalpador da peça, é feita a movimentação para afastar o carro porta-ferramenta, de maneira a garantir que ao indexar outra ferramenta, não haja colisão. Esse é o último passo a ser executado durante a sub-rotina de medição.

4 TRABALHO EXPERIMENTAL

4.1 Equipamentos utilizados

O equipamento utilizado para a realização dos experimentos com o apalpador foi um TORNO INDEX Modelo GU600, com Potência de 22Kw, fabricado em 1997. O comando numérico é um SIEMENS 810D que possui funções específicas para realização de medições. Esse comando tem ainda a possibilidade de comunicação em rede com PC externo, via padrão Ethernet, TCP/IP, proporcionando a transferência de programas CN e parâmetros diretamente do PC para a máquina. Para medição manual de diâmetro no torno, utilizou-se um micrômetro externo marca Mitutoyo, modelo 25-50mm, com resolução de 0,001mm.

4.2 Procedimento experimental

Os experimentos realizados visaram determinar a exatidão, repetibilidade, resolução e confiabilidade do apalpador mediante uso no chão de fábrica e as características do sistema como um todo (Torno + Apalpador).

Foi realizado um experimento tomando-se um eixo cujo diâmetro havia sido previamente normalizado. Em seguida foi feita uma usinagem com ferramenta de metal duro VBMT160404UC6010, rebaixando 0,010mm o seu diâmetro, tomando cuidado com os parâmetros de corte para que não houvesse 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, ver FIGURA 4.2.1.

Cada medição manual com micrômetro foi realizada 3 vezes seguidas e então calculada a média dos valores, de maneira a obter-se um resultado mais expressivo do valor real do diâmetro para cada colo.



FIGURA 4.2.1 - Inspeção automática de um mesmo colo de um eixo normalizado

Os procedimentos de rebaixo de 0,010mm e inspeção foram repetidos cinco vezes, desta vez produzindo-se colos de diferentes diâmetros, obtendo-se cinco amostras de dados relativos às medidas de cada um dos colos com rebaiços consecutivos de 0,010 mm, FIGURA 4.2.2.

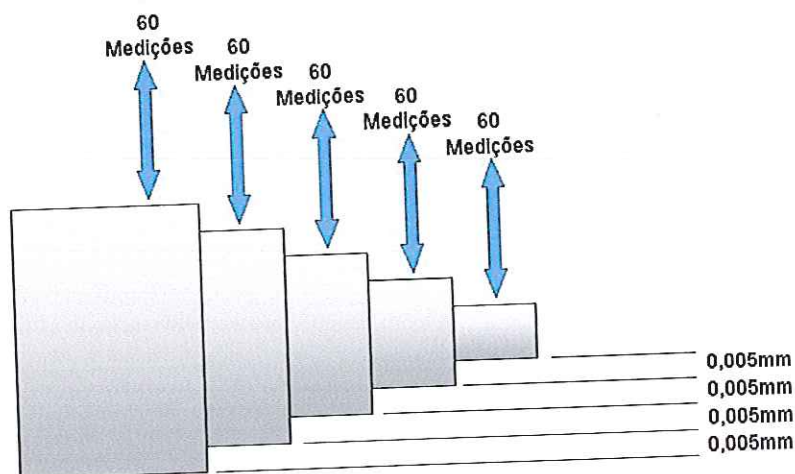


FIGURA 4.2.2 - Ilustração do procedimento do ensaio para determinação de características do sistema de medição

A FIGURA 4.2.3, mostra um exemplo dos resultados obtidos para um dos cinco colos.

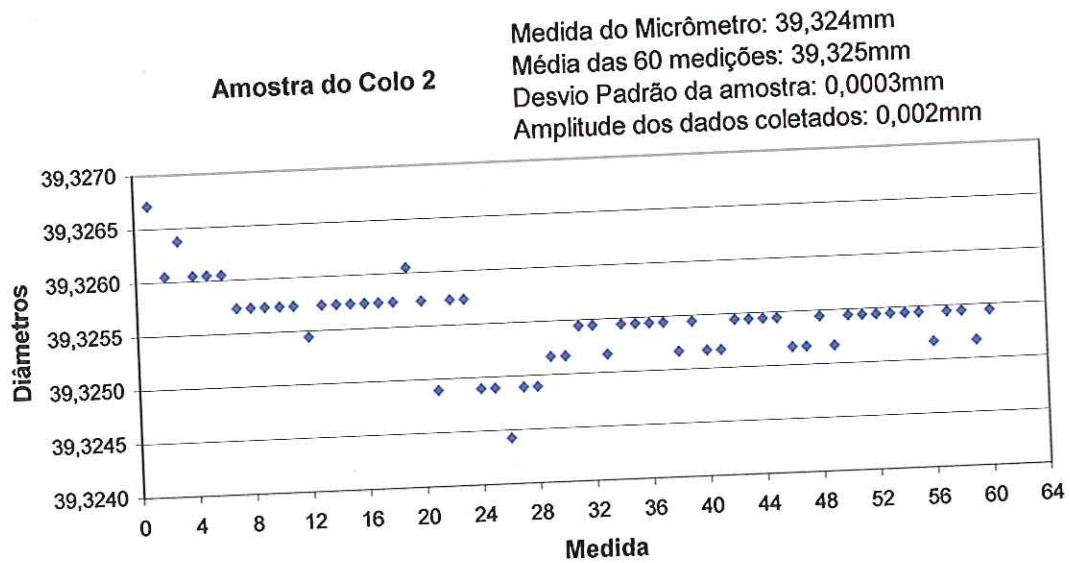


FIGURA 4.2.3 – Resultado das 60 medições consecutivas de um dos colos usinados.

Os dados colhidos no presente experimento foram utilizados para a realização de dois estudos distintos: análise de Repetibilidade e Reprodutibilidade (R&R) e estudo estatístico dos grupos de dados para inferir a respeito da resolução do sistema de medição.

4.2.1 Estudo de Repetibilidade e Reprodutibilidade (R&R)

Conforme descrito no item 2.2.3.1 “Repetibilidade e reprodutibilidade de sistemas de medição”, pode-se utilizar o método da “Média e Amplitude” para o cálculo dessas características do instrumento de medição. 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.

4.2.2 Análises estatísticas – Teste de hipóteses

Para inferir sobre a resolução do processo de medição como um todo, foram utilizados testes de hipóteses como ferramentas de análise. Comparando-se duas amostras de rebaxos consecutivos, foi utilizado um teste de hipóteses para duas médias, (DEVORE, 1982), a fim de determinar se elas

são iguais ou diferentes. Caso o teste aponte que exista diferença entre as duas amostras, pode-se afirmar que estatisticamente o sistema de medição tem, pelo menos, a resolução da diferença entre os colos, ou seja, 0,010 mm. O teste foi aplicado em todas as amostras, duas a duas consecutivamente, a fim de se determinar estatisticamente se havia diferença ou igualdade entre a média das amostras. Abaixo, encontram-se as hipóteses e a aplicação do teste para as amostras das medições dos colos 1 e 2:

Se μ_1 é a média dos diâmetros do colo 1 e μ_2 é a média dos diâmetros do colo 2, as hipóteses nula e alternativa podem ser escritas como:

$H_0: \mu_1 = \mu_2$ (as médias dos diâmetros coincidem)

$H_a: \mu_1 \neq \mu_2$ (as médias as médias dos diâmetros são diferentes)

O nível de significância adotado para o teste foi definido em 0,5%

Os valores críticos de z para $\alpha = 0,005$ são definidos como $\pm z_{\alpha/2}$. Da tabela de distribuição normal, determina-se $\pm z_{\alpha/2} = \pm z_{0,0025} = \pm 2,81$. A FIGURA 5.2.1 mostra os valores críticos.

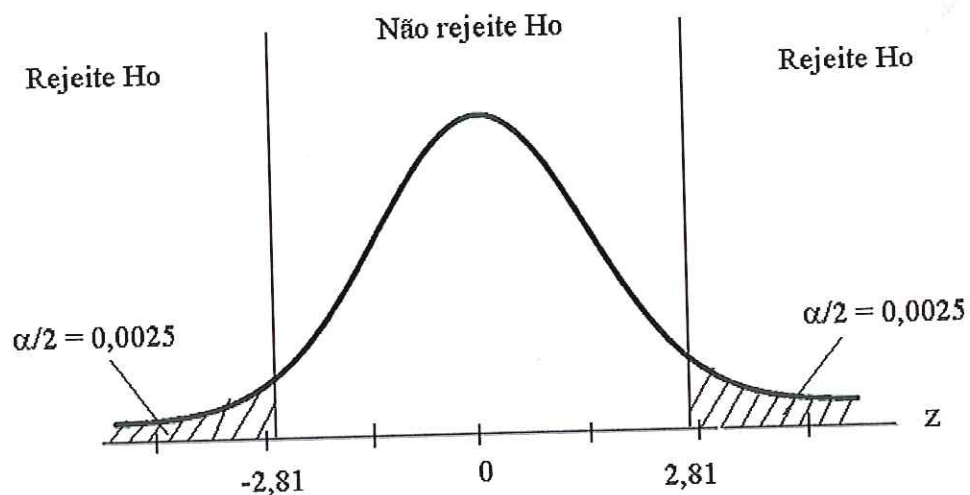


FIGURA 4.2.4 - Valores críticos de Z para $\alpha = 0,005$

4.2.3 Teste de usinagem seriada

A fim de simular o comportamento do sistema durante um processo de usinagem seriada, bem como inferir a respeito da possibilidade do sistema (Torno +Apalpador) realizar usinagens de precisão mantendo alta capacidade

do processo, foi realizado um experimento onde vinte peças foram usinadas através de uma operação de desbaste e uma operação de acabamento no colo de maior diâmetro de um eixo escalonado.

O procedimento consistiu em medir o diâmetro do colo após a operação de acabamento, e realizar uma comparação entre o valor obtido para o diâmetro do colo e os limites superiores e inferiores de especificação, fazendo a correção necessária no comprimento da ferramenta a fim de trazer o valor do diâmetro da próxima peça a ser usinada para o diâmetro nominal especificado. Com o intuito de minimizar os parâmetros envolvidos no processo e tornar possível a análise dos dados, não foi utilizado o segundo passe de acabamento. Sendo assim, a correção no comprimento da ferramenta surtiu efeito a partir da próxima peça a ser usinada, conforme mostra o diagrama da FIGURA 4.2.5.



FIGURA 4.2.5 - Usinagem com controle dimensional através de medição com apalpador e correção do comprimento da ferramenta de corte

Utilizando-se um Micrômetro, também foi feita a medição manual de cada uma das peças usinadas a fim de acompanhar a variação do erro entre o valor do diâmetro apontado pelo apalpador e o resultado da medida com o Micrômetro. A FIGURA 4.2.6 mostra um detalhe do experimento:



FIGURA 4.2.6 – Usinagem seriada de 20 peças: Antes e depois da usinagem do colo

5 Resultados e Discussões

Nesse capítulo são apresentados os resultados dos experimentos e discutidos os principais pontos encontrados em cada um deles. Ao final, item 5.4 "Testes de aplicações práticas", são apresentados os diagramas e programas gerados para comprovar a aplicabilidade prática de algumas das funções atribuídas aos apalpadores no campo do torneamento.

5.1 Resultados do teste de Repetibilidade e Reprodutibilidade

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 TABELA 5-1 apresenta os resultados:

OP1	Colo1	Colo2	Colo3	Colo4	Colo5
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
x/	39,33148	39,32529	39,31382	39,30673	39,29783
OP2	Colo1	Colo2	Colo3	Colo4	Colo5
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
x/	39,33142	39,32551	39,31356	39,30737	39,29821
OP3	Colo1	Colo2	Colo3	Colo4	Colo5
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
x/	39,33161	39,32546	39,31343	39,30672	39,29813

TABELA 5-1 – Apalpador simulando o efeito de três operadores medindo cinco peças

Utilizando-se das relações para cálculo dos limites do gráfico de \bar{X} , tem-se:

$$LS = \bar{\bar{X}} + A_2 \times \bar{R} = 39,3151 + 0,577 \times 0,00096 = 39,3157mm$$

$$LM = \bar{\bar{X}} = 39,3151mm$$

$$LI = \bar{\bar{X}} - A_2 \times \bar{R} = 39,3151 - 0,577 \times 0,00096 = 39,3146mm$$

O Gráfico das médias é apresentado a seguir, FIGURA 2.1.1, a qual retrata a habilidade do instrumento em fazer distinção entre diferentes dimensões das peças resultantes dos processos.

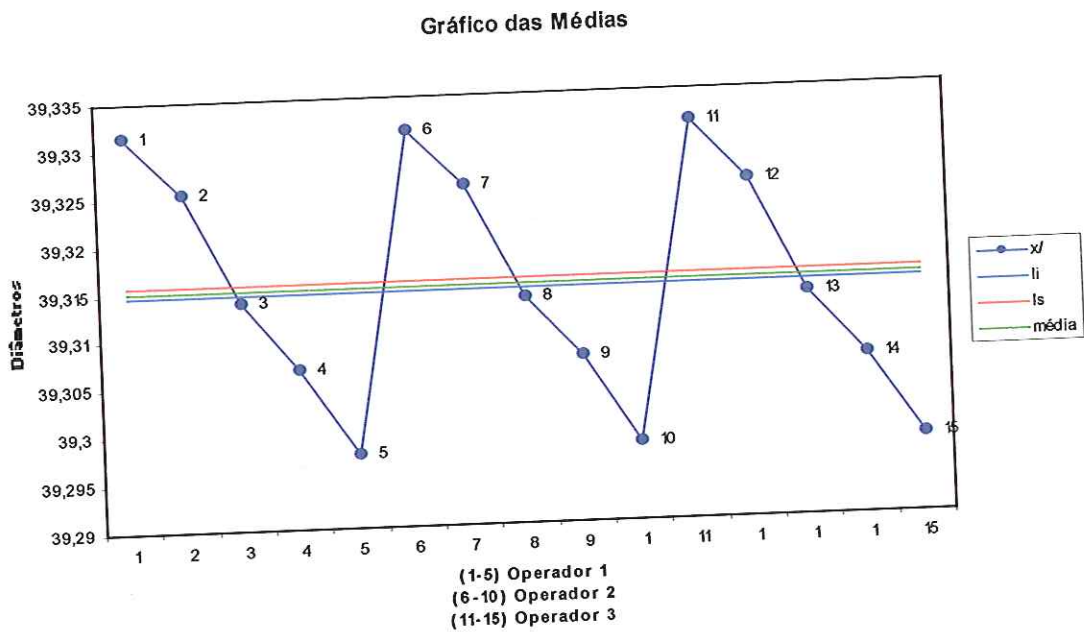


FIGURA 5.1.1 – Gráfico das médias

O fato de o gráfico apresentar os pontos fora dos limites já era esperado e desejável. Segundo CARPINETTI, (2000), como para esse tipo de estudo, os limites do gráfico das médias 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:

$$LS = D_4 \times \bar{R} = 2,115 \times 0,00096 = 0,00203mm$$

$$LM = \bar{R} = 0,00096mm$$

$$LI = D_3 \times \bar{R} = 0 \times 0,00096 = 0mm$$

O gráfico das amplitudes é apresentado a seguir FIGURA 5.1.2, 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.

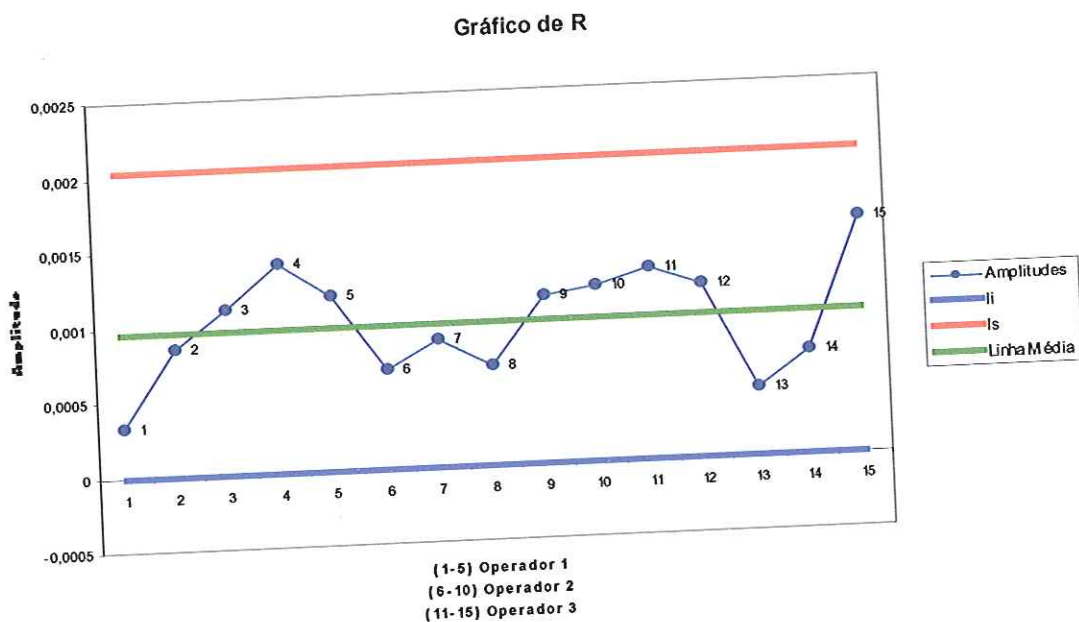


FIGURA 5.1.2 – Gráfico das Amplitudes

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:

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

Uma estimativa para o cálculo da reprodutibilidade do instrumento é dada através das seguintes relações:

$$R_x = \bar{x}_{\max} - \bar{x}_{\min} = 39,31521 - 39,31503 = 0,00018$$

$$\text{reprodutibilidade} = 6\hat{\sigma}_{\text{repro}} = 6\left(\sqrt{\left(\frac{R_x}{d_2}\right)^2 - \frac{(\hat{\sigma}_{\text{repe}})^2}{nr}}\right)$$

Observa-se na equação acima que a subtração do termo $\frac{(\hat{\sigma}_{repe})^2}{nr}$ tem a função de dar uma melhor estimativa da reprodutibilidade, pois o termo $\left(\frac{R_x}{d_2}\right)^2$ possui uma pequena contaminação dada pela repetibilidade. No caso da presente análise, onde as medições são feitas automaticamente e, por consequência, a parcela da repetibilidade tem influência muito maior que a parcela referente à reprodutibilidade, a subtração a fração da repetibilidade não faz sentido, pois tornaria a equação negativa. Dessa forma, o termo $\left(\frac{R_x}{d_2}\right)^2$ não foi utilizado e uma pequena contaminação do resultado deve ser admitida, tornando o resultado da reprodutibilidade apenas uma estimativa.

$$reprodutibilidade = 6 \left(\sqrt{\left(\frac{0,00018}{2,326} \right)^2} \right) = 0,00046$$

A estimativa da capacidade do sistema de medição (R&R) é dada por:

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

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

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

Alternativamente, o cálculo de R&R também pode ser realizado com o auxílio do Software Minitab®, gerando o conjunto de dados apresentados a seguir, FIGURA 5.1.3:

Gage R&R (ANOVA) for Resultados

Gage name: Apalpador
 Date of study:
 Reported by:
 Tolerance:
 Misc:

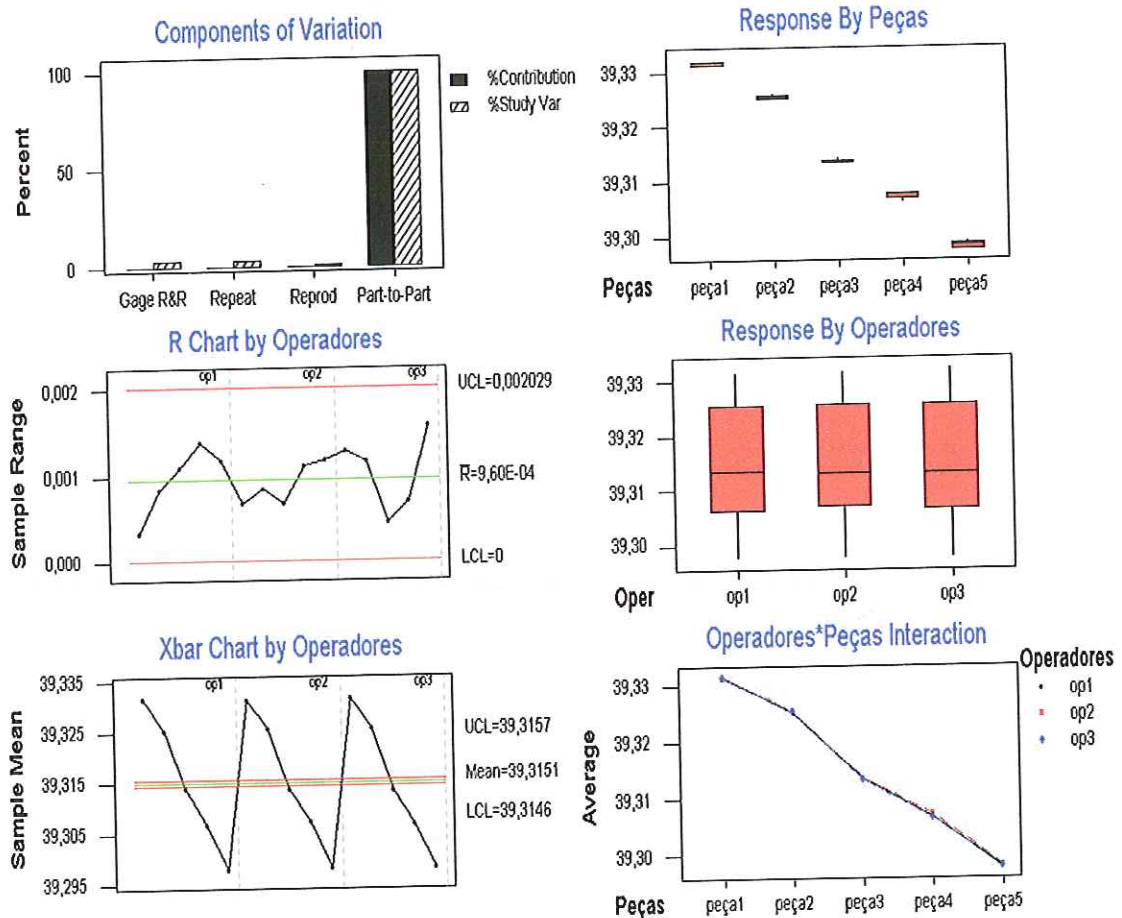


FIGURA 5.1.3 – Resultados de R&R obtidos com a utilização do Software Minitab®

5.2 Resultados do teste de hipóteses

Abaixo, encontram-se as hipóteses e a aplicação do teste para as amostras das medições dos colos 1 e 2:

Se μ_1 é a média dos diâmetros do colo 1 e μ_2 é a média dos diâmetros do colo 2, as hipóteses nula e alternativa podem ser escritas como:

H_0 : $\mu_1 = \mu_2$ (as médias dos diâmetros coincidem)

H_a : $\mu_1 \neq \mu_2$ (as médias as médias dos diâmetros são diferentes)

O nível de significância adotado para o teste foi definido em 0,5%

Os valores críticos de z para $\alpha = 0,005$ são definidos como $\pm z_{\alpha/2}$. Da tabela de distribuição normal, determina-se $\pm z_{0,005/2} = \pm z_{0,0025} = \pm 2,81$. A FIGURA 5.2.1 mostra os valores críticos.

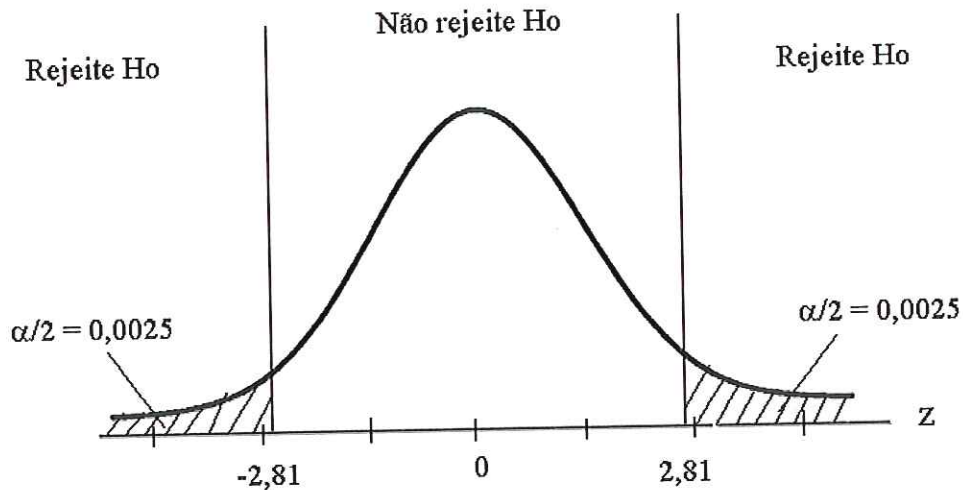


FIGURA 5.2.1 - Valores críticos de Z para $\alpha = 0,005$

Cálculo do valor da estatística do teste:

$$s_{\bar{x}_1 - \bar{x}_2} = \sqrt{\left(\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}\right)} = \sqrt{\left(\frac{0,00023^2}{60} + \frac{0,00035^2}{60}\right)} = 0,00005$$

$$z = \frac{(\bar{x}_1 - \bar{x}_2) - 0}{s_{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}} = \frac{39,3314 - 39,3255}{0,00005} = 118$$

Observando novamente a TABELA 5-2, observa-se que o valor 118 cai completamente dentro da região de rejeição, rejeitando-se a hipótese nula H_0 . Portanto, aceita-se como válida a hipótese H_a , ou seja, o sistema tem a capacidade de diferenciar o degrau existente.

Repetindo-se tal procedimento para os demais colos 2-3, 3-4, 4-5, determinou-se, utilizando-se nível de significância de 99,5%, que os grupos de dados de cada um dos diâmetros usinados são altamente diferentes entre si, provando que o apalpador tem a capacidade de realizar medições com resolução de pelo menos 0,010 mm, valor esse compatível com a imensa maioria dos processos de torneamento.

Dados Dimensionais (mm)					
	Diametro1	Diametro2	Diametro3	Diametro4	Diametro5
Real (R)	39.3320	39.3240	39.3110	39.3030	39.2960
Média (M)	39.3314	39.3255	39.3134	39.3069	39.2979
(R-M)	0.0006	-0.0015	-0.0024	-0.0039	-0.0019
Amplitude	0.0013	0.0018	0.0016	0.0018	0.0019
DesvPad	0.0002	0.0004	0.0003	0.0005	0.0005
Teste de igualdade de Médias com 99,5% de confiabilidade					
Amostras	Z do Teste	Z Obtido	Aceita H0	Aceita Ha	Resultado
1-2	2,81	118		X	Diferem
2-3	2,81	201		X	Diferem
3-4	2,81	91		X	Diferem
4-5	2,81	101		X	Diferem

TABELA 5-2 - Resultados do Experimento

O Dispositivo de Retorno projetado mostrou-se preciso o suficiente para um processo de torneamento e o sistema foi capaz de realizar as medições sem que houvesse tendências nos resultados, além de garantir valores consideráveis para a amplitude e o desvio padrão das amostras.

5.3 Resultados do teste de usinagem seriada

O conjunto total dos dados adquiridos é mostrado a seguir, TABELA 5-3:

Usinagem de 20 peças (Diâmetro Nominal =25,700mm)				
peça	micrômetro(mm)	Probe(mm)	Diferença	Compensação
1	25,715	25,701	0,014	-0,004
2	25,704	25,692	0,012	0,000
3	25,710	25,704	0,006	0,002
4	25,709	25,713	0,004	0,008
5	25,689	25,681	0,008	-0,001
6	25,712	25,703	0,009	-0,001
7	25,707	25,700	0,007	-0,001
8	25,707	25,702	0,005	-0,002
9	25,700	25,694	0,006	0,001
10	25,709	25,701	0,008	0,000
11	25,708	25,703	0,005	-0,001
12	25,705	25,698	0,007	0,000
13	25,708	25,702	0,006	-0,001
14	25,704	25,699	0,005	-0,001
15	25,705	25,699	0,006	0,000
16	25,706	25,700	0,006	0,000
17	25,706	25,705	0,001	-0,003
18	25,699	25,697	0,002	-0,001
19	25,702	25,703	0,001	-0,003
20	25,699	25,699	0,000	-0,002
Média	25,705	25,700	0,006	
desvpad	0,006	0,006	0,003	

TABELA 5-3 – Dados obtidos da usinagem seriada de 20 peças: medição do diâmetro do colo através da utilização do apalpador e micrômetro

A análise do processo foi realizada com o auxílio do Software Minitab® para gerar os gráficos de CEP, cálculo de CP e CPK, Gráfico de Médias e Amplitude, Histograma e teste de normalidade.

O primeiro gráfico apresenta os resultados do processo sob o ponto de vista do micrômetro, FIGURA 5.3.1:

Capabilidade do Processo (micrômetro)

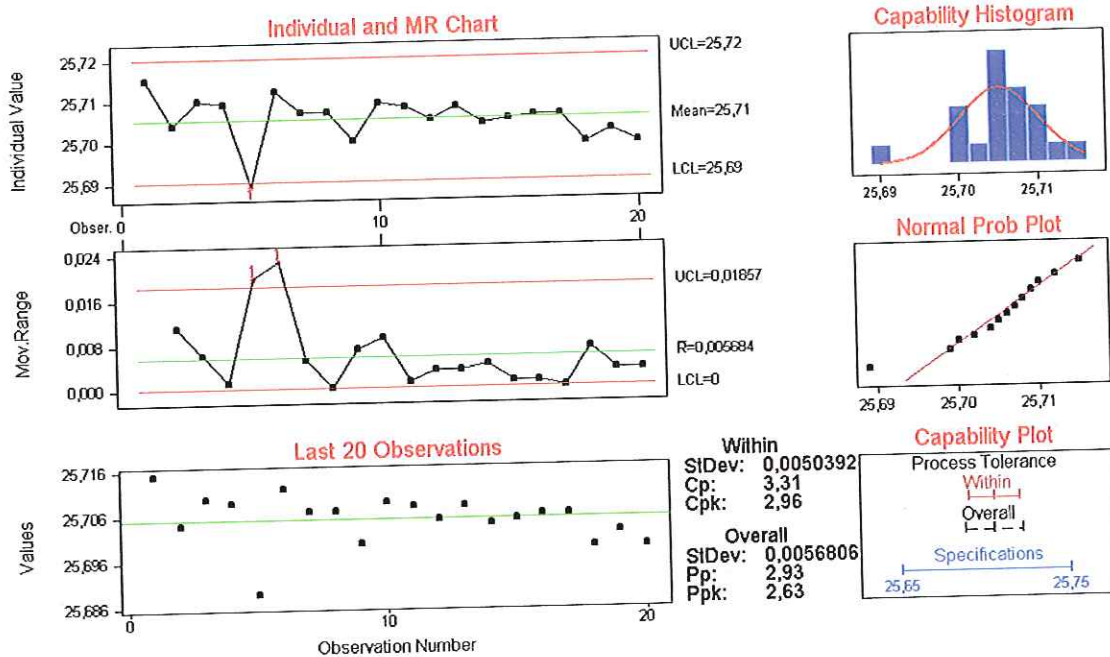


FIGURA 5.3.1 - Análise das medições realizadas nas 20 peças torneadas (Micrômetro)

Conforme pode ser observado, os limites estabelecidos para o processo foram $LIE=25,650\text{mm}$ e $LSE=25,750\text{mm}$, tendo o valor central ($25,700$) como o valor nominal. Para esses limites de tolerância, foi obtido o valor de $CP=3,31$ e $CPK=2,96$, o que segundo a norma NBR ISO 9004 (1994), demonstra tratar-se de um processo extremamente capaz, com índices de rejeição inferiores a 64ppm.

Um outro fato relevante que deve ser observado é que a usinagem das peças foi feita em seqüência, tendo início com a máquina recém ligada (fria) e terminando após aproximadamente uma hora. Esse fato pode explicar as amplas variações obtidas no início do experimento e a posterior estabilidade após o aquecimento da máquina.

Para efeito de comparação dos resultados, a seguir a FIGURA 5.3.2 mostra o mesmo estudo, porém utilizando os resultados do processo advindos das medições do apalpador:

Capabilidade do Processo (Probe)

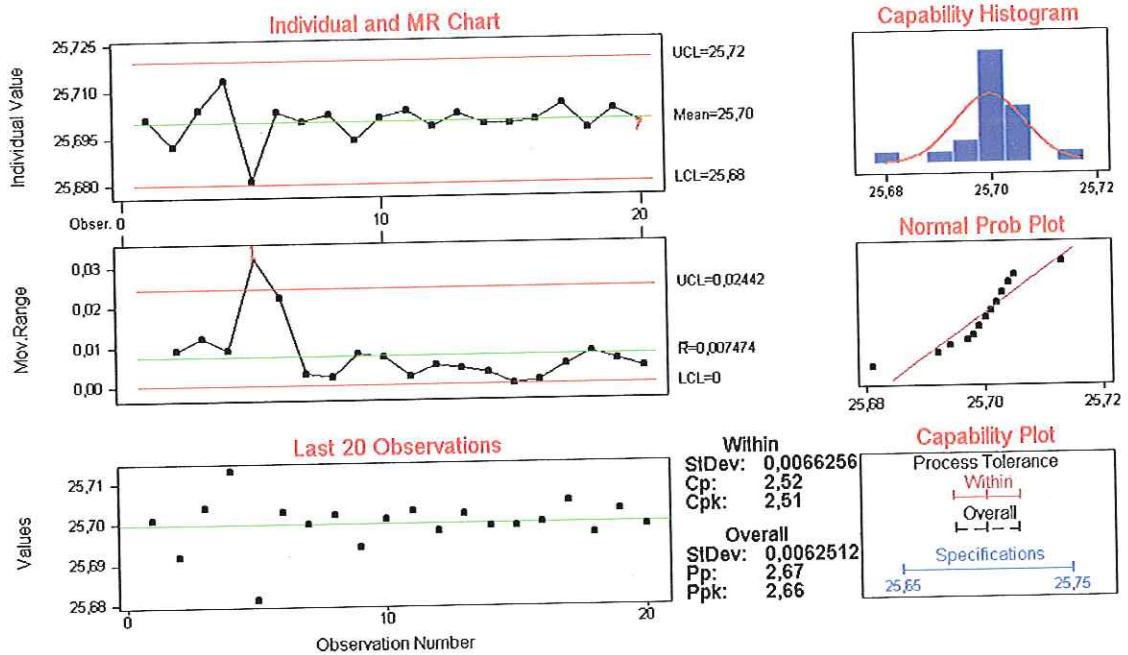


FIGURA 5.3.2 - Análise das medições realizadas nas 20 peças torneadas (Apalpador)

O gráfico seguinte, FIGURA 5.3.3, representa o mesmo estudo, porém comparando os valores obtidos entre o Apalpador e o micrômetro:

Capabilidade do Processo (Interação Micrômetro e Probe)

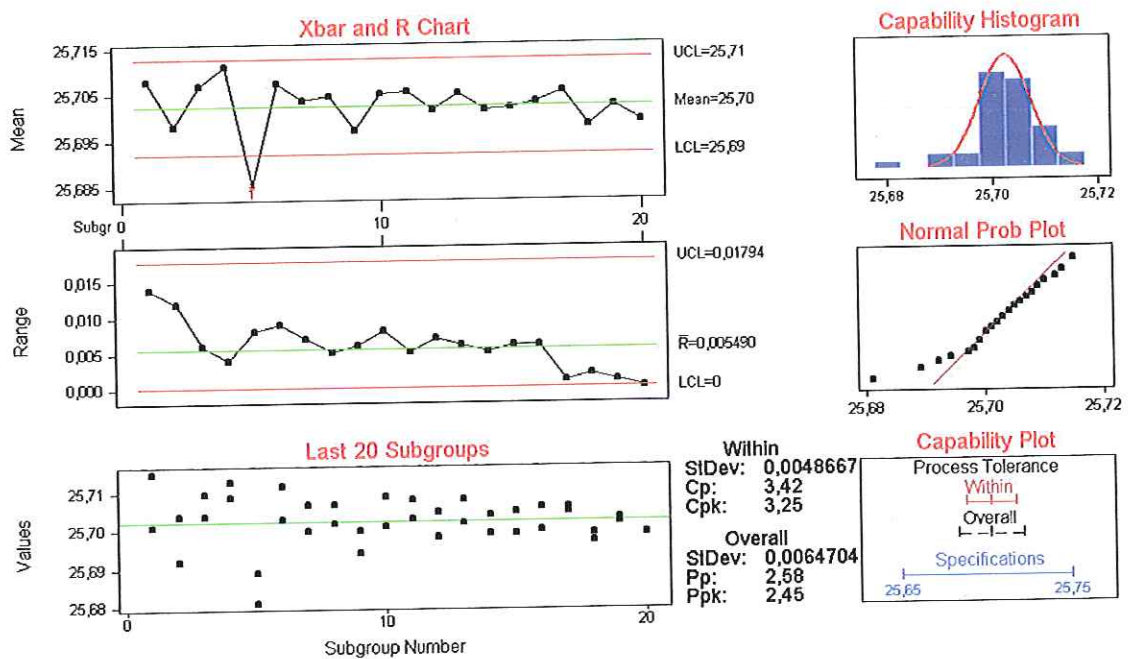


FIGURA 5.3.3 - Análise das medições realizadas nas 20 peças torneadas (Micrômetro e Apalpador)

O gráfico da interação entre os resultados obtidos pelas medições do micrômetro e o Apalpador mostra que, na média, existe uma diferença de 0,005mm entre os valores medidos pelo apalpador e os valores medidos pelo micrômetro (RANGE). Essa diferença representa um possível erro no cálculo do “off-set” do apalpador. Observa-se que esse erro foi maior no início e diminuiu no decorrer do experimento até coincidir perfeitamente com o valor lido no micrômetro ao término do experimento. É importante salientar que o “pre-set” do apalpador foi realizado no dia anterior, com a máquina quente.

5.4 Testes de aplicações práticas

Dentre as possíveis aplicações dos apalpadores, pode-se destacar a detecção automática de quebra e compensação de desgastes 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 outras.

Com o intuito de comprovar a aplicabilidade de algumas das funções atribuídas aos apalpadores no campo do torneamento, foram realizados ensaios utilizando o sistema desenvolvido.

5.4.1 “Offset” automático do apalpador

O “offset” de uma ferramenta é definido como a distância entre a ponta da mesma e o centro do furo onde se insere o suporte da ferramenta no porta-ferramenta. Essa distância é usualmente medida em um desempenho, com a ajuda de um traçador de altura.

O “offset” automático trata-se de um procedimento pelo qual as dimensões do apalpador são automaticamente detectadas e inseridas nos parâmetros de “offset” da ferramenta, sem a necessidade de medições manuais. Assim, com apenas alguns toques em uma peça com dimensões conhecidas, o apalpador já está configurado e apto a realizar as medições.

Para a realização dessa função, os seguintes passos foram efetuados:

Com a finalidade de obter uma maior confiabilidade na medição, o eixo foi fixado no torno e um contra ponto foi utilizado. Em seguida foi dado um passe de desbaste para garantir que a linha de centro do eixo e a linha de centro da castanha fossem o mais coincidente possível. Somente então a medição do diâmetro com o micrômetro foi realizada.

A seguir é apresentado o diagrama de bloco para a realização do "offset" automático, FIGURA 5.4.1.

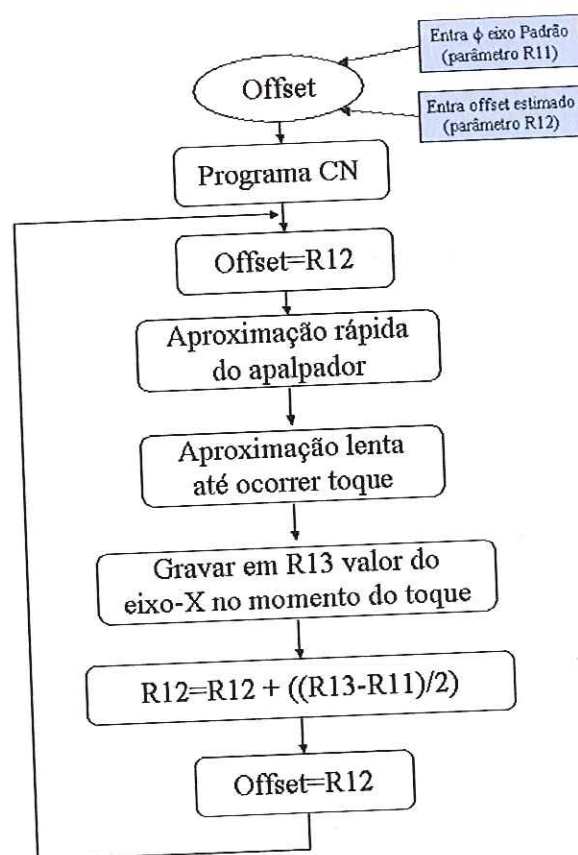


FIGURA 5.4.1 Diagrama de bloco da função "offset" automático

Inicialmente é inserido em um campo do programa CN o valor do diâmetro do eixo "padrão", anteriormente verificado com micrômetro. Esse valor é armazenado em um parâmetro "R" e utilizado posteriormente para verificação do comprimento do apalpador.

Em outro campo do programa CN é inserido o valor aproximado do "offset" do apalpador para ser usado como referência na aproximação do mesmo com o eixo "padrão".

Em seguida o programa é executado. O apalpador toca o eixo "padrão" e o valor medido é armazenado. Esse valor, representativo do diâmetro do eixo, é então comparado com o valor real medido com o micrômetro e a diferença entre esses dois valores é adicionada ao valor inicial do comprimento estimado do apalpador.

Tal procedimento foi implementado com sucesso e foi capaz de medir automaticamente o "offset" do apalpador na direção X, ou seja, seu comprimento.

5.4.2 Medição e correção durante a usinagem

Este procedimento consiste em uma operação convencional de usinagem, por exemplo, composta por um passe de desbaste e um de acabamento, com a diferença que após a operação de acabamento, é inserido um ciclo de medição e possíveis ações baseadas nas medidas obtidas. Assim, a peça pode ser aceita ou, caso não esteja dentro das tolerâncias especificadas pelo projeto, é possível executar um ou mais passes rebaixando o diâmetro até atingir a dimensão correta, ou refugá-la caso a peça já esteja menor do que a tolerância especificada. Caso o erro resultante da comparação entre o valor nominal da peça e o valor medido pelo apalpador seja maior do que um valor especificado (baseado no desgaste permitido até fim de vida da ferramenta), é possível executar um comando para troca de ferramenta ou exibir uma mensagem na tela de IHM, instruindo o operador a realizar a troca da pastilha manualmente.

Tais procedimentos podem ser muito úteis em um sistema de manufatura e medição automáticas, onde a própria Máquina-Ferramenta se torna um sistema de medição "em processo", compensando desgastes das ferramentas de corte, verificando e atuando dinamicamente na qualidade das peças produzidas.

Após a aquisição das dimensões com o apalpador, utilizando-se um sistema de supervisão e monitoramento, segundo INMETRO. (1995), é possível disponibilizar os dados obtidos no chão de fábrica de maneira confiável e com o mínimo atraso para diversas áreas dentro da empresa e,

conforme interesse, para clientes, cadeia de fornecedores, etc, utilizando-se para isso tecnologias de comunicação disponíveis comercialmente em máquinas-ferramenta cujo CNC seja de arquitetura aberta.

Também é possível o desenvolvimento de uma carta de controle "eletrônica", através da representação em forma de gráfico, dos valores medidos e armazenados no decorrer do tempo.

A seguir é apresentado o diagrama de bloco para a realização do procedimento de usinagem e medição automática, FIGURA 5.4.2.

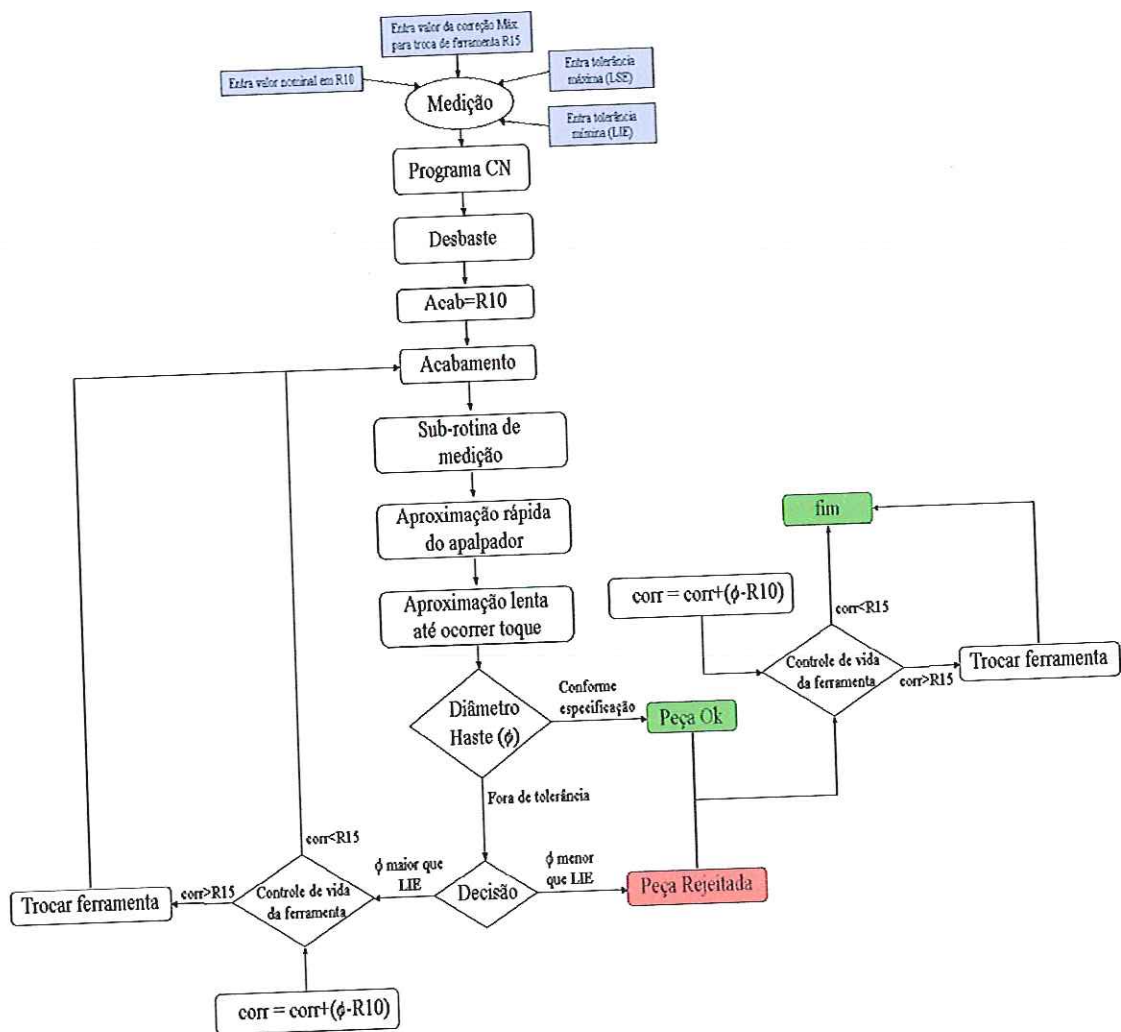


FIGURA 5.4.2 - Diagrama de bloco da função de medição e correção durante a usinagem

6 Conclusões

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 a ampla utilização, é o seu 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. A realização do presente trabalho permitiu concluir que:

- É possível a fabricação de um apalpador de baixo custo, baseado no princípio de contato elétrico, capaz de realizar medições com alta confiabilidade e precisão para a maioria das aplicações de usinagem em Tornos CNC;
- O sistema proposto mostrou-se capaz de distinguir entre dimensões de 0,010 mm com confiabilidade de 99,5%. Também mostrou uma repetibilidade de 0,03mm
- Quando aplicado para medição de peças em uma simulação de produção seriada, mostrou-se capaz de manter o controle do processo dentro dos limites de especificação de 0,1mm, mantendo valores de C_p e C_{pk} acima de 2,5, o que denota um processo altamente capaz.
- A utilização de procedimentos padrão de medição provou ser de grande utilidade para a realização das funções e geração dos programas em código CN, facilitando a programação, minimizando riscos de colisão e tornando a "tarefa medir" em rotinas simples e transparentes ao operador.

7 Sugestões para Trabalhos Futuros

Ainda existe muito a se pesquisar a sobre os apalpadores, sobretudo a respeito da exatidão dos resultados e confiabilidade de sua utilização em máquinas-ferramenta com algum tempo de uso. Vários textos falam da sua confiabilidade em máquinas-ferramenta novas, porém não identificam e muito menos padronizam procedimentos de como corrigir os valores medidos conforme a máquina se desgasta e aparecem folgas.

Não foram encontrados na literatura textos científicos tratando a fundo a respeito do uso dos apalpadores em máquinas-ferramenta, sendo seu estudo voltado quase que exclusivamente para métodos de diminuição de erros e calibração em Máquinas de Medir a Coordenadas. Como pode ser notado, muito do que foi escrito a respeito da utilização dos apalpadores no chão de fábrica veio de textos retirados de revistas comerciais voltadas à indústria metal-mecânica.

Outro ponto importante que deve ser estudado e desenvolvido está na área do programa de controle e intertravamento do apalpador que, pelo que pudemos notar durante o estudo, é muito rústico e de difícil utilização. A produção de um programa que utilize telas gráficas indicando a rotina a ser usada, passo a passo, ajudaria muito na programação do equipamento. Juntamente com isso, devem ser desenvolvidos dispositivos de segurança que protejam tanto o apalpador quanto a Máquina-ferramenta durante possíveis falhas na transmissão do sinal de "trigger", erros de "setup" ou programação.

Finalmente, o desenvolvimento de um programa gráfico tipo CAD/CAM onde seria possível simular o funcionamento das rotinas de medição juntamente com a usinagem e gerando, automaticamente, o programa CN capaz de criar a peça e inspeciona-la na própria Máquina-ferramenta.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARNONE, M. (1998). *High Performance Machining*. Cincinnati, OH.: Hanser Gardner Publications.
- BRYAN, J. (1990). International status of thermal error research, *Annals of the CIRP*, V. 39, No.2, p. 645-656.
- BUZATTO, W. T. (1999). Open CNC, *Controle & Instrumentação*, Jan. p. 70-71.
- CARPINETTI, L. R. C.(2000). *Controle da qualidade de processo*. Apostila, São Carlos: EESC-USP.
- CÉLULAS DE CARGA - CONCEITOS BÁSICOS, Disponível em: <http://www.celuladecarga.com.br>
- DEVORE, J. L. (1982) *Probability & Statistics for Engineering and the Sciences*, Brooks/Cole Publishing Company.
- DEWES, R. C.; ASPINWALL, D. K. (1997). A review of ultra high speed milling of hardened steels, *Journal of Materials Processing Technology*, V. 69, p. 1-17.
- DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH, Traunreut, Germany. Disponível em: <http://www.heidenhain.com>.
- DYNAMICS RESEARCH CORPORATION, Andover, Massachusetts, USA: Disponível em: www.drc.com/encoder/linear/lx.htm.
- FERRAZ JR, F., COELHO, R. T.(2001). Desenvolvimento de um sistema de monitoramento e supervisão para o processo de torneamento via TCP/IP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA.
- FURUKAWA, Y.; MORONUKI, N. (1987). Contact deformation of a machine tool slideway and its effect on machining accuracy. *JSME International Journal*, V. 30, p. 868-874.
- INMETRO. (1995), *Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia*.

- JEDRZEJEWSKI, J.; MODRZYCKI, W. (1997). Intelligent supervision of thermal deformations in high precision machine tools", *Proc. 32nd Int. Matador Conf*, Manchester, UK, p. 457-462.
- JURAN, J. M.; GRZYNA, F. M. (1993). *Quality analysis and planning*, McGraw-Hill.
- JURAN, J. M.; GRZYNA, F. M.; BINGHAN, R. S. (1979). *Quality Control Handbook*, New York: Mc Graw Hill.
- KANE, V. E. (1986). Process capability indices, *Journal of Quality Control*, V.18, p. 41-52.
- KIM, K. D.; CHUNG, S. C. (2001). Synthesis of the measurement system on the machine tool, *International Journal of Production Research*, V. 19, No. 11, p. 2475-2497
- KIRSCNIK, M. G. (1997). *Comando numérico computadorizado para aplicações HSM*. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE ALTA TECNOLOGIA – "Usinagem com altíssima velocidade de corte e alta precisão" Sta. Bárbara d'Oeste, UNIMEP.
- KUNZMANN, H., et al. (1993). Concept for the traceability of measurements with coordinate measuring machines, *Seventh International Precision. Engineer Seminar*, Kobe, Japan, p. 1-14.
- MICHEL, R.; FOGLIATO, F. S. (2002) Projeto econômico de cartas adaptativas para monitoramento de processos", *Gestão e Produção*, V. 9, No. 1, p. 17-31.
- MIGUEL, P. C.; KING, T.; ABACKERLI, A. (1998). A review on methods for probe performance verification, *Measurement*, V. 23, p. 15-33.
- MINTCHELL, G. A. (2000). CNC Technology another weapon in integrated manufacturing's arsenal, *Control Engineering*, V. 47, No. 12, p. 62-70.
- MODERN MACHINE SHOP ON LINE (2001). *System simplifies probing operations on VMCs*. Disponível em: <http://www.mmsonline.com>.
- MODERN MACHINE SHOP ONLINE (2001). *CNC Machine Tool In-Process Inspection*. Disponível em: <http://www.mmsonline.com>

- MODERN MACHINE SHOP ONLINE (2001). *Probing for Process Improvement*. Disponível em: <http://www.mmsonline.com>.
- MODERN MACHINE SHOP ONLINE SUPPLEMENT, Position measurement on machine tools: by linear encoder or ballscrew and rotary encoder?. Disponível em: <http://www.mmsonline.com>.
- MODERN MACHINE SHOP ONLINE, High Speed Machine Home, "Linear motors strengths. Disponível em: <http://www.heidenhain.com>.
- MONTGOMERY, D. C. (1991). *Design and Analysis of experiments*, 3. ed. John Wiley & Sons.
- MONTGOMERY, D. C. (1996) *Introduction to statistical quality control*, 3. ed. New York: John Wiley & Sons.
- MOU, J. (1997). A system approach to enhance machine tool accuracy for precision manufacturing, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, V. 37, No. 5, p. 669-685.
- NBR ISO 9004 (1994), *Gestão da qualidade e elementos do sistema de qualidade – parte 1: Diretrizes*, ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro.
- NI, J. (1997). CNC machine accuracy enhancement through real-time error compensation, *ASME Trans Journal of Manufacturing Science and Engineering*, V. 19, p. 717-724.
- PRITSCHOW, G.; ALTINTAS, Y.; JOVANE, F. (2001). Open controller architecture – Past, present and future, *Annals of the CIRP*, V. 50, No. 2.
- QS 9000. (1995). *Measurement System Analysis – Reference Manual*
- RAMESH, R; MANAN, M. A.; POO, A. N. (2000). Error compensation in machine tools-a review Part I: geometric, cutting-force induced and fixture-dependent errors, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, V. 40, p. 1235-1256.
- REID, C. (1993). Probe technology – beyond accuracy, *Proc. Of Applying Imaging and Sensing Technology to CMM Applications*, Nashville, Tennessee: SME.

- REID, C. (1995). Performance characteristics of touch trigger probes, *Quality Today. Buyers Guide*, p. 152-155.
- RENÉ J. R; JMAYER, J. R.; GHAZZAR, A.; ROSSY, O. (1996). 3D characterisation, modelling and compensation of the pre-travel of a knematic touch trigger probe, *Measurement*, V. 19, No.2, p.83-94.
- RENISHAW PLC, METROLOGY DIVISION. *Technical Literature*. New Mills, Wotton-under-Edge, Gloucestershire, UK.
- SHEN, Y; MOON, S. (1996). Error compensation of coordinate measurements in computer-integrated manufacturing using neural networks, *Journal of Materials Processing Technology*, V. 61, p. 12-17.
- SILVA L. R.(2001). *Estudo da geometria da aresta de corte de ferramentas aplicadas ao torneamento com alta velocidade de corte em superligas à base de níquel*. 197p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- SLOCUM, A. H.(1992). *Precision Machine Design*, Prentice Hall.
- Souza A. J. (1999). Desenvolvimento e implementação de funções de automação inteligentes num torno CNC utilizando técnicas de monitoramento por emissão acústica. 89p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- SOUZA, A.F; COELHO, R.T. (2003) O Caminho para atingir o estado-da-arte é o bom entendimento. *Máquinas e Metais*, São Paulo, v.40, n.455, p. 82-97.
- SPIRING, F. A. (1997) A Unifying approach to process capability indices, *Journal of Quality Technology*, V. 29, p. 49-58.
- TAGARAS G.(1998). A survey of recent developments in the design of adaptive control charts, *Journal of Quality Tecnology*, V. 30, No. 2, p. 212-231.
- TAGUCHI, G.; ELSAYED, E.; HSIANG, T. (1990). *Taguchi-Engenharia da qualidade em sistemas de produção*, McGraw-Hill.

- TOOLING & PRODUCTION (1999). *RF technology enhances touch probe.*, Oct.
- YANDAYAN, T.; BURDEKIN, M. (1997). In-process dimensional measurement and control of workpiece accuracy, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, V. 37, No. 10, p. 1423-1439.
- ZHOU, E. P.; HARRISON, D. K.; LINK, D. (1996). Effecting in-cycle measurement with pretepic CNC machine tools, *Computers in Industry*, V.28, p. 95-102.

ANEXOS

Programas CN utilizados no presente trabalho:

- "Offset" do Apalpador:

;OFFSET_DO_APALPADOR

;Inse-se em R17 o diametro do eixo padrao

;Inse-se em R18 o comprimento aproximado do apalpador (do centro do porta-ferramenta ate a ponta)

;O valor do offset será automaticamente corrigido. PS: apalpador configurado como T11

N10 G90 G53 G71 G60 G94

N20 G53 X330 Z420 F5000

;posicao segura (troca de ferramenta)

N30 T11 D1

;carrega apalpador

N40 G1 Z400 F2000

;posicao de medida do colo em Z

N50 G1 X=(R17+20) F3000

;aproximacao com o colo

N60 MEAS=1 G1 X=(R17-20) F300

;ATENCAO!!! Procura pela medicao do colo

N70 STOPRE

N80 R19=\$AC_MEA[1]

;joga 0 ou 1 em R11

N90 IF R19==0 GOTOF FALHA

;caso não receba o sinal do apalpador, mostrar msg

N100 R40=\$AA_MW[X]

;joga o valor medido em R40

N110 R18=R18+((R40-R17)/2)

;atualiza R18 com o valor real do comprimento do apalpador

N115 \$TC_DP3[11,1]=R18

;Atualiza o Valor do offset para a ferramenta 11 (apalpador)

N120 G1 X=70 F3000

;afasta apalpador do colo

N130 G53 X150 Z420 F5000

;posicao segura (troca de ferramenta)

N140 GOTOF FIM

N150 FALHA: MSG("Probe status not ready") ;mensagem de falha do sinal do apalpador

N160 FIM: M0

N170 M30

- Medição e Correção durante a Usinagem:

```
;USINA EIXO E INSPECIONA
;ferramenta de corte em T7
; Insere-se em R10 o valor do diametro nominal
; Insere-se em R11 o valor do Limite Inferior de Especificacao
; Insere-se em R12 o valor do Limite Superior de Especificacao
; Insere-se em R13 o valor do desgaste máximo permitido
N20 USINA: G90 G71 G60 G94 ;prog. abs; mm; pos. exato; f em mm/min
N30 EXTERN DECISAO(VAR INT) ;define subrotina a ser usada
N40 DEF INT REFAZER
N50 REFAZER=0
N60 G53 D0 X330 F5000 ;afasta p/ troca de ferramenta
N70 G53 D0 Z150 F5000 ;afasta p/ troca de ferramenta
N80 DESBASTE: T7 D1 ;carrega ferramenta
N90 M4 S800 ;liga eixo arvore
N100 G55 ;off-set
N110 G0 Z1.0
N120 G0 X28
N130 G1 X26 Z3 F500 ;POSICIONA P/ USINAGEM
N150 G1 x26 Z-35 F100 ;Desbaste
N160 G1 x50 f500 ;afasta ferramenta
N170 G1 Z1.0 F500
N180 ACABA: T7 D1
N190 G1 X=R10 F500 ;posiciona para acabamentoo
N200 G1 X=R10 Z-35 F50 ;acaba
N210 G1 X50 F500 ;afasta ferramenta
N220 G1 Z0 F500 ;afasta ferramenta
N230 MEDE ;chama subrotina de medicao
N240 DECISAO(REFAZER) ;chama subrotida de comparacao e deicsao
N250 IF (REFAZER==1) GOTOB ACABA ;re-acabamento
N260 G53 D0 X330 F5000 ;afasta p/ troca de ferramenta
N270 G53 D0 Z150 F5000 ;afasta p/ troca de ferramenta
N280 M0
N290 M30
```


- Medição e Correção durante a Usinagem: Sub-rotina de medição

```
; Sub-rotina MEDE
;Apalpador em T11
N102 PROC MEDE (REAL POSICAO) SAVE ;DISPLOF SBLOF
N202 POSICAO=$AA_IW[Z] ;salva posicao do eixo Z na variavel
N302 M5 ;parada do eixo arvore
N402 M9 ;desliga fluido refrigerante
N502 G90 G71 G60 G94 ;prog. abs; mm; pos. exato; f em mm/min
N602 G53 D0 X330 F5000 ;afasta p/ troca de ferramenta
N702 G53 D0 Z420 F5000 ;afasta p/ troca de ferramenta
N802 T11 D1 ;carrega apalpador
N902 G1 Z=POSICAO F5000 ;le posicao em z anterior a troca
N1002 MEDIR:
N1102 G1 X=(R10+6) F1000 ;aproximacao rapida (diametro NOM. em R10)
N1202 MEAS=1 G1 X=(R10-0.5) F200 ;medicao do diametro
N1302 STOPRE ;trava medicao
N1402 R17=$AA_MW[X] ;grava em R17 o diametro medido
N1502 R16=$AC_MEA[1] ;flag de falha em R16
N1602 IF R16==0 GOTOF FALHA ;if de falha
N1702 G1 X=(R10+20) F1000 ;afasta apalpador
N1802 IF R17>(R10+1) GOTOB MEDIR ;repete medicao em caso de grande discrepancia
N1812 G53 D0 X330 Z420 F5000 ;posicao de troca de ferramenta
N1952 M0
N1902 RET
N2002 G1 X=(R10+20) F1000 ;afasta apalpador
N2102 FALHA: MSG("Probe status not ready")
N2202 M0
N2302 RET
```



- Medição e Correção durante a Usinagem: Sub-rotina de decisão

; Sub-rotina DECISAO

```
N101 PROC DECISAO (VAR INT REFAZER) SAVE ;DISPLOF SBLOF
N201 R18=R18+((R17-R10)/2) ;Adiciona correção de desgaste
N301 $TC_DP12[7,1]=(R18) ;Atualiza desgaste para ferramenta T7 D1
N401 IF R18<=R15 GOTOF FERROK ;Desgaste tolerado
N501 MSG("DESGASTE ACENTUADO: TROCAR PASTILHA")
N601 M0 ;parada para troca de pastilha
N701 $TC_DP12[7,1]=0 ;zera desgaste da ferramenta 7. (nova pastilha)
N711 R18=0 ;zera parametro de controle
N801 FERROK:
N901 IF R17<R11 GOTOF REJEITA ;Peca menor que LIE
N1001 IF R17<=R12 GOTOF ACEITA ;Peca OK
N1101 IF R17>R12 GOTOF ACABA ;Peca maior que LSE
N1201 REJEITA: MSG("PECA REJEITADA: DIMENSIONAL ABAIXO DO MINIMO ESPECIFICADO")
N1301 REFAZER=0
N1401 M0
N1501 RET
N1601 ACEITA: MSG("PECA OK")
N1701 REFAZER=0
N1801 M0
N1901 RET
N2001 ACABA: MSG("MAIS UM PASSE DE ACABAMENTO")
N2101 REFAZER=1
N2201 M0
N2301 RET
```