

Validação de processos de medição por coordenadas em operações de controle da qualidade

Ademir Linhares de Oliveira

**Universidade Federal de Santa Catarina
Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial
Departamento de Engenharia Mecânica
Labmetro**

Trabalho apresentado como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em METROLOGIA na Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Santa Catarina, Brasil

Florianópolis, 03 de outubro de 2003

Validação de processos de medição por coordenadas em operações de controle da qualidade

Ademir Linhares de Oliveira

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de
Mestre em METROLOGIA
e aprovada na sua forma final pelo
Programa de Pós Graduação em Metrologia Científica e Industrial

Prof. André Roberto de Sousa, Dr. Eng.
Orientador

Prof. Marco Antonio Martins Cavaco, Ph.D.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior, Dr. Eng.

Prof. Celso Luiz Nickel Veiga, Dr. Eng.

Prof. Gustavo Daniel Donatelli, Dr. Eng.

Resumo

Este trabalho apresenta um método de validação de processos de medição em máquinas de medir por coordenadas com base em ensaios experimentais. Estes ensaios abrangem os efeitos combinados das diversas fontes de incerteza sobre o processo de medição. São determinadas as incertezas dos parâmetros de inspeção de um produto controlado em uma máquina de medir por coordenadas. A comparação das incertezas obtidas com as incertezas máximas estabelecidas pela indústria para este produto permite validar em um primeiro momento o processo de medição. Este trabalho também aborda a necessidade de uma verificação periódica do processo de medição para garantir sua estabilidade ao longo do tempo. O método de avaliação das incertezas, baseado na norma ISO 15530-3, foi aplicado em dois processos de medição, cujos dados, análises, dificuldades encontradas e conclusões são apresentados em detalhes. Também foram realizados um ensaio de verificação periódica de uma máquina de medir por coordenadas com um “padrão de inspeção rápida” e um ensaio comparativo da eficiência operacional de 3 programas CNCs, elaborados com diferentes abordagens para uma mesma finalidade. Este trabalho considera os aspectos técnicos importantes para a validação de um processo de medição por coordenadas e, além disso, aborda recomendações de onde atuar quando for necessário baixar suas incertezas de medição ou otimizá-lo operacionalmente.

Abstract

This work presents a method for the validation of measurement processes that use coordinate measuring machines for the products quality control, based on experimental tests in the machine. These tests include the combined effects of several influence quantities on the measurement process. The uncertainties are determined for the inspection parameters of a product controlled in a coordinate measuring machine. The comparison of the obtained uncertainties with the maximum uncertainties established by the industry for this product allows to validate in a first moment the measurement process. This work also includes the need of a periodic verification of the measurement process to guarantee its stability along the time. The uncertainties evaluation method, based on the norm ISO 15530-3, was applied in two measurement processes, whose data, analysis, obtained difficulties and conclusions are described in details. There were also accomplished a periodic verification test of a coordinate measuring machine with a "fast inspection standard" and a comparative study of the operational efficiency of 3 CNC programs, elaborated with different approaches for a same measurement task. This work considers the important technical aspects for a coordinate measurement process validation and, besides that, it gives recommendations about what has to be done when it is necessary to reduce their measurement uncertainties or optimize its operational efficiency.

Este trabalho é dedicado
à minha esposa Sheila, ao meu filho Gabriel e aos meus pais.

Agradecimentos

- À UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina, por ter sido o palco da realização deste trabalho.
- Ao curso de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, pela capacitação de alto nível oferecida.
- À Fundação CERTI, por propiciar o conhecimento técnico e experiência necessária para a realização deste trabalho.
- À empresa Embraco, pelo interesse na realização dos trabalhos.
- Ao professor André Roberto de Sousa, pela dedicação e empenho na orientação dos trabalhos.
- Ao Dr. Eugen Trapet, pelos esclarecimentos e discussões técnicas em pontos importantes do trabalho.
- Ao professor Celso Veiga, pela minha introdução no mundo da Medição por Coordenadas.
- A todos os colegas, professores e funcionários da Fundação CERTI e LABMETRO que de alguma forma contribuíram para o sucesso deste trabalho.

Sumário

Aprovação	ii
Resumo	iii
Abstract	iv
Dedicatória	v
Agradecimentos	vi
CAPÍTULO 1	
Introdução	1
1.1 Os processos de medição por coordenadas no controle dimensional da produção seriada.....	2
1.2 A configuração e manutenção de processos de medição confiáveis e eficientes.....	4
1.3 Um método para validar os processos de medição por coordenadas considerando aspectos metrológicos e operacionais.....	6
CAPÍTULO 2	
Potencialidades da tecnologia de medição por coordenadas	9
2.1 Necessidade de medições na manufatura atual.....	9
2.2 A tecnologia de medição por coordenadas na indústria.....	12
2.3 Requisitos para o aproveitamento das potencialidades da tecnologia.....	17
CAPÍTULO 3	
Incerteza dos processos de medição por coordenadas	19
3.1 A variabilidade de processos e os fatores de influência.....	19
3.2 Gestão de processos.....	23
3.3 Fontes de incerteza em um processo de medição por coordenadas.....	24
3.3.1 A máquina de medir por coordenadas.....	25
3.3.2 O ambiente de instalação da MMC.....	29
3.3.3 A peça a medir.....	30
	33

3.3.4	O operador e a estratégia de medição.....	
3.4	Efeito do processo de medição na capacidade do processo produtivo.....	36
3.4.1	Efeito da parcela aleatória do processo de medição sobre o índice de capacidade Cp do processo produtivo.....	39
3.4.2	Efeito das parcelas aleatória e sistemática do processo de medição sobre o índice de capacidade Cpk do processo produtivo.....	40
3.4.3	Efeito das parcelas aleatória e sistemática do processo de medição sobre a fração não conforme observada do processo produtivo.....	43
3.4.4	Efeito do processo de medição sobre a probabilidade de aprovação de uma peça sob inspeção.....	45
3.4.5	Histograma do efeito do processo de medição sobre o processo produtivo.....	49
3.5	Consideração da Incerteza de Medição na Faixa de Conformidade de Produtos pela ISO 14253-1.....	51
3.6	Ensaio de verificação de performance e calibração de MMCs para tarefas específicas de medição.....	52
3.6.1	Ensaio de verificação de performance de MMCs.....	52
3.6.2	Calibração de MMCs para tarefas específicas de medição.....	53
3.7	Conclusões gerais com relação aos efeitos do processo de medição sobre o a observação do processo produtivo.....	55

CAPÍTULO 4

	Um método para validação de processos de medição por coordenadas em operações de controle da qualidade.....	58
4.1	Área A – Avaliação das incertezas de processos de medição por coordenadas.....	61
4.1.1	Definição e documentação do PMC.....	61
4.1.2	Seleção e calibração das peças a calibrar.....	62
4.1.3	Definição das incertezas máximas.....	64
4.1.4	Execução do ensaio de obtenção das incertezas.....	66
4.1.5	Considerações quanto à garantia da rastreabilidade.....	69
4.2	Área B – Tomada de decisões e ações de melhoria no PMC.....	71
4.2.1	Ação no PMC para reduzir as incertezas.....	71
4.2.2	Análise de otimização operacional.....	76
4.3	Área C – Implantação das verificações periódicas de estabilidade.....	80
4.3.1	Verificação da estabilidade de processos de medição por coordenadas....	80
4.3.2	Verificação periódica da máquina de medir por coordenadas.....	82
4.3.3	Avaliação da estabilidade e capacidade de medição.....	84
4.3.4	Ajuste da MMC e ações de melhoria da estabilidade do PMC.....	85
		86

4.3.5 Monitoramento contínuo para a MMC e PMC.....	
CAPÍTULO 5	
Aplicações Realizadas do Método Proposto.....	87
5.1 Avaliação das incertezas de medição em dois processos de medição por coordenadas.....	88
5.2 Processo de medição 1 (DEA Mistral).....	91
5.2.1 Aquisição e análise dos dados do ensaio do PMC1.....	91
5.2.2 Processamento e análise dos resultados do ensaio do PMC1.....	96
5.2.3 Determinação das incertezas de medição do ensaio do PMC1.....	98
5.3 Processo de medição 2 (Zeiss Eclipse).....	101
5.3.1 Aquisição e análise dos dados do ensaio do PMC2.....	101
5.3.2 Processamento e análise dos resultados do ensaio do PMC2.....	103
5.3.3 Determinação das incertezas de medição do ensaio do PMC2.....	105
5.4 Considerações e conclusões a respeito da aplicação do método nos dois processos de medição por coordenadas avaliados.....	107
5.5 Verificação periódica de uma MMC com um padrão de inspeção rápida.....	111
5.5.1 Descrição do ensaio de verificação de estabilidade.....	112
5.5.2 Aquisição e análise dos dados.....	114
5.5.3 Conclusões do ensaio de estabilidade realizado.....	121
5.6 Otimização Operacional de um Processo de Medição por Coordenadas.....	125
5.6.1 Descrição do ensaio de otimização operacional.....	126
5.6.2 Resultados obtidos e conclusões da otimização operacional realizada.....	129
CAPÍTULO 6	
Considerações Finais, Conclusões e Recomendações.....	132
6.1 Considerações quanto às incertezas de medição.....	132
6.2 Considerações quanto a outros métodos de avaliação de meios de medição – Análise comparativa.....	134
6.3 Conclusões.....	137
6.4 Recomendações de trabalhos futuros.....	140

ANEXOS

A1 Terminologia e siglas empregadas.....	141
A1.1 Termos do VIM.....	142
A1.2 Termos Técnicos Específicos.....	144
A1.3 Lista de Siglas.....	145
A2 Dados Brutos das peças 1, 2 e 3 do PMC1.....	146
A3 Dados Brutos das peças 1, 2 e 3 do PMC2.....	147
A4 Diário de bordo do ensaio de estabilidade da MMC.....	148
Referências Bibliográficas.....	149

Capítulo 1

Introdução

A Tecnologia de Medição por Coordenadas é considerada um dos recursos mais poderosos que a área de Garantia da Qualidade das empresas possui para controlar seus produtos e melhorar a performance dos processos, reduzindo as perdas com refugos e peças retrabalhadas. Devido às grandes potencialidades inerentes da Medição por Coordenadas, como alta flexibilidade, automatização e informatização, esta tecnologia tem sido utilizada com uma frequência cada vez maior para o controle dimensional de peças mecânicas na produção seriada.

No entanto, em muitas empresas percebe-se um uso inadequado da tecnologia de medição por coordenadas, ocorrendo tanto nos aspectos metrológicos quanto operacionais. Sob o aspecto metrológico, verifica-se muitas vezes o emprego de procedimentos de medição sem os devidos critérios, refletindo-se, em muitos casos, em incertezas de medição incompatíveis com as tolerâncias das peças a controlar, podendo levar a erros de classificação e diagnósticos incorretos de produtos e processos. Sob o aspecto operacional, verifica-se que muitos processos de medição são ineficientes por despenderem tempos de medição demasiadamente longos, subutilizando o potencial da máquina de medir por coordenadas e o investimento realizado nesta tecnologia.

Esses problemas, na maior parte das vezes, são parcial ou totalmente desconhecidos pelos usuários. O desconhecimento das incertezas dos processos de medição por coordenadas e de mecanismos de maximização da produtividade da máquina de medir normalmente aumentam em muito os problemas internos nas empresas. É tão comum observar processos de medição por coordenadas operando sob condições metrológicas inadequadas como observar processos de medição por coordenadas operando sob condições improdutivas.

Uma utilização mais confiável e eficiente da medição por coordenadas nas indústrias seria possível se houvesse um método de fácil aplicação que permitisse ao próprio usuário da máquina de medir avaliar as incertezas de seus processos de medição e, em função dos resultados encontrados, ser orientado quanto a ações técnicas para reduzir as incertezas e também a otimizar operacionalmente os seus procedimentos de medição. O desenvolvimento de um método passível de ser aplicada nas indústrias e com o objetivo de avaliar e validar processos de medição por coordenadas foi o enfoque desta dissertação de mestrado.

1.1 Os Processos de Medição por Coordenadas no Controle Dimensional da Produção Seriada

A abordagem da medição como um processo não é recente, mas ainda não está difundida nos ambientes metrológicos industriais e acadêmicos. Alguns documentos de referência, como o *Measurement Systems Analysis* (Análise de Sistemas de Medição – MSA) [1] e artigos técnicos publicados [2, 3] deixam explícitas as vantagens da abordagem da atividade de medição como um processo, cujo resultado são números que representam as propriedades de um

objeto medido. Assim como os processos de fabricação devem gerar produtos de boa qualidade, os processos de medição devem gerar números com boa confiabilidade metrológica, com um nível de incerteza tal que não provoquem falsas interpretações a respeito do processo onde a medição é realizada. Esse enfoque permite uma visão mais abrangente da medição, observando-se o conjunto de fatores que provocam erros e incertezas de medição, sem limitar-se apenas ao sistema de medição. Permite, ainda, que ferramentas estatísticas consagradas utilizadas na análise de processos de produção, como o Controle Estatístico de Processos (CEP) [4], sejam também aplicadas nos processos de medição.

Na produção seriada, os processos de medição por coordenadas possuem uma função vital no controle de produtos e processos. Ao optarem e investirem nessa tecnologia, as empresas buscam elevar seu nível de qualidade, pois algumas características da medição por coordenadas, como a alta velocidade de medição, os recursos quase ilimitados de medição geométrica e a baixa incerteza das máquinas de medir, permitem às empresas um controle de um número maior de peças, com mais profundidade e de forma confiável.

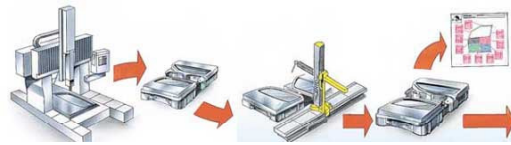
Com essas potencialidades, a medição por coordenadas é largamente utilizada ao longo de todo o ciclo produtivo de uma peça. Desde o desenvolvimento do produto, passando pelo desenvolvimento dos processos até o controle da produção seriada, a medição por coordenadas permite vantagens que nenhuma outra técnica de medição oferece (figura 1.1).

Desenvolvimento do Produto

- Análise de protótipos
- Investigação de problemas
- Certificação de modelo

**Desenvolvimento do Processo**

- Aprovação de ferramental
- Aprovação de meios auxiliares
- Análise de primeiras amostras
- Ajuste / Liberação do Processo

**Produção em série**

- Aprovação de fornecedores
- Monitoramento de processos
- Inspeção de componentes
- Análise de meios auxiliares

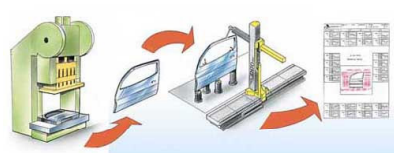


Figura 1.1 - Presença da medição por coordenadas no ciclo de vida do produto [5]

A medição por coordenadas tem dupla responsabilidade na inspeção de componentes e monitoramento de processos: identificar peças não conformes, não deixando que estas peças sigam adiante no processo, e gerar dados que permitam diagnosticar e otimizar o processo produtivo, mantendo-o sob controle. Os dados gerados nas medições são utilizados, ainda, para otimizar o projeto do produto e orientar futuros desenvolvimentos. Para fazer tudo isso com sucesso, é necessário que o processo de medição por coordenadas seja eficiente e confiável.

1.2 A Configuração e Manutenção de Processos de Medição Confiáveis e Eficientes

Um processo de medição por coordenadas envolve a participação de vários fatores que, em maior ou menor grau, são fontes de incerteza sobre os

resultados da medição. A máquina de medir, o ambiente, o operador, a estratégia de medição e a peça possuem imperfeições que acabam por se manifestar nos resultados das medições, provocando erros de medição.

Para que estes erros se mantenham dentro de limites bem definidos, que não prejudiquem a confiabilidade do controle dimensional, o processo de medição precisa ser planejado e configurado de forma criteriosa e, uma vez estabelecido, demonstrar ser capaz de fornecer resultados confiáveis ao longo do tempo. A configuração deste processo deve levar em conta também a produtividade nas operações de medição, de forma a maximizar o tempo útil da máquina de medir.

Infelizmente, com muita frequência em situações reais de produção, esses aspectos apresentam-se deficientes. O desconhecimento das fontes de incerteza sobre os resultados de medição e o desconhecimento de estratégias consistentes que minimizem a influência dessas grandezas, faz com que muitos processos de medição na produção estejam operando sob condições inadequadas, gerando dados sem confiabilidade e/ou subutilizando a capacidade da máquina de medir. Esse desconhecimento também se estende aos métodos para verificar a confiabilidade dos processos de medição. A falta de critérios técnicos leva à configuração de processos não confiáveis e a falta de métodos eficazes de avaliação dos processos perpetua essa baixa confiabilidade metrológica.

Paradoxalmente, percebe-se que boa parte desses problemas é gerada pela própria sofisticação da tecnologia de medição por coordenadas. Essa sofisticação gera certos mitos no uso desta tecnologia. O principal deles faz muitos usuários acreditarem que a incerteza dos resultados de medição é dada basicamente pelo equipamento, e que é sempre baixa. A incerteza de um processo de medição por coordenadas em condições reais de medição e a estabilidade deste processo ao longo do tempo são normalmente aspectos desconhecidos por parte dos usuários das máquinas de medir.

1.3 Um Método para Validar os Processos de Medição por Coordenadas Considerando Aspectos Metrológicos e Operacionais

Diante do contexto descrito anteriormente decidiu-se pelo desenvolvimento de um método com intuito de orientar usuários de medição por coordenadas na busca de estabelecer e validar processos de medição por coordenadas. O método contempla ações operacionais e metrológicas e pode ser vista de forma resumida na figura 1.2, onde estão indicadas as macro-ações necessárias, que serão detalhadas no decorrer do trabalho.

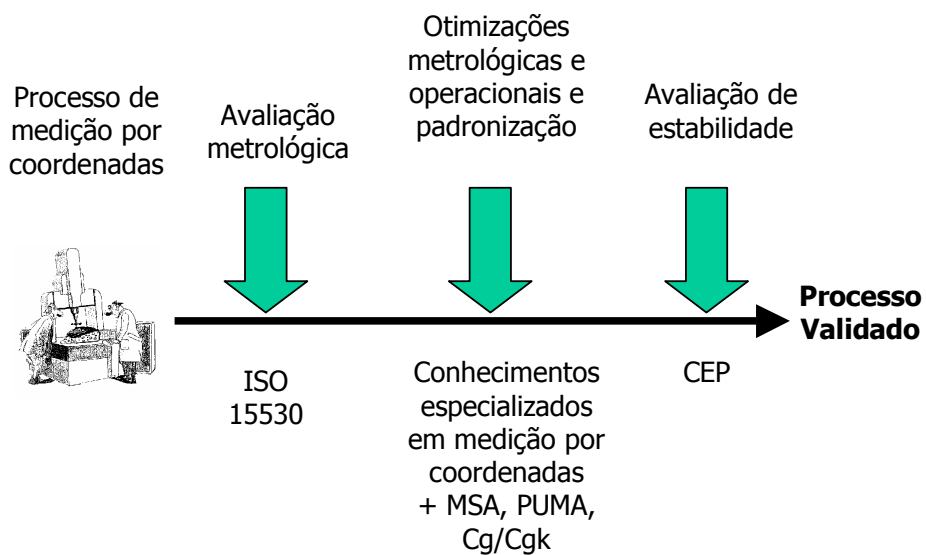


Figura 1.2 - Visão geral do método de validação de processos de medição por coordenadas

No desenvolvimento do método procurou-se manter a possibilidade de integrar conceitos e procedimentos de várias sistemáticas de avaliação de processos de medição e normas de garantia da qualidade já existentes. Por exemplo, na etapa de otimização metrológica do processo de medição, além dos conhecimentos

especializados em medição por coordenadas, visando uma ação mais imediata em possíveis fontes de incerteza predominantes, manteve-se a possibilidade de se aplicar ensaios previstos no MSA [1], estudos de capacidade de meios de medição (índices C_g e C_{gk}) [6, 7, 8] ou a abordagem de adequação do processo de medição à incerteza máxima estabelecida de acordo com o PUMA – *Procedure for Uncertainty Management* [9]. Na etapa de avaliação da estabilidade ao longo do tempo, utilizou-se a abordagem com cartas de controle prevista em estudos de CEP – Controle Estatístico de Processos [4]. Esse conjunto de procedimentos permitiu fundamentar uma seqüência de ações e operações de análise, estabelecendo um ciclo decisório objetivo para a avaliação, otimização e padronização de processos de medição.

Faz parte também do método toda a orientação técnica específica da medição por coordenadas, de forma a auxiliar o usuário a estabelecer procedimentos de medição consistentes sob os aspectos metrológico e operacional. Dessa forma, a sistemática de atuação proposta evita que o método possua um caráter genérico apenas de sistematização de ações, como ocorre com a grande maioria de sistemáticas de avaliação, por exemplo o GUM [10], PUMA [9], MSA, etc. Embora estes procedimentos sejam perfeitamente válidos, as particularidades da medição por coordenadas são muitas e requerem que sejam desenvolvidos procedimentos mais específicos para análise e ações nos processos de medição.

No desenvolvimento e avaliação do método procurou-se estabelecer uma seqüência clara de ações e empregar ferramentas de análise consagradas, também com o objetivo de tornar o processo prático de aplicação em ambiente industrial. Os resultados do método devem ser objetivos e conclusivos, para orientar o usuário no estabelecimento de processos de medição confiáveis e eficientes.

Para permitir uma melhor compreensão dos assuntos abordados neste trabalho, resumiu-se abaixo a estrutura da dissertação conforme os capítulos:

- No capítulo 2 são detalhados os aspectos da medição por coordenadas inserida em processos de controle de qualidade na produção seriada;
- No capítulo 3 aprofunda-se nas questões relacionadas com as incertezas de medição de processos de medição por coordenadas e a sua influência na conformidade dimensional das peças e no processo;
- No capítulo 4 é apresentado em detalhes o método de validação de processos de medição por coordenadas proposto;
- No capítulo 5 são apresentadas as aplicações práticas realizadas com o objetivo de se avaliar o método, empregando-se vários estudos de caso;
- O capítulo 6 traz as considerações sobre o trabalho e as suas conclusões.

CAPÍTULO 2

Potencialidades da Tecnologia de Medição por Coordenadas

2.1 Necessidade de Medições na Manufatura Atual

Os componentes mecânicos possuem especificações de tolerâncias geométricas (dimensão, forma e posição) que irão definir a faixa de aprovação para as respectivas características, de tal modo que os requisitos funcionais e tecnológicos do produto sejam atendidos [11]. O atendimento a estas especificações (busca da conformidade geométrica) só é passível de demonstração e verificação através da utilização de processos de medição adequados [12].

Em um ambiente produtivo altamente competitivo e globalizado, a garantia da conformidade geométrica dos produtos é condição indispensável para assegurar a intercambiabilidade e funcionalidade dos produtos. O desafio que se coloca aos

sistemas produtivos é que produzam peças cada vez mais exatas, com formas geométricas cada vez mais complexas, a custos cada vez menores. O atendimento a estas necessidades requer sistemas de produção rápidos, capazes e estáveis ao longo do tempo. Filosofias de gestão presentes em muitas empresas, como o 6 sigma, especificam níveis de qualidade raramente antes imaginados. Perdas com refugo e retrabalho são minimizadas ao máximo, de forma a aumentar a rentabilidade dos processos.

Os processos de medição exercem uma grande responsabilidade nesse contexto, pois, além de inspecionar a conformidade geométrica das peças produzidas, suas informações servem para conhecer e, por conseguinte, corrigir desvios e variações no comportamento do processo de fabricação (realimentação do processo de fabricação) visualizado na figura 2.1. Dessa forma, o processo de medição não só permite classificar peças dentro e fora das especificações, mas também permite melhorar o desempenho dos processos de fabricação [13].

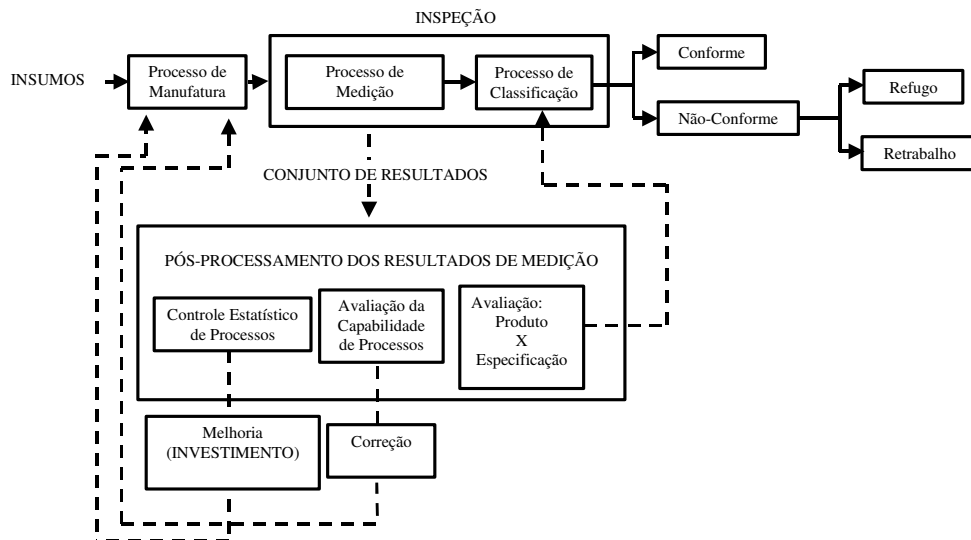


Figura 2.1 – Processo de inspeção no controle da qualidade na indústria [14]

Dada a importância, é fundamental que os processos de medição sejam capazes de realizar medições confiáveis, para evitar erros na classificação das peças e também evitar que o processo de fabricação seja realimentado com informações inseguras que possam representar reprovações posteriores. Processos de medição com incerteza de medição incompatível com as tolerâncias das peças são geradores de perdas, na medida em que provocam problemas tanto na classificação das peças como nas informações passadas para o ajuste dos processos.

A figura 2.2 apresenta as principais conseqüências quando se aprova peças não conformes e quando se rejeita peças conformes.

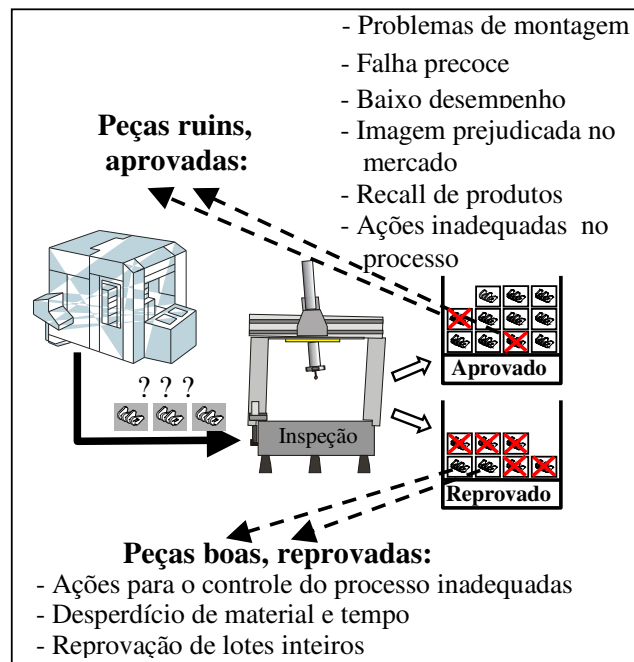


Figura 2.2 – Conseqüências dos erros de classificação de peças [15]

2.2 A Tecnologia de Medição por Coordenadas na Indústria

No setor industrial metal-mecânico, a utilização de MMCs no controle de processos produtivos cresceu de forma expressiva no Brasil na última década [16]. No Brasil, não são raros os fabricantes de máquinas que divulgaram crescimentos de 20% nas vendas de 1998 para 1999 [17].

Os motivos que têm levado ao grande aumento da utilização de MMCs em ambientes industriais são potencialidades como:

- Elevado grau de automatização e informatização das medições, possibilitando a programação de rotinas de medição, automação do processamento, armazenagem dos resultados e emissão de relatórios de medição;
- Programação de medições *off-line* (fora da máquina);
- Flexibilidade, versatilidade, universalidade e agilidade no controle dimensional e geométrico de peças;
- Integração do controle de qualidade à produção automatizada com grande flexibilidade;
- Medição de geometrias complexas;
- Possibilidade do uso de acessórios de medição como mesa rotativa e magazine para troca de apalpadores.

Além destas suas potencialidades, pode-se destacar algumas vantagens da medição por coordenadas em relação aos métodos tradicionais de medição (figura 2.3).

Medição Convencional	Medição por Coordenadas
Alinhamento manual e demorado da peça	Não é necessário o alinhamento manual da peça
Instrumentos dedicados e pouco flexíveis	Flexibilidade e adaptação simples às tarefas de medição
Medições obtidas por medidas materializadas	Medições obtidas por meio de modelos matemáticos
Determinação separada de dimensões, desvios de forma e posição, utilizando diferentes instrumentos de medição	Determinação conjunta de dimensão, forma e posição, na maior parte das vezes, em uma única montagem
Dificuldade de integração em ambientes automatizados	Possibilidade de integração em ambientes com automação flexível
Menor confiabilidade em tarefas complexas	Maior confiabilidade em tarefas complexas
Maior tempo de inspeção em grande quantidade de peças complexas	Menor tempo de inspeção em grande quantidade de peças (possibilidade de programação CNC)
Maior custo de inspeção de peças com geometrias complexas	Menor custo de inspeção de peças com geometrias complexas
Menor custo de investimento	Maior custo de investimento
Menor qualificação do operador	Maior qualificação do operador

Figura 2.3 – Comparação da medição por coordenadas com a medição convencional [18, 19]

Essa disseminação faz com que o controle de processos e a garantia da qualidade em modernas operações da manufatura dependam cada vez mais da performance das máquinas de medir por coordenadas. Nos últimos 20 anos, as MMCs têm substituído tradicionais métodos de inspeção e reduzido o tempo e as exigências de capacitação humana, pelo fato da medição por coordenadas permitir o controle de diversos mensurandos em um único equipamento.

As MMCs não somente possuem a capacidade de inspecionar peças com geometrias comuns, mas também peças com geometrias complexas como engrenagens, eixos de cames, juntas homocinéticas, aerofólios, peças com superfícies de forma livre e muitas outras (figura 2.4). O controle das características geométricas destas peças, por sistemas de medição dedicados, vem se tornando incapaz de atender aos novos requisitos que surgiram devido

às novas tecnologias de manufatura, como rapidez, flexibilidade e automação.



Figura 2.4 – Exemplos de peças medidas em máquinas de medir por coordenadas [20]

As potencialidades matemáticas dos softwares de medição atuais têm permitido análises dimensionais praticamente ilimitadas, com recursos poderosos para processamento e apresentação de resultados. Relatórios estatísticos, processamentos gráficos e numéricos permitem gerar resultados muito mais conclusivos sobre as peças, permitindo a tomada rápida de ações para a melhoria de processos (figura 2.5).



Figura 2.5 – Algumas potencialidades dos softwares de medição atuais [21]

A informatização da tecnologia permite a sua total integração dentro do sistema produtivo das empresas, com outros sistemas computadorizados. A integração com sistemas CAD permite configurar, simular e programar de forma rápida e segura a medição, possibilitando o estabelecimento de seqüências de medição otimizadas (figura 2.6).

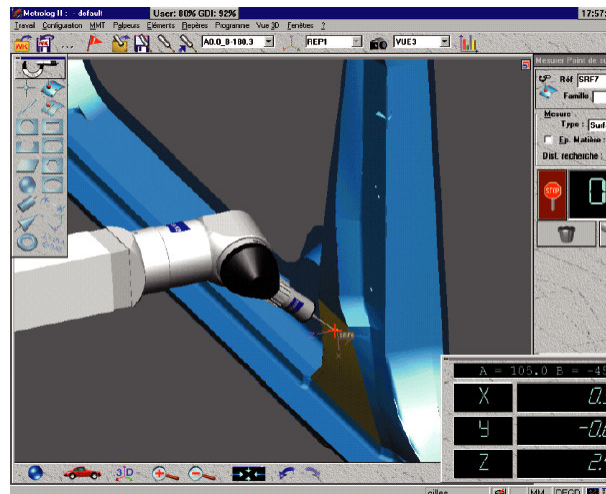


Figura 2.6 - Programação e simulação da medição sobre modelo CAD da peça
[22]

A tecnologia presente nas máquinas de medir permite um alto nível de automatização e exatidão na execução de seqüências de medição, possibilitando ações como troca automática de apalpadores, correção automática de influências do ambiente e da própria máquina, rotinas condicionais de medição, etc. Certos equipamentos permitem uma integração com outros meios da produção, como máquinas-ferramenta, para permitir correções automáticas do processo produtivo a partir dos resultados das medições (figura 2.7).

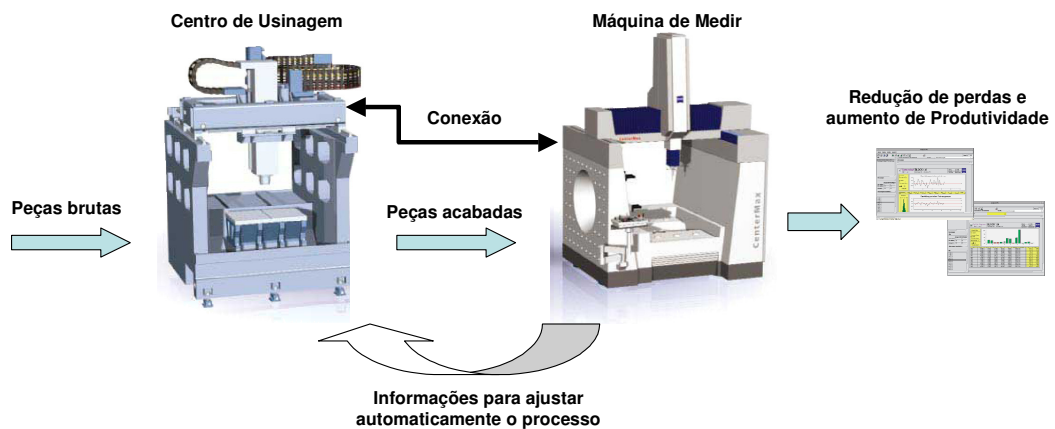


Figura 2.7 – Integração da máquina de medir por coordenadas no ambiente de manufatura [5]

A integração da medição por coordenadas permite que os resultados das medições sejam enviados para centrais CEP, engenharia da qualidade e outros setores que monitoram o desempenho da produção, possibilitando tomadas de decisão mais ágeis e confiáveis.

2.3 REQUISITOS PARA O APROVEITAMENTO DAS POTENCIALIDADES DA TECNOLOGIA

A aquisição dessa tecnologia requer investimentos significativos por parte das empresas, além da compra da máquina, como a preparação do ambiente, treinamento de operadores, etc. Para que o investimento tenha o retorno esperado, é preciso que os benefícios com a melhoria da qualidade dos produtos e redução de perdas em processos superem os investimentos. Em outras palavras, o aumento no custo de avaliação da qualidade precisa ser compensado pela redução de custos da não qualidade e, para que isso ocorra, é necessário gerenciar e utilizar de forma adequada a medição por coordenadas. Não são raras as situações de empresas que não conseguiram ter retorno com a utilização da tecnologia, apesar de todos os seus recursos e potencialidades.

O uso de máquinas de medir por coordenadas para o controle do processo requer uma atenção especial. Muitas vezes o usuário desconhece alguns pré-requisitos básicos para uma medição confiável por meio desta tecnologia, como por exemplo:

- Entendimento e uso adequado das funções do software da máquina de medir;
- Capacitação operacional e metrológica dos operadores da máquina, como subsídio para minimizar erros de medição;
- Definição de estratégias adequadas de medição, tais como número e distribuição de pontos, direção de apalpação, velocidade de medição, etc.;
- Seleção adequada dos apalpadores (diâmetro do sensor, comprimento e espessura da haste);

- Qualificação prévia dos palpadores;
- Controle da temperatura ambiente e das peças a medir;
- Máquina instalada em local apropriado e bem ajustada pelo fabricante;
- Dispositivos adequados de fixação das peças na máquina (sem deformar as peças e com boa repetitividade da fixação);
- Alinhamento adequado da peça pelo programa de medição, levando-se em conta elementos funcionais e de referências da peça;
- Interpretação correta dos desenhos de medição;
- Conhecimento da peça e dos processos de fabricação envolvidos;
- Manutenção e verificação periódica da máquina.

A desconsideração destes pré-requisitos impacta diretamente nas possíveis vantagens que o uso da tecnologia de medição por coordenadas potencializa. Para evitar isto, é necessário ter conhecimento dos fatores que influem no processo de medição, como será visto no capítulo 3, e consciência das conseqüências da incerteza de medição nos processos de medição por coordenadas.

Capítulo 3

Incerteza dos Processos de Medição por Coordenadas

3.1 A variabilidade de Processos e os Fatores de Influência

Um processo produtivo está sujeito a uma série de fatores de influência que definem a sua variabilidade. As causas dessas variações geralmente estão relacionadas aos fatores de manufatura: matéria-prima, máquina (inclusive manutenção), medida, ambiente, mão-de-obra (operador) e método (figura 3.1) [23]. O controle dos fatores de influência considerados mais importantes é fundamental para a manutenção da qualidade dos produtos do processo.

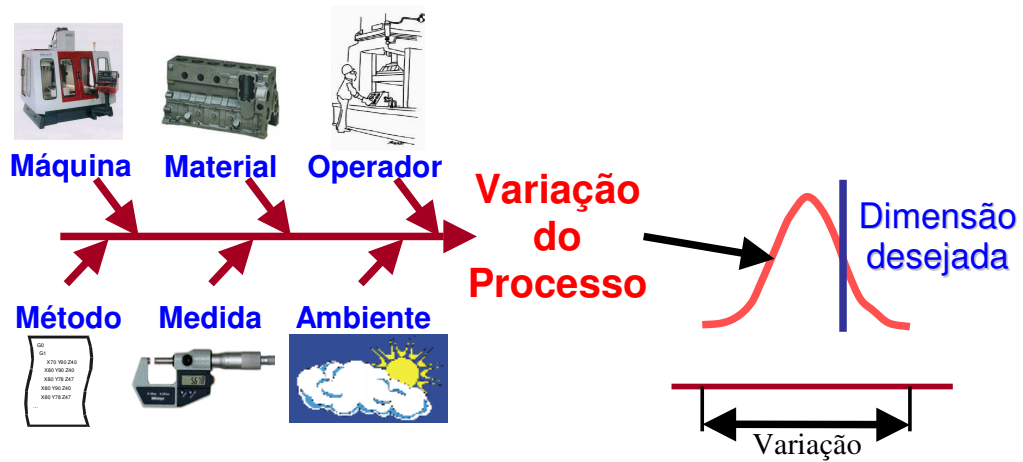


Figura 3.1 : Fatores de influência em um processo produtivo [16]

De forma análoga, fontes de incerteza agem sobre um processo de medição. A superposição de todas as fontes de incerteza define a variabilidade total do processo de medição (figura 3.2).

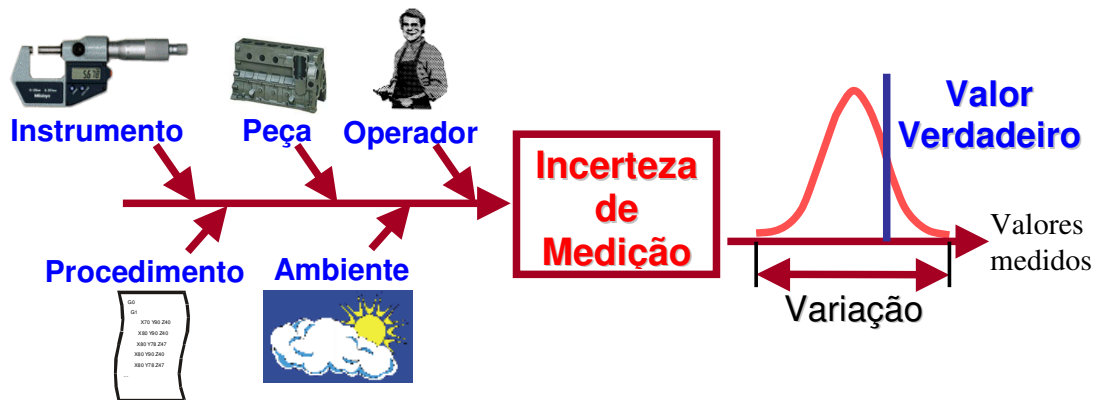


Figura 3.2: Fontes de incerteza em um processo de medição [16]

Especificamente em um processo de medição por coordenadas, existem várias fontes que influem nos resultados de medição. Algumas têm um efeito em curto prazo, como a repetitividade da máquina e a repetitividade do dispositivo de fixação. Outras têm efeito nos resultados de medições após um longo período de

tempo, ou gradualmente, no caso de desajuste da máquina de medir, ou bruscamente, como mudanças no procedimento ou estratégias de medição, ou irregularmente, como mudanças no fornecimento de energia elétrica ou de ar comprimido. O intervalo de tempo e as condições nas quais as medições são realizadas afetam a amplitude de variação que estará presente [4].

A variação observada em um processo produtivo tem uma contribuição decorrente do processo de medição. Este fato pode ser crítico se o processo de medição não for estável ou se a sua variação contribuir de forma expressiva no total de variação do processo. Neste caso, poderão ser tomadas decisões inadequadas. A figura 3.3 ilustra o problema.

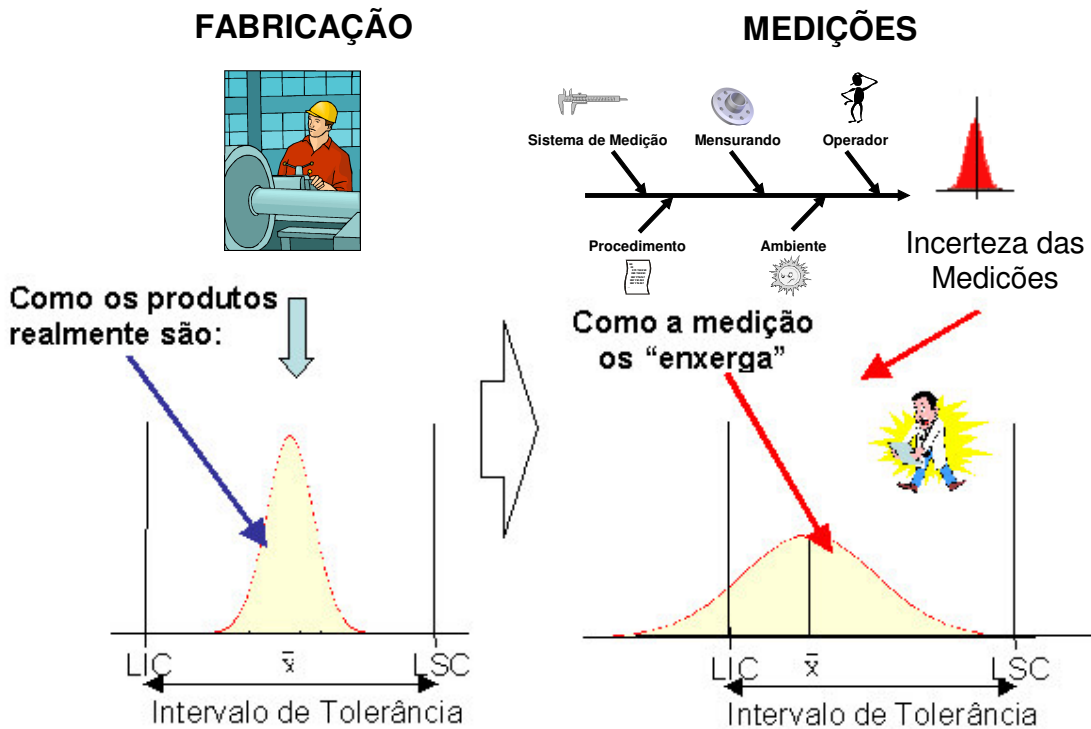


Figura 3.3 – Fontes de incerteza em um processo de medição [16]

Em processos produtivos ou de medição, a variação nos resultados pode ocorrer devido aos seguintes tipos de causas [23, 24]:

- Variação por causa comum: corresponde à variação natural de caráter aleatório do processo, resultante da combinação de várias pequenas causas, que por razões técnicas ou econômicas, não são individualizáveis. Diz-se que um processo está “sob controle” se está operando apenas com causas comuns de variação. Seu comportamento é previsível em um futuro próximo.
- Variação por causa estrutural ou intrínseca: corresponde às variações do processo de uma forma marcada, mas previsível. É evidenciada por padrões não aleatórios.
- Variação por causa especial: resultantes de intervenção alheia ao processo, com comportamento não aleatório. Diz-se que um processo está “fora de controle” se está operando com causas especiais de variação.
- Variação por operação inconsistente: resultante de ajustes desnecessários no processo, ao se tentar corrigir variações devidas a causas comuns (*tampering*), resultando no aumento da variação.

A distinção entre causas comuns e especiais é fundamental para decidir quais as ações a tomar para um determinado processo. Se causas comuns forem julgadas como especiais, a variação aumentará devido ao efeito do *tampering*. Por outro lado, se causas especiais não forem percebidas, estas serão aos poucos incorporadas ao processo, aumentando a sua variação [23]. A única forma de evitar as operações inconsistentes é através do uso de cartas de controle (ferramentas utilizadas para análise de estabilidade) [24].

3.2 Gestão de Processos

Processos produtivos ou de medição devem ser encarados por uma ótica de melhoria contínua, devido às exigências de qualidade e eficiência cada vez mais rigorosas do mercado. A obtenção de dados do processo não deve ser um fim em si mesmo, mas a base para ações de melhoria. Infelizmente, é bastante comum o uso de técnicas estatísticas de controle de processos sendo utilizadas apenas para a avaliação da conformidade de peças. Assim, o pleno poder dessas técnicas estatísticas para aperfeiçoar a qualidade, aumentar a produtividade e reduzir custos não é alcançado [4]. Nesse contexto, a abordagem sobre um processo pode ser dividida em três etapas [23]:

- Pré-manutenção: levantamento da situação atual das variações do processo, sem que novas ações de manutenção da qualidade tenham sido introduzidas. Esta etapa se destaca pela presença de causas não comuns (especiais, estruturais e por operação inconsistente).
- Manutenção da qualidade: tomada de ações para manter o processo sob controle, eliminando-se os problemas crônicos, devidos às causas especiais inseridas no processo, com conseqüente melhoria da qualidade. A etapa de manutenção da qualidade também compreende as ações para impedir a deterioração natural do processo. Causas especiais ocasionais também estão presentes, mas não de forma crônica como na etapa anterior, cujo efeito se refletia diretamente na qualidade dos produtos. As causas especiais, nesta etapa, produzem problemas ocasionais que devem ser entendidos, eliminados e bloqueados para que não voltem a ocorrer. Ela pode ser vista como o período que abrange as atividades necessárias para fixar as ações realizadas no processo.
- Melhoria da qualidade: etapa posterior à manutenção da qualidade que somente faz sentido se o processo já estiver operando da forma desejada. São solucionados problemas crônicos do processo, reduz-se a variabilidade e define-se um novo estágio de manutenção.

A alternância entre as etapas de manutenção e melhoria da qualidade é que torna um processo previsível e com menores variações, em sintonia com a abordagem de melhoria contínua da qualidade [23].

3.3 Fontes de Incerteza em um Processo de Medição por Coordenadas

Os processos de medição por coordenadas, como todos processos de medição, possuem fontes de incerteza que geram incertezas nos resultados de medições. De uma maneira geral, estas fontes de incerteza podem ser associadas à máquina de medir, à peça a inspecionar, às condições ambientais onde se encontra a máquina, aos operadores e programadores da máquina e aos procedimentos e estratégias de medição. Cada um dos fatores é subdividido em vários outros, conforme apresentado na figura 3.4.

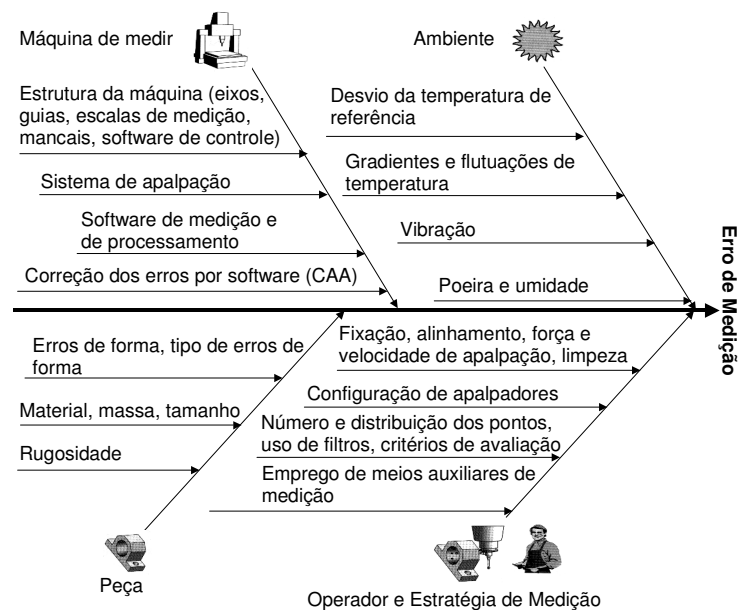


Figura 3.4 – Fontes de incerteza em um processo de medição por coordenadas [6]

3.3.1 A Máquina de Medir por Coordenadas

Uma máquina de medir por coordenadas geralmente pode ser dividida em 5 partes principais: a estrutura mecânica, o sistema de apalpação, o sistema de medição de deslocamento, o controle CNC e o software de medição. A estrutura mecânica consiste basicamente nas guias, colunas, mesa e sistemas de acionamento, transmissão e de deslocamento do cabeçote apalpador. O sistema de apalpação corresponde ao conjunto formado pelo cabeçote apalpador e o apalpador. O sistema de medição de deslocamento consiste nas escalas eletro-ópticas. O controle CNC corresponde à unidade responsável pelo monitoramento e controle dos sistemas mecaoptoeletrônicos da máquina, controle de movimentação e interface de comunicação com o software de medição. O software de medição (instalado no computador da máquina) é responsável por fornecer ao operador o gerenciamento do processo de medição, elaboração e execução de programas CNC e emissão dos relatórios de medição. A figura 3.5 ilustra as diferentes partes da máquina.

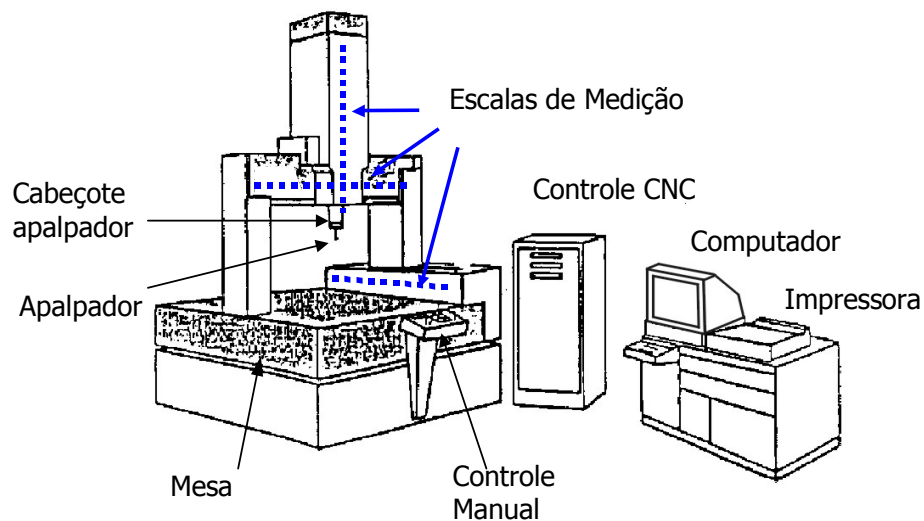


Figura 3.5 - Partes principais de uma máquina de medir por coordenadas [15]

As fontes de incerteza provenientes da MMC podem ter origem em diferentes partes da máquina, mas principalmente na sua estrutura, no sistema de apalpação, no sistema de medição de deslocamento e no software de medição. Algumas dessas fontes de incerteza são minimizadas no ajuste da máquina pelo fabricante, que através da realização de medições de um padrão de comprimento em algumas posições e orientações no volume da máquina, obtém os erros da MMC que serão então compensados via software. Entretanto, para a maioria das MMCs CNC apenas os erros de posicionamento e perpendicularidade são de fato periodicamente corrigidos. Os erros de rotação e retilidade da máquina são minimizados geralmente ou pelo uso de guias de precisão ou pela correção destes via software em um ensaio mais refinado na instalação da máquina. Mesmo após o ajuste de uma MMC, os erros não são nulos. O fabricante apenas garante que os erros para medição de comprimentos estão dentro dos limites especificados em contrato para determinadas condições ambientais e para um determinado apalpador.

Os erros da estrutura da MMC, combinados aos erros das escalas, são classificados em três grupos: erros de rotação, translação e perpendicularidade. Os erros de rotação se dividem nos erros de rolamento (*roll*), guinamento (*pitch*) e tombamento (*yaw*). Os erros de translação, por sua vez, se dividem nos erros de posicionamento e retilidade. São três os erros de rotação e três os erros de translação por eixo da MMC, somando-se ao todo 18 erros para os três eixos da máquina. A estes, somam-se ainda os três erros de perpendicularidade entre os eixos da MMC, totalizando-se 21 erros. A figura 3.6 mostra os 3 erros de rotação do eixo Y, os 3 erros de translação do eixo X e os erros de perpendicularidade entre os eixos X e Y e X e Z [25].

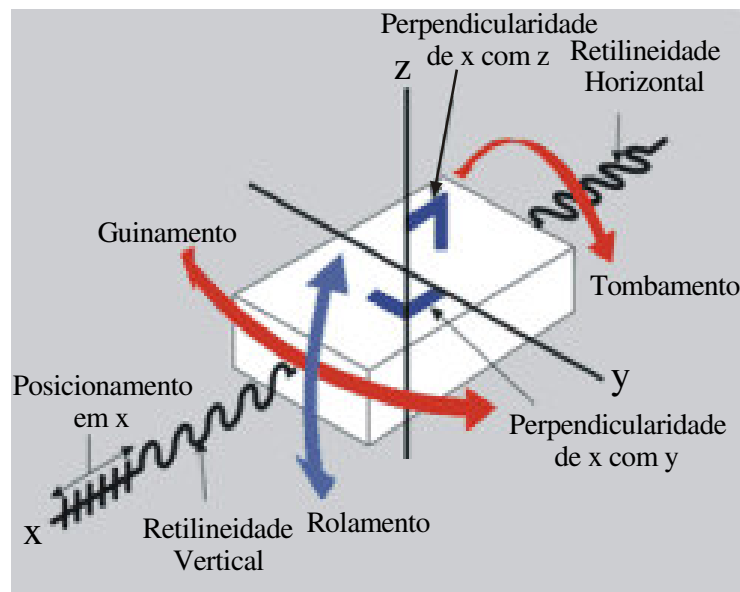


Figura 3.6 - Erros devidos à estrutura e escalas da MMC [26]

Os erros provocados pelo sistema de apalpação têm componentes aleatórias e sistemáticas, cuja amplitude depende muito das condições de uso do conjunto cabeçote/apalpador (tempo de uso, frequência e severidade de colisões, nível de poeira no ambiente, manuseio pelos operadores, etc.) e do projeto construtivo dos mesmos. A figura 3.7 ilustra o princípio construtivo de dois tipos de cabeçotes apalpadores: comutadores ou ligadores (*"touch-trigger probes"*) e medidores (*"measuring probes"*). Os primeiros são formados por três chaves que são acionadas quando o apalpador toca na peça e, após um instante de tempo, as coordenadas X, Y e Z do ponto são adquiridas. O segundo tipo é mais complexo, consistindo em sistemas de molas planas e transdutores indutivos, que medem as deflexões paralelas aos eixos da MMC provocadas pelo toque do apalpador na peça. O princípio construtivo dos cabeçotes apalpadores medidores possibilita erros de medição menores do que os apalpadores comutadores [27].

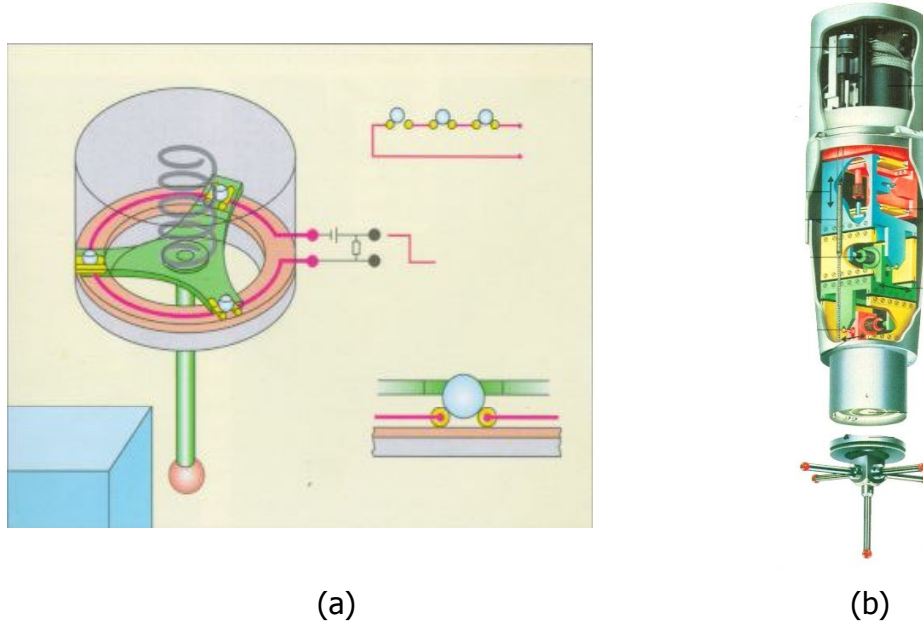


Figura 3.7 – Cabeçotes apalpadores comutador (a) e medidor (b) [15]

Parte dos efeitos sistemáticos dos erros de apalpação são compensados pela qualificação do apalpador com a esfera padrão da máquina. Entretanto, sobram erros residuais de flexão da haste, desvio de forma do sensor (esfera do apalpador), histerese, achatamento do sensor e a repetitividade. Geralmente estes erros tornam-se significativamente maiores quando são utilizadas hastes mais longas e mais finas de mesmo material.

Os erros decorrentes do software da máquina são devidos principalmente a algoritmos de cálculo inconsistentes, número de casas decimais insuficiente e erros de interpolação de dados. Geralmente estes erros podem ser desprezados frente às demais fontes de incerteza.

É de grande importância que o operador conheça as diferentes fontes de erros da máquina e suas limitações para que possa estabelecer estratégias de medição consistentes que venham a minimizar as influências dos mesmos nos resultados de medição.

3.3.2 O Ambiente de Instalação da MMC

O ambiente em que se encontra a máquina de medir por coordenadas também interfere nos resultados de medição. Sua influência é tanto maior quanto mais severas forem as condições ambientais para a MMC. As principais influências do ambiente nas medições com MMCs estão relacionadas às condições de temperatura, poeira e vibração [15] (figura 3.8).

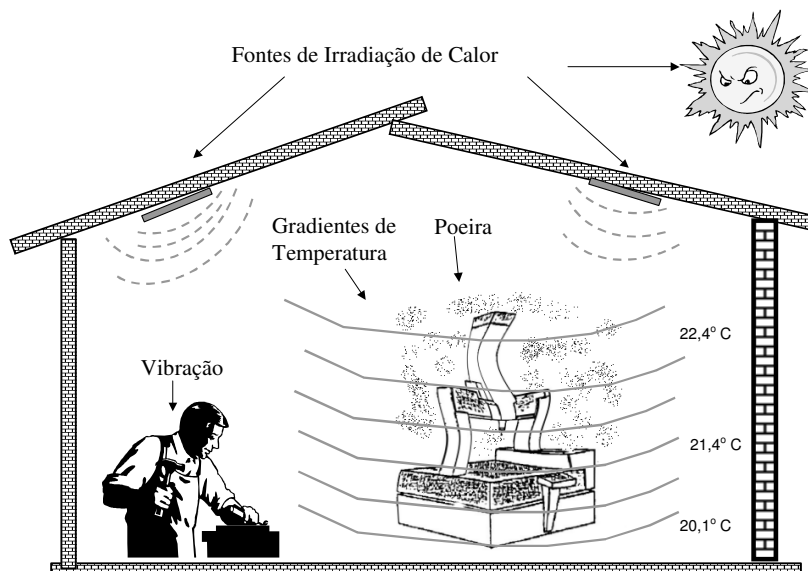


Figura 3.8 – O ambiente como fonte de incerteza na medição por coordenadas [12]

Basicamente existem três formas da temperatura influenciar os resultados das medições: desvio da temperatura de referência; flutuações no tempo e gradientes de temperatura na máquina e no ambiente. Estes fatores afetam tanto a MMC quanto a peça, pois expansões ou contrações térmicas podem levar a desvios nos resultados. Gradientes de temperatura na peça, quando não ocorre uma estabilização térmica suficiente da peça com o ambiente da máquina, podem provocar deformações não lineares da peça refletindo-se diretamente nos resultados de medição. Além disso, variações de longo período

nos gradientes de temperatura em torno da MMC provocam mudanças nas amplitudes dos erros de rotação, alterando a performance da máquina ao longo do tempo.

Apesar de existir a possibilidade de se minimizar os efeitos da temperatura, seja por compensação matemática ou através do uso de máquinas com maior robustez aos efeitos de temperatura (máquinas com guias feitas de materiais possuindo baixo coeficiente de expansão térmica ou com guias de elevado coeficiente de condutibilidade térmica), é de fundamental importância que se busque um eficiente controle das condições ambientais para que a confiabilidade das medições não seja comprometida. A observância das condições limites ambientais especificadas no manual da máquina é imprescindível para que a performance da máquina seja mantida conforme a especificação do fabricante.

Para minimizar os efeitos do ambiente nas medições, são necessárias ações como: adequada climatização do ambiente de instalação da máquina; minimização de vibrações causadas tanto pelo movimento da própria máquina como vibrações propagadas através do ambiente; controle de poeira e instalação da máquina longe de fontes de calor e vibrações.

3.3.3 A Peça a Medir

As características macro (desvios dimensionais, de forma e posição) e micro-geométricas (rugosidade) da peça são os principais fatores que a tornam uma fonte de incerteza, além de aspectos como rigidez, dureza e sua condutibilidade térmica. O desconhecimento da geometria, acabamento superficial e rigidez mecânica da peça pode levar à definição de estratégias de medição inadequadas, com conseqüentes erros de medição. Por exemplo, na figura 3.9a, a medição do diâmetro do furo em uma única seção resultará em um valor

incorreto se a superfície superior for escolhida como referência, devido ao desvio de paralelismo entre as faces da peça. Nas figuras 3.9b, a medição da posição do centro de um furo fornece valores diferentes para x e y dependendo da estratégia de alinhamento, devido ao erro de perpendicularidade entre as faces da peça.

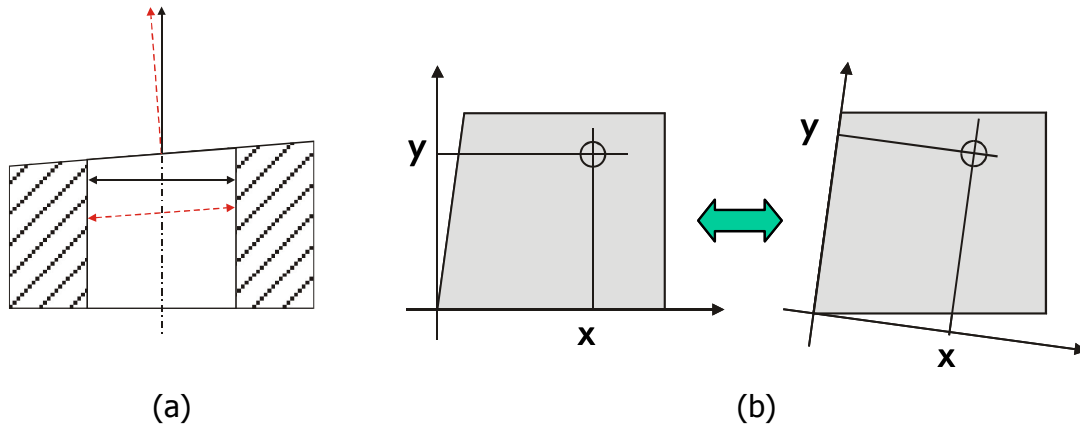


Figura 3.9 - Efeito de desvios de forma das peças nas estratégias de medição
[15]

Um número reduzido de pontos sobre os elementos de medição da peça (faces, furos, etc.) pode ocasionar uma avaliação inexata do valor do mensurando, devido aos desvios de forma da peça. Um exemplo clássico é o “isoespesso”, mostrado na figura 3.10, cuja forma dificulta a obtenção de medições com boa exatidão do diâmetro médio com poucos pontos.

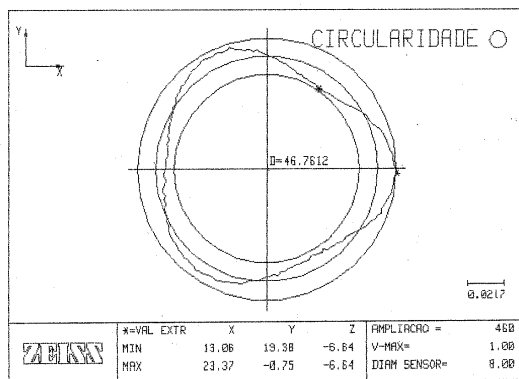


Figura 3.10 – Erro de circularidade de uma peça representando um “isoespesso” [15]

Peças com baixa rigidez, como peças plásticas, estão sujeitas em geral a se deformarem na sua fixação. Devem ser utilizados dispositivos adequados, que consideram as regiões funcionais da peça (montagem, elementos de apoio e fixação, referências de alinhamento). Pontos de apoio adicionais devem ser previstos para os casos em que a peça possa se deformar pelo seu próprio peso. A distribuição dos pontos de medição também deve evitar as regiões mais flexíveis da peça, de forma que a influência da força de apalpação da máquina de medir seja minimizada. A figura 3.11 abaixo ilustra dois casos de fixação de peças flexíveis com dispositivos universais de fixação.

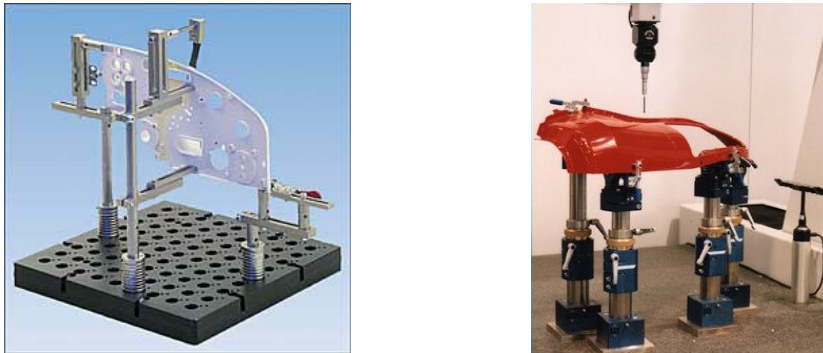


Figura 3.11- Fixação de peças complexas com dispositivos universais [15]

A presença de defeitos localizados nas peças como rebarbas, rechupes, bolhas, pingos de solda, regiões oxidadas ou com irregularidades do processo de fabricação, partículas impregnadas, etc., interferem nos resultados de medição se os pontos de apalpação sobre a peça incluírem estas regiões. O conhecimento do processo de fabricação da peça é importante para definir estratégias adequadas de distribuição dos pontos de apalpação, como por exemplo, evitando-se pontos de medição próximos às bordas de superfícies estampadas ou usinadas, devido à possível presença de rebarbas ou deformação nestas áreas.

3.3.4 O Operador e a Estratégia de Medição

O operador é o responsável pela fixação e posicionamento da peça, interpretação de desenhos técnicos, definição da força e velocidade de apalpação, seleção e configuração dos apalpadores, uso de acessórios como mesa rotativa ou magazine para troca dos apalpadores e, principalmente, por estabelecer a estratégia de medição.

A estratégia de medição, isto é, o número e distribuição dos pontos de medição, uso de filtros e métodos de avaliação, deverá ser estabelecida levando em consideração o conhecimento do projeto da peça (onde deverão estar fixadas as referências e tolerâncias definidas de acordo com as características funcionais da peça) e os erros causados pelo processo de fabricação.

Muitos operadores acreditam que os erros de medição são provocados principalmente pela máquina de medir, e alguns operadores aceitam que o ambiente (temperatura) também influencia nos resultados de medição. Entretanto, a grande maioria não tem noção dos efeitos provocados pela definição das estratégias de medição. Exemplos ilustrativos dos efeitos de diferentes estratégias de medição são apresentados nas figuras abaixo. A figura 3.12 mostra o efeito da distribuição dos pontos de medição. Verifica-se que os erros de medição para pontos distribuídos de forma concentrada são maiores que para os pontos espalhados sobre o mesmo elemento de medição. O efeito destes erros torna-se maior se a peça possuir acabamento superficial ruim ou se o apalpador não possuir uma boa repetitividade.

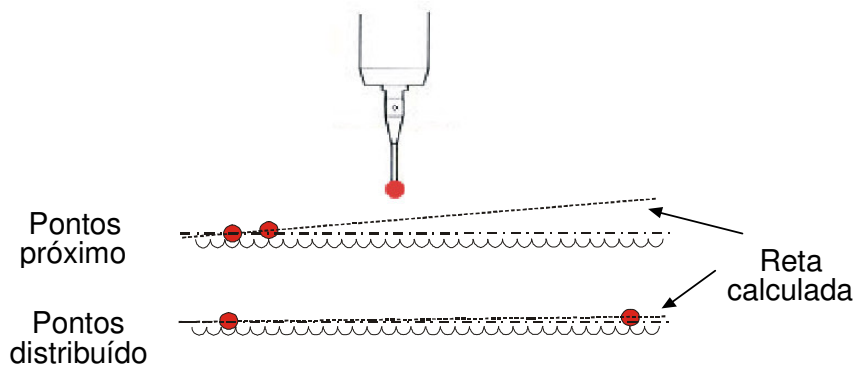


Figura 3.12 - Efeito da distribuição dos pontos de medição [15]

A escolha dos apalpadores para se medir um mensurando também tem influência sobre os resultados. Os apalpadores marcados com "X" nas figuras 3.13 a e b não são apropriados para medir o diâmetro e a profundidade do furo, respectivamente (o primeiro por não permitir apalpações na parte inferior do furo, o segundo por utilizar um apalpador com haste desnecessariamente longa).

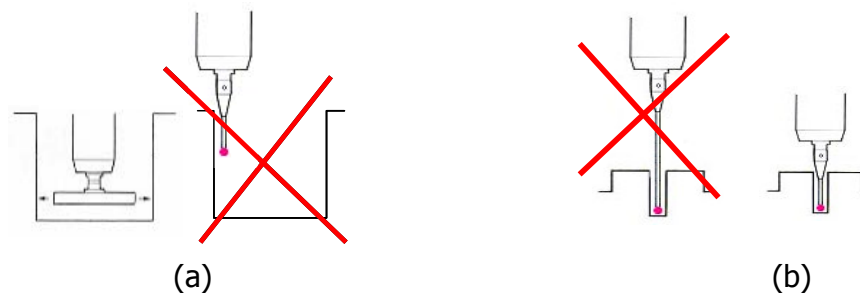


Figura 3.13 - Escolha dos apalpadores para uma dada tarefa de medição [28]

Entre as fontes de incerteza, é o operador aquele que tem maior potencial de influenciar os resultados de medição, mesmo em uma máquina de medir por coordenadas CNC. Isto se deve principalmente ao fato de que é o operador (ou o responsável por programar a MMC) que, ao elaborar os programas CNC, define as estratégias de medição. Nas máquinas de medir manuais, o efeito dos operadores é ainda maior. Além das escolhas adequadas das estratégias de medição para cada parâmetro a medir, o operador também influencia os

resultados de medição pela sua habilidade em manusear a máquina (força, velocidade, direção de apalpação). A figura 3.14 abaixo mostra de forma ilustrativa a relação entre os efeitos dos operadores, ambiente e máquina sobre os resultados de medição, em condições ótimas e críticas de trabalho.

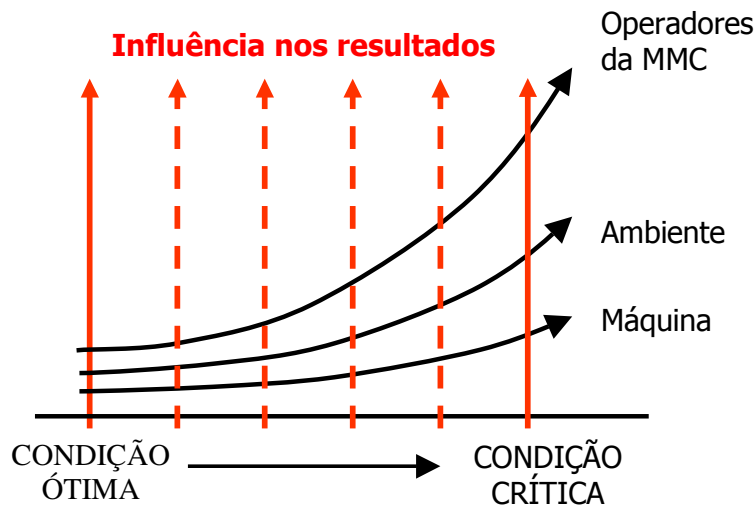


Figura 3.14 – Influência da máquina, ambiente e operador nos resultados de medição [15]

A capacitação dos operadores da MMC deve ser proporcional à importância e complexidade da tecnologia de medição por coordenadas para a indústria. Esta capacitação deve abranger não apenas os aspectos operacionais de manusear a MMC e seu software, mas também os aspectos metrológicos envolvidos com a medição por coordenadas, como o conhecimento das fontes de incerteza, estratégias para minimizar os efeitos dessas influências nos resultados de medições e capacidade de avaliar a incerteza de medição dos resultados obtidos.

3.4 Efeito do Processo de Medição na Capacidade do Processo Produtivo

O processo de medição tem influência direta nos dados observados (medidos) do processo produtivo. Portanto, o desempenho observado do processo produtivo depende da qualidade do processo de medição. O desempenho de um processo produtivo é medido em geral pelos seus índices de capacidade C_p e C_{pk} . O índice de capacidade C_p avalia a capacidade potencial do processo produtivo, relacionando a faixa de variação permitida ao processo, através dos limites de especificação, e a faixa real de variação do processo. O índice de capacidade C_{pk} está relacionado com a amplitude da variação do processo (índice C_p) e também com o desvio da média do processo em relação ao seu valor nominal (alvo). É considerado como uma medida do desempenho do processo, ou seja, como o processo realmente se comporta [23]. O valor de C_{pk} é igual ao valor de C_p quando a média dos valores é igual ao valor nominal do processo. Usualmente exige-se um valor mínimo de C_{pk} igual a 1,33. Um processo com $C_p = C_{pk} = 1,33$ tem uma fração não conforme estimada em 63,4 ppm. As equações 3.1 a 3.5 abaixo apresentam as fórmulas envolvidas para o cálculos de C_p e C_{pk} .

$$IT = LSE - LIE \quad (\text{Equação 3.1})$$

$$k = \frac{|Média - Alvo|}{(IT/2)} \quad (\text{Equação 3.2})$$

$$Alvo = \frac{LIE + LSE}{2} \quad (\text{Equação 3.3})$$

$$C_p = \frac{IT}{6.s} \quad (\text{Equação 3.4})$$

$$C_{pk} = \frac{1-k}{C_p} \quad (\text{Equação 3.5})$$

Onde: IT= intervalo de tolerância

LSE= limite superior especificado

LIE= limite inferior especificado

k= "vício" do processo

Média= média observada do processo

Alvo= valor nominal do processo (valor ideal especificado pelo projeto)

s= desvio padrão dos dados observados do processo

Cp, Cpk= índices de capacidade observados do processo

As figuras 3.15 ilustram a relação entre os índices Cp e Cpk com a capacidade do processo produtivo.

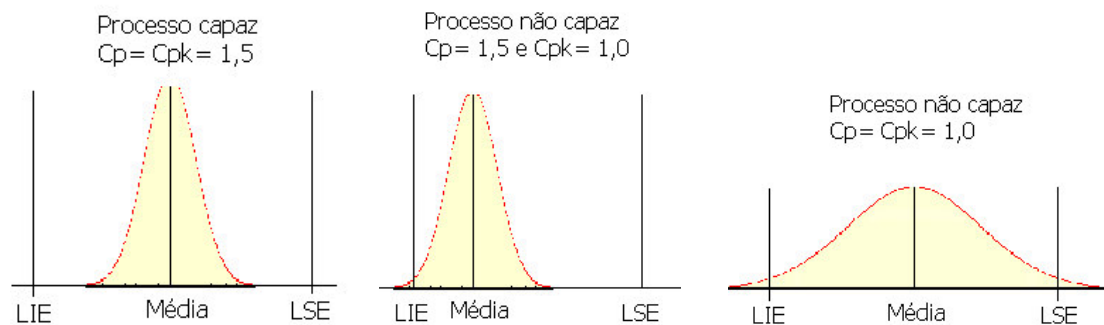


Figura 3.15 - Relação dos índices Cp e Cpk com a capacidade do processo

Foram realizadas algumas simulações computacionais para demonstrar o efeito do processo de medição sobre os índices de capacidade Cp e Cpk observados do processo produtivo. As simulações realizadas valem para analisar os efeitos de qualquer processo de medição sobre a observação de um processo produtivo. Nessas simulações, as influências do processo de medição foram estabelecidas por dois parâmetros: a tendência "Td" e a incerteza do processo de medição "U".

A incerteza "U" foi estabelecida nas simulações realizadas como duas vezes o desvio padrão "s" do processo de medição. Esta consideração somente é possível na prática quando a repetitividade do processo de medição for a parcela predominante que define a incerteza final em um balanço de incertezas. Se este não for o caso de um processo de medição qualquer em estudo, pode-se mesmo assim utilizar os gráficos gerados nas simulações abaixo, utilizando-se "2.s" no lugar de "U". Neste caso, será analisado apenas o efeito da repetitividade ("2.s") do processo de medição sobre a observação do processo produtivo. Se o desvio padrão considerado abranger, além de efeitos puramente aleatórios do processo de medição, também influências sistemáticas (por exemplo: efeitos de diferentes peças e variações devidas à temperatura), então a avaliação deste desvio padrão será em geral superestimada e, conseqüentemente, também serão superestimados os efeitos do processo de medição sobre a observação do processo produtivo.

Está se considerando também uma distribuição normal para os dados do processo de medição. Sabe-se que em muitos processos de medição há um afastamento da distribuição real em relação à normal, principalmente nas suas extremidades. A consideração de uma distribuição normal para distribuições de fato não normais geralmente superestima a amplitude da variação dos dados [1]. Isto ocorre, por exemplo, quando se assume distribuição normal para distribuições que de fato são retangulares, triangulares ou mistas. Técnicas estatísticas simples de análise dos dados, como histogramas, são recomendadas para verificar se os dados se distribuem de forma normal. Se o critério de normalidade não puder ser assumido, pelo fato das medições se afastarem de uma distribuição normal ou pela necessidade de se obter uma estimativa mais realista de U, então outras formas de análise dos efeitos do processo de medição sobre o processo produtivo devem ser realizadas como, por exemplo, o uso da função perda quadrática (Taguchi) [29] ou através do índice de concentração Cpm [4, 24].

Nas simulações apresentadas nos itens 3.4.3 a 3.4.5, referentes ao efeito do processo de medição sobre a classificação das peças em conformes ou não conformes, não foi considerada a diminuição da faixa de aprovação do produto pelo valor da incerteza de medição, conforme estabelecido na norma ISO 14253-1 [30]. O efeito da diminuição da faixa de aprovação tende a aumentar o número de peças conformes reprovadas e diminuir o número de peças não conformes aprovadas, além dos valores obtidos nas simulações.

3.4.1 Efeito da Parcela Aleatória do Processo de Medição sobre o Índice de Capacidade C_p do Processo Produtivo

Um aumento na incerteza (parcela aleatória 2.s) do processo de medição provoca uma redução no índice de capacidade C_p observado do processo produtivo. Nesta simulação, procurou-se determinar de quanto é a perda no índice de capacidade C_p observado do processo para diferentes níveis de incerteza do processo de medição. Foram consideradas as seguintes relações da incerteza de medição com o intervalo de tolerância: 0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50%. Foram avaliados 5 processos com C_p real (sem efeito do processo de medição) variando de 0,67 a 2,00. A figura 3.16 a seguir apresenta os resultados obtidos.

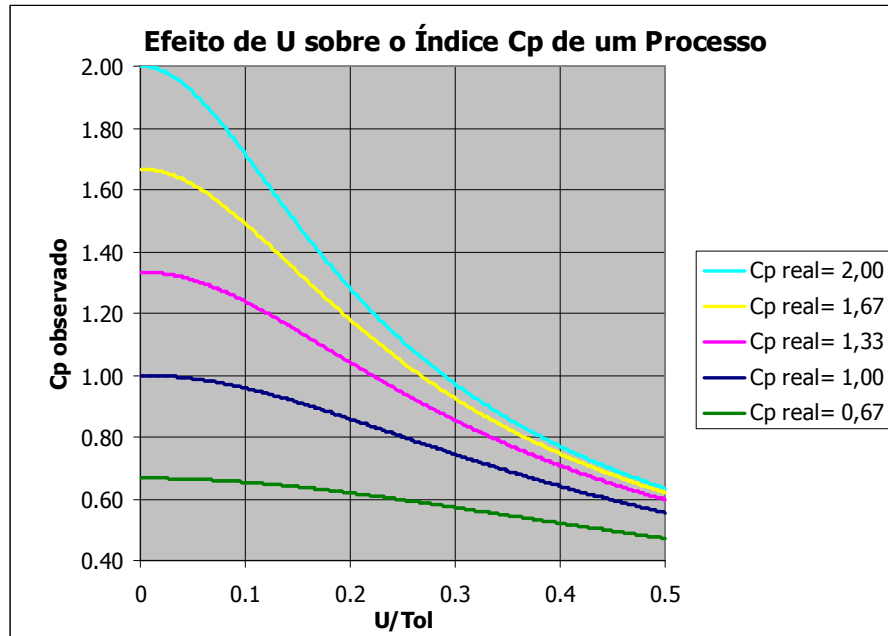


Figura 3.16 - Efeito da incerteza do processo de medição sobre o índice Cp [6]

Verifica-se que, mesmo para um processo altamente capaz ($Cp \text{ real} = 2$), a utilização de um processo de medição com incerteza igual a 20% da tolerância já está abaixo ao requisito mínimo de Cp igual a 1,33.

3.4.2 Efeito das Parcelas Aleatória e Sistemática do Processo de Medição sobre o Índice de Capacidade Cpk do Processo Produtivo

Nesta simulação, procurou-se determinar de quanto é a perda aparente no índice de capacidade Cpk do processo para diferentes níveis de incerteza e tendência ("Td") do processo de medição. Na simulação realizada, foram consideradas as seguintes relações da incerteza de medição com o intervalo de tolerância: 0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50%. Também foram consideradas as

seguintes relações da tendência com o intervalo de tolerância: 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% e 55%. O processo produtivo simulado (real) está centrado (valor médio igual ao alvo) e tem índices de capacidade $C_p \text{ real} = C_{pk} \text{ real} = 1,67$. A figura 3.17 apresenta os resultados obtidos.

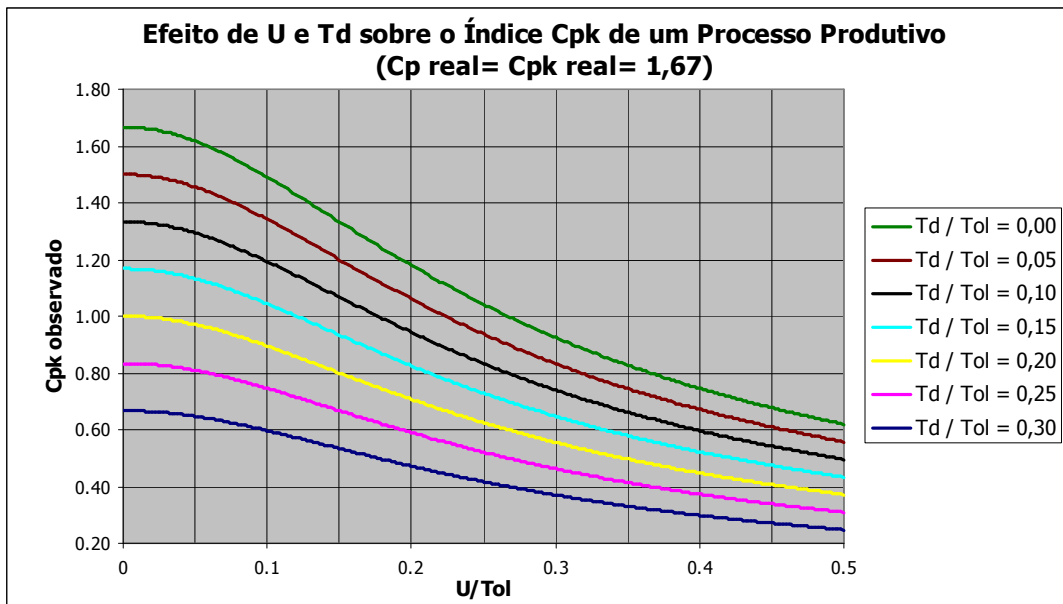


Figura 3.17 - Efeito da incerteza e da tendência do processo de medição sobre o índice Cpk

Verifica-se, para as demais curvas, que um aumento da incerteza provoca uma redução no índice Cpk observado do processo, e que um aumento na tendência provoca uma redução ainda mais acentuada do mesmo. Constatase então, que a presença de tendência em um processo de medição é mais crítica que uma incerteza de medição (2.s) de mesma magnitude. Comparando-se as curvas com o limite mínimo especificado de $C_{pk} = 1,33$, observa-se que para uma tendência de apenas 10% do intervalo de tolerância, a incerteza de medição deveria ser nula para que o índice Cpk observado fosse igual a 1,33. Da mesma forma, observa-se que para uma incerteza de medição de apenas 15% do intervalo de tolerância, o processo de medição deveria ter uma tendência nula para que o índice Cpk fosse igual a 1,33. Conclui-se que para um processo real com $C_p =$

$Cpk = 1,67$ ser considerado capaz, a incerteza e tendência do processo de medição devem ser muito pequenas em relação ao intervalo de tolerância.

A simulação realizada considerou um processo produtivo centralizado (valor médio = alvo). Para processos não centrados, o efeito do processo de medição sobre o índice Cpk observado do processo produtivo pode resultar numa redução ainda maior da capacidade, do que na simulação apresentada, ou até resultar em um aumento da capacidade, dependendo se a tendência se superpõe ou compensa um desvio do processo em relação ao alvo, respectivamente.

Outra conclusão a se destacar analisando-se a figura 3.17 é quanto ao efeito provocado por uma especificação inadequada do intervalo de tolerância (IT). A diminuição do IT faz com que ambas as relações Td/IT e U/IT assumam valores mais críticos, exigindo mais dos processos produtivo e de medição. Neste caso, observa-se a necessidade de um investimento em MMCs com maior exatidão, sob o risco de ocorrer uma redução no índice de capacidade observado do processo. Em contrapartida, um aumento do intervalo de tolerância permitirá uma maior variação para os processos produtivos e de medição, ou um aumento no índice de capacidade observado do processo. É fundamental, portanto, ainda na fase de projeto, especificar as tolerâncias dos produtos levando-se em conta as reais necessidades para um controle adequado dos mesmos, e considerar o efeito destas especificações sobre os índices de capacidade observados e os respectivos investimentos necessários em meios de medição.

A especificação de uma nova máquina de medir para atender determinado nível de capacidade de um processo também deve levar em conta análises da redução observada da capacidade real do processo produtivo devido ao processo de medição.

3.4.3 Efeito das Parcelas Aleatória e Sistemática do Processo de Medição sobre a Fração Não Conforme Observada do Processo Produtivo [31, 32]

O processo de medição tem influência direta no número de peças rejeitadas (fração não conforme) na inspeção do processo produtivo. Quanto maior for a tendência ou incerteza do processo de medição (avaliada como $2.s$), maior será também a fração não conforme observada. Para se ter uma noção clara deste impacto, foi realizada uma simulação do mesmo processo produtivo simulado no item 3.4.2 ($C_p \text{ real} = C_{pk} \text{ real} = 1,67$). A figura 3.18 abaixo apresenta os resultados obtidos.

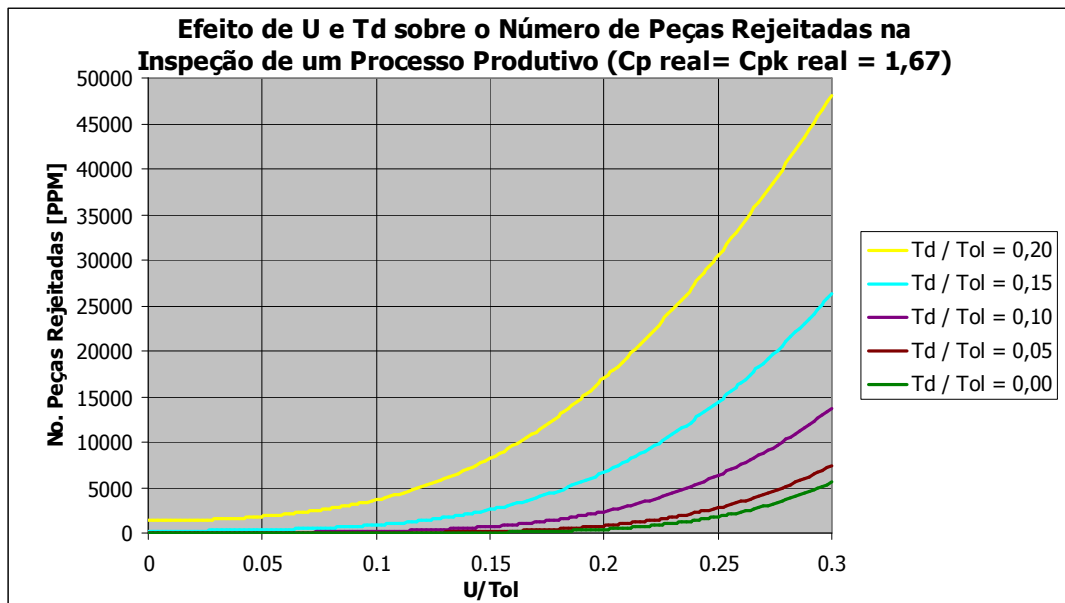


Figura 3.18 - Efeito da incerteza e da tendência sobre a fração não conforme de um processo produtivo com $C_p \text{ real} = C_{pk} \text{ real} = 1,67$

Os gráficos foram gerados considerando-se distribuições normais para o processo produtivo e processo de medição. O número de peças rejeitadas foi obtido calculando-se a probabilidade das peças situarem-se fora dos limites de tolerância, para determinadas características de Td e U do processo de medição.

Como era de se esperar, um aumento da incerteza de medição ou da tendência levam ao aumento do número de peças rejeitadas. Nota-se também aqui que o efeito provocado pela tendência é superior ao efeito provocado pela incerteza de medição.

A figura 3.19 abaixo é uma ampliação do gráfico anterior, para visualizar o número de peças não conformes nas situações que atendem ao limite especificado de 63,4 ppm relacionado ao índice mínimo de capacidade admissível $C_p = C_{pk} = 1,33$. Este limite foi escolhido para as análises deste estudo, mas pode ser outro, conforme os requisitos da indústria.

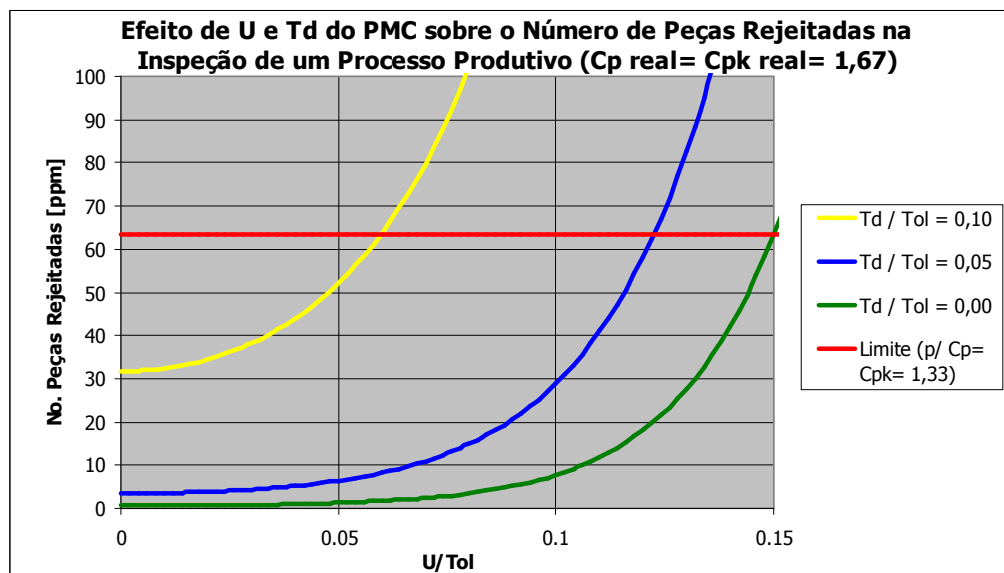


Figura 3.19 - Efeito da incerteza e da tendência sobre a fração não conforme de um processo produtivo (gráficos da figura 3.18 ampliados)

Analisando-se as curvas acima, verifica-se que para uma tendência nula do processo de medição, a incerteza máxima admissível é de 15% do intervalo de tolerância. Verifica-se também que uma tendência de 10% e uma incerteza de 5% do intervalo de tolerância já provocam uma fração não conforme próximo ao limite admissível. Também se constata que processos de medição com tendências menores têm efeitos reduzidos para um mesmo aumento da incerteza de medição, possibilitando uma maior folga para a incerteza sob um mesmo requisito de fração não conforme.

3.4.4 Efeito do Processo de Medição sobre a Probabilidade de Aprovação de uma Peça sob Inspeção

A probabilidade para se aprovar uma peça está diretamente relacionada ao seu afastamento em relação ao valor nominal e às características de tendência e incerteza do processo de medição. Para ilustrar o efeito do processo de medição sobre a probabilidade de se aprovar uma peça, foi simulado um processo produtivo com as seguintes especificações:

- Inspeção de uma cota de posição com valor nominal 10,0 mm e limites inferior e superior para aprovação iguais a 9,9 e 10,1 mm, respectivamente.
- Índices de capacidade real do processo produtivo: $C_p = C_{pk} = 2$

Foram simulados três processos de medição:

a) Processo de medição por coordenadas 1 (PMC 1):

- Tendência = 0,01 mm
- Desvio padrão = 0,02 mm

Neste processo, foram simuladas várias peças cujos valores reais situam-se dentro e fora dos limites de aprovação. Na figura 3.20, os limites inferior e superior estão apresentados em vermelho e a curva em verde representa a

probabilidade para aprovar uma peça cujo valor real é apresentado no eixo das abscissas. Os limites de aprovação nesta simulação correspondem aos limites definidos para as tolerâncias de um produto. Analisando-se o gráfico, verifica-se, por exemplo, que uma peça com valor real 9,90 mm terá uma probabilidade de aprovação pelo processo de medição de aproximadamente 70%. Uma peça com 10,1 mm terá uma probabilidade de ser aprovada de aproximadamente 30%. Esta diferença entre as probabilidades de aprovação das duas peças é devida à influência da tendência do processo de medição.

Verifica-se que peças com valores reais próximos ao valor nominal têm 100% de probabilidade de aprovação. Em contrapartida, observa-se que peças fora das especificações também podem ser aprovadas como, por exemplo, uma peça com valor real 9,88 mm, cuja probabilidade de aprovação será de aproximadamente 30%. A capacidade observada deste processo produtivo com este processo de medição se reduz de $C_p = C_{pk} = 2$ (processo capaz), para $C_p = 1,28$ e $C_{pk} = 1,15$, portanto, um pouco abaixo do limite mínimo admissível de $C_{pk} = 1,33$ (o processo observado torna-se incapaz).

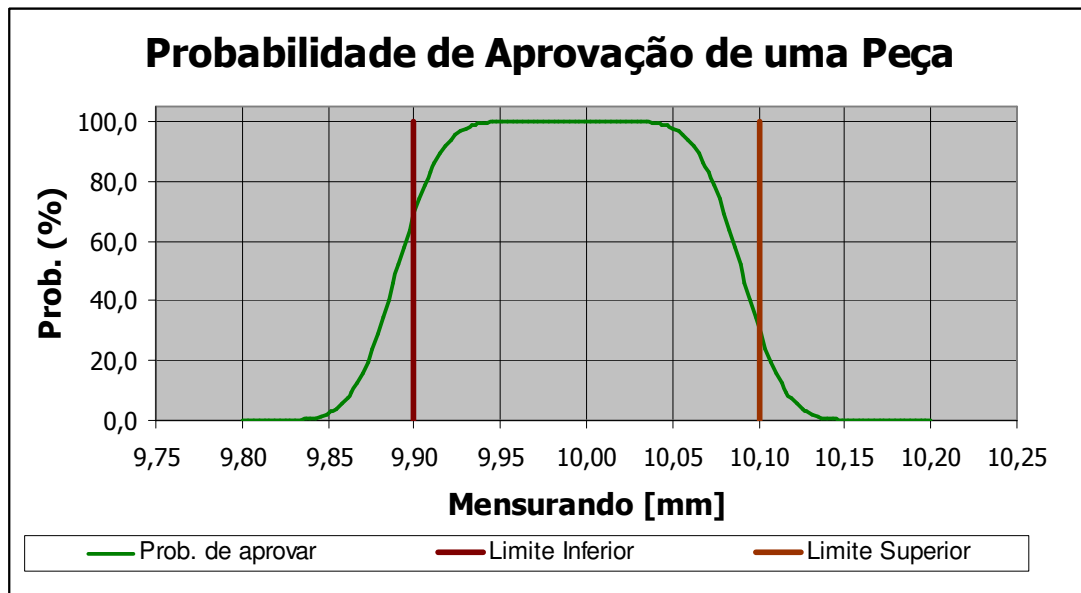


Figura 3.20 – Probabilidade de aprovação de uma peça para o PMC 1 [1]

b) Processo de medição por coordenadas 2 (PMC 2):

- Tendência = 0,01 mm
- Desvio padrão = 0,05 mm

Analisando-se a figura 3.21, nota-se que a curva para este processo de medição é mais aberta que a curva do processo de medição anterior, o que leva a uma redução na probabilidade de aprovação de peças conformes e aumento da probabilidade de aprovação de peças não conformes. Verifica-se também, neste caso, que mesmo peças com valores reais próximos ao valor nominal têm probabilidade de serem rejeitadas pelo processo de inspeção.

Comparando-se este processo de medição (PMC 2) com o processo de medição anterior (PMC 1), para uma peça com valor real 10,10 mm, nota-se que a probabilidade de se aprovar a peça é maior neste processo (40% contra 30% do processo anterior), embora o desvio padrão do PMC 2 seja maior que do PMC 1 e as tendências de ambos sejam iguais. A justificativa é que a maior dispersão do PMC 2 faz com que mais peças que estariam não conformes, devido ao efeito da tendência, sejam aprovadas. A capacidade observada para o processo produtivo com este processo de medição é reduzida de $C_p = C_{pk} = 2$ (processo capaz), para $C_p = 0,63$ e $C_{pk} = 0,57$, portanto, abaixo do C_{pk} admissível (o processo a ser observado torna-se incapaz).

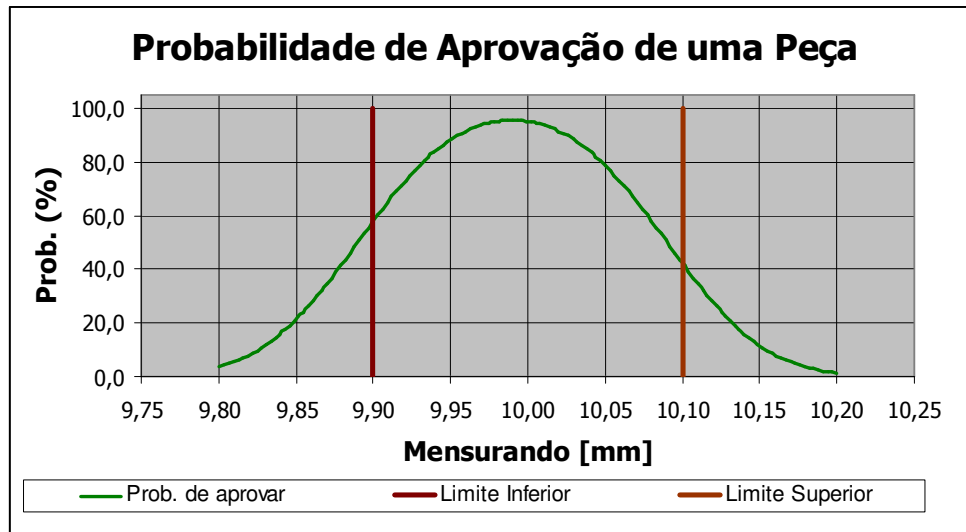


Figura 3.21 – Probabilidade de aprovação de uma peça para o PMC 2 [1]

c) Processo de medição por coordenadas 3 (PMC 3):

- Tendência = 0,00 mm
- Desvio padrão = 0,01 mm

A visualização do gráfico da figura 3.22 mostra claramente uma maior área de aprovação de peças conformes e menor área de rejeição de peças não conformes, em relação aos processos de medição anteriores, o que demonstra este processo de medição ser mais capaz. Nota-se que, pelo fato da tendência ser nula, a curva de probabilidades é simétrica e centrada no valor nominal. A capacidade observada do processo produtivo com este processo de medição é reduzida de $C_p = C_{pk} = 2$ (processo capaz), para $C_p = C_{pk} = 1,71$ (processo observado também capaz).

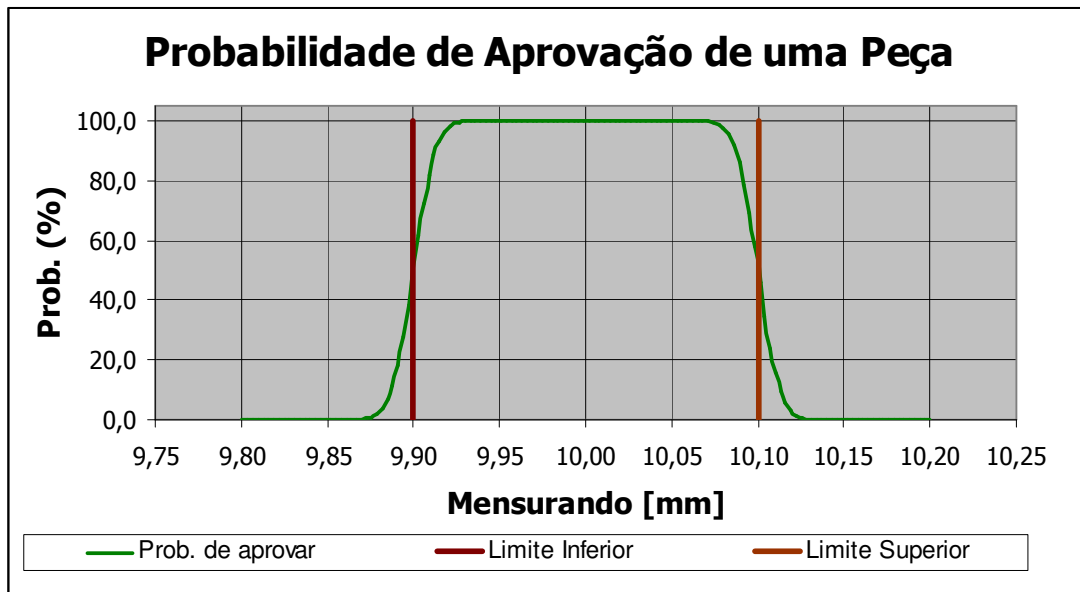


Figura 3.22 – Probabilidade de aprovação de uma peça – PMC 3 [1]

3.4.5 Histograma do Efeito do Processo de Medição sobre o Processo Produtivo

Um histograma comparativo entre os dados reais e observados auxilia bastante a visualização dos efeitos do processo de medição sobre o processo produtivo. Com este intuito, os seguintes dados foram utilizados para simular ambos os processos:

- Processo produtivo real:
 - o Cp real= Cpk real= 2,00
 - o Valor nominal= 10 mm
 - o Intervalo de tolerância= 0,2 mm

- Processo observado:
(processo de medição com $T_d = 0,020$ mm e $U = 2s = 0,022$ mm)
 - C_p observado = 1,66
 - C_{pk} observado = 1,33

Foram gerados aleatoriamente 5000 dados de medição, distribuídos em uma curva normal, para representar os valores reais de 5000 peças de um processo qualquer. O efeito do processo de medição foi então simulado para estas mesmas 5000 peças. Na figura 3.23, a distribuição em branco representa os valores reais das peças e a distribuição em vermelho representa a distribuição dos resultados de medição. Percebe-se claramente uma redução da capacidade observada do processo, manifestada pelo afastamento entre as médias das distribuições e a maior dispersão dos dados na distribuição com os valores "medidos", resultante da superposição dos efeitos aleatórios do processo produtivo e do processo de medição.

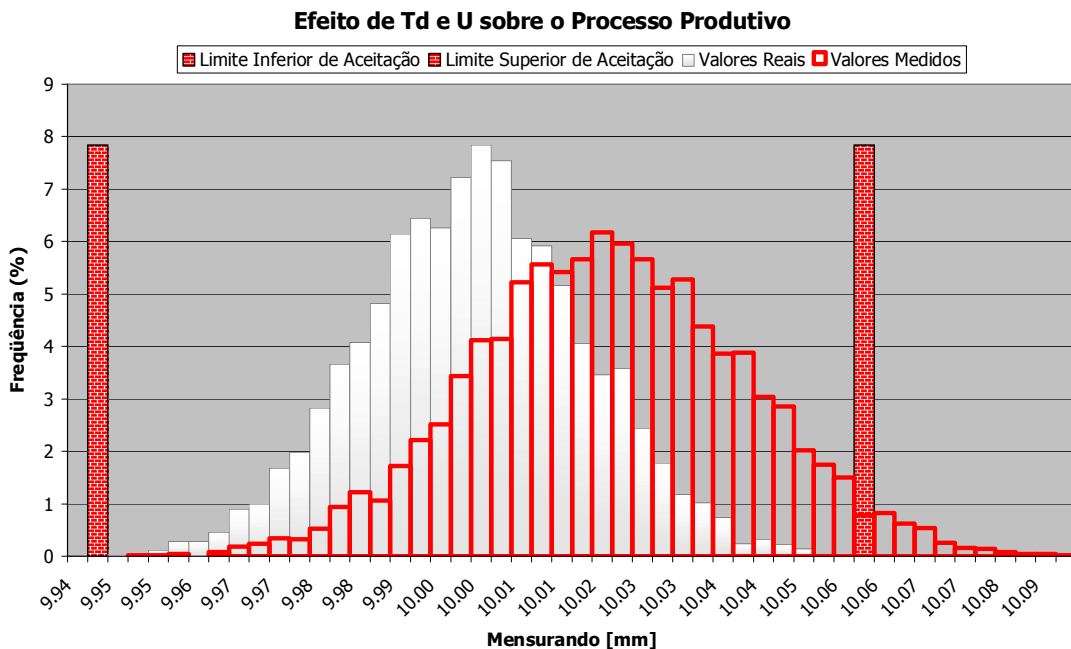


Figura 3.23 – Histograma do efeito da tendência e incerteza sobre o processo produtivo

3.5 Consideração da Incerteza de Medição na Faixa de Conformidade de Produtos pela ISO 14253-1

A incerteza dos processos de medição é um parâmetro de extrema importância para a confiabilidade de qualquer operação de controle dimensional. É por esta razão que sua consideração está incluída na norma ISO 14253-1, que trata das regras para comprovação da conformidade de produtos [30]. Segundo esta norma, a faixa de tolerância do produto deve ser diminuída da incerteza de medição para se obter a faixa de conformidade do produto. A figura 3.24 mostra que à medida que a incerteza aumenta, ocorre um decréscimo na faixa de aprovação do produto.

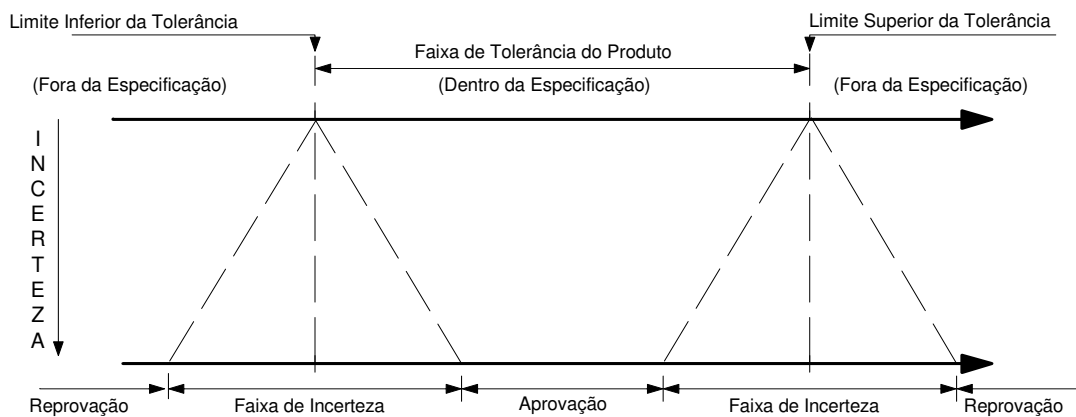


Figura 3.24 - Diminuição da zona de conformidade em função da incerteza de medição [15, 30]

Desta forma, processos com incertezas de medição elevadas terão um impacto direto em uma redução expressiva da faixa de aprovação dos produtos, ocasionando um número ainda maior de peças não conformes. Este fato reforça ainda mais a necessidade de se minimizar as incertezas de um processo de medição, para reduzir o número de peças rejeitadas na inspeção e permitir maior variação do processo de fabricação.

3.6 Ensaios de Verificação de Performance e Calibração de MMCs para Tarefas Específicas de Medição

Conforme já mencionado neste capítulo, a máquina de medir por coordenadas representa uma das fontes de incerteza de um processo de medição por coordenadas. Existem várias diretrizes e normas, nacionais e internacionais, que descrevem ensaios e condições necessárias para se avaliar a performance das MMCs, e como confrontar os resultados obtidos com as especificações do fabricante da máquina. Outros ensaios mais refinados na máquina, possibilitam calibrar MMCs para tarefas específicas de medição, com a obtenção das incertezas de medição. A diferença entre estes ensaios e suas respectivas aplicações é apresentada a seguir.

3.6.1 Ensaios de Verificação de Performance de MMCs

Os ensaios de verificação de performance de uma MMC são baseados em normas e diretrizes internacionais de aceitação e verificação de máquinas de medir, como a ISO 10360-2 [33], e correspondem ao conjunto de operações consensadas entre fabricantes e usuários de MMCs para verificar se a performance da máquina atende às especificações colocadas em um contrato de compra e venda. Estes ensaios são geralmente realizados logo após a instalação da máquina ou periodicamente, conforme contrato estabelecido com o fabricante da máquina. As normas de verificação da performance utilizadas não tratam de calibrações, mas sim de verificações para ensaios bem definidos, como medição de comprimentos, posição e forma. Entretanto, estes ensaios não permitem

avaliar a performance de medição de comprimentos da MMC para todo o volume da máquina e avaliar os erros de medição para outros mensurandos. Os ensaios de verificação de performance, portanto, não garantem rastreabilidade das medições realizadas com a máquina para todas as tarefas de medição [34, 35].

Entretanto, em 1995 já houve o reconhecimento, por parte da comunidade européia, de que os ensaios de verificação de performance e inspeções periódicas das máquinas de medir correspondiam ao estado da arte no ambiente industrial para “aproximar” a rastreabilidade às medições, nos casos em que certificados de calibração dos componentes medidos não eram requeridos [34]. Atualmente, está em fase de elaboração, um conjunto de normas internacionais referentes à avaliação de incertezas de medição em máquinas de medir por coordenadas (série ISO 15530), cuja aplicação também se destina às indústrias, além de laboratórios de calibração [36, 37].

3.6.2 Calibração de MMCs para Tarefas Específicas de Medição

Devido ao grande número de tarefas de medição possíveis de serem realizadas em uma MMC e às diversas estratégias de medição possíveis (número e distribuição dos pontos de medição e escolha dos apalpadores) para cada tarefa específica, não é praticável a calibração de MMCs para todas as situações. Portanto, as calibrações de MMCs são realizadas para tarefas específicas de medição, onde tanto a tarefa como as estratégias de medição adotadas estão bem definidas. Esta abordagem possibilita estabelecer rastreabilidade às medições específicas realizadas com a MMC.

Há basicamente três formas possíveis de calibração: utilizando-se o método da substituição, o método da síntese de erros e uma abordagem mista dos dois

primeiros. O método da substituição utiliza-se de objetos calibrados similares às peças a medir. O método da síntese dos erros baseia-se na análise dos erros introduzidos pelos diferentes componentes da MMC (erros paramétricos) e seus efeitos sobre o resultado da medição. O método misto é uma abordagem que utiliza ambos os métodos para uma definição completa da incerteza de medição do mensurando. O método da substituição é mais simples e recomendável quando os objetos de referência são disponíveis economicamente, e fornecem incertezas mais realistas [35]. Entretanto, há necessidade da realização dos ensaios de calibração para todas as tarefas de medição, cujas incertezas de medição deseja-se avaliar. O método da síntese dos erros permite avaliar as incertezas de diferentes tarefas de medição utilizando-se um mesmo conjunto de dados de ensaio, através de um software de simulação dos erros da máquina ("virtual CMM"), sendo portanto mais versátil [34].

Infelizmente, os ensaios de verificação de performance de MMCs estão sendo atualmente utilizados por fabricantes e laboratórios de calibração como calibrações de MMCs. A rigor, isto somente seria possível nas seguintes condições: a) se as peças a medir fossem similares aos padrões de referência utilizados na verificação de performance (tamanho, acabamento superficial, rigidez, massa, dureza), b) se as peças a medir fossem medidas exatamente nas posições dos padrões do ensaio de verificação de performance, c) se os parâmetros de medição a avaliar fossem apenas comprimentos.

3.7 Conclusões Gerais com Relação aos Efeitos do Processo de Medição sobre a Observação do Processo Produtivo

Em todas as simulações aqui realizadas ficou constatado um elevado efeito do processo de medição sobre a observação do processo produtivo. Pequenas relações entre incertezas e tendências do processo de medição e os respectivos intervalos de tolerância já provocam uma redução considerável na capacidade observada do processo produtivo. A prática usual na indústria, de se trabalhar com meios de medição com incertezas de até 1/5 ou 1/10 do intervalo de tolerância, não atende em muitos casos a capacidade observada admissível de 1,33 para o Cpk. Isto se torna ainda mais crítico quando efeitos sistemáticos não corrigidos do processo de medição (tendências) estão presentes, o que é bastante comum em processos de medição por coordenadas, pelo fato do ajuste da máquina pelo fabricante não poder ser realizado para as inúmeras tarefas específicas de medição.

O efeito da tendência do processo de medição pode levar a conclusões totalmente falsas do desempenho do processo. O índice de capacidade Cpk observado para um processo real não centrado (fora do alvo) pode ser inclusive melhor que a capacidade real do processo, se a tendência do processo de medição compensar este desvio do processo produtivo. A consequência disto é ruim para a indústria, uma vez que se supõe que o processo encontra-se próximo ao alvo, quando de fato está deslocado. Nenhuma ação será tomada para ajustar o processo produtivo, e os custos resultantes disto serão tanto maiores quanto mais distante no ciclo produtivo a falha for identificada, conforme ilustrado na figura 3.25 abaixo.

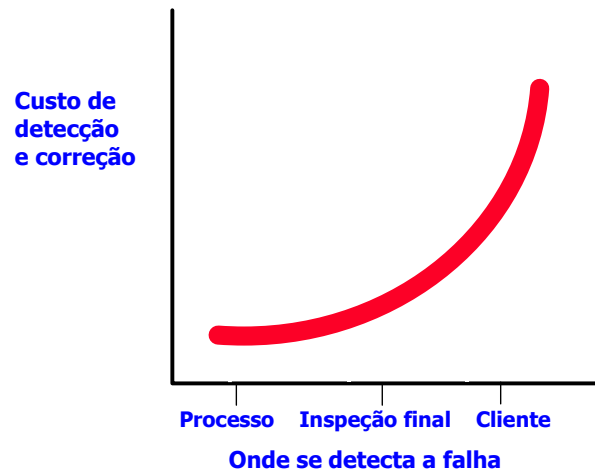


Figura 3.25 - Custo da qualidade associada ao momento da detecção de uma falha [38]

Nos anos 60, foi introduzida uma nova definição operacional da qualidade classe mundial, relacionada com o conceito de perda para a sociedade: "... no alvo, com variância mínima" [24]. Esta abordagem vale também para processos de medição, cuja tendência nula e incerteza pequena frente ao intervalo de tolerância minimiza os custos da qualidade envolvidos com o processo. Nas simulações realizadas, ficou constatada a observação de uma maior fração não conforme de peças quando o processo de medição tem tendências e incertezas de medição maiores. Outro aspecto a considerar, é que o uso de processos de medição com valores maiores de incertezas de medição também tende a proporcionar um maior número de peças não conformes que são aprovadas pelo processo de inspeção. Os custos envolvidos com estas falhas são em geral maiores que os custos de apenas rejeitar peças conformes, e tanto maiores quanto mais distantes no processo forem identificados e corrigidos.

A grande maioria das indústrias que utilizam máquinas de medir por coordenadas para inspeção de processos seriados não avalia as incertezas de seus processos de medição, e quando o fazem geralmente subestimam as

incertezas adotando erroneamente as incertezas de medição especificadas pelo fabricante. A consequência disto é a perda de confiabilidade dos resultados de medição e substancial aumento dos custos da qualidade.

Conforme já mencionado neste capítulo, são muitas as fontes de incerteza sobre um processo de medição por coordenadas. O conhecimento dos efeitos dessas fontes de incerteza é fundamental para que se possa realizar ações com intuito de minimizá-las e garantir a confiabilidade dos resultados de medição, e consequente qualidade dos produtos fabricados.

Para garantir a confiabilidade dos processos de medição, é fundamental que os mesmos sejam validados por um método que permita conhecer melhor suas variações e comparar o seu desempenho com os requisitos de qualidade especificados pela indústria. Este trabalho reuniu diversas informações de métodos de avaliação de processos produtivos e de meios de medição já consagradas na indústria e sintetizou um método aplicável diretamente à validação de processos de medição por coordenadas nas indústrias. O método de validação proposto está descrito no capítulo seguinte.

Capítulo 4

Um Método para Validação de Processos de Medição por Coordenadas em Operações de Controle da Qualidade

O método de validação proposto objetiva avaliar o processo de medição por coordenadas e propor ações de melhoria de caráter metrológico e operacional. As melhorias metrológicas ocorrem no sentido de reduzir as incertezas de medição para adequá-las a uma incerteza máxima admissível especificada pela indústria. As melhorias operacionais ocorrem no sentido de tornar o processo de medição mais eficiente no tempo, disponibilizando mais horas de máquina para outras tarefas de medição. Este método de validação também aborda a necessidade de uma verificação periódica da máquina e do processo de medição. As verificações periódicas da máquina são realizadas de forma a se avaliar a sua estabilidade no tempo e identificar o momento apropriado de se realizar o ajuste da mesma. As verificações periódicas do processo de medição são realizadas com o intuito de verificar a estabilidade de um processo de medição específico no tempo, bem como de buscar um aperfeiçoamento contínuo do mesmo.

É imprescindível conhecer as limitações de um processo de medição para que se possa agir de forma eficaz sobre o processo produtivo em questão. Estas limitações estariam bem definidas se fossem conhecidas as incertezas do processo de medição para cada parâmetro de inspeção de um determinado produto. Por esta razão, foi elaborada recentemente a norma ISO 15530 parte 3, que trata da determinação de incertezas de medição em máquinas de medir por coordenadas, utilizando-se peças calibradas. O objetivo da norma é fornecer uma técnica experimental que simplifique a avaliação de incertezas nas medições com máquinas de medir por coordenadas [36]. Com base nesta norma e na ferramenta estatística mais importante para monitoramento de processos, que são as cartas de controle, foi elaborado o método proposto para validação de processos de medição por coordenadas em operações de controle da qualidade, descrito a seguir. Uma visão geral deste método é apresentada no fluxograma da figura 4.1.

Para um melhor entendimento, o método de validação foi dividido em 3 grandes partes, mostradas no fluxograma pelas áreas entre as linhas tracejadas e identificadas como A, B e C. Constam nos subitens a seguir, os esclarecimentos mais detalhados relacionados a cada uma dessas partes.

FLUXOGRAMA DE VALIDAÇÃO DE UM PROCESSO DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS (PMC)

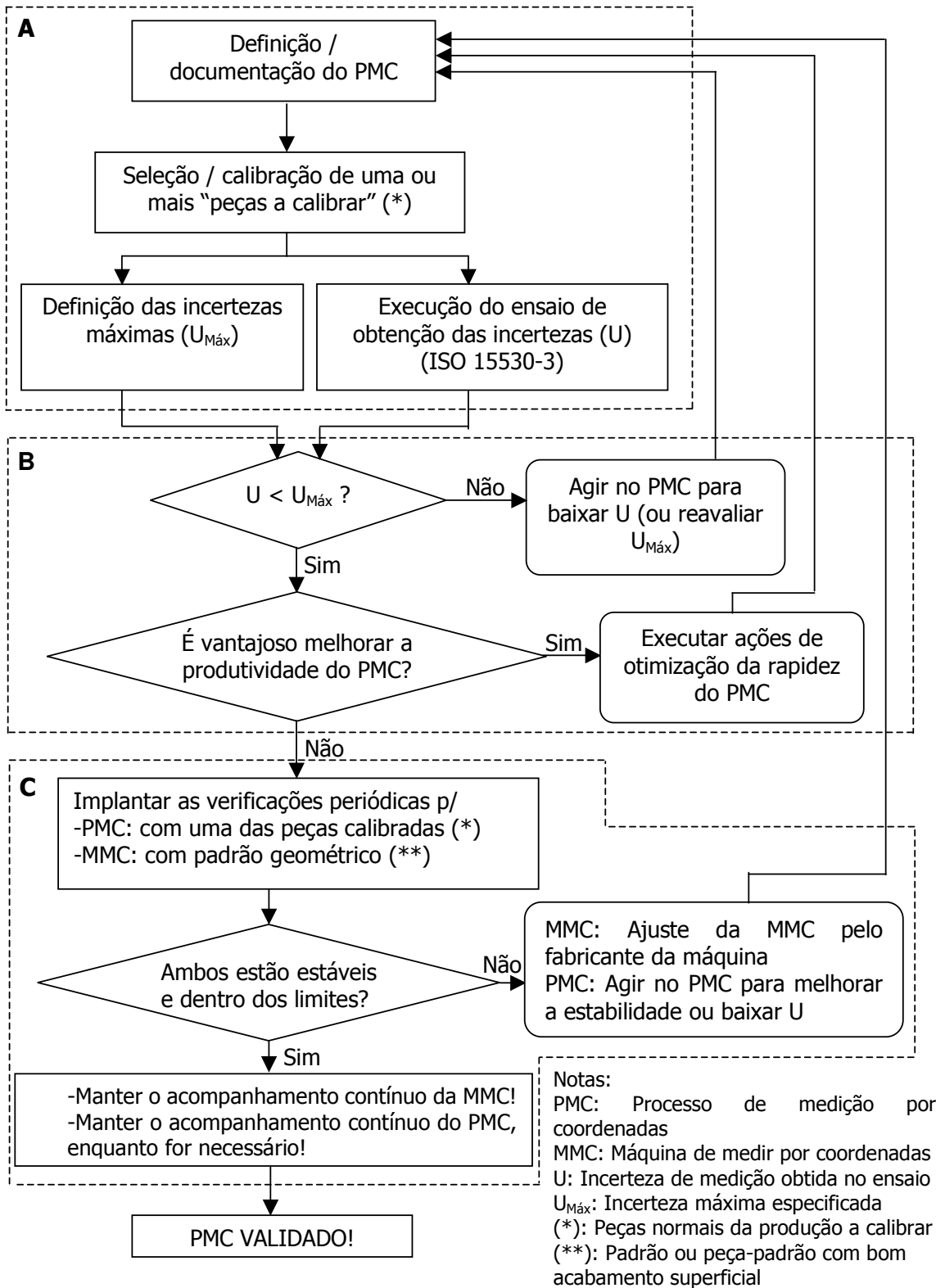


Figura 4.1 - Fluxograma de validação de um PMC [39]

4.1 Área A – Avaliação das Incertezas (U) de Processos de Medição por Coordenadas (PMC)

O método de avaliação das incertezas de medição do processo de medição por coordenadas se baseia na norma ISO 15530-3, e utiliza peças calibradas para simular as medições reais na máquina de medir por coordenadas (MMC). As incertezas de medição são avaliadas para cada parâmetro de inspeção do produto. Uma comparação das incertezas obtidas com as incertezas máximas estabelecidas pela indústria permite afirmar se o processo de medição está ou não validado em um determinado momento.

4.1.1 Definição e Documentação do PMC

Para validar um processo de medição por coordenadas deve-se, em primeiro lugar, defini-lo e documentá-lo. A documentação das condições reais do processo de medição por coordenadas é importante para a padronização das medições, para o conhecimento das amplitudes de variação de algumas das fontes de incerteza e para a definição de ações de melhoria no processo de medição.

Deve-se relacionar por exemplo: peça, parâmetros de inspeção, desenhos e tolerâncias, etapas de fabricação, máquina de medir por coordenadas, acessórios da máquina (apalpadores, esfera-padrão, dispositivo de fixação, etc.), programas de medição CNC (ou procedimentos de medição manual), posições e orientações das peças no volume da máquina, condições ambientais em torno da máquina, faixa de temperatura em que as peças são normalmente medidas, frequência e horários em que as medições são realizadas, operadores encarregados, situações especiais que influem nas medições, etc.

4.1.2 Seleção e Calibração das “Peças a Calibrar”

As peças a calibrar devem ser similares às peças reais inspecionadas com o processo de medição por coordenadas em avaliação. Estas peças devem cumprir os requisitos de similaridade colocados na figura 4.2, conforme estabelecido na norma ISO 15530-3 [36].

Parâmetro	Requisitos Admissíveis	
Características geométricas	Dimensão	-acima de 250 mm: até 10 % de variação -até 250 mm: até 25 mm de variação
	Ângulos	até +/- 5° de variação
Material: dureza, coef. exp. térmica, elasticidade)	Deveriam ser similares devido às propriedades funcionais	

Figura 4.2 - Requisitos de similaridade para as peças a calibrar [36]

As peças a calibrar não devem ter desvios de forma localizados, como rebarbas, rechupes, deformações, etc, próximos aos pontos de medição.

Existe a possibilidade prevista pela norma de se utilizar apenas uma única peça calibrada no ensaio de avaliação das incertezas. Entretanto, a utilização de mais peças calibradas no ensaio de avaliação das incertezas do PMC, permite considerar também a influência das variações do processo produtivo (desgaste de ferramentas e máquinas, variações de temperatura, esforço de corte, lubrificação, dureza e tamanho da matéria-prima, habilidades do operador em centralizar e alimentar as peças, constância de fornecimento elétrico, etc.) sobre

os resultados de medição. Estas variações se manifestam nas características das peças (desvios de forma, coeficiente de expansão térmica, elasticidade, plasticidade e rugosidade). O uso de apenas uma peça calibrada somente é possível se as variações manifestadas entre as peças são conhecidas e pequenas o suficiente para que possam ser desprezadas, ou se os efeitos das variações das peças no processo de medição sejam devidamente avaliados e adicionados quadraticamente às variações obtidas no ensaio proposto [36]. Para os casos gerais, recomenda-se o uso de pelo menos 3 peças calibradas, obtidas de diferentes lotes.

A calibração das peças selecionadas é realizada em uma MMC de referência, do laboratório de metrologia da própria indústria ou de um laboratório de calibração externo, na temperatura de referência 20°C. As estratégias adotadas na calibração (número e distribuição de pontos, apalpadores, referências de alinhamento da peça, formas de fixação, etc.) devem ser consistentes às características físicas (acabamento superficial, elasticidade, presença de defeitos localizados, etc.) e funcionais das peças. As incertezas da calibração devem valer para os mensurandos e estratégias de medição adotadas no processo de medição real. Entretanto, o objetivo principal da calibração não é comparar resultados obtidos entre MMCs, mas sim adquirir os valores de referência, com as respectivas incertezas, dos mensurandos das peças a calibrar. Desta forma, as estratégias de medição adotadas na calibração não devem ser as mesmas das adotadas no processo de medição, se estas forem inadequadas.

As incertezas da calibração dos mensurandos, das peças para o ensaio de avaliação de incertezas do PMC, devem ser baixas o suficiente para não contribuir significativamente no balanço de incertezas final do PMC. Entretanto, a obtenção de incertezas baixas o suficiente pode não ser possível para peças com desvios de forma elevados. Uma forma de minimizar as incertezas dos processos de medição e calibração é aumentando-se significativamente o número de

pontos de medição. A norma ISO 15530-6 (em elaboração) pode ser utilizada como um guia para se avaliar as incertezas de medição na calibração de peças com máquinas de medir por coordenadas [37].

4.1.3 Definição das Incertezas Máximas ($U_{Máx}$)

Cada parâmetro de inspeção deve ter associada uma incerteza máxima admissível. A definição destas incertezas é resultado de uma decisão gerencial pela indústria, envolvendo principalmente as áreas de projeto, fabricação e garantia da qualidade. A incerteza máxima é determinada levando-se em conta a especificação do produto (tolerância ou erro máximo permissível (MPE)), estudos de CEP, custos, parâmetros críticos, requisitos da qualidade, etc. [9]. Para vários destes critérios, foi elaborada neste trabalho uma ferramenta computacional (figura 4.3) que define as incertezas máximas para cada parâmetro de inspeção.

1 **DEFINIÇÃO DAS INCERTEZAS MÁXIMAS (U_{95})**

2

3 Escolher o critério entre as opções abaixo:

4

5 1- Relação Tolerância / Incerteza de Medição

6

7 2- Índices de Capabilidade de meios de medição (Cg, Cgk)

8

9 3- Número de falhas de classificação de conformidade (em ppm)

10

11 4- Custo resultante das falhas de classificação de conformidade (em unidades monetárias)

12

13 5- Redução da capacidade do processo devido ao PMC

14

15 6- Valores quaisquer para cada parâmetro de inspeção

16

17 **Informar dados!**

18

19

20

Documentação do PMC Planilha Doc1 Planilha Doc2 Valores REF. U Máxima Gráfico1

Fig. 4.3 - Ferramenta computacional para definição de $U_{Máx}$

Com o uso desta ferramenta, as incertezas máximas de cada parâmetro de inspeção de um produto podem ser definidas com relação ao seu processo produtivo das seguintes formas:

- Relação tolerância / incerteza de medição: definido por uma relação numérica entre o intervalo de tolerância e a incerteza de medição;
- Índices de capacidade de meios de medição (C_g , C_{gk}): índices obtidos ou especificados considerando-se a avaliação de meios de medição através de padrões bem acabados (com pequenos desvios de forma e rugosidade) [6, 7, 8];
- Número de falhas na inspeção de conformidade das peças: especifica-se um número admissível de falhas (em ppm) de classificação das peças em conformes e não conformes, por culpa do processo de medição (peças conformes reprovadas e peças não conformes aprovadas);
- Custo resultante das falhas de inspeção da conformidade: alternativamente à opção anterior, especifica-se um custo admissível devido às falhas de inspeção por culpa do processo de medição. Neste caso, é necessária também uma estimativa dos custos reais, diretos e indiretos, relacionados com a reprovação de peças conformes e aprovação de peças não conformes.
- Redução da capacidade observada do processo devido ao efeito do PMC: especifica-se a redução admissível na capacidade observada do processo produtivo provocada pelo processo de medição, conforme demonstrado nas simulações realizadas nos itens 3.4.1 e 3.4.2 neste trabalho.
- Uso de valores de incerteza máxima já especificados ou obtidos por outras análises.

A ferramenta computacional leva em conta diferentes configurações de processos produtivos, definidos pelos índices de capacidade observados C_p e C_{pk} (ou pela dispersão e afastamento do processo em relação ao alvo) e análises de parcelas aleatória e sistemática do processo de medição.

4.1.4 Execução do Ensaio de Obtenção das Incertezas

Nos ensaios, as seguintes condições gerais devem ser seguidas [36]:

- Medir pelo menos 1 peça calibrada (um número maior permite considerar também o efeito das variações do processo produtivo no processo de medição, conforme explicado no item 4.1.2);
- Realizar pelo menos 20 ciclos de medição ao todo, e pelo menos 10 ciclos por peça calibrada (ex.: se forem utilizadas 3 peças, então se deve medir ao todo no mínimo 30 vezes, 10 vezes por peça);
- As medições devem ocorrer ao longo de um dia (se necessário, em 2 dias);
- Medir todos os parâmetros de inspeção;

O ensaio de avaliação das incertezas com as peças calibradas deve ocorrer nas condições mais próximas possíveis das medições reais, como se uma peça fabricada estivesse realmente sob inspeção. Os seguintes aspectos do processo de medição deveriam ser observados: programa CNC (o mesmo das medições reais), procedimento de fixação, estratégia de alinhamento, procedimentos de limpeza, temperatura da peça, tempo de estabilização térmica, parâmetros de máquina (velocidade de medição, velocidade de deslocamento, aceleração, desaceleração, força de medição e distância de aproximação), posições e orientações da peça na mesa da máquina, apalpadores, etc. Documentar as condições do ensaio para cada ciclo de medição.

As equações envolvidas com a determinação das incertezas de medição constam abaixo (equação 4.1):

$$U = k \cdot \sqrt{u_c^2 + u_p^2 + u_w^2} + |E| \quad (\text{Equação 4.1})$$

Onde:

- U é a incerteza de medição do processo de medição para o mensurando avaliado
- u_c é a incerteza padrão da calibração da peça utilizada para avaliação da incerteza do PMC. É obtida de U_c (incerteza expandida da peça calibrada), para uma determinada probabilidade de enquadramento), conforme equação 4.2.

$$u_c = U_c / k \quad (\text{Equação 4.2})$$

k: coeficiente de student (a norma recomenda utilizar k=2)

- u_p é a incerteza padrão devida à variação do processo de medição, correspondendo à repetitividade (tipo A) [40]

$$u_p = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (\text{Equação 4.3})$$

n: número de medições

- u_w é a incerteza padrão devido ao processo de fabricação (em geral admite-se que seu efeito já está considerado em u_p , quando são utilizadas pelo menos 3 peças calibradas, caso contrário seu valor deve ser avaliado e somado quadraticamente, conforme a equação 4.1)
- E: tendência do processo de medição (valor absoluto)

$$E = \bar{y} - x_c \quad (\text{Equação 4.4})$$

\bar{y} : média das medições

x_c : Valor calibrado do mensurando avaliado

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i \quad (\text{Equação 4.5})$$

Se mais de uma peça calibrada é utilizada, então as equações 4.3 e 4.4 devem ser readequadas ao número de peças utilizadas na avaliação do PMC, conforme as equações 4.6 e 4.7 a seguir:

$$u_P = \sqrt{\frac{1}{(m \cdot n - 1)} \sum_{j=1}^m \left[\sum_{i=1}^n (y_{i,j} - \bar{y}_j)^2 \right]} \quad (\text{Equação 4.6})$$

$$E = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (\bar{y}_j - x_{c_j}) \quad (\text{Equação 4.7})$$

n: número de medições

m: número de peças calibradas utilizadas

Eventuais contribuições de incertezas que não forem abordadas no ensaio, deverão ser consideradas em um balanço de incertezas final. Se após a realização do ensaio for decidido efetuar a correção da tendência E do processo de medição nas medições de rotina, devido à obtenção de uma incerteza maior que a máxima estabelecida e com contribuição significativa de desvios sistemáticos, então se deve refazer todo o ensaio utilizando-se os valores de correção. Esta necessidade foi colocada na norma ISO 15530-3 para não exigir que o usuário tenha que fazer considerações a respeito da incerteza da correção dos seus resultados de medição, uma vez que esta norma destina-se principalmente ao ambiente industrial.

4.1.5 Considerações Quanto à Garantia da Rastreabilidade

A garantia da rastreabilidade de medições em máquinas de medir, ou de qualquer outro meio de medição, é requisito básico em quaisquer sistemas de garantia da qualidade para produtos ou processos (ex.: ISO 17025 [41], ISO/TS 16949, ISO 10012 [42, 43]). Entretanto, os ensaios de verificação de performance de máquinas de medir por coordenadas não garantem rastreabilidade a todas as possíveis tarefas de medição, pois não há como se garantir que o valor real de um mensurando esteja dentro da faixa definida pela incerteza estimada por estes ensaios.

O método proposto neste trabalho permite levar rastreabilidade às medições realizadas na máquina de medir por coordenadas e às informações de ajustes no processo produtivo. A figura 4.4 abaixo ilustra como informações rastreadas chegam ao processo produtivo. Uma peça da produção é calibrada em uma máquina de medir por coordenadas de referência e utilizada no ensaio de uma MMC na produção. O ensaio realizado possibilita o conhecimento das incertezas deste processo de medição. Os dados gerados pelo processo de inspeção com esta máquina estão rastreados e são utilizados para o controle e ajuste do processo de fabricação.

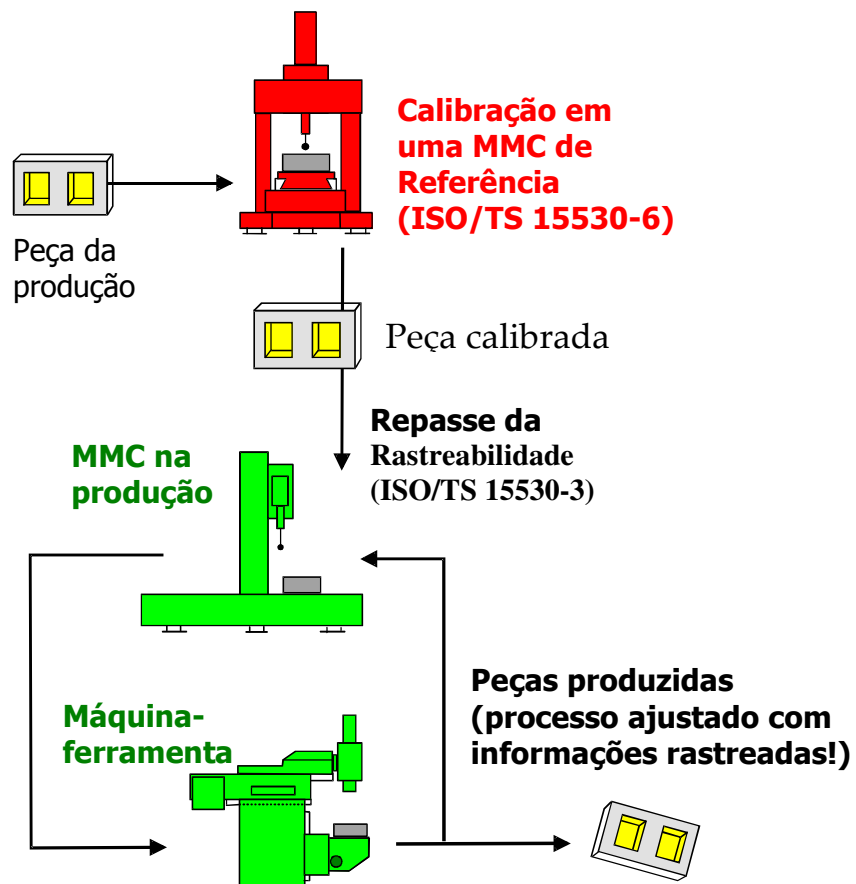


Figura 4.4 - Rastreabilidade de medições na produção [35]

4.2 Área B – Tomada de Decisões e Ações de Melhorias no PMC

As incertezas de medição obtidas com o ensaio segundo a norma ISO 15530 parte 3 são comparadas com as incertezas máximas admissíveis para cada parâmetro de inspeção. Todas as incertezas deveriam ser menores que as incertezas máximas especificadas.

4.2.1 Ação no PMC para Reduzir as Incertezas

Se as incertezas obtidas forem maiores que as incertezas máximas admissíveis, então são necessárias ações para baixar as incertezas de medição do processo de medição por coordenadas. O método iterativo de abordagem da adequação da incerteza de medição previsto no PUMA [9] pode ser utilizado para gerenciar este processo.

Para uma ação de melhoria eficaz sobre o PMC, é necessário conhecer suas principais causas de variação (sistemáticas ou aleatórias). Para tanto, recomenda-se a realização de alguns ensaios na máquina de medir:

a) Ensaio de curto prazo com uma única peça calibrada e uma única fixação: medir várias vezes a peça sem soltá-la, calcular o desvio-padrão e comparar com o desvio-padrão obtido no ensaio de avaliação das incertezas do PMC. Se for significativamente menor, então se deve avaliar:

- A repetitividade do dispositivo de fixação;
- As variações nas condições ambientais;
- A repetitividade na qualificação dos apalpadores.

b) Ensaio de apalpação: realizado para saber se o cabeçote indexador e o apalpador estão de acordo com o especificado pelo fabricante. Podem ser utilizados bloco-padrão, anel-padrão ou esfera-padrão, até 30 mm de dimensão, conforme se queira avaliar as incertezas de apalpação 1D, 2D ou 3D, respectivamente. De uma maneira geral, recomenda-se o uso de uma esfera-padrão calibrada, diferente daquela utilizada para qualificar os apalpadores [33].

c) Ensaio para verificação da performance da MMC: Pode-se basear na norma ISO 10360-2 (5 comprimentos em 7 posições, 3 ciclos, apalpações bidirecionais de pontos individuais, todos erros dentro do especificado). Se o ensaio demonstrar que a máquina não atende aos requisitos especificados, então será necessário realizar o ajuste da mesma [33].

d) Ensaio para avaliar erros da MMC em tarefas específicas de medição: podem ser utilizados padrões para avaliar erros da máquina de medir em situações específicas. O uso de padrões permite avaliar os efeitos dos erros da máquina e do ambiente, eliminando a influência dos desvios de forma e do acabamento superficial da peça. Os padrões devem portanto ser similares aos elementos reais de medição, cuja incerteza da máquina pretende-se avaliar. Podem ser utilizados os índices C_g e C_{gk} (índices de capacidade para meios de medição) para avaliar a capacidade da MMC em tarefas específicas de medição, através do uso de peças padrão com bom acabamento superficial [44].

e) Ensaio de R&R (Repetitividade e Reprodutibilidade): Permitem avaliar efeitos aleatórios no processo de medição em condições normais de operação, utilizando-se pelo menos 5 peças da produção e dois operadores. Cada operador deve medir cada peça no mínimo duas vezes [7, 1]. Os ensaios de R&R são ensaios consagrados internacionalmente e permitem obter conclusões importantes a respeito das variações dos processos de medição. O ensaio de avaliação das incertezas do PMC pode ser configurado de forma similar a um

estudo de R&R, permitindo obter as mesmas conclusões e, adicionalmente, a determinação das incertezas de medição do PMC. Processos de medição por coordenadas que utilizam máquinas de medir CNC, com dispositivos adequados de fixação, com alinhamento CNC das peças, com operadores devidamente treinados (capacitação operacional e metrológica) e com processamento automatizado dos resultados, não necessitam, na maioria dos casos, de uma avaliação da reprodutibilidade devida aos operadores. Para estes casos, é recomendado o ensaio do "Tipo 3" (caso especial de um estudo de R&R), onde um único operador mede pelo menos 5 peças ($n \geq 5$), no mínimo duas vezes cada peça ($r \geq 2$) e o produto entre o número de peças e o número de repetições deve ser no mínimo igual a 20 ($n.r \geq 20$) [7].

f) Ensaio de linearidade de posicionamento da MMC: realizado ao longo dos três eixos da MMC para avaliar o desempenho da máquina na medição de comprimentos. Recomenda-se o uso de padrões escalonados próprios para verificação de MMCs ou barras de furos ou esferas com passo de até 50 mm. Desvios significativos de linearidade, em relação aos requisitos internos da indústria para os produtos e processos, necessitarão de ajuste pelo fabricante da MMC.

g) Corrigir as tendências (desvios sistemáticos) obtidas do ensaio de avaliação das incertezas de medição do PMC. É uma prática comum nas indústrias não corrigir tendências de sistemas de medição, pela facilidade operacional que esta postura proporciona. A correção da tendência para cada parâmetro de inspeção é uma das maneiras mais simples de reduzir a incerteza do processo de medição, quando esta tem um peso significativo na incerteza. Em medição por coordenadas, os valores de correção poderiam ser incluídos no próprio programa CNC, sendo portanto automaticamente consideradas. Entretanto, os seguintes aspectos devem ser observados:

- A responsabilidade do ensaio de avaliação das incertezas do processo de medição aumenta, uma vez que os resultados de medição são de fato alterados. A decisão de aprovar ou rejeitar uma peça de acordo com os limites especificados dependerá diretamente das correções introduzidas no programa CNC. A realização adequada do ensaio de avaliação das incertezas e a própria calibração das peças para este ensaio são de fundamental importância.
- Haverá necessidade de controle e entendimento das correções introduzidas no programa CNC para que não ocorram maus usos das mesmas, como por exemplo: alterações involuntárias, uso do mesmo programa em outra máquina de medir (sem um prévio ajuste das correções introduzidas), conclusões falsas obtidas de medições manuais de caráter investigativo (para confirmação de resultados);
- A redução das incertezas de medição será possível apenas para os processos de medição cujo ensaio de avaliação das incertezas tenha sido realizado, com conseqüente correção das tendências. Assim sendo, as medições de outras peças ou de outros parâmetros de inspeção não terão suas incertezas reduzidas;
- Quaisquer mudanças no processo de medição (mesmo sendo melhorias!) implicarão na necessidade imediata de um novo ensaio de avaliação de incertezas e alteração dos valores de correção no programa CNC. Estas mudanças podem ser por exemplo: posição na máquina, apalpadores, condições ambientais, número de pontos de medição, etc.

As tendências não devem ser corrigidas com base apenas em um estudo de curto prazo, sob o risco de aumentar a variabilidade do PMC devido ao *tampering*. A utilização de dados de estabilidade do PMC no tempo ou de um histórico de avaliações de incertezas do PMC é recomendada quando se decide

pela correção das tendências do processo de medição.

h) Outras ações de melhoria: pequenas mudanças no processo de medição (estratégias, limpeza, parâmetros da máquina, apalpadores, alinhamento, fixação, etc.) podem ser suficientes para se baixar as incertezas para valores aceitáveis. Algumas dessas mudanças podem ser, por exemplo:

- Utilizar apalpadores mais curtos e mais espessos;
- Introduzir nos procedimentos de medição a limpeza das peças, apalpadores, esfera-padrão e dispositivo de fixação;
- Aumentar o número de ciclos de medição das peças (usar a média dos ciclos como resultado de medição);
- Aumentar o número de pontos de medição: resulta em uma definição mais exata do mensurando e em geral minimiza a dispersão dos elementos medidos;
- Baixar as velocidades de medição e de deslocamento, aceleração e desaceleração da máquina (os apalpadores deverão ser qualificados nas mesmas condições);
- Padronizar o posicionamento e orientação das peças na máquina e realizar o alinhamento CNC;
- Distribuir os pontos de medição em locais adequados na peça (ex.: pontos afastados das bordas em peças estampadas, pontos afastados de partes flexíveis de peças plásticas, etc);
- Distribuir os pontos afastados e de forma simétrica sobre o elemento da peça a medir. Este procedimento tende a minimizar os erros de medição;

As ações abaixo são recomendadas, em último caso, quando as demais ações de melhoria citadas acima não são suficientes ou inviáveis economicamente:

- Redefinir o processo de medição utilizando-se uma outra máquina de medir com melhor classe de precisão. O ensaio de avaliação das incertezas de medição deve ser refeito para a nova máquina;
- Reavaliar as incertezas máximas estabelecidas para os parâmetros de inspeção. Neste caso, os critérios da qualidade que foram utilizados anteriormente para definir as incertezas máximas não serão cumpridos.

Uma reavaliação das incertezas de medição deve ser realizada após as ações de melhoria no processo de medição visando a redução das incertezas.

Deve-se observar que o método apresenta, além de recomendações genéricas de otimização metrológica de processos de medição, recomendações específicas para processos de medição por coordenadas.

4.2.2 Análise de Otimização Operacional

Este item busca avaliar se é vantajoso melhorar a produtividade de um determinado processo de medição por coordenadas. Em muitas situações é importante que o PMC seja rápido e produtivo operacionalmente. Por exemplo:

- Quando a máquina de medir por coordenadas é utilizada em regime total de operação ou em determinados períodos do dia, ocasionando atrasos em outros setores da indústria;
- A indústria prevê aumento da demanda de serviços de inspeção na máquina de medir por coordenadas, e não há recursos para aquisição de uma outra máquina;

- São medidas muitas peças na máquina de medir por coordenadas por dia, logo uma pequena redução no tempo de medição por peça, resulta em uma grande economia de tempo de máquina. Ex.: 100 peças por dia, 10 minutos por peça: uma redução de 1 minuto por peça, resulta em uma economia de 100 minutos por dia;

Nesses casos, deve-se analisar a possibilidade de se otimizar operacionalmente o PMC. Algumas otimizações podem levar a um aumento da incerteza de medição. Portanto, devem ser realizadas de forma criteriosa. Uma reavaliação das incertezas de medição é necessária dependendo das alterações realizadas. As recomendações de otimização abaixo valem principalmente para máquinas CNC:

1- Verificar o tempo de medição total, procurando identificar as operações mais demoradas. Estas operações deveriam ser as primeiras a serem analisadas quanto à possibilidade de redução de tempo.

2- Otimizar o processo de fixação e alinhamento da peça na máquina: padronizar a posição e orientação da peça, conceber uma forma de fixação rápida e repetitiva e programar um alinhamento CNC da peça.

3- Reduzir tempos de máquina parada, causados por exemplo por:

- O operador realiza cálculos para obter os resultados de medição finais antes de repassá-los adiante;
- A máquina aguarda a impressão de resultados de medição (automaticamente pelo programa CNC);
- O operador aguarda a estabilização de temperatura da peça na máquina antes de medi-la;
- Problemas de gerenciamento e organização da rotina de trabalho (máquina parada em horários de almoço, lanche, troca de turnos, etc).

4- Reduzir os tempos de fixação das peças: uso de *pallets*;

5- Racionalizar o programa CNC:

- Programar as posições intermediárias do apalpador, tendo sempre em mente os próximos pontos e elementos a serem apalpados. Programar com uma seqüência contínua de medições, minimizando deslocamentos desnecessários do apalpador;
- Minimizar as indexações angulares dos apalpadores;
- Utilizar os recursos de programação off-line (fora da máquina) do software da máquina.
- Quanto à escolha dos apalpadores: A troca de apalpadores requer um certo tempo para ocorrer. Logo, se for possível minimizar as trocas, sem prejudicar a confiabilidade das medições, então isto é recomendável. Outra possibilidade para reduzir o número de trocas de apalpadores é a utilização de apalpadores do "tipo estrela".
- Quanto à alteração de parâmetros de medição da máquina de medir: (requer uma qualificação dos apalpadores nas mesmas condições!)
 - Aumentar a velocidade de deslocamento e/ou a aceleração e desaceleração da máquina: a alteração destes parâmetros modifica as condições dinâmicas da máquina. Não se deve ultrapassar os limites especificados pelo fabricante, sob pena de piora na confiabilidade das medições;
 - Aumentar a velocidade de medição: corresponde à velocidade de apalpação da máquina. Deve-se seguir as recomendações do fabricante. Velocidades muito altas tendem a aumentar a dispersão dos resultados.

- Reduzir a distância de aproximação: corresponde à distância que a máquina se desloca com velocidade de medição, antes de uma apalpação. Distâncias muito pequenas não são recomendáveis, pois se aumentam os erros devido a efeitos dinâmicos da máquina.
- Quanto ao número de pontos de medição: recomenda-se o número mínimo de pontos que represente bem o mensurando (compromisso de medir rápido, mas com qualidade). As máquinas com recursos de *scanning* permitem a medição de muitos pontos em um tempo relativamente curto. São apropriadas, portanto, quando se necessita de informações dos desvios de forma das peças.
- Quanto ao tempo de repetições, discussões e análises: repete-se freqüentemente medições de peças para confirmar resultados? Se isto ocorre é porque causas especiais não conhecidas estão atuando no PMC. Uma investigação do mesmo é necessária para eliminar ou minimizar estas variações. O tempo dedicado à repetição de medições, discussões e análises tende a ser bastante elevado, além de colocar em risco a confiabilidade das medições.

Quando o processo de medição por coordenadas estiver já padronizado e aprovado no ensaio de avaliação das incertezas, então se parte para os ensaios de verificação periódica.

4.3 Área C – Implantação das Verificações Periódicas de Estabilidade

As verificações periódicas são realizadas para os diferentes processos de medição por coordenadas da indústria e também especificamente para estas máquinas de medir. Ambos os tipos de verificações diferem entre si pelos objetos utilizados para a coleta dos dados e pelos seus objetivos, conforme exposto nos subitens 4.3.1 e 4.3.2. As ferramentas utilizadas para a análise dos dados de estabilidade são as Cartas de Controle, descritas brevemente no item 4.3.3.

4.3.1 Verificação da Estabilidade de Processos de Medição por Coordenadas

Um processo de medição por coordenadas somente recebe o status de validado se for comprovada a sua estabilidade no tempo e se os dados se mantêm dentro dos limites especificados de incerteza máxima para cada parâmetro de inspeção. Diz-se que o processo de medição é estável quando todos os pontos medidos situam-se dentro dos limites naturais de variação das cartas de controle. O uso de cartas de controle é fundamental para a observância da estabilidade, bem como para direcionar ações de melhorias consistentes no processo de medição.

Se um processo de medição estiver estável, os dados poderão ser utilizados para obter a tendência do processo de medição. O desvio padrão "s" também poderá ser utilizado para estimar a repetitividade "t.s" do processo de medição [1]. Portanto, estes dados podem ser utilizados para validar a incerteza de medição obtida com o ensaio segundo a ISO 15530-3.

Se a indústria tiver muitos processos de medição por coordenadas ou produtos com muitos parâmetros a inspecionar, então se sugere, pelo menos, avaliar a estabilidade dos processos mais críticos (ex.: processos de medição cuja dispersão das medições é próxima ao intervalo de tolerância, processos de medição de peças com requisitos funcionais vitais para a qualidade do produto final, etc.). Para cada um desses parâmetros será traçada uma carta de controle para o monitoramento do processo de medição.

Na fase de implantação da verificação periódica do processo de medição por coordenadas, deve-se selecionar uma das peças calibradas como objeto de referência, definir a frequência e horários em que os dados serão coletados, definir e instruir os responsáveis e a forma de documentação e o preenchimento dos dados nas respectivas cartas de controle. Recomenda-se que os dados sejam coletados em horários escolhidos de modo aleatório, de forma a garantir maior abrangência de condições possíveis de medição. A frequência da coleta dos dados depende do conhecimento que se tem a respeito da máquina de medir, da frequência de uso, da frequência de recalibrações ou reparos, do grau de severidade das condições operacionais. Valores típicos de frequência utilizadas nas indústrias são de 3 a 5 vezes diárias ou semanal [1].

As peças calibradas devem se manter estáveis ao longo do período do estudo de estabilidade, devendo ser substituídas por outras também calibradas se houver suspeita de instabilidade ou deterioração pelo manuseio, oxidação, etc. As novas peças também devem ser calibradas para que o ensaio de estabilidade permita avaliar também ao longo do tempo os desvios sistemáticos do processo de medição.

As análises com cartas de controle realizadas em estudos de CEP são utilizadas de forma análoga para a avaliação de um processo de medição [4]. As fontes de incerteza em um processo de medição são em menor número do que em um

processo produtivo, mas não menos importantes.

Para indústrias que mantenham um monitoramento contínuo do processo produtivo através de CEP, que façam verificações periódicas freqüentes nas máquinas de medir e cujos processos de medição já se encontrem sob controle estatístico e dentro dos limites especificados de incertezas máximas, não há uma obrigatoriedade de se manter uma verificação contínua também da estabilidade de processos de medição. Entretanto, esta pode ainda ser mantida se for vantajoso e viável reduzir ainda mais os desvios sistemáticos e aleatórios remanescentes no processo de medição ou para uma confirmação de que uma instabilidade detectada em um estudo de CEP não seja devida ao processo de medição.

Por outro lado, indústrias que possuam processos de medição cuja estabilidade esteja fora de controle ou seja desconhecida, devem implantar e manter o estudo de estabilidade do processo de medição, obtendo as informações necessárias para melhorar o processo de medição.

4.3.2 Verificação Periódica da Máquina de Medir por Coordenadas:

Com o uso, é natural que as máquinas de medir por coordenadas mudem suas características ao longo do tempo. Este processo é mais acentuado quando as condições ambientais (temperatura, vibrações, sujeira) não forem favoráveis. A verificação periódica da máquina permite prever o momento certo de se entrar em contato com a assistência técnica para o seu ajuste. Desta forma, evita-se que medições ocorram com a máquina desajustada, cujas implicações em custos diretos e indiretos podem ser muito alto. Além disso, economiza-se quando, analisando-se a carta de controle, for constatado que a máquina está dentro do

especificado e pode-se adiar o seu ajuste. Entretanto, a manutenção preventiva da máquina deve ser mantida mesmo assim, para evitar paradas inesperadas por falta de manutenção.

A máquina de medir por coordenadas deve ser verificada periodicamente com um padrão genérico e com bom acabamento superficial, como um tetraedro, cubo de esferas, placa padrão, "ball-bar", peças padrão, padrões escalonados, blocos-padrão, etc. Recomenda-se a verificação com padrões tridimensionais ou planos, de forma a reduzir o tempo necessário de verificação.

O padrão utilizado para verificar a estabilidade da máquina de medir deve ser calibrado em laboratórios que forneçam incertezas de medição baixas o suficiente para possibilitar uma avaliação do atendimento dos erros da máquina em relação aos limites de aceitação. Geralmente são utilizadas as próprias especificações do fabricante como limites de aceitação de uma máquina de medir. Entretanto, outros limites podem ser definidos de acordo com as necessidades reais da indústria.

Um estudo de estabilidade da máquina com objetos de referência não calibrados também é possível, se o enfoque for apenas avaliar as variações dos erros da máquina, sem se preocupar com os erros absolutos. Entretanto, deve-se ressaltar que os erros absolutos da máquina contribuem em geral de forma significativa na performance de uma máquina de medir, e não serão avaliados sem o uso de padrões calibrados.

A avaliação da estabilidade de uma máquina de medir é similar à avaliação do processo de medição (item 4.3.1). Diz-se que uma máquina de medir está estável quando todos os pontos medidos situem-se dentro dos limites naturais de variação das cartas de controle [4]. O uso de cartas de controle é fundamental para a observação da estabilidade da máquina.

4.3.3 Avaliação da Estabilidade e Performance de Medição

Essa análise visa responder se o processo de medição por coordenadas e a máquina de medir demonstram estabilidade e se atendem aos respectivos limites especificados.

Para avaliação da performance, o processo de medição deve atender aos limites definidos pelas incertezas máximas e a MMC deve atender aos limites de aceitação especificados para ela. Geralmente, são utilizados como limites para a máquina de medir a própria especificação de erro máximo admissível dado pelo fabricante, mas outros limites conforme a necessidade da indústria podem ser adotados.

Para avaliar a estabilidade de processos de medição recomenda-se o uso das cartas das Médias e Amplitudes (\bar{X}/R) ou das Médias e Desvio Padrão (\bar{X}/S) [4]. Para analisar a estabilidade de uma máquina de medir recomenda-se o uso das cartas de Indivíduos e Amplitude Móvel (\bar{X}/mR). Na análise das Cartas de Controle, deve-se procurar observar principalmente os seguintes comportamentos nos dados coletados [4]:

- Pontos além dos limites de controle: presume-se a ocorrência de uma causa especial de variação, que deve ser analisada e corrigida de imediato.
- Seqüência de 7 pontos consecutivos em um lado da média ou crescentes ou decrescentes: se ocorrer na carta de amplitudes, indica alguma mudança no processo de medição que resultou em uma maior ou menor dispersão das medições, conforme os valores estejam acima ou abaixo da amplitude média, respectivamente (não é válido para cartas (\bar{X}/mR). Se ocorrer na carta das médias, indica que a tendência do processo de medição se alterou.
- Padrões não aleatórios óbvios: por exemplo padrões cíclicos.

Na análise das cartas de controle deve-se considerar a significância prática e estatística dos dados. Os limites de controle das cartas são obtidos de acordo com as variações naturais do processo de medição ou da máquina em estudo. Portanto, se durante um certo tempo os dados se mantiverem com uma variação bastante reduzida, e se então forem adquiridos dados com variação ou média um pouco diferente, é provável que a carta indique pontos fora dos limites de controle. Estes pontos deveriam ser comparados com os limites especificados de incerteza máxima para saber se são realmente críticos. Uma análise com poucos pontos também pode acusar pontos fora dos limites. Neste caso, a coleta de mais dados deve ser suficiente para a definição mais realista dos limites de controle.

O número de subgrupos nas cartas de controle deveria assegurar que todas as fontes de incerteza tenham tido oportunidade de se manifestarem nos dados coletados. Tipicamente, 25 ou mais subgrupos, contendo 100 ou mais dados ao todo, dão uma boa base para determinar a estabilidade e boas estimativas de localização e dispersão.

4.3.4 Ajuste da MMC e Ações de Melhoria da Estabilidade do PMC

Se os erros da máquina tiverem uma tendência de exceder suas especificações, então se deve entrar em contato com a assistência técnica a fim de ajustá-la. Se os erros do PMC tiverem a tendência de exceder suas especificações, deve-se analisar as causas de imediato e agir sobre o processo de medição, conforme recomendações no item 4.2.1.

4.3.5 Monitoramento Contínuo para a MMC e PMC

O monitoramento contínuo da estabilidade da MMC, avaliada por um PMC com sistema de causas reduzido (uso de padrão com bom acabamento superficial e condições repetitivas de medição), é um pré-requisito para que um processo de medição por coordenadas qualquer nesta máquina possa ser considerado como validado.

Por outro lado, o monitoramento de um PMC, de uma característica crítica, deve ser realizado pelo menos enquanto for verificada a necessidade de se agir sobre o processo de medição, visando melhorá-lo.

Capítulo 5

Aplicações Realizadas do Método Proposto

Foram realizados alguns experimentos aplicando o método proposto com o objetivo de se avaliar na prática sua viabilidade de uso, vantagens e limitações. Procurou-se realizar experimentos que abrangessem o máximo possível do método proposto. Os experimentos realizados foram divididos em três grupos:

1. Determinação das incertezas de medição de processos de medição por coordenadas
2. Verificação periódica de uma MMC com um padrão de inspeção rápida
3. Otimização operacional de um processo de medição por coordenadas

5.1 Avaliação das Incertezas de Medição em Dois Processos de Medição por Coordenadas

Este caso prático teve como objetivo avaliar a simplicidade e eficácia da execução do ensaio de avaliação das incertezas de PMCs utilizando-se a norma ISO 15530-3. Adicionalmente, foi realizada uma análise crítica dos dados medidos para verificar a presença de causas especiais e estruturais de variação, além de possíveis ações para melhoria do processo de medição.

Os estudos foram realizados nas instalações da indústria. Foram avaliados 2 processos de medição por coordenadas (PMC) para um bloco de compressor para refrigeração:

-PMC 1: com uma MMC DEA Mistral ($U = 3,0 \mu\text{m} + 4L/1000 \mu\text{m}$, L em mm)

-PMC 2: com uma MMC Zeiss Eclipse ($U = 4,2 \mu\text{m} + 5L/1000 \mu\text{m}$, L em mm)

Ambos os processos de medição por coordenadas situam-se em salas de medição climatizadas na produção ($20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$). Não há uma padronização nos dois processos de medição quanto ao local e tempo em que as peças ficam armazenadas aguardando sua medição. As peças tanto podem ser trazidas diretamente para dentro da sala climatizada como aguardar do lado de fora. O tempo decorrido entre o recebimento de uma peça e sua medição também varia, dependendo da demanda de serviços na máquina. As medições ocorrem durante os 3 turnos de trabalho (24 horas/dia).

Os processos de medição avaliados são responsáveis pela inspeção das seguintes etapas de usinagem do bloco, realizadas em diferentes linhas de produção:

- Giratória GROB (faz o torneamento e desbaste de superfícies);
- Transfer GROB (faz furações e acabamento final de superfícies desbastadas);

- Brunidora NAGEL (faz o acabamento dos furos do mancal, cilindro e assento axial);

Foram avaliadas as incertezas de ambos os processos de medição por coordenadas, para os 4 parâmetros de inspeção dos blocos, apresentados na figura 5.1 abaixo.

Parâmetro de Inspeção	Valor Nominal [mm]	Intervalo de Tolerância [mm]
Planeza do assento axial	0	0,010
Batimento do assento axial	0	0,030
Batimento dos ressaltos	0	0,080
Perpendicularidade topo/cilindro	0	0,040

Figura 5.1 – Especificações técnicas dos parâmetros avaliados

A referência para a medição de ambos os batimentos é o furo do mancal. Os elementos de medição relacionados aos parâmetros de inspeção estão identificados na figura 5.2 abaixo.

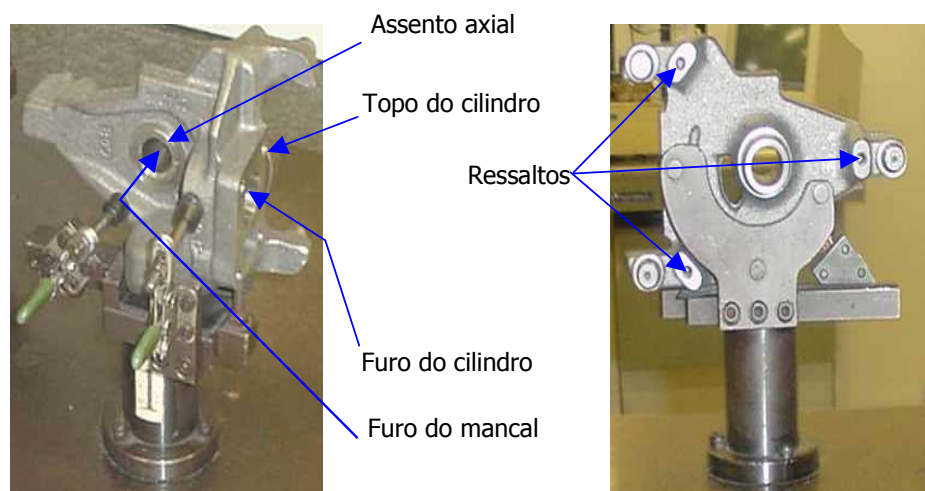


Figura 5.2 – Especificações técnicas dos parâmetros avaliados

Para estabelecer os valores de referência, foram selecionados aleatoriamente 3 blocos de linhas de produção diferentes. Estes blocos foram calibrados no laboratório de metrologia da indústria para cada uma das 4 cotas em estudo. Os valores de referência obtidos para os 3 blocos estão apresentados na figura 5.3. A incerteza de medição da calibração dos 4 parâmetros foi estimada em 0,0026 mm.

Cotas Calibradas	Peça 1	Peça 2	Peça 3
Planeza do assento axial [mm]	0,0020	0,0030	0,0013
Batimento do assento axial [mm]	0,032	0,042	0,023
Batimento dos ressaltos [mm]	0,043	0,075	0,062
Perpendicularidade topo/cilindro [mm]	0,012	0,024	0,032

Figura 5.3 – Valores calibrados dos parâmetros das 3 peças medidas

As mesmas peças calibradas foram utilizadas para a avaliação das incertezas dos dois processos de medição. Os seguintes procedimentos e condições foram seguidos em ambos os processos:

- Foram utilizados 3 dispositivos de fixação. Cada peça foi medida sempre em um mesmo dispositivo (conjuntos diferentes para cada PMC);
- As peças ficaram fora da sala de medição e somente foram trazidas para dentro no momento da medição (condição de medição mais freqüente). As três peças eram medidas em seqüência a cada ciclo de medição;
- Os respectivos operadores de cada turno ficaram responsáveis pelas medições realizadas em seus turnos;
- Recomendação interna de que o apalpador deveria ser limpo com papel e benzina antes da medição;

- As 3 peças foram medidas em intervalos aproximados de 2 horas ao longo de um dia (a primeira medição iniciou-se às 14 horas e a última encerrou-se às 12 horas do dia seguinte). Os parâmetros de inspeção foram medidos 12 vezes, totalizando 144 resultados para cada processo de medição.

5.2 Processo de Medição 1 (DEA Mistral)

5.2.1 Aquisição e análise dos dados do ensaio do PMC1

As medições foram conduzidas ao todo por 4 operadores nos seus respectivos horários. O potenciômetro de ajuste da velocidade da máquina foi setado na posição de velocidade máxima durante as medições (condição real de operação).

Os dados brutos obtidos das medições para as 3 peças calibradas estão apresentados no anexo A2. As diferenças entre os valores obtidos e os valores de referência (erros) foram plotadas em gráficos seqüenciais para os ciclos de medição realizados, com o objetivo de observar a presença de causas especiais e variações estruturais sobre o processo de medição. Verificou-se a ocorrência de causas especiais de variação na planeza do assento axial e na perpendicularidade topo/cilindro, cujos gráficos constam nas figuras 5.4 e 5.5.

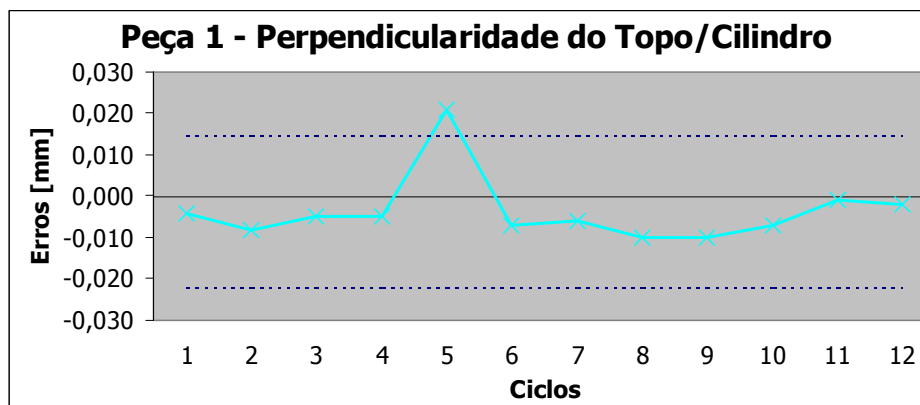


Figura 5.4 – Causa especial na perpendicularidade topo/cilindro da peça 1

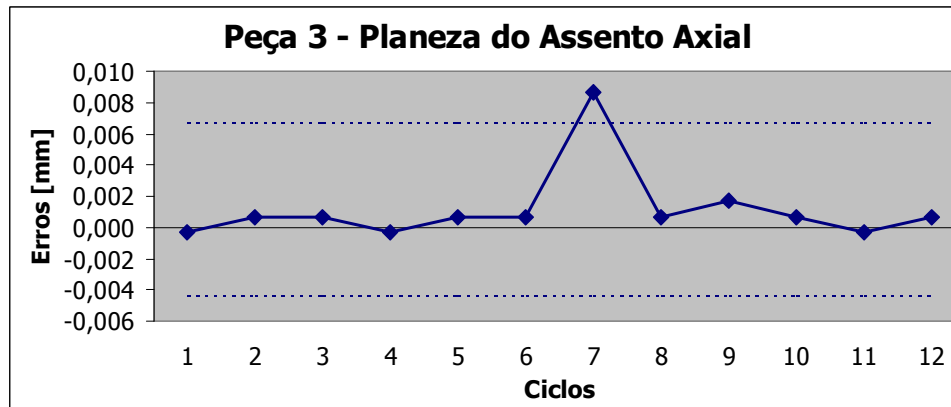


Figura 5.5 – Causa especial na planeza do assento axial da peça 3

Não foi possível obter as causas destes desvios, embora se suspeitasse de sujeira na peça ou no apalpador. Entretanto, ambos os pontos situaram-se dentro do intervalo de tolerância dos respectivos parâmetros do produto. Mesmo assim, uma investigação do processo de medição é necessária para identificar estas causas especiais. No contexto deste estudo, resolveu-se simplesmente eliminar estes 2 pontos, admitindo-se que o processo de medição será devidamente investigado, as causas serão minimizadas e as ações de prevenção tomadas (mudança no procedimento de medição e treinamento dos operadores).

Os gráficos a seguir, nas figuras 5.6 a 5.9, apresentam a seqüência dos erros de medição encontrados para as 3 peças por parâmetro de inspeção. Os pontos faltantes correspondem aos dois pontos excluídos da análise.

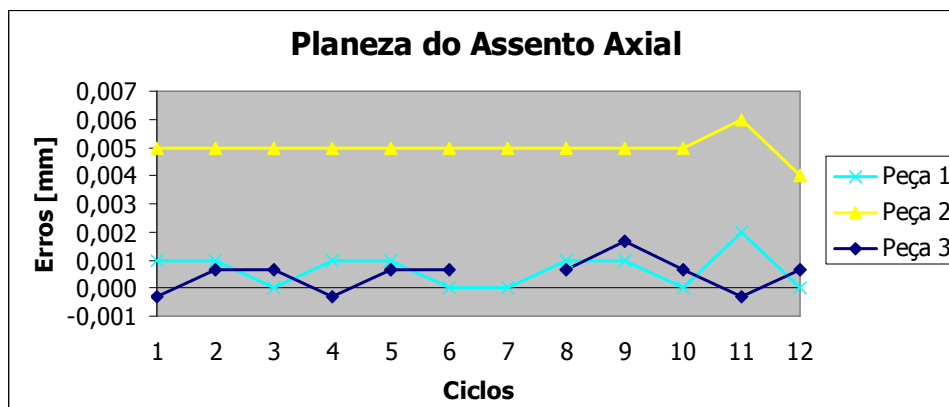


Figura 5.6 – Erros em relação ao valor calibrado para a planeza do assento axial

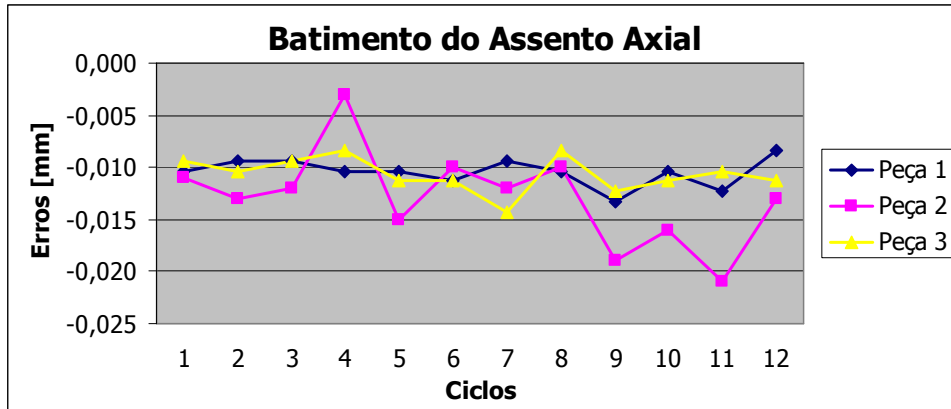


Figura 5.7 – Erros em relação ao valor calibrado para o batimento do assento axial

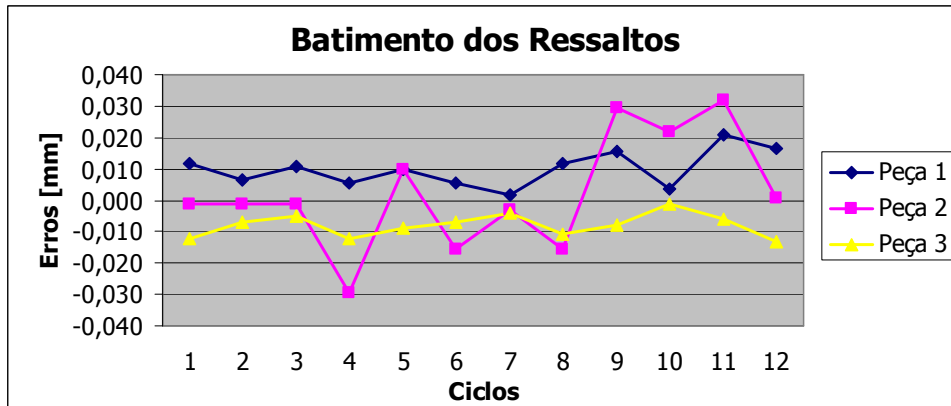


Figura 5.8 – Erros em relação ao valor calibrado para o batimento dos ressaltos

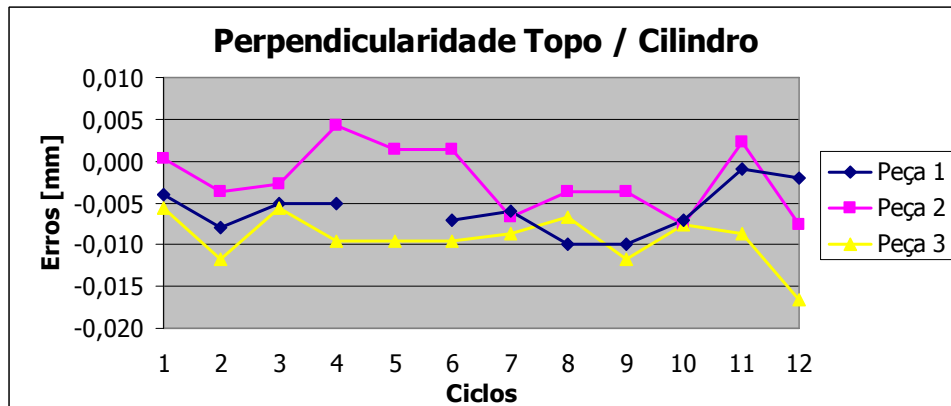


Figura 5.9 – Erros em relação ao valor calibrado para a perpendicularidade topo/cilindro

Analisando-se os dados obtidos para a planeza do assento axial das 3 peças, verifica-se que os valores por peça estão distribuídos em apenas 3 categorias, o que indica que a resolução utilizada na MMC de 0,001 mm é da mesma ordem de grandeza da variação natural das medições, sendo portanto inadequada para um controle eficaz do processo produtivo para a planeza do assento axial. Há uma recomendação em literatura técnica [1] de que a resolução deva ser de no máximo 1/10 da variação do processo produtivo, tendo em vista sua melhoria contínua. Em outra literatura técnica [7], especifica-se uma resolução máxima do sistema de medição de 5% do intervalo de tolerância (com ressalvas para tolerâncias muito apertadas). O gráfico da planeza do assento axial da peça 2 foi rerepresentado isoladamente na figura 5.10 para uma melhor visualização do efeito da resolução da máquina. Verifica-se que o processo de medição não está sob controle estatístico, uma vez que dois pontos ultrapassaram os limites de controle.

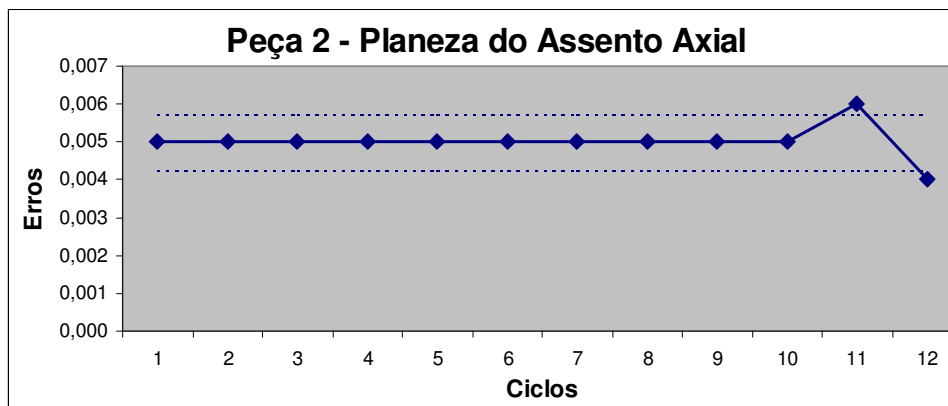


Figura 5.10 – Efeito da resolução da máquina sobre os dados medidos

Uma vez que é bastante simples incrementar uma casa decimal no software da MMC, esta ação deveria ser tomada para a indicação da planeza. Pode-se manter as três casas decimais para os demais parâmetros, com o intuito de facilitar uma pronta identificação dos resultados pelos operadores. No contexto

deste estudo, os dados foram processados com as três casas decimais, simulando a condição real vigente na época do ensaio.

Na análise dos gráficos seqüenciais (figuras 5.6 a 5.9), também foi verificado que o batimento do assento axial da peça 2 teve uma tendência de queda ao longo do ensaio, o que demonstra a presença de uma variação estrutural no processo de medição. A obtenção da incerteza de medição de um conjunto de dados com variações gradativas ao longo do ensaio torna-se em geral superestimada quando se considera uma distribuição normal para os dados, cuja distribuição real é mista (ex.: normal e retangular).

Especialistas em avaliação de incertezas de medição poderiam identificar a distribuição estatística mais apropriada dos dados e corrigir este efeito no cálculo de incertezas de medição. Entretanto, considerações deste tipo não são realidades em ambientes industriais. A melhor solução, portanto, é investigar e eliminar as causas de variação estrutural no processo de medição, e posteriormente refazer o ensaio de avaliação das incertezas. Neste estudo, as incertezas foram obtidas assumindo-se uma distribuição normal, conforme recomendação da norma ISO 15530-3.

Analisando-se os erros (valor medido menos valor de referência) das medições da planeza do assento axial para as 3 peças calibradas, verificou-se que os erros obtidos com a peça 2 diferem-se significativamente, e de forma sistemática, daqueles obtidos com as peças 1 e 3. Também não foi possível comprovar a causa para estas diferenças, mas há uma forte suspeita de que uma partícula estaria presa na superfície do assento axial da peça 2, pelas seguintes razões:

- Não constavam nas instruções de execução do ensaio procedimentos de limpeza das peças imediatamente antes das medições (para melhor representar as medições de rotina);

- O desvio de planeza obtido foi maior na peça 2;
- A maior dispersão e a tendência queda dos resultados do batimento do assento axial da peça 2, fato que não ocorreu para as demais peças;
- As calibrações das 3 peças foram realizadas em um mesmo momento e com o mesmo programa CNC. Os dados obtidos no ensaio para a planeza do assento axial das peças 1 e 2 conferem com os valores calibrados, logo a princípio não se desconfia dos valores de referência informados. A mesma peça 2 também foi medida 4 dias após na avaliação das incertezas do PMC 2, indicando também uma divergência na planeza do assento axial da peça 2 em relação às demais, entretanto abaixo de 2 μm .

Resolveu-se, neste estudo, avaliar as incertezas da planeza e do batimento do assento axial com e sem os dados da peça 2, de forma a caracterizar os diferentes efeitos nas incertezas finais.

5.2.2 Processamento e Análise dos Resultados do Ensaio do PMC 1

As tabelas a seguir (figuras 5.11 a 5.14) apresentam os resultados obtidos para os ciclos realizados em cada peça, por parâmetro inspecionado.

	Planeza do Assento Axial (mm)		
	Peça 1	Peça 2	Peça 3
Desvio padrão	0,0007	0,0004	0,0006
Média	0,0027	0,0080	0,0018
Valor calibrado	0,0020	0,0030	0,0013
Tendência	0,0007	0,0050	0,0005

Figura 5.11 – Tabela de resultados para a planeza do assento axial

Batimento do Assento Axial (mm)			
	Peça 1	Peça 2	Peça 3
Desvio padrão	0,001	0,005	0,002
Média	0,022	0,029	0,013
Valor calibrado	0,032	0,042	0,023
Tendência	-0,010	-0,013	-0,011

Figura 5.12 – Tabela de resultados para o batimento do assento axial

Batimento dos Ressaltos (mm)			
	Peça 1	Peça 2	Peça 3
Desvio padrão	0,006	0,018	0,004
Média	0,053	0,078	0,054
Valor calibrado	0,043	0,075	0,062
Tendência	0,010	0,002	-0,008

Figura 5.13 – Tabela de resultados para o batimento dos ressaltos

Perpendicularidade do Topo / Cilindro (mm)			
	Peça 1	Peça 2	Peça 3
Desvio padrão	0,003	0,004	0,003
Média	0,006	0,022	0,022
Valor calibrado	0,012	0,024	0,032
Tendência	-0,006	-0,002	-0,009

Figura 5.14 – Tabela de resultados para a perpendicularidade topo/cilindro

As tabelas nas figuras 5.15 e 5.16 apresentam os resultados processados de tendência e desvio padrão para cada parâmetro de inspeção do processo de medição, considerando-se e desconsiderando-se as medições relacionadas ao assento axial da peça 2, respectivamente.

Parâmetros	Tendência (mm)	Desvio padrão (mm)
Planeza do Assento Axial	0,0021	0,0022
Batimento do Assento Axial	-0,011	0,003
Batimento dos Ressaltos	0,001	0,013
Perpendicularidade do Topo / Cilindro	-0,006	0,004

Figura 5.15 – Avaliação da tendência e desvio padrão dos parâmetros inspecionados, incluindo os dados do assento axial da peça 2

Parâmetros	Tendência (mm)	Desvio padrão (mm)
Planeza do Assento Axial	0,0006	0,0006
Batimento do Assento Axial	-0,011	0,002
Batimento dos Ressaltos	0,001	0,013
Perpendicularidade do Topo / Cilindro	-0,006	0,004

Figura 5.16 – Avaliação da tendência e desvio padrão dos parâmetros inspecionados, sem os dados do assento axial da peça 2

Analisando-se comparativamente os resultados obtidos nas figuras 5.15 e 5.16, percebe-se uma diferença expressiva entre a tendência e o desvio padrão da planeza do assento axial em ambas as figuras. Esta diferença é explicada justamente pela divergência entre as tendências do processo de medição obtida com a peça 2 em relação às peças 1 e 3.

5.2.3 Determinação das Incertezas de Medição do Ensaio do PMC 1

Foram consideradas como fontes de incerteza a incerteza da calibração das peças e a repetitividade do processo de medição, dada pelo desvio padrão das diferenças entre os valores medidos e de referência para todas as peças e ciclos realizados. Assumiu-se que demais fontes de incerteza já foram consideradas na repetitividade, inclusive os efeitos de temperatura e do processo. Um balanço de incertezas foi realizado com estas duas fontes de incertezas, obtendo-se a incerteza expandida para $k=2$, conforme estabelecido na norma. Como incerteza final, a tendência do processo de medição foi somada à incerteza expandida obtida no balanço, assumindo-se que a tendência não será corrigida nas medições de rotina. Os balanços de incertezas com as incertezas finais de cada parâmetro de inspeção estão apresentados nas figuras abaixo:

PLANILHA DE CÁLCULO DE INCERTEZAS					
Mensurando: Planeza do Assento Axial					
Componentes de Incerteza	Valor (mm)	Distrib. de Probabilidades	Divisor	C	u (mm)
Influência do processo de fabricação	0,0000	Retangular	1,7321	1	0,0000
Influência da temperatura das peças	0,0000	Retangular	1,7321	1	0,0000
Influência da temperatura da MMC	0,0000	Retangular	1,7321	1	0,0000
Influência do coef. exp. térmica da peça	0,0000	Retangular	1,7321	1	0,0000
Influência do coef. exp. térmica da MMC	0,0000	Retangular	1,7321	1	0,0000
Repetitividade do processo de medição	0,0006	Normal	1,0000	1	0,0006
Incerteza da calibração de referência	0,0026	Normal	2,0000	1	0,0013
Incerteza Combinada					0,0014
Tendência					0,0006
U = Incerteza Expandida (k=2) + Tendência 					0,0035

Figura 5.17 – Balanço de incertezas para a planeza do assento axial

A incerteza obtida para a planeza do assento axial, mostrada na figura 5.17, desconsiderou os dados da peça 2. Se os dados da peça 2 fossem considerados nos cálculos, a incerteza final teria sido de 0,0073 mm, portanto, mais que o dobro da incerteza obtida.

A incerteza obtida para o batimento do assento axial (figura 5.18) desconsiderou os dados da peça 2. Se os dados da peça 2 fossem considerados nos cálculos, a incerteza final teria sido de 0,018 mm, portanto, um pouco maior que a incerteza obtida.

PLANILHA DE CÁLCULO DE INCERTEZAS					
Mensurando: Batimento do Assento Axial					
Componentes de Incerteza	Valor (mm)	Distrib. de Probabilidades	Divisor	C	u (mm)
Influência do processo de fabricação	0,0000	Retangular	1,7321	1	0,0000
Influência da temperatura das peças	0,0000	Retangular	1,7321	1	0,0000
Influência da temperatura da MMC	0,0000	Retangular	1,7321	1	0,0000
Influência do coef. exp. térmica da peça	0,0000	Retangular	1,7321	1	0,0000
Influência do coef. exp. térmica da MMC	0,0000	Retangular	1,7321	1	0,0000
Repetitividade do processo de medição	0,0015	Normal	1,0000	1	0,0015
Incerteza da calibração de referência	0,0026	Normal	2,0000	1	0,0013
Incerteza Combinada					0,0020
Tendência					-0,0105
U = Incerteza Expandida (k=2) + Tendência 					0,015

Figura 5.18 – Balanço de incertezas para o batimento do assento axial

As figuras 5.19 e 5.20 apresentam os balanços de incerteza para o batimento dos ressaltos e perpendicularidade do topo / cilindro.

PLANILHA DE CÁLCULO DE INCERTEZAS					
Mensurando: Batimento dos Ressaltos					
Componentes de Incerteza	Valor (mm)	Distrib. de Probabilidades	Divisor	C	u (mm)
Influência do processo de fabricação	0,0000	Retangular	1,7321	1	0,0000
Influência da temperatura das peças	0,0000	Retangular	1,7321	1	0,0000
Influência da temperatura da MMC	0,0000	Retangular	1,7321	1	0,0000
Influência do coef. exp. térmica da peça	0,0000	Retangular	1,7321	1	0,0000
Influência do coef. exp. térmica da MMC	0,0000	Retangular	1,7321	1	0,0000
Repetitividade do processo de medição	0,0133	Normal	1,0000	1	0,0133
Incerteza da calibração de referência	0,0026	Normal	2,0000	1	0,0013
Incerteza Combinada					0,0133
Tendência					0,0014
U = Incerteza Expandida (k=2) + Tendência 					0,028

Figura 5.19 – Balanço de incertezas para o batimento dos ressaltos

PLANILHA DE CÁLCULO DE INCERTEZAS					
Mensurando: Perpendicularidade do Topo / Cilindro					
Componentes de Incerteza	Valor (mm)	Distrib. de Probabilidades	Divisor	C	u (mm)
Influência do processo de fabricação	0,0000	Retangular	1,7321	1	0,0000
Influência da temperatura das peças	0,0000	Retangular	1,7321	1	0,0000
Influência da temperatura da MMC	0,0000	Retangular	1,7321	1	0,0000
Influência do coef. exp. térmica da peça	0,0000	Retangular	1,7321	1	0,0000
Influência do coef. exp. térmica da MMC	0,0000	Retangular	1,7321	1	0,0000
Repetitividade do processo de medição	0,0045	Normal	1,0000	1	0,0045
Incerteza da calibração de referência	0,0026	Normal	2,0000	1	0,0013
Incerteza Combinada					0,0046
Tendência					-0,0058
U = Incerteza Expandida (k=2) + Tendência 					0,015

Figura 5.20 – Balanço de incertezas para a perpendicularidade topo/cilindro

5.3 Processo de Medição 2 (Zeiss Eclipse)

5.3.1 Aquisição e Análise dos Dados do Ensaio do PMC2

As mesmas 3 peças calibradas para avaliar as incertezas de medição do PMC1 foram utilizadas para avaliar o PMC2. Seguiram-se as mesmas instruções de ensaio colocadas no item 5.1. Os mesmos parâmetros das peças foram avaliados e com a mesma quantidade de ciclos. Neste ensaio, 3 operadores se envolveram com as medições, de acordo com os seus respectivos turnos. As 4 primeiras medições foram realizadas com o operador A, da quinta a oitava com o operador B e da nona até a décima segunda com o operador C.

As tabelas com os dados brutos obtidos encontram-se no anexo A3. As figuras 5.21 a 5.24 a seguir apresentam os gráficos seqüenciais dos erros (valor medido menos valor calibrado) para os 4 parâmetros avaliados em cada peça.

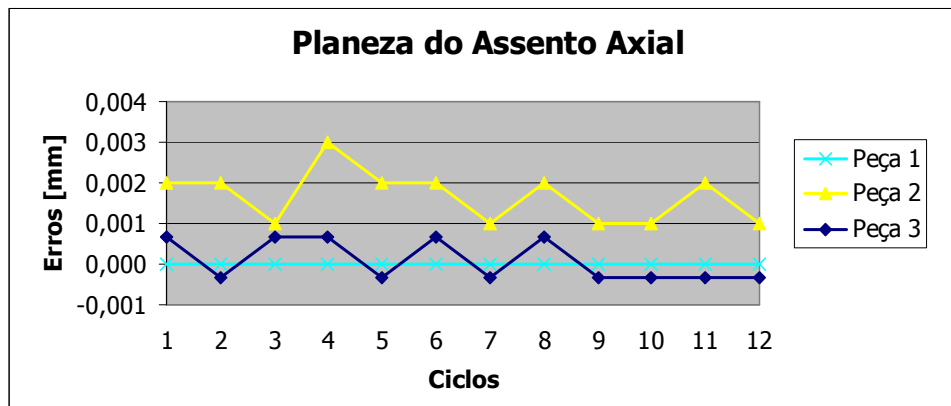


Figura 5.21 – Erros em relação ao valor calibrado para a planeza do assento axial

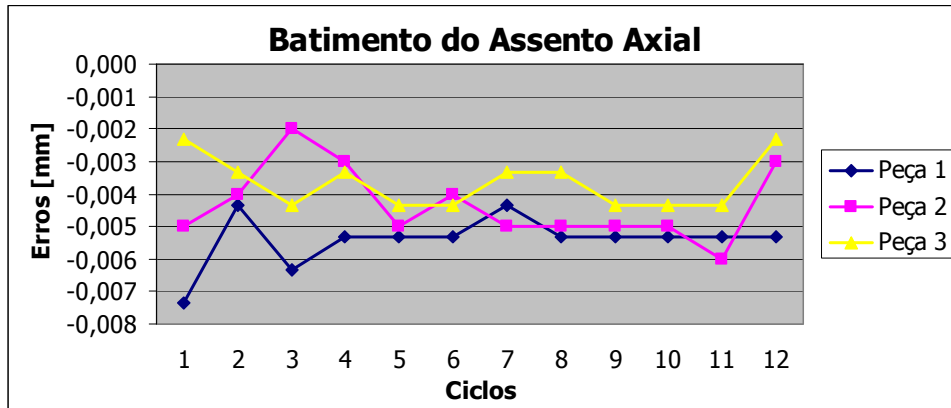


Figura 5.22 – Erros em relação ao valor calibrado para o batimento do assento axial

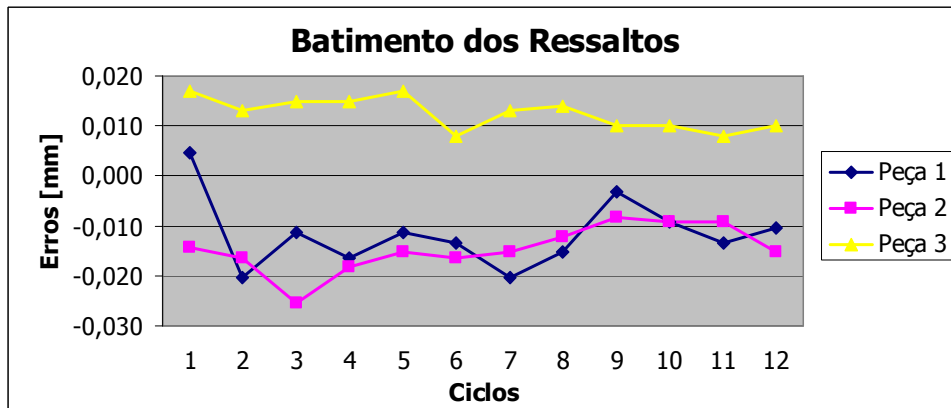


Figura 5.23 – Erros em relação ao valor calibrado para o batimento dos ressaltos

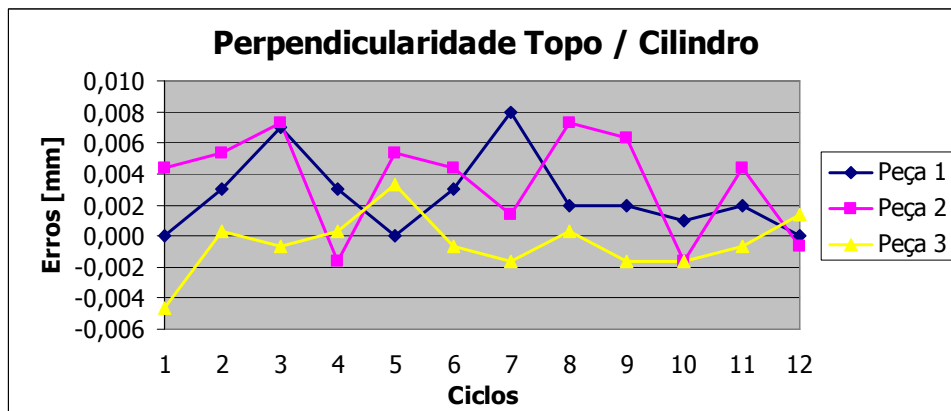


Figura 5.24 - Erros em relação ao valor calibrado para a perpendicularidade topo/cilindro

Analisando-se os gráficos nas figuras 5.21 a 5.24, percebe-se que no PMC2 não ocorreram pontos de uma mesma peça que se afastaram sensivelmente dos demais, como no PMC1. Verificou-se também que a resolução da MMC para a medição da planeza do assento axial não é adequada para se controlar o processo produtivo, conforme já mencionado nas análises do PMC1. A ausência de variação das indicações da MMC para a planeza da peça 1 foi devida à resolução da MMC não ser adequada.

Os erros do PMC2 para a medição da planeza do assento axial determinado pela peça 2 divergiu em cerca de 2 μm em relação às demais peças. Também para o batimento dos ressaltos houve uma divergência entre os erros obtidos do processo de medição com diferentes peças, indicando a presença de efeitos sistemáticos devidos às influências das peças sobre os resultados de medições. A diminuição da sensibilidade do processo de medição às influências das peças é recomendada. A observação dos gráficos também mostra que não ocorreram variações gradativas significativas no tempo, indicando estabilidade e consistência dos dados.

5.3.2 Processamento e Análise dos Resultados do Ensaio do PMC 2

As tabelas abaixo apresentam os resultados obtidos para os ciclos realizados em cada peça, por parâmetro inspecionado do PMC2 (figuras 5.25 a 5.28).

	Planeza Assento Axial (mm)		
	Peça 1	Peça 2	Peça 3
Desvio padrão	0,0000	0,0007	0,0005
Média	0,0020	0,0047	0,0014
Valor calibrado	0,0020	0,0030	0,0013
Tendência	0,0000	0,0017	0,0001

Figura 5.25 – Tabela de resultados para a planeza do assento axial

	Batimento Assento Axial (mm)		
	Peça 1	Peça 2	Peça 3
Desvio padrão	0,001	0,001	0,001
Média	0,027	0,038	0,020
Valor calibrado	0,032	0,042	0,023
Tendência	-0,005	-0,004	-0,004

Figura 5.26 – Tabela de resultados para o batimento do assento axial

	Batimento Ressaltos (mm)		
	Peça 1	Peça 2	Peça 3
Desvio padrão	0,007	0,005	0,003
Média	0,032	0,061	0,075
Valor calibrado	0,043	0,075	0,062
Tendência	-0,012	-0,015	0,013

Figura 5.27 – Tabela de resultados para o batimento dos ressaltos

	Perpendicularidade do Topo/Cilindro (mm)		
	Peça 1	Peça 2	Peça 3
Desvio padrão	0,003	0,003	0,002
Média	0,015	0,027	0,031
Valor calibrado	0,012	0,024	0,032
Tendência	0,003	0,004	0,000

Figura 5.28 – Tabela de resultados para a perpendicularidade topo/cilindro

A tabela seguinte apresenta os resultados processados para o processo de medição de cada parâmetro de inspeção (figura 5.29).

Parâmetros	Tendência (mm)	Desvio padrão (mm)
Planeza do Assento Axial	0,0006	0,0009
Batimento do Assento Axial	-0,004	0,001
Batimento dos Ressaltos	-0,005	0,013
Perpendicularidade do Topo/Cilindro	0,002	0,003

Figura 5.29 – Avaliação da tendência e desvio padrão do PMC para os parâmetros inspecionados

Analisando-se os resultados obtidos, verificou-se um desvio padrão maior para o batimento dos ressaltos, devido às divergências entre as tendências do processo de medição determinadas pela peça 3 em relação às demais.

5.3.3 Determinação das Incertezas de Medição do Ensaio do PMC 2

As incertezas de medição dos parâmetros inspecionados pelo PMC2 foram determinadas da mesma forma que para o PMC1 (item 5.2.3). Foram consideradas as mesmas fontes de incerteza e foram feitas as mesmas considerações de cálculos. Os balanços com as incertezas finais de cada parâmetro de inspeção do PMC2 estão apresentados nas figuras 5.30 a 5.33.

PLANILHA DE CÁLCULO DE INCERTEZAS					
Mensurando: Planeza Assento Axial					
Componentes de Incerteza	Valor (mm)	Distrib. de Probabilidades	Divisor	C	u (mm)
Influência do processo de fabricação	0,0000	Retangular	1,7321	1	0,0000
Influência da temperatura das peças	0,0000	Retangular	1,7321	1	0,0000
Influência da temperatura da MMC	0,0000	Retangular	1,7321	1	0,0000
Influência do coef. exp. térmica da peça	0,0000	Retangular	1,7321	1	0,0000
Influência do coef. exp. térmica da MMC	0,0000	Retangular	1,7321	1	0,0000
Repetitividade do processo de medição	0,0009	Normal	1,0000	1	0,0009
Incerteza da calibração de referência	0,0026	Normal	2,0000	1	0,0013
Incerteza Combinada					0,0016
Tendência					0,0006
U = Incerteza Expandida (k=2) + Tendência 					0,0038

Figura 5.30 – Balanço de incertezas para a planeza do assento axial do PMC2

PLANILHA DE CÁLCULO DE INCERTEZAS					
Mensurando: Batimento Assento Axial					
Componentes de Incerteza	Valor (mm)	Distrib. de Probabilidades	Divisor	C	u (mm)
Influência do processo de fabricação	0,0000	Retangular	1,7321	1	0,0000
Influência da temperatura das peças	0,0000	Retangular	1,7321	1	0,0000
Influência da temperatura da MMC	0,0000	Retangular	1,7321	1	0,0000
Influência do coef. exp. térmica da peça	0,0000	Retangular	1,7321	1	0,0000
Influência do coef. exp. térmica da MMC	0,0000	Retangular	1,7321	1	0,0000
Repetitividade do processo de medição	0,0012	Normal	1,0000	1	0,0012
Incerteza da calibração de referência	0,0026	Normal	2,0000	1	0,0013
Incerteza Combinada					0,0017
Tendência					-0,0045
U = Incerteza Expandida (k=2) + Tendência 					0,008

Figura 5.31 – Balanço de incertezas para o batimento do assento axial

PLANILHA DE CÁLCULO DE INCERTEZAS					
Mensurando: Batimento Ressaltos					
Componentes de Incerteza	Valor (mm)	Distrib. de Probabilidades	Divisor	C	u (mm)
Influência do processo de fabricação	0,0000	Retangular	1,7321	1	0,0000
Influência da temperatura das peças	0,0000	Retangular	1,7321	1	0,0000
Influência da temperatura da MMC	0,0000	Retangular	1,7321	1	0,0000
Influência do coef. exp. térmica da peça	0,0000	Retangular	1,7321	1	0,0000
Influência do coef. exp. térmica da MMC	0,0000	Retangular	1,7321	1	0,0000
Repetitividade do processo de medição	0,0133	Normal	1,0000	1	0,0133
Incerteza da calibração de referência	0,0026	Normal	2,0000	1	0,0013
Incerteza Combinada					0,0134
Tendência					-0,0046
U = Incerteza Expandida (k=2) + Tendência 					0,031

Figura 5.32 – Balanço de incertezas para o batimento dos ressaltos

PLANILHA DE CÁLCULO DE INCERTEZAS					
Mensurando: Perpendicularidade do Topo/Cilindro					
Componentes de Incerteza	Valor (mm)	Distrib. de Probabilidades	Divisor	C	u (mm)
Influência do processo de fabricação	0,0000	Retangular	1,7321	1	0,0000
Influência da temperatura das peças	0,0000	Retangular	1,7321	1	0,0000
Influência da temperatura da MMC	0,0000	Retangular	1,7321	1	0,0000
Influência do coef. exp. térmica da peça	0,0000	Retangular	1,7321	1	0,0000
Influência do coef. exp. térmica da MMC	0,0000	Retangular	1,7321	1	0,0000
Repetitividade do processo de medição	0,0031	Normal	1,0000	1	0,0031
Incerteza da calibração de referência	0,0026	Normal	2,0000	1	0,0013
Incerteza Combinada					0,0034
Tendência					0,0019
U = Incerteza Expandida (k=2) + Tendência 					0,009

Figura 5.33 – Balanço de incertezas para a perpendicularidade topo/cilindro

Analisando-se os balanços de incerteza, percebe-se que a incerteza da calibração teve uma influência considerável na definição da incerteza final, principalmente da planeza do assento axial.

5.4 Considerações e Conclusões a Respeito da Aplicação do Método nos Dois Processos de Medição por Coordenadas Avaliados

Nos dois ensaios realizados de aplicação da ISO 15530-3, foram utilizados recursos gráficos para avaliar a presença de causas especiais e estruturais de variação nos resultados de medição. A análise gráfica não faz parte do escopo da norma ISO 15530-3, mas foi utilizada pela sua facilidade e clareza na identificação de medições com incidência de causas especiais e para identificar possíveis limitações de aplicação da norma. As cartas de controle podem ser

utilizadas como uma ferramenta para diminuir a suscetibilidade do processo de medição à atuação das causas especiais. Algumas ações para deixar o PMC 1 menos sensível às causas especiais poderiam ser por exemplo: o aumento do número de pontos, uma limpeza mais freqüente das peças e apalpadores, e a medição das peças após equilíbrio térmico com o ambiente.

A confirmação da suspeita de uma partícula na peça 2 no ensaio do PMC1 teria sido possível se esta peça tivesse sido analisada durante a realização das medições. Para tanto, seria necessária uma análise crítica dos dados, à medida que estes fossem sendo adquiridos, ou o processamento dos dados já no local. Desta forma, as causas das divergências teriam sido obtidas e as ações corretivas prontamente tomadas. Entretanto, deve-se atentar para o fato de não melhorar o desempenho do processo de medição, sem que as devidas ações de padronização (alteração de procedimentos e treinamento dos operadores) sejam tomadas. A incerteza de medição obtida no ensaio deve representar fielmente a incerteza das medições de rotina.

Analisando-se os parâmetros de uma forma geral, verifica-se que há influência das peças nos resultados obtidos, pois se observa seqüências deslocadas entre si que se repetem com os ciclos. Isto reforça a idéia de que o processo produtivo tem a sua parcela de influência no processo de medição, manifestada na influência das peças. O uso de uma quantidade maior de peças neste caso é recomendável para uma avaliação mais realista da incerteza de medição. Algumas literaturas técnicas [37, 1] colocam a necessidade de se utilizar pelo menos 5 peças para se avaliar um processo de medição. O uso de apenas uma peça calibrada somente é possível se o processo for estável e as influências do processo produtivo forem conhecidas e desprezíveis frente a outras variações. Em ambos os PMCs avaliados neste estudo, o uso de apenas uma peça calibrada não teria sido suficiente para uma avaliação realista das incertezas de medição.

Comparando-se as incertezas de medição obtidas no ensaio com as incertezas da máquina declaradas pelo fabricante, percebe-se que, com exceção da planeza do assento axial, os 3 outros parâmetros resultaram em incertezas do processo de medição maiores que a incerteza da máquina (ex.: para o batimento dos ressaltos do PMC 2, $U_{MMC} = 0,005$ mm e $U_{PMC} = 0,031$ mm).

Comparando-se as incertezas de medição obtidas para os parâmetros de inspeção de ambos os PMCs avaliados com os respectivos intervalos de tolerância, foram encontradas relações tolerância/incerteza de 2,0 a 4,4. Estas relações estão bem abaixo das recomendações geralmente aceitáveis para a indústria (por exemplo, de 10/1), indicando a necessidade de uma investigação no processo de medição e ações para baixar as incertezas. O ensaio de avaliação das incertezas de medição terá que ser refeito após a implementação das ações corretivas no processo de medição.

Os seguintes pontos podem representar dificuldades para avaliação das incertezas pelo método proposto:

- Os desvios de forma das peças podem impedir a obtenção de uma incerteza adequada da calibração;
- Processos de medição reais com distribuições não normais dos dados necessitam de considerações estatísticas mais aprofundadas que dificultam a aplicação do método na indústria. A aplicação do método sem quaisquer ajustes fornecerá incertezas não representativas da realidade;
- Algumas peças da produção somente poderão ser utilizadas como referência no momento do ensaio, por motivos de oxidação ou instabilidade dimensional. Não poderão ser utilizadas portanto em ensaios de verificação periódica de um PMC ou então deverão ser recalibradas com maior frequência;

- Processos de medição que sejam sensíveis às variações das características das peças necessitarão de um número maior de peças para uma avaliação realista das incertezas de medição;
- O ensaio requer que as medições sejam realizadas ao longo de um dia inteiro. Isto exige o envolvimento dos operadores de todos os turnos de trabalho e planejamento para que as instruções de ensaio sejam seguidas de forma adequada por todos.

O objetivo inicial da realização destes ensaios foi comparar as incertezas obtidas com as incertezas máximas estabelecidas pela indústria, identificar as ações de melhoria no processo de medição e avaliar a estabilidade do processo de medição ao longo do tempo com uma das peças calibradas. Entretanto, diante da necessidade de melhor investigar os processos de medição, com o intuito de reduzir as incertezas e deixá-los sob controle estatístico, com conseqüente utilização de um maior tempo de máquina, resolveu-se nestes ensaios aplicar o método proposto apenas até a etapa de obtenção das incertezas de medição. Nos ensaios seguintes, procurou-se abranger outros pontos do método proposto.

5.5 Verificação Periódica de uma MMC com um Padrão de Inspeção Rápida

Conforme mencionado no capítulo anterior, uma verificação periódica freqüente da máquina de medir é importante para avaliar sua estabilidade no tempo e determinar o momento certo de se entrar em contato com o fabricante para um ajuste da máquina. Neste caso prático, foi empregado um padrão de inspeção rápida da máquina, como será visto mais adiante. Procurou-se com este estudo alcançar os seguintes objetivos:

- Avaliar a viabilidade de se utilizar um padrão de inspeção rápida de MMCs (tetraedro [45]) para verificação da estabilidade e erros da máquina, levando-se em conta a praticidade operacional e confiabilidade dos resultados obtidos;
- Verificar a possibilidade e facilidade de calibração de tetraedros, com relação a outros padrões de inspeção de MMCs;
- Comparar os erros de medição de comprimento obtidos no ensaio com as especificações técnicas do fabricante da máquina;
- Aplicar as análises com cartas de controle também para um processo de medição (do padrão utilizado), confirmando se o emprego das mesmas permite realmente levantar informações a respeito das variações do processo de medição e, avaliando também, se as cartas permitem afirmar se um processo é previsível ou não no tempo;
- Avaliar se as cartas de controle permitem a definição de ações de melhorias consistentes e se fornecem meios para identificar a eficácia destas ações;
- Confirmar a não necessidade de se realizar mais de um ciclo de medição na aquisição dos dados de estabilidade da MMC, quando se utiliza um padrão com bom acabamento superficial e desvios de forma reduzidos;

- Avaliar uma quantidade mínima necessária de pontos para que se possa concluir sobre a estabilidade da máquina.

5.5.1 Descrição do Ensaio de Verificação de Estabilidade

A realização deste estudo foi conduzida em uma máquina de medir por coordenadas Zeiss ZMC 550, situada no laboratório de calibração da Fundação CERTI. O padrão de inspeção rápida de MMCs utilizado foi um protótipo de tetraedro (figuras 5.34), fabricado na própria Fundação CERTI em conjunto com a Unimetrik [45]. Este padrão é constituído de 6 barras de aço de mesmo tamanho e 4 esferas formando uma estrutura tridimensional. O tetraedro permite a obtenção dos erros de posicionamento dos 3 eixos e as 3 perpendicularidades entre os eixos da máquina, além dos erros de medição de comprimento das 6 barras. Os erros de posicionamento e perpendicularidade da máquina são os que em geral mais estão suscetíveis a se desajustarem no tempo, com influência direta nas mudanças das características metrológicas da máquina. Neste estudo foi analisada somente a estabilidade da máquina para a medição das 6 distâncias do tetraedro, de forma a comparar estes resultados com a especificação técnica da máquina.



Figura 5.34: Uso de um tetraedro para inspeção rápida de uma MMC

Para avaliar os erros absolutos da máquina, o tetraedro foi calibrado na Fundação CERTI utilizando-se uma barra de esferas calibrada como referência e o método da substituição (figura 5.35). As temperaturas da barra de esferas e do tetraedro foram medidas e compensadas para a temperatura de referência 20°C, de forma a minimizar a incerteza da calibração, que foi avaliada em 1,0 μm ($k=2$).



Figura 5.35: Calibração do tetraedro utilizando-se uma barra de esferas

Para a aquisição dos dados de estabilidade, o tetraedro foi posicionado sobre uma placa e fixo em 4 pontos com “massa de modelar”. Esta fixação foi escolhida visando não deformar o tetraedro, permitir livre dilatação devido a efeitos de temperatura e por ser simples e se julgar suficiente. A placa, por sua vez, foi fixada na mesa da máquina com parafuso e grampo, conforme observado na figura 5.34. A posição do tetraedro no volume da máquina foi padronizada marcando-a sobre a mesa de granito, de forma a garantir uma boa repetição do posicionamento ao longo do tempo. A placa de apoio do tetraedro foi então posicionada a cada medição visualmente sobre as marcas.

Os dados foram coletados de uma a duas vezes por dia, variando-se os horários. A cada coleta foram realizadas duas inspeções sucessivas. O estudo de

estabilidade da máquina com o tetraedro durou pouco mais de um mês, totalizando 66 medições.

Um programa CNC foi gerado para medir as 6 distâncias espaciais entre as esferas. O alinhamento do tetraedro foi realizado automaticamente sempre no início do programa CNC, sem a necessidade de um pré-alinhamento manual. A cada medição, o tetraedro foi tirado de posição e fixado novamente. Não foi padronizado um apalpador específico, entretanto todos os apaladores utilizados foram verticais, com pequena variação de comprimento (50 a 80 mm) e diâmetros dos apaladores de 3 a 5 mm. Logo, pôde-se assumir que o uso de apaladores diferentes não influenciou significativamente os dados de medição.

O tetraedro ficou armazenado em geral em uma ante-sala de medição da máquina de medir. O ambiente da máquina e a ante-sala são climatizados na temperatura de referência 20°C. Como um dos objetivos do estudo foi avaliar a praticidade do uso do tetraedro e verificar se o uso de cartas de controle agregava informações sobre o desempenho do processo de medição, decidiu-se não adotar de início quaisquer procedimentos que minimizassem os efeitos de temperatura. Desta forma, a medição do tetraedro ocorreu imediatamente após este ser colocado na máquina e em diversos horários e situações de rotina da máquina e do ambiente. Mudanças controladas nos procedimentos foram realizadas ao longo do ensaio para verificar os respectivos efeitos nas cartas de controle.

5.5.2 Aquisição e Análise dos Dados

Foram utilizadas as cartas das médias e amplitudes (com 2 repetições) para se analisar os dados de medição. Foi plotada na carta das médias a maior diferença em módulo entre os 6 comprimentos medidos do tetraedro em relação aos

respectivos valores calibrados. As linhas azuis nas cartas das médias e amplitudes apresentadas na figura 5.36 representam os limites de controle obtidos para os dados coletados [3]. As linhas verdes representam respectivamente o valor médio e a amplitude média, nas cartas das médias e das amplitudes. Os dados obtidos, dias e horários estão apresentados em conjunto com as cartas. O diário de bordo do estudo de estabilidade com as informações relevantes específicas dos dados coletados encontra-se no anexo A4 deste trabalho.

TABELA: DADOS DE ESTABILIDADE DA MMC - CARTAS DE CONTROLE X/R																	
Nome da peça: Tetraedro			Parâmetro: Erro máximo de comprimento medido para as 6 barras do tetraedro														
MMC: Zeiss - ZMC 550 CAA			Valor Referência: 0,000			Unidade dos valores da carta: mm											
Data	29/07	30/07	31/07	01/08	02/08	03/08	04/08	05/08	06/08	07/08	08/08	11/08	13/08	14/08	14/08	18/08	18/08
Hora	22:30	20:00	19:30	22:00	19:30	19:00	13:30	22:00	19:30	19:00	22:00	19:00	8:30	12:30	21:30	1:40	19:30
Ciclos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	0,0026	0,0015	0,0030	0,0034	0,0036	0,0017	0,0022	0,0028	0,0022	0,0020	0,0031	0,0020	0,0024	0,0026	0,0019	0,0026	0,0023
2	0,0026	0,0019	0,0026	0,0033	0,0035	0,0026	0,0020	0,0021	0,0019	0,0024	0,0032	0,0021	0,0022	0,0023	0,0015	0,0024	0,0016
Média	0,0026	0,0017	0,0028	0,0033	0,0035	0,0021	0,0021	0,0024	0,0020	0,0022	0,0031	0,0020	0,0023	0,0024	0,0017	0,0025	0,0019
Ampl.	0,0000	0,0004	0,0004	0,0001	0,0001	0,0009	0,0002	0,0007	0,0003	0,0004	0,0001	0,0001	0,0002	0,0003	0,0004	0,0002	0,0007
Data	19/08	20/08	21/08	22/08	25/08	27/08	27/08	28/08	28/08	29/08	01/09	02/09	03/09	04/09	06/09	06/09	
Hora	16:00	15:00	12:30	14:00	21:30	8:00	15:00	13:30	19:00	19:00	19:00	19:00	19:30	19:30	12:00	18:00	
Ciclos	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	20	30	31	32	33	
1	0,0027	0,0022	0,0032	0,0018	0,0022	0,0026	0,0025	0,0024	0,0025	0,0022	0,0016	0,0015	0,0019	0,0016	0,0021	0,0018	
2	0,0018	0,0016	0,0021	0,0019	0,0028	0,0018	0,0026	0,0019	0,0022	0,0020	0,0019	0,0015	0,0014	0,0017	0,0025	0,0019	
Média	0,0022	0,0019	0,0026	0,0018	0,0025	0,0022	0,0026	0,0022	0,0023	0,0021	0,0017	0,0015	0,0016	0,0017	0,0023	0,0018	
Ampl.	0,0009	0,0006	0,0011	0,0001	0,0006	0,0008	0,0001	0,0005	0,0003	0,0002	0,0003	0,0000	0,0005	0,0001	0,0004	0,0001	

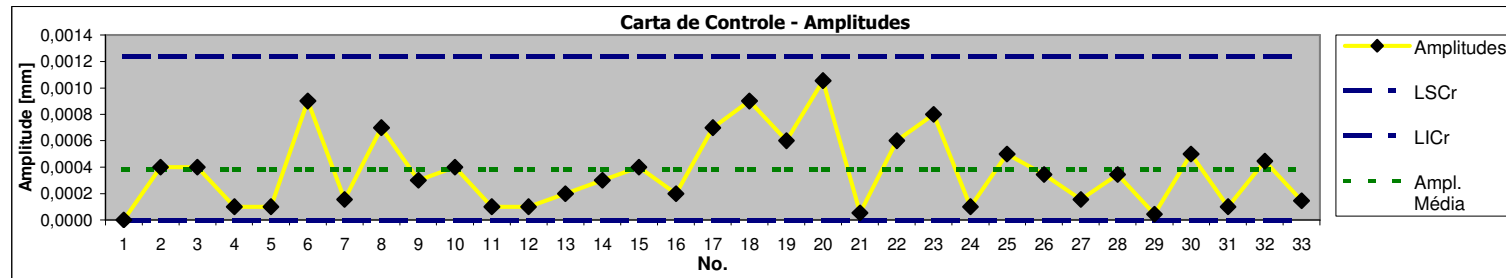
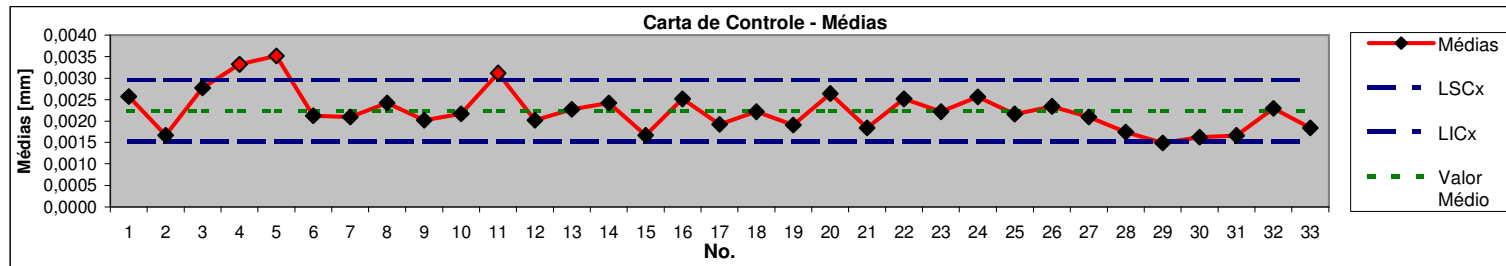


Figura 5.36: Dados iniciais de estabilidade da MMC – Carta de Controle das Médias e Amplitudes

Analisando-se as cartas na figura 5.36, percebe-se que 4 pontos (pontos 4, 5, 11 e 29) ultrapassaram os limites na carta das médias e todos os pontos ficaram dentro dos limites na carta das amplitudes. A observação do diário de bordo permitiu obter a causa dos desvios obtidos para os pontos 4, 5 e 11. Estas medições foram realizadas logo após a máquina ter sido ligada, indicando uma possível influência de um aquecimento da máquina. Esta informação confere com procedimentos deste laboratório de aguardar um certo tempo (pelo menos 45 minutos), antes de utilizar a máquina em uma medição criteriosa. Os procedimentos de ensaio foram modificados, de forma que as medições a partir do ponto 12 ocorressem sempre com a máquina já aquecida.

Verificou-se também na carta das médias, que os pontos 27 a 33 indicam uma pequena tendência de redução na média dos erros da máquina, resultante de uma melhoria introduzida nos procedimentos de medição, que será comentada mais adiante frente. Dados adicionais seriam necessários para realmente comprovar esta tendência de melhoria.

Uma vez que a causa dos desvios dos pontos 4, 5 e 11 foram identificadas e tomadas as ações para que estas causas não voltassem a ocorrer, então se decidiu eliminar estes 3 pontos da análise. As cartas de controle foram então reprocessadas e as novas cartas estão apresentadas na figura 5.37.

Analisando-se as novas cartas percebe-se agora que todos os pontos encontram-se dentro dos limites, inclusive o ponto 26 (corresponde ao ponto 29 da carta anterior), indicando que a máquina de medir e o processo de medição do tetraedro estão, portanto, sob controle estatístico.

TABELA: DADOS DE ESTABILIDADE DA MMC CORRIGIDOS - CARTAS X/R																	
Nome da peça: Tetraedro			Parâmetro: Erro máximo de comprimento medido para as 6 barras do tetraedro														
MMC: Zeiss - ZMC 550 CAA			Valor Referência: 0,000					Unidade dos valores da carta: mm									
Data	29/07	30/07	31/07	03/08	04/08	05/08	06/08	07/08	11/08	13/08	14/08	14/08	18/08	18/08	19/08	20/08	21/08
Hora	22:30	20:00	19:30	19:00	13:30	22:00	19:30	19:00	19:00	8:30	12:30	21:30	1:40	19:30	16:00	15:00	12:30
Ciclos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	0,0026	0,0015	0,0030	0,0017	0,0022	0,0028	0,0022	0,0020	0,0020	0,0024	0,0026	0,0019	0,0026	0,0023	0,0027	0,0022	0,0032
2	0,0026	0,0019	0,0026	0,0026	0,0020	0,0021	0,0019	0,0024	0,0021	0,0022	0,0023	0,0015	0,0024	0,0016	0,0018	0,0016	0,0021
Média	0,0026	0,0017	0,0028	0,0021	0,0021	0,0024	0,0020	0,0022	0,0020	0,0023	0,0024	0,0017	0,0025	0,0019	0,0022	0,0019	0,0026
Ampl.	0,0000	0,0004	0,0004	0,0009	0,0002	0,0007	0,0003	0,0004	0,0001	0,0002	0,0003	0,0004	0,0002	0,0007	0,0009	0,0006	0,0011
Data	22/08	25/08	27/08	27/08	28/08	28/08	29/08	01/09	02/09	03/09	04/09	06/09	06/09				
Hora	14:00	21:30	8:00	15:00	13:30	19:00	19:00	19:00	19:00	19:30	19:30	12:00	18:00				
Ciclos	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30				
1	0,0018	0,0022	0,0026	0,0025	0,0024	0,0025	0,0022	0,0016	0,0015	0,0019	0,0016	0,0021	0,0018				
2	0,0019	0,0028	0,0018	0,0026	0,0019	0,0022	0,0020	0,0019	0,0015	0,0014	0,0017	0,0025	0,0019				
Média	0,0018	0,0025	0,0022	0,0026	0,0022	0,0023	0,0021	0,0017	0,0015	0,0016	0,0017	0,0023	0,0018				
Ampl.	0,0001	0,0006	0,0008	0,0001	0,0005	0,0003	0,0002	0,0003	0,0000	0,0005	0,0001	0,0004	0,0001				

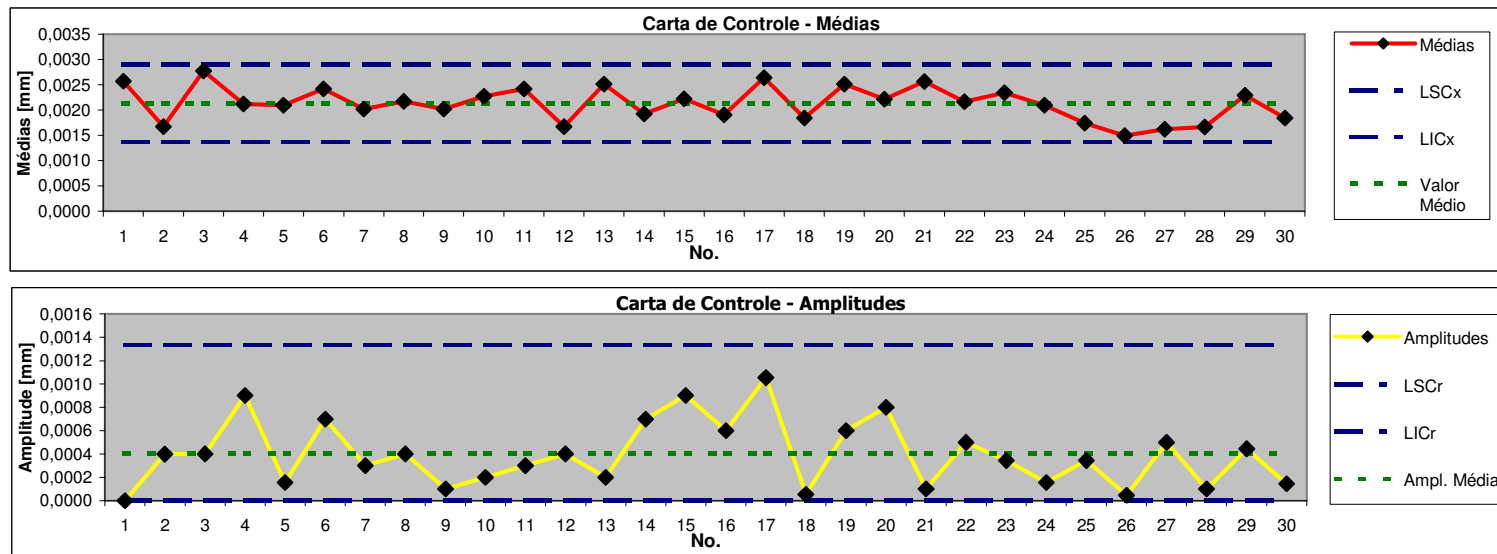


Figura 5.37: Dados de estabilidade da MMC (sem os 3 pontos) – Carta de Controle das Médias e Amplitudes

Uma comparação dos erros obtidos com os limites especificados para a máquina foi então realizada. O limite especificado pelo fabricante para o erro máximo permissível para medição de comprimentos no volume da máquina é de $\pm (1,5 + L / 250) \mu\text{m}$, onde L é o comprimento em milímetros [33]. Para a distância entre as esferas do tetraedro de 420 mm, este erro resulta em $3,2 \mu\text{m}$. Verificou-se que todos os pontos atenderam a esta especificação. Entretanto, julgava-se que tanto a média quanto a amplitude destes erros poderiam ser menores.

Resolveu-se, portanto, testar uma nova melhoria no processo de medição, deixando o tetraedro tempo suficiente sobre a MMC para garantir uma estabilização térmica com o ambiente da máquina, antes de medi-lo. Esta modificação iniciou-se a partir do ponto 25 (figura 5.37, ou ponto 28 na figura 5.36) em diante. Analisando-se as cartas de controle da figura 5.37, percebeu-se uma redução na média dos erros de $2,1$ para $1,8 \mu\text{m}$ e uma leve melhoria na estabilidade dos dados na carta de amplitudes entre os pontos 25 e 33. A análise da carta indicou, portanto, uma leve tendência de melhora tanto da média quanto da amplitude dos dados, indicando que a ação de melhoria realizada mostrou-se satisfatória. Dados adicionais seriam necessários para confirmar esta melhoria no processo de medição.

Uma análise dos erros médios das 6 distâncias medidas ao longo do ensaio também foi realizada. A figura 5.38 apresenta a carta de valores individuais com todos os dados de ensaio (inclusive os pontos 4, 5 e 11 que foram eliminados da análise). Verificou-se que a média dos erros para os 6 últimos pontos (exatamente os pontos em que se realizou a melhoria) aproximou-se do erro nulo, o que demonstra que a MMC está bem ajustada quanto ao erro médio e que efeitos sistemáticos de temperatura foram corrigidos. Também foi verificado que as variações entre os 6 últimos pontos diminuíram, o que pode ser explicado pelo fato do tetraedro ter sido medido em condições estáveis de temperatura.

Concluiu-se, portanto, que as causas das variações anteriores eram decorrentes do ambiente em que o tetraedro estava armazenado e foram solucionadas com a melhoria realizada.

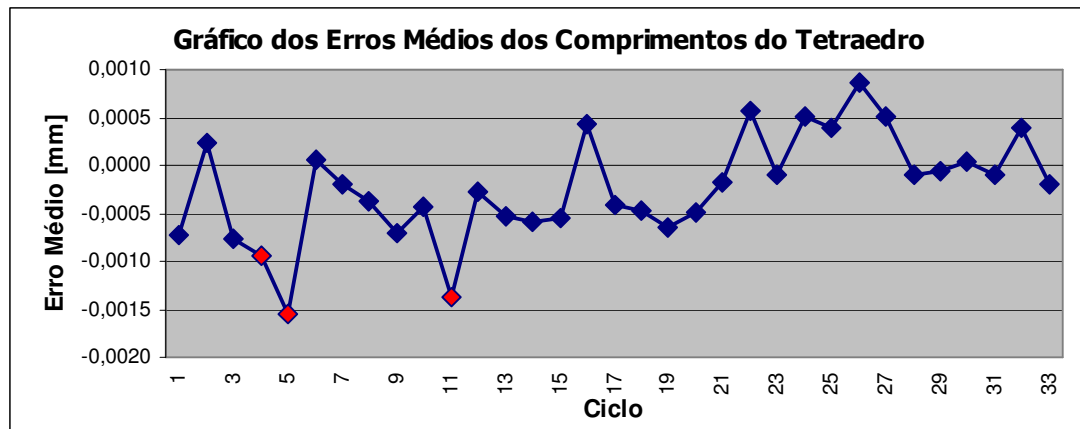


Figura 5.38: Erros médios das 6 distâncias do tetraedro ao longo do tempo

O gráfico na figura 5.38 também deixa clara a influência prejudicial nas medições quando estas ocorrem logo após a máquina ter sido ligada (pontos 4, 5 e 11), conforme já mencionado.

Uma confirmação da eficácia da ação de melhoria seria obtida com a continuação do ensaio de estabilidade. Uma nova carta de controle deveria ser então gerada a partir do ponto 25 da figura 5.37 para reavaliar se o processo encontra-se também sob controle. Novas ações de melhoria neste processo de medição poderiam ainda ser introduzidas para obter uma verificação periódica da máquina mais confiável.

5.5.3 Conclusões do Ensaio de Estabilidade Realizado

A partir deste estudo pôde-se concluir que:

- O método de análise da estabilidade de um processo de medição por meio de cartas de controle permite obter informações a respeito das variações do processo, separando-se os efeitos das causas comuns e especiais. Além disso, serve de base para direcionar as ações de melhoria contínua;
- O tetraedro mostrou-se bastante prático e eficiente para ser utilizado em uma verificação periódica da estabilidade de MMCs. O tempo de medição para a MMC em questão foi de apenas 6,5 minutos. Este tempo será ainda menor nas máquinas de medir utilizadas na indústria em geral. Em geral os fabricantes dos padrões de inspeção rápida de MMCs já fornecem também o software para avaliação dos dados, com representação dos erros da máquina em cartas de controle. O processamento é bastante simples, são informadas, na primeira utilização do software, as distâncias calibradas do tetraedro e, posteriormente, apenas as distâncias medidas, além do dia e horário.
- O ensaio realizado com o tetraedro apresentou resultados conforme o esperado, uma vez que as premissas de que as mudanças introduzidas no processo de medição melhorariam os dados da carta, e estas tiveram realmente a tendência de melhora. A comparação dos erros da MMC para medição de comprimentos obtidos com o tetraedro com o erro máximo especificado para a máquina também forneceu bons resultados, indicando que o tetraedro pode ser utilizado para verificações periódicas de MMCs. Alguns cuidados com os efeitos da temperatura deveriam ser levados em conta, quando se está interessado em avaliar os erros apenas devidos à MMC, para melhorar a qualidade dos dados obtidos e, conseqüentemente, das análises efetuadas. Análises da estabilidade da MMC com influência das condições ambientais (temperatura) também são possíveis;

- A calibração de um tetraedro de tamanho não muito grande (até 500 mm) pode ser realizada sem maiores problemas em uma máquina de medir por coordenadas de precisão, utilizando-se o método da substituição. O tempo da calibração deste tetraedro foi de 8 horas, geralmente inferior aos tempos necessários para calibrar outros padrões de inspeção rápida de MMCs, como placas e cubos de esferas. A calibração de tetraedros maiores dependerá da existência de máquinas e padrões de referência também maiores para a calibração. Alguns dos tetraedros no mercado são desmontáveis, o que facilita o transporte para um laboratório de calibração (nesse caso, são calibrados apenas os comprimentos das 6 barras e o usuário deve se basear em informações do fabricante, ou realizar ensaios próprios, para avaliar os efeitos da desmontagem e nova montagem do tetraedro);

- Não foi possível concluir na prática um número de pontos mínimo necessário para tirar conclusões sobre as variações do processo de medição. Em uma simulação realizada com apenas alguns pontos da figura 5.37, os pontos avaliados ficaram dentro dos limites de controle da carta, não representando porém uma regra geral. Há uma recomendação em literatura técnica [1] para se tomar cuidado em particular com as análises de causas especiais ou anomalias quando o número de pontos medido for inferior a 30.

- Quanto ao número de medições dos subgrupos (medições de curto prazo), a recomendação é de se adotar de 3 a 5 medições [1]. Esta recomendação vale para a análise de processos de medição utilizando-se uma peça da produção calibrada. Para análise da estabilidade de uma MMC com um padrão de referência bem acabado, o tamanho do subgrupo poderia a princípio ser menor, devido à menor influência da peça (padrão) sobre os dados. Com esse intuito, resolveu-se avaliar a possibilidade de se realizar um único ciclo de medição. Para tanto, os dados da primeira medição da carta (figura 5.37) foram simulados utilizando-se a carta de valores individuais e amplitude móvel. Nesta carta, as amplitudes são obtidas pela diferença entre dois subgrupos sucessivos. A

simulação realizada encontra-se na figura 5.39. Verificou-se que nenhum ponto ultrapassou os limites de controle para as médias e amplitudes. Conclui-se, portanto, que é viável a realização de apenas uma única medição por subgrupo nos estudos de estabilidade de MMCs com padrões bem acabados.

Algumas observações devem ser colocadas quando se utiliza a carta de valores individuais e amplitude móvel [4]: a) Há uma menor sensibilidade da carta para detectar mudanças no processo; b) Distribuições não simétricas requerem cuidados especiais na interpretação dos dados; c) Não se obtém informação a respeito da repetitividade de curto prazo; d) Os valores estimados da média e do desvio padrão do processo de medição podem ter uma variabilidade substancial, mesmo se o processo for estável, até que o número de subgrupos seja 100 ou maior.

TABELA: DADOS DE ESTABILIDADE DA MMC CORRIGIDOS - CARTAS X/AMPLITUDE MÓVEL																	
Nome da peça: Tetraedro			Parâmetro: Erro máximo de comprimento medido para as 6 barras do tetraedro														
MMC: Zeiss - ZMC 550 CAA			Valor Referência: 0,000			Unidade dos valores da carta: mm											
Data	29/07	30/07	31/07	03/08	04/08	05/08	06/08	07/08	11/08	13/08	14/08	14/08	18/08	18/08	19/08	20/08	21/08
Hora	22:30	20:00	19:30	19:00	13:30	22:00	19:30	19:00	19:00	8:30	12:30	21:30	1:40	19:30	16:00	15:00	12:30
Ciclos	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	0,0026	0,0015	0,0030	0,0017	0,0022	0,0028	0,0022	0,0020	0,0020	0,0024	0,0026	0,0019	0,0026	0,0023	0,0027	0,0022	0,0032
2																	
Média	0,0026	0,0015	0,0030	0,0017	0,0022	0,0028	0,0022	0,0020	0,0020	0,0024	0,0026	0,0019	0,0026	0,0023	0,0027	0,0022	0,0032
Amp.Móv.	0,0011	0,0015	0,0013	0,0005	0,0006	0,0006	0,0002	0,0000	0,0004	0,0002	0,0007	0,0007	0,0003	0,0004	0,0005	0,0010	0,0014
Data	22/08	25/08	27/08	27/08	28/08	28/08	29/08	01/09	02/09	03/09	04/09	06/09	06/09				
Hora	14:00	21:30	8:00	15:00	13:30	19:00	19:00	19:00	19:00	19:30	19:30	12:00	18:00				
Ciclos	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30				
1	0,0018	0,0022	0,0026	0,0025	0,0024	0,0025	0,0022	0,0016	0,0015	0,0019	0,0016	0,0021	0,0018				
2																	
Média	0,0018	0,0022	0,0026	0,0025	0,0024	0,0025	0,0022	0,0016	0,0015	0,0019	0,0016	0,0021	0,0018				
Ampl.	0,0004	0,0004	0,0001	0,0001	0,0001	0,0003	0,0006	0,0001	0,0004	0,0003	0,0005	0,0003					

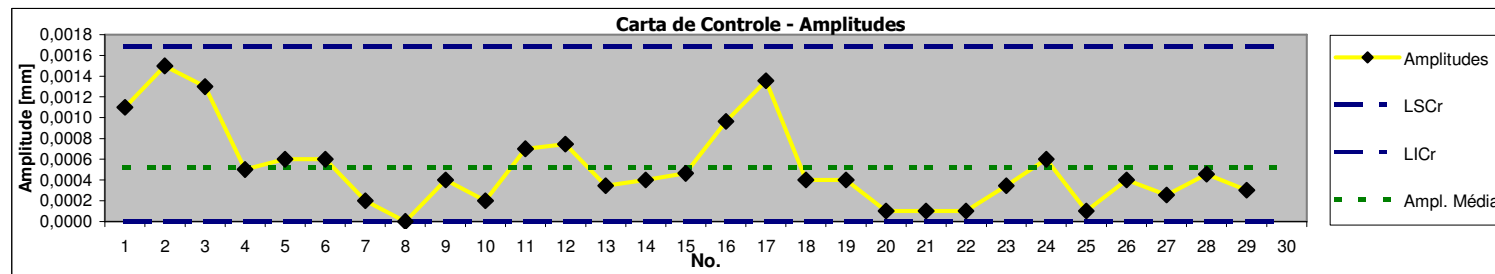
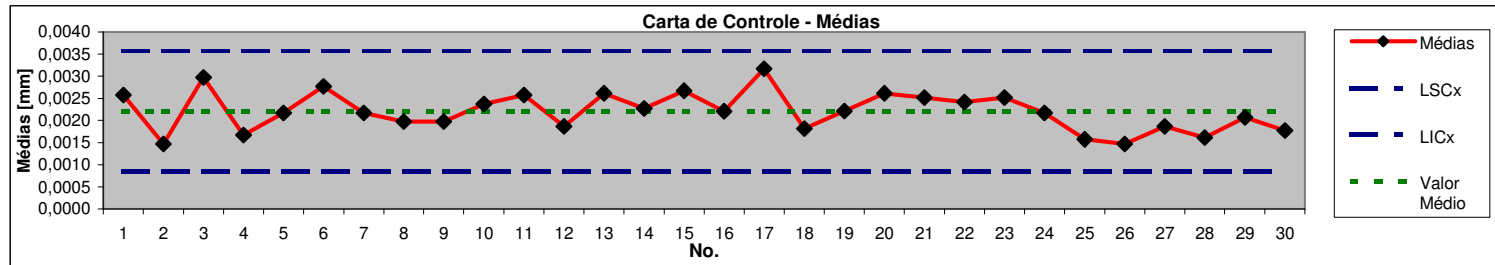


Figura 5.39: Dados de estabilidade da MMC (sem os 3 pontos) – Carta de Controle das Médias e Amplitudes

5.6 Otimização Operacional de um Processo de Medição por Coordenadas

O objetivo deste experimento foi mostrar na prática os benefícios obtidos em eficiência operacional quando há um pré-planejamento para elaboração do programa CNC. A abordagem aqui é válida em todos os casos onde é interessante um aumento da rapidez nas medições, necessidade típica de um processo de inspeção, sem prejuízos na confiabilidade dos resultados.

Neste estudo não foram realizadas mudanças nos programas CNC que interferissem diretamente no nível de confiabilidade dos resultados (aumento ou redução das incertezas de medição), como mudanças nas configurações da máquina (velocidade, aceleração, distância de aproximação) e estratégias de medição (número de pontos, distribuição dos pontos, palpadores). Desta forma, não foram feitas análises comparativas entre os resultados de medição ou avaliação de incertezas, por não ser o objetivo deste estudo. Assumiu-se que as modificações feitas nos diferentes programas CNC elaborados neste estudo e as estratégias adotadas de fixação e alinhamento das peças não influenciaram as incertezas de medição.

Cabe ressaltar, entretanto, que alterações com influência direta na confiabilidade dos resultados também são válidas, desde que realizadas de forma criteriosa e com posterior reavaliação das incertezas de medição. Processos produtivos centrados e com baixa dispersão permitem variações maiores do processo de medição para os mesmos requisitos de qualidade.

5.6.1 Descrição do Ensaio de Otimização Operacional

A realização deste ensaio foi conduzida em uma máquina de medir por coordenadas Zeiss ZMC 550. A peça escolhida para o ensaio pode ser vista nas figuras 5.40. Esta peça foi escolhida pela facilidade de acesso por todos os lados, grande número de possíveis parâmetros de medição, fixação simples e tamanho condizente com muitas das peças existentes na indústria mecânica.

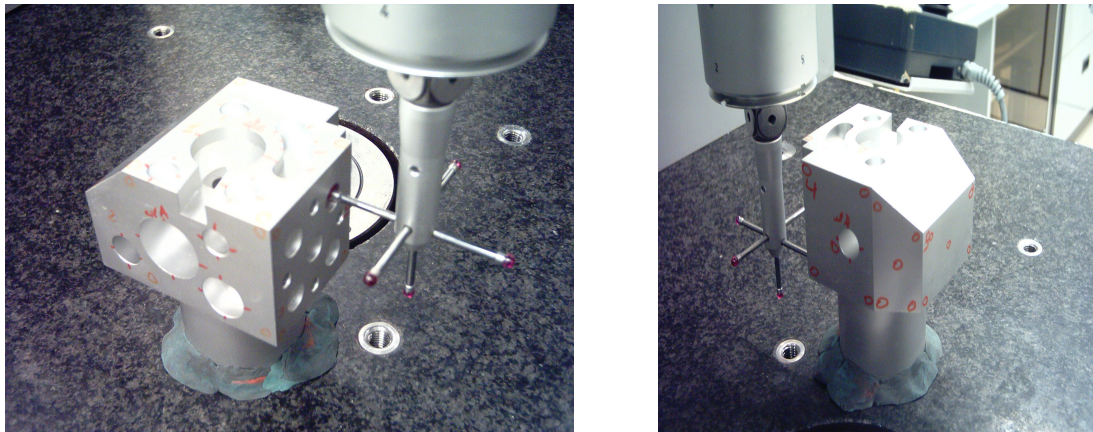


Figura 5.40 – Peça escolhida para a análise de otimização operacional

Foram escolhidos 15 parâmetros de medição na peça, envolvendo distâncias, ângulos, erro de divisão, coaxialidade, paralelismo, batimento e posição. Os elementos a medir foram escolhidos de forma que se distribuíssem por todas as faces da peça. Os parâmetros de medição foram numerados de 1 a 15, iniciando-se pelas cotas que estariam representadas na vista frontal de um desenho da peça, e na seqüência, pelas vistas superior e lateral. Este procedimento foi adotado para deixar a seqüência de medição mais próxima à que seria obtida na prática, quando o desenho da peça for disponível. Um único apalpador “tipo estrela” foi utilizado em todo o ensaio. Foram computados os tempos de medição de um lote de 5 peças.

Foram elaborados 3 programas CNC para a medição dos 15 parâmetros, com as seguintes características:

- Programa 1: A elaboração do programa foi realizada seguindo-se a numeração dos parâmetros de medição. Esta programação foi a primeira a ser realizada e não se procurou minimizar o número de posições intermediárias do apalpador. Considerou-se também que não havia um dispositivo de fixação que permitisse reproduzir as posições das peças a cada nova medição. Logo, o programa exige um pré-alinhamento manual da peça antes de ser executado. Considerou-se que o alinhamento da peça é refeito pelo programa CNC no início de sua execução.
- Programa 2: A elaboração do programa foi realizada seguindo-se também a numeração dos parâmetros de medição, mas também o “bom senso”. Ou seja, ao deslocar o apalpador para uma determinada região da peça para medir uma cota, aproveita-se para já medir os demais elementos que farão parte das demais cotas. Este foi o segundo programa a ser realizado. Nesta programação, tomou-se cuidado em minimizar o número de posições intermediárias. Considerou-se que havia disponível um dispositivo de fixação que reproduz o posicionamento das peças, logo, o alinhamento para uma nova peça é realizado apenas em CNC (não há o alinhamento manual).
- Programa 3: O último programa elaborado levou em conta um pré-planejamento de sua elaboração. A seqüência de medição foi definida pelos elementos de medição, e não pela numeração das cotas. Ou seja, identificaram-se todos os elementos a medir na peça e definiu-se a seqüência de medição de forma que o apalpador percorresse um menor caminho para finalizar as medições. A maior parte do processamento dos dados ocorreu no final do programa. Nesta programação, tomou-se um cuidado ainda maior na definição das posições intermediárias do que no programa 2, quanto ao número e posição. Considerou-se também a medição de um *pallet* com

dispositivos de fixação para as 5 peças a medir. O alinhamento das peças é feito apenas CNC. Considerou-se a existência de um programa gerenciador, no qual informa-se o tipo e a quantidade de peças a medir e a posição das peças no *pallet*. O programa gerenciador se encarrega de chamar os programas específicos de cada peça e executá-los de acordo com as informações introduzidas.

Quanto às posições intermediárias, ocorreram as seguintes diferenças entre as programações 2 e 3:

- No programa 2, as posições intermediárias foram introduzidas nas mudanças de direção de deslocamento do apalpador e em geral antes e após a apalpação de um ponto na peça, com exceção de alguns casos onde não eram necessárias. No programa 3, as posições intermediárias foram introduzidas nas mudanças de direção de deslocamento do apalpador e somente antes das apalpações, quando necessárias.
- Ocorreram também menos posições intermediárias no programa 3 devido ao estudo prévio da melhor distribuição dos pontos para que o apalpador percorresse um menor caminho.

Os pontos a medir foram marcados sobre a peça de forma que os 3 programas fossem comparados com a mesma quantidade e distribuição de pontos. A quantidade de pontos, portanto, não foi um dos parâmetros avaliados na otimização da eficiência da programação CNC. Os parâmetros de configuração da máquina também não foram alterados, ou seja, os 3 programas utilizaram as mesmas velocidades, acelerações e distâncias de aproximação (distância antes da apalpação).

5.6.2 Resultados Obtidos e Conclusões da Otimização Operacional Realizada

Os tempos envolvidos em cada etapa da medição com os 3 programas constam na tabela abaixo (figura 5.41).

Etapa	Programa 1 (ineficiente)	Programa 2 (intermediário)	Programa 3 (eficiente)
Fixação das peças	MMC permanece parada enquanto as 5 peças são fixadas. Tempo: 25 s x 5 = 125 s	MMC permanece parada enquanto as 5 peças são fixadas. Tempo: 10 s x 5 = 50 s	MMC permanece parada enquanto o <i>pallet</i> com as 5 peças é fixado. Tempo: 20 s x 1 = 20 s
Alinhamento manual	Tempo: 90 s x 5 = 450 s	Não há	Não há
Seleção do programa CNC	O programa é selecionado 5 vezes Tempo: 10 s x 5 = 50 s	O programa é selecionado 5 vezes Tempo: 10 s x 5 = 50 s	O programa é selecionado 1 vez Tempo: 20 s x 1 = 20 s
Medição, processamento e documentação	Tempo: 14 min 25 s x 5 = 72 min e 5 s	Tempo: 11 min e 49 s x 5 = 59 min e 5 s	Tempo: 10 min e 51 s x 5 = 54 min e 15 s

Total (lote de 5 peças)	Tempo: 1 h 22 min 30 s	Tempo: 1 h 00 min 45 s	Tempo: 0 h 54 min 55 s
Tempo médio por peça	Tempo: 16 min 30 s	Tempo: 12 min 9 s	Tempo: 10 min 59 s

Figura 5.41 – Tabela de comparação entre os tempos dos 3 PMCs

Com relação a estes ensaios deve-se observar que:

- Os tempos de fixação foram determinados cronometrando-se as simulações na prática de colocar e fixar as peças na máquina e dispositivo. No caso do programa 1, simulou-se a fixação de uma peça com parafuso, porca, arruela, grampo e calço, previamente instalados na mesa da máquina de medir. Para o programa 2, determinou-se o tempo para colocar uma nova peça em um dispositivo e prendê-lo com um sujeitador. Para o programa 3, determinou-se o tempo para colocar um *pallet* com as 5 peças na máquina em uma determinada posição pré-definida. Considerou-se que o *pallet* pode ser facilmente conduzido por um único operador e que sua colocação na máquina não é dificultada por espaço físico ou por outra causa. Considerou-se também que as peças são colocadas no *pallet* enquanto a máquina está medindo.
- Alinhamento CNC: Os 3 programas foram elaborados de forma que o alinhamento CNC fosse realizado. Este período está computado no tempo de execução do programa CNC.
- Seleção do programa CNC: Os tempos informados consideram a necessidade de se acionar pelo menos 3 teclas e entrar com o número do programa. O

caso 3 considera também o tempo necessário para informar ao software o número, tipo e posição das peças no *pallet*, embora uma única vez. Recursos de software de acionamento rápido de programa CNC podem ser utilizados para reduzir estes tempos (“execução a um toque”).

- Medição, processamento e documentação: As mesmas cotas e as mesmas informações foram processadas e impressas pelos 3 programas CNC avaliados. Utilizou-se uma função automática da máquina para avaliar o tempo de execução do programa CNC.

Analisando-se os tempos médios por peça na tabela, verifica-se uma diferença bastante considerável entre os programas 1 e 2 (mais de 4 minutos). Este resultado mostra que a programação sem um mínimo de pré-planejamento e a ausência de dispositivos de fixação leva a tempos de medições bem maiores. A redução do tempo médio por peça obtido entre os programas 2 e 3 foi de pouco mais de 1 minuto. Este tempo se torna mais significativo quando se consideram medições de grande escala, por exemplo 16 lotes de 5 peças/dia (ao todo, 80 medições). Considerando-se 1 minuto de economia de tempo por peça, ter-se-á ao todo 80 minutos de máquina livre por dia para outras atividades.

Capítulo 6

Considerações Finais, Conclusões e Recomendações

6.1 Considerações Quanto às Incertezas de Medição

A incerteza de medição é um parâmetro de fundamental importância para se conhecer as limitações de um processo de medição e, por esta razão, sua avaliação é um requisito na maioria dos documentos de referência em metrologia e sistemas de garantia da qualidade. Mesmo assim, a avaliação de incertezas de medição nos ambientes industriais não tem recebido sua devida atenção. Um dos motivos está relacionado com a complexidade das normas internacionais para determinação de incertezas de medição, que inviabilizam uma plena aplicação nas indústrias. O GUM [40] é considerado um documento de referência de alto nível que auxilia no entendimento da teoria e traça as diretrizes de como as fontes de incertezas de medição devem ser classificadas e combinadas, porém não é um documento operacional prático para obtenção das incertezas. Mesmo a norma ISO 14253-2, que está voltada para a medição nas indústrias, tem uma complexidade semelhante à do GUM.

A ausência de métodos adequados e de fácil aplicação para avaliar as incertezas de medições com máquinas de medir por coordenadas fez com que o meio industrial desenvolvesse outros mecanismos para se avaliar a adequabilidade do uso de meios de medição para controle de produtos e processos. Desta forma, surgiram várias referências para se avaliar meios de medição como o MSA, VDA 5 [46] e Q-DAS [44, 7], além de iniciativas isoladas de várias empresas. Tradicionalmente o termo "incerteza de medição" tem sido reservado para as medições de alta precisão executadas nos laboratórios de metrologia [1]. Entretanto, as próprias normas de garantia de sistemas de qualidade das indústrias (setor automobilístico) como a QS-9000 ou a ISO/IEC TS 16949 [47] colocam como requisito o conhecimento e consistência da incerteza de medição com sua aplicação.

Na medição por coordenadas a complexidade é ainda maior. Os ensaios de verificação de performance da máquina são utilizados pelas indústrias para avaliar as incertezas das medições de suas peças. Fazendo-se isso, os usuários correm o risco de subestimar as incertezas dos resultados de medição. Assim, variações na capacidade de um processo produtivo serão atribuídas principalmente ao processo de fabricação. Ações desnecessárias e prejudiciais no processo serão tomadas com o intuito de melhorá-lo. O resultado será o aumento da variação do processo (*tampering*). Por outro lado, a definição de incertezas de medição muito conservativas resultará em uma menor sensibilidade na análise de CEP, exigirá mais do processo produtivo e levará a um número maior de peças rejeitadas. Portanto, deve-se obter uma avaliação realista das incertezas de medição para minimizar os efeitos acima relatados.

O uso de métodos experimentais, como o utilizado por neste trabalho, é o mais recomendável para se obter uma avaliação realista das incertezas de medição. A abordagem experimental do método também o torna de fácil aplicação nas indústrias.

6.2 Considerações Quanto a Outros Métodos de Avaliação de Meios de Medição – Análise Comparativa

O método de validação apresentado neste trabalho permite considerar aspectos de diversos sistemas de garantia da qualidade já consagrados, tais como CEP, MSA, R&R, Cg/Cgk, GUM, PUMA, aplicados à avaliação de processos de medição por coordenadas. O método proposto se aproxima de estudos de CEP nas etapas de verificação da estabilidade e análise dos dados com cartas de controle. O ensaio de avaliação das incertezas de medição do método proposto abrange os ensaios de R&R e tendência de um estudo de MSA. Apenas o ensaio de linearidade de um estudo de MSA não é abordado de alguma forma no método proposto, mas por ser em geral desnecessário, uma vez que para cada processo de medição existirá uma peça de referência calibrada de dimensões similares às peças a medir [44, 7].

Uma diferença entre o método proposto e os métodos de avaliação da capacidade de processos de medição por coordenadas, através dos índices Cg e Cgk, ou ensaio de tendência previsto em um estudo de MSA, está na escolha dos objetos de referência. Este trabalho está baseado na norma ISO 15530-3, que utiliza peças calibradas com características similares às peças reais a medir. O uso destas peças possibilita a consideração dos efeitos do processo produtivo sobre as incertezas do processo de medição. Nos estudos de capacidade de medição de máquinas de medir por coordenadas, são utilizados em geral padrões com bom acabamento superficial e diferentes das peças a inspecionar. Assim, os efeitos das peças e estratégias de medição sobre o processo de medição são desconsiderados nestas análises. Um ensaio de capacidade de medição com uma peça padrão com bom acabamento superficial, e similar às peças a inspecionar, permite avaliar também os efeitos das estratégias de

medição adotadas ao executar o mesmo programa CNC das peças a medir para a peça padrão.

É por esta razão que um estudo de R&R também é realizado em conjunto com um ensaio de capacidade de medição para uma avaliação mais completa de um processo de medição. A informação obtida por um ensaio de capacidade de medição é útil para se comparar diferentes máquinas de medir e avaliar o desempenho de uma máquina em condições ótimas de medição, sob condições repetitivas de medição. Os estudos de capacidade de medição são freqüentemente utilizados para selecionar ou validar um padrão ou sistema de medição para uma determinada aplicação [2]. Além disso, podem também ser utilizados para conhecer melhor a potencialidade da máquina de medir em um determinado processo de medição, com intuito de buscar informações para otimizá-lo metrologicamente.

Por outro lado, os ensaios de R&R utilizam peças da produção e são realizados em condições reais de uso, de forma semelhante ao ensaio de avaliação de incertezas estabelecidos pelo método proposto neste trabalho. Uma diferença entre ambos os ensaios é que no R&R as peças não são calibradas, o que não permite uma análise de tendência do processo de medição. A combinação do ensaio de capacidade de medição com os ensaios de R&R levanta informações importantes a respeito do processo de medição. Além disso, permite avaliar se o processo de medição é adequado para o controle de produtos e processos. Uma análise completa de um processo de medição utilizando-se os conceitos do MSA possibilita entender e melhorar o processo de medição.

Esta mesma linha de pensamento foi adotada na validação de processos de medição por coordenadas segundo o método proposto. As ações de melhoria dos processos de medição envolvem análises e ensaios investigativos sobre o processo de medição, que podem ser inclusive ensaios previstos no MSA ou

outros métodos de avaliação. A comparação das incertezas obtidas com as incertezas máximas especificadas também permite avaliar a adequabilidade do processo de medição. As incertezas máximas devem ser especificadas levando-se em conta requisitos de qualidade e especificações técnicas de produtos ou processos.

O próprio ensaio de avaliação de incertezas segundo a ISO 15530-3 pode ser configurado de forma similar a um estudo de R&R, por exemplo considerando-se 5 peças (mínimo aceitável em um ensaio de R&R) e 10 medições ao todo por peça (mínimo aceitável em um ensaio segundo a ISO 15530-3), então 2 avaliadores poderiam medir 5 vezes cada um as 5 peças, totalizando 50 medições. Desta forma, este ensaio de avaliação das incertezas de medição poderá ser tratado como um estudo de R&R, obtendo-se também suas valiosas conclusões.

Outra diferença entre os métodos previstos no MSA e o método de validação proposto refere-se às fontes de incerteza nos resultados. Neste sentido, a avaliação da incerteza de medição pela ISO 15530-3 é mais abrangente que as considerações no MSA, por levar em conta algumas fontes de incerteza que são desconsideradas pelo MSA como, por exemplo, a incerteza da calibração das peças de referência e outras fontes de incerteza não cobertas pela avaliação experimental (influência do processo, influência da temperatura, incerteza dos coeficientes de expansão térmica das peças, etc.).

As vantagens do método proposto perante os ensaios combinados de capacidade de medição (C_g , C_{gk}) e R&R consistem na realização de um único ensaio e na obtenção das incertezas de medição. Por outro lado, os ensaios de capacidade de medição e R&R têm a vantagem de estarem disseminados no meio industrial, servindo de base para avaliações padronizadas de meios de medição em geral.

6.3 Conclusões

O método de validação proposto orienta os usuários de máquinas de medir por coordenadas a documentar as estratégias de medição utilizadas, definir as incertezas máximas admissíveis para cada parâmetro de inspeção e verificar a adequação das incertezas obtidas na máquina de medir em relação às incertezas máximas estabelecidas. Quando necessário, também orienta o usuário a otimizar o processo de medição, reduzindo as incertezas de medição, de modo que estas atendam às incertezas máximas especificadas. Além disso, este método também apresenta recomendações de onde atuar no processo de medição se houver vantagem e possibilidade de simplificá-lo buscando uma otimização operacional. Após a validação do processo de medição por coordenadas, o usuário é orientado a realizar verificações periódicas da máquina e do processo de medição, com o intuito de garantir que este continuará validado com o passar do tempo. A aplicação integral deste método permite então validar um processo de medição, de forma que este atenda os requisitos de qualidade da indústria.

O método proposto baseia-se principalmente na norma internacional ISO 15530-3 e no uso de cartas de controle, o que possibilita um reconhecimento facilitado a nível internacional de validações e avaliações de processos de medição realizadas com base neste método. Desta forma, barreiras técnicas relacionadas à validação de processos de inspeção com máquinas de medir por coordenadas são superadas.

A ausência de uma sistemática completa de validação, aplicável integralmente à medição por coordenadas, e que ainda fosse de fácil aplicação nas indústrias motivou a realização deste trabalho. Este método, além de cumprir o seu papel de validar um processo de medição por coordenadas, permite também a avaliação de incertezas de medição realistas e traz subsídios para a execução de melhorias nestes processos de medição.

Outra grande vantagem do método proposto é o repasse da rastreabilidade aos processos de inspeção validados e aos dados gerados pela MMC para o controle e ajustes do processo produtivo, resultando em uma produção mais centrada no alvo, com redução de custos e melhoria da qualidade dos produtos.

As seguintes conclusões gerais puderam ser obtidas com as simulações e as aplicações do método nos casos práticos realizados:

- O processo de medição tem uma influência direta na capacidade observada do processo produtivo. Assim como um processo de fabricação deveria produzir peças no alvo e com variância mínima, o processo de medição deveria ter uma tendência nula e dispersão mínima. As influências do processo de medição na perda da capacidade observada do processo produtivo e na fração não conforme de produtos resultante tornam-se significativamente maiores à medida que a tendência e a repetitividade do processo de medição aumentam. Isto se torna ainda mais crítico em um processo de inspeção, pois a norma ISO 14253-1 impõe uma redução da faixa de aprovação de um produto do valor correspondente à incerteza de medição deste processo de inspeção;
- A avaliação das incertezas de medição para os dois casos práticos realizados comprovou a simplicidade do ensaio e a possibilidade de uma automatização do processamento. Verificou-se também a necessidade de uma análise gráfica para avaliar a presença de causas especiais e estruturais de variação nos processos de medição em estudo. Estas causas deveriam ser investigadas e eliminadas e os procedimentos alterados e padronizados para que não voltassem mais a ocorrer. Também foi verificada a influência das peças sobre os resultados de medição, indicando que os processos de medição estudados eram sensíveis a determinadas características das peças;
- A realização do ensaio de verificação da estabilidade de uma máquina de

medir por coordenadas permitiu confirmar a viabilidade de se utilizar padrões de inspeção rápida de MMCs. Em um tempo bastante reduzido, é possível avaliar os erros de uma máquina que estão mais suscetíveis a se desajustarem no tempo, e confrontar a performance desta máquina, para medição de comprimentos, com as especificações técnicas do fabricante;

- O ensaio de verificação da estabilidade da máquina realizado também comprovou a grande eficácia do uso de cartas de controle para levantar as variações de um processo de medição, identificar a sua estabilidade e trazer subsídios para ações de melhoria no processo de medição;
- A realização do caso prático de otimização da eficiência de processos de medição por coordenadas confirmou a idéia de que um pré-planejamento, um pouco de experiência na elaboração de programas CNC e o uso das recomendações deste método permitem otimizar significativamente os tempos de medição envolvidos. Desta forma, consegue-se maximizar o tempo da máquina para outras tarefas.

6.4 Recomendações de Trabalhos Futuros

- Aplicar a norma ISO 15530-6, em elaboração atualmente, para a calibração das peças que serão referências nos ensaios com a norma ISO 15530-3;
- Aplicar o método proposto neste trabalho em casos práticos de melhoria de processos de medição;
- Analisar mais profundamente os efeitos da mudança das características do processo de fabricação e das peças sobre a incerteza do processo de medição;
- Estudar formas de minimizar a sensibilidade de processos de medição com relação às suas fontes de incerteza;
- Elaborar um software completo de aplicação do método proposto neste trabalho.

ANEXOS:

A1 - Terminologia e Siglas Empregadas

Os termos gerais utilizados no trabalho estão baseados no VIM – Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia [48]. Os termos técnicos mais específicos das áreas de medição por coordenadas e de controle de processos produtivos foram baseados principalmente na experiência do autor, discussões com o orientador e em literaturas técnicas traduzidas para o português sobre o assunto abordado. Uma lista dos termos principais utilizados, com uma breve definição dos mesmos, foi inserida no trabalho para facilitar o entendimento pelo leitor. Adicionalmente, também foram inseridos no anexo os significados das siglas principais utilizadas no trabalho.

A1.1 Termos do VIM

- Erro: resultado de medição menos o seu valor verdadeiro convencional (ex.: erro de medição).
- Repetitividade: grau de concordância entre os resultados de medições sucessivas de um mesmo mensurando efetuadas sob as mesmas condições de medição.
- Reprodutibilidade: grau de concordância entre os resultados das medições de um mesmo mensurando efetuadas sob condições variadas de medição.
- Incerteza de medição: parâmetro associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser fundamentalmente atribuídos ao mensurando.
- Ajuste: operação destinada a fazer com que um sistema de medição tenha desempenho compatível ao seu uso.
- Fonte de incerteza: grandeza que não é o mensurando mas afeta o resultado da medição deste.
- Resolução: menor diferença entre indicações que pode ser significativamente percebida pelo instrumento de medição.
- Estabilidade: Aptidão de um instrumento de medição de conservar constantes suas características metrológicas ao longo do tempo.
- Tendência: erro sistemático da indicação de um instrumento de medição.
- Rastreabilidade: propriedade do resultado de uma medição ou valor de um padrão estar relacionado a referências estabelecidas, geralmente a padrões

nacionais ou internacionais, através de uma cadeia contínua de comparações, todas tendo incertezas estabelecidas.

- Calibração: conjunto de operações que estabelece, sob condições especificadas, a relação entre os valores indicados por um sistema de medição ou os valores representados por uma medida materializada, e os valores correspondentes das grandezas estabelecidos por padrões.
- Padrão: medida materializada ou sistema de medição destinado a definir, realizar, conservar ou reproduzir uma unidade ou um ou mais valores de uma grandeza para servir como referência.
- Mensurando: objeto da medição. Grandeza específica submetida à medição.
- Resultado de uma medição: valor atribuído a um mensurando obtido por medição. A informação completa de um resultado de medição inclui informações sobre a incerteza de medição.
- Indicação: valor de uma grandeza fornecido por um instrumento de medição.
- Peça calibrada: peça da produção calibrada de forma a se obter os valores verdadeiros convencionais dos mensurandos para o ensaio de avaliação das incertezas de medição de um processo de medição por coordenadas.

A1.2 - Termos Técnicos Específicos

- Peça padrão: peça similar às peças da produção, mas com menor desvio de forma e melhor acabamento superficial, para minimizar as influências da própria peça para a finalidade a qual se destina.
- Processo de medição: Conjunto de todos os fatores que interagem na geração de um resultado de medição. Inclui o instrumento de medição, acessórios, padrões, operador, efeitos de temperatura, estratégias de medição, dispositivo de fixação, peças a medir, etc.
- Capacidade real (de um processo produtivo): corresponde à capacidade de um processo produtivo sem os efeitos do processo de medição. Seria a capacidade obtida do processo ao se utilizar um processo de medição ideal (tendência e variação nula). Utilizada apenas para análises de um processo.
- Capacidade observada (de um processo produtivo): Corresponde à capacidade obtida cujos efeitos do processo de medição estão presentes nos dados. Esta é a capacidade que se obtém quando se realiza um estudo de CEP de um processo produtivo.
- Intervalo de tolerância: Limite superior especificado menos o limite inferior especificado
- Balanço de incertezas: Análise das contribuições das diversas fontes de incerteza para uma determinada tarefa de medição com o objetivo de obter a incerteza expandida de medição para esta tarefa.
- Incerteza padrão: Faixa de dispersão em torno do valor central equivalente a um desvio padrão [49].
- Fração não conforme: Volume de peças fora das especificações em relação ao volume total de peças. Geralmente é especificado em % ou ppm.

A1.3 - Lista de Siglas

- MMC: Máquina de medir por coordenadas
- PMC: Processo de medição por coordenadas
- CAA: Correção dos erros da máquina por software (*computer aided accuracy*)
- CEP: Controle estatístico do processo
- CNC: Comando numérico computadorizado
- IT: Intervalo de tolerância (LSE – LIE)
- LSE, LIE: Limite superior e inferior especificado, respectivamente
- U: Incerteza de medição
- Td: Tendência
- MSA: Análise de sistemas de medição
- R&R: Ensaio de repetitividade e reprodutibilidade de um sistema de medição
- Cp, Cpk: Índices de capacidade de um processo produtivo
- Cg, Cgk: Índices de capacidade de um processo de medição
- Ppm: partes por milhão

A2 - Dados Brutos das Peças 1, 2 e 3 do PMC 1

Dados Brutos do PMC 1 - Peça Calibrada No. 1				
No. Medição	Planeza Assento Axial [mm]	Batimento Assento Axial [mm]	Batimento Ressaltos [mm]	Perpendicularidade Topo/Cilindro [mm]
1	0,003	0,022	0,055	0,008
2	0,003	0,023	0,050	0,004
3	0,002	0,023	0,054	0,007
4	0,003	0,022	0,049	0,007
5	0,003	0,022	0,053	0,033
6	0,002	0,021	0,049	0,005
7	0,002	0,023	0,045	0,006
8	0,003	0,022	0,055	0,002
9	0,003	0,019	0,059	0,002
10	0,002	0,022	0,047	0,005
11	0,004	0,020	0,064	0,011
12	0,002	0,024	0,060	0,010

Dados Brutos do PMC 1 - Peça Calibrada No. 2				
No. Medição	Planeza Assento Axial [mm]	Batimento Assento Axial [mm]	Batimento Ressaltos [mm]	Perpendicularidade Topo/Cilindro [mm]
1	0,008	0,031	0,074	0,024
2	0,008	0,029	0,074	0,020
3	0,008	0,030	0,074	0,021
4	0,008	0,039	0,046	0,028
5	0,008	0,027	0,085	0,025
6	0,008	0,032	0,060	0,025
7	0,008	0,030	0,072	0,017
8	0,008	0,032	0,060	0,020
9	0,008	0,023	0,105	0,020
10	0,008	0,026	0,097	0,016
11	0,009	0,021	0,107	0,026
12	0,007	0,029	0,076	0,016

Dados Brutos do PMC 1 - Peça Calibrada No. 3				
No. Medição	Planeza Assento Axial [mm]	Batimento Assento Axial [mm]	Batimento Ressaltos [mm]	Perpendicularidade Topo/Cilindro [mm]
1	0,001	0,014	0,050	0,026
2	0,002	0,013	0,055	0,020
3	0,002	0,014	0,057	0,026
4	0,001	0,015	0,050	0,022
5	0,002	0,012	0,053	0,022
6	0,002	0,012	0,055	0,022
7	0,010	0,009	0,058	0,023
8	0,002	0,015	0,051	0,025
9	0,003	0,011	0,054	0,020
10	0,002	0,012	0,061	0,024
11	0,001	0,013	0,056	0,023
12	0,002	0,012	0,049	0,015

A3 - Dados Brutos das Peças 1, 2 e 3 do PMC 2

Dados do PMC 2 - Peça Calibrada No. 1				
No. Medição	Planeza Assento Axial [mm]	Batimento Assento Axial [mm]	Batimento Ressaltos [mm]	Perpendicularidade Topo/Cilindro [mm]
1	0,002	0,025	0,048	0,012
2	0,002	0,028	0,023	0,015
3	0,002	0,026	0,032	0,019
4	0,002	0,027	0,027	0,015
5	0,002	0,027	0,032	0,012
6	0,002	0,027	0,030	0,015
7	0,002	0,028	0,023	0,020
8	0,002	0,027	0,028	0,014
9	0,002	0,027	0,040	0,014
10	0,002	0,027	0,034	0,013
11	0,002	0,027	0,030	0,014
12	0,002	0,027	0,033	0,012

Dados do PMC 2 - Peça Calibrada No. 2				
No. Medição	Planeza Assento Axial [mm]	Batimento Assento Axial [mm]	Batimento Ressaltos [mm]	Perpendicularidade Topo/Cilindro [mm]
1	0,005	0,037	0,061	0,028
2	0,005	0,038	0,059	0,029
3	0,004	0,040	0,050	0,031
4	0,006	0,039	0,057	0,022
5	0,005	0,037	0,060	0,029
6	0,005	0,038	0,059	0,028
7	0,004	0,037	0,060	0,025
8	0,005	0,037	0,063	0,031
9	0,004	0,037	0,067	0,030
10	0,004	0,037	0,066	0,022
11	0,005	0,036	0,066	0,028
12	0,004	0,039	0,060	0,023

Dados do PMC 2 - Peça Calibrada No. 3				
No. Medição	Planeza Assento Axial [mm]	Batimento Assento Axial [mm]	Batimento Ressaltos [mm]	Perpendicularidade Topo/Cilindro [mm]
1	0,002	0,021	0,079	0,027
2	0,001	0,020	0,075	0,032
3	0,002	0,019	0,077	0,031
4	0,002	0,020	0,077	0,032
5	0,001	0,019	0,079	0,035
6	0,002	0,019	0,070	0,031
7	0,001	0,020	0,075	0,030
8	0,002	0,020	0,076	0,032
9	0,001	0,019	0,072	0,030
10	0,001	0,019	0,072	0,030
11	0,001	0,019	0,070	0,031
12	0,001	0,021	0,072	0,033

A4 - Diário de Bordo do Ensaio de Estabilidade da MMC

CARTA DE CONTROLE - REGISTRO DE OCORRÊNCIAS COM O PROCESSO DE MEDIÇÃO

Quaisquer mudanças no pessoal, materiais, ambiente, métodos, máquinas ou sistemas de medição deve ser anotada!

DATA	HORA	COMENTÁRIOS
29/07	22:30	Medição logo após a finalização do programa de medição do tetraedro!
01/ago	22:00	Medição logo após a máquina ter sido ligada!
02/ago	19:30	Medição logo após a máquina ter sido ligada!
03/ago	19:00	Medição com a máquina em uso (mais de 1 hora)!
05/ago	22:00	Medição com a máquina em uso (mais de 1 hora)!
08/ago	22:00	Medição logo após a máquina ter sido ligada!
14/ago	21:30	Medição com a máquina em uso (mais de 1 hora)!
18/ago	01:40	Medição fora de horário normal de trabalho e com possível problema de temperatura!
25/ago	21:30	Medição com a máquina em uso (mais de 1 hora)!
27/ago	08:00	A máquina estava ligada desde às 06:00!
28/ago	19:00	Suspeita de problema de temperatura, conforme gráfico dos erros médios (figura 5.38)!
01/set	19:00	A partir deste dia o tetraedro foi deixado estabilizando termicamente na mesa da MMC!

Referências Bibliográficas

- [1] "Measurement Systems Analysis, Reference Manual", ed. 3, março, 2002.
- [2] Donatelli, G.D.; et all; "Estabilidade Estatística da Medição"; Metrosul, Curitiba, setembro, 2002.
- [3] Belanger, B.C.; "Traceability: An Evolving Concept", ASTM Standardization News, v. 8, n. 1, p. 22-28, 1980.
- [4] Chrysler Corporation, Ford Motor Company, General Motors Corporation, "Fundamentos de Controle Estatístico do Processo (CEP)", 1a Edição Brasileira, 1997.
- [5] Sousa, A.R.; "Conhecendo e Conservando a Medição por Coordenadas"; Carl Zeiss Aplicação & Engenharia, 2003.
- [6] Weckenmann, A.; Gawande, B.; "Koordinatenmesstechnik", Carl Hanser Verlag München, Wien, 1999.
- [7] Dietrich, E.; "Leitfaden zum Fähigkeitsnachweis von Messsystemen", Q-DAS, Versão 2.1 D/E, dezembro, 1999.
- [8] Pfeifer, T.; "Fertigungsmeßtechnik"; München, 1998.

- [9] ISO TR 14253-2, "Guide to the Estimation of Uncertainty in GPS Measurement, in Calibration of Measuring Equipment and in Product Verification", ISO GPS, 1998.
- [10] BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements", Geneva, International Organization for Standardization, 1993.
- [11] Veiga, C.L.N.; et al.; "É difícil calibrar CMMs?", Controle da Qualidade, no. 50, Editora Banas, São Paulo, SP, p48-54, abril, 1997.
- [12] Oliveira, A.L.; Sousa, A.R.; Neto, A. A. B.; "Influências da Incerteza da Medição por Coordenadas na Conformidade Dimensional de Peças Seriadas", ENQUALAB-2002, anais.
- [13] Urrutia, J.I.D.; "Avaliação dos processos de medição na indústria, baseada no impacto econômico da operação de controle geométrico", dissertação de mestrado, curso Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, agosto, 2000.
- [14] Gigo, L. G., "Estação de Medição por Coordenadas na Produção de Peças Complexas – Método de Especificação", dissertação de Mestrado do Programa de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, novembro de 1999.
- [15] Fundação CERTI, "Garantia da Confiabilidade Metrológica na Medição por Coordenadas", apostila de curso, julho, 2003.
- [16] Sousa, A.R., "A medição por coordenadas na garantia da qualidade da produção do 3o milênio", Congresso Brasileiro de Metrologia, 2003.

- [17] Tanio, F.; "Curva Ascendente nas Vendas de Máquinas de Medição Tridimensional", revista Metal Mecânica, dezembro de 1999 – janeiro de 2000.
- [18] Bosch, J.A.; "Coordinate Measuring Machines and Systems", ISBN 0-8247-9581-4, Marcel Dekker, INC, 443p., New York, 1995.
- [19] França, L.R.G., "Sistema de Gerenciamento de Instrumentos de Controle Geométrico: Caracterização e Desenvolvimento de um Protótipo", dissertação do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, março de 1993.
- [20] Tupy S.A., Joinville, Brasil, disponível em www.tupy.com.br
- [21] LK Limited, Derby, Reino Unido, disponível em www.lk-cmm.com
- [22] Software de medição 3D "Metrolog II", Metrologic Group®, Meylan, França, disponível em www.metrologic.fr
- [23] Filho, O.D.; Drumond, F.B.; "Itens de controle e avaliação de processos", Belo Horizonte, Fundação Christiano Ottoni, 151 p., 1994.
- [24] Donatelli, G.D., "Gestão de processos", seminário: A medida da qualidade e produtividade, Fundação CERTI, março de 2003.
- [25] Sousa, A.R., "Padrões Corporificados e a Tecnologia de Medição por Coordenadas Inovando a Qualificação Geométrica de Centros de Usinagem", tese de doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina, julho de 2000.
- [26] Weck, M.; "Handbook of Machine Tools – Metrological Analysis and Performance Tests", Vol. 4, John Wiley and Sons, 1984.

- [27] Neumann, H.J.; "Industrial Coordinate Metrology – Ten years of innovations", Carl Zeiss, Verlag Moderne Industrie, 2000.
- [28] Renishaw, "Probing systems for co-ordinate measuring machines", catálogo de produtos, 2000.
- [29] Ross, P.J.; "Aplicações das Técnicas Taguchi na Engenharia da Qualidade", São Paulo, 1991.
- [30] ISO TR 14253-1, "Decision Rules for Proving Conformance or Non-Conformance with Specifications", ISO GPS, 1998.
- [31] Donatelli, G.; "Capability of Measurement Systems for 100% Inspection Tasks", tese de doutorado, departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1999.
- [32] Silva, A.C.; "Desenvolvimento de uma Metodologia para Reduzir os Custos da Qualidade através de Atividades Metrológicas", dissertação de mestrado, curso de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.
- [33] ISO 10360-2, "Acceptance test and reverification test for Coordinate Measuring Machines (CMM) – Part 2: CMMs used for measuring linear dimensions", 2000.
- [34] European Cooperation for Accreditation of Laboratories; EAL-G17: "Coordinate measuring machine calibration", Publication Reference, janeiro, 1995.
- [35] Trapet, E.; "La Incertidumbre en Mediciones con MCs", Unimetrik, Vitoria, 2002.

- [36] Norma ISO TS 15530-3, "Coordinate Measuring Machines – Techniques for Evaluation of the Uncertainty of Measurement – Part 3: Use of Calibrated Workpieces", 2000.
- [37] Norma ISO TS 15530-6, "Coordinate Measuring Machines– Techniques for Evaluation of the Uncertainty of Measurement – Part 6: Uncertainty Assessment Using Un-Calibrated Workpieces", em elaboração, 2000.
- [38] Donatelli, G.D.; "Evaluación de la calidad en producción", Grupo de Metrología y Aseguramiento de la Calidad, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Comahue.
- [39] Oliveira, A.L; Sousa, A.R., "Validação de Processos de Medição por Coordenadas em Operações de Controle da Qualidade", Congresso Brasileiro de Metrologia, 2003.
- [40] International Organization for Standardization (ISO), "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement", 1995.
- [41] ISO/IEC 17025, "General requirements for the competence of testing and calibration laboratories", 1999.
- [42] ISO 10012 part 1, "Quality assurance requirements for measuring equipment – Metrological confirmation system for measuring", 1992.
- [43] ISO 10012 part 2, "Quality assurance for measuring equipment – Guidelines for control of measurement processes", 1997.
- [44] Dietrich, E.; "Sonderfälle bei der Beurteilung von Messverfahren", Q-DAS, Versão 2.2 D, maio, 2001.
- [45] Unimetrik, Vitoria, Espanha, disponível em www.unimetrik.es

- [46] VDA 5.2, "Prüfprozesseignung und Einhaltung messtechnischer Anforderungen an Prüfmittel", 2001.
- [47] ISO / TS 16949, "Quality management systems – Particular requirements for the application of ISO 9001:2000 for automotive production and relevant service part organizations", 2ª edição, março, 2002.
- [48] Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia, 2a. Edição, Brasília, Senai / Inmetro, 2000.
- [49] Júnior, A.A.G.; "Metrologia – Parte 1", apostila do curso PósMCI - Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina; Florianópolis, 1999.