

Universidade Federal de Santa Catarina

Centro Tecnológico

Departamento de Engenharia Mecânica

Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial

Labmetro - Laboratório de Metrologia e Automação

A Tecnologia da Medição por Coordenadas na Calibração de Peças Padrão e Medição de Peças com Geometrias Complexas

Dissertação submetida à: Universidade Federal de Santa Catarina para a
obtenção do título de Mestre em
METROLOGIA

Florianópolis, 19 de março de 2003

**A Tecnologia da Medição por Coordenadas na
Calibração de Peças Padrão e Medição de Peças
com Geometrias Complexas**

Antônio de Assis Brito Neto

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. Carlos Alberto Schneider, Dr. Ing.

Prof. Gustavo Daniel Donatelli, Dr. Eng.

Prof. Celso Luiz Nickel Veiga, M.Eng.

Resumo

A tecnologia de medição por coordenadas vem a cada dia aumentando seu campo de atuação nas operações de controle geométrico devido ao seu elevado nível de flexibilidade, universalidade, informatização, automação, bem como os seus baixos níveis de incerteza frente às tolerâncias dimensionais e geométricas de um grande número de peças da indústria. Classicamente, máquinas de medir por coordenadas têm sido utilizadas para o controle de peças com geometrias complexas, no entanto, um dos desafios atuais é desenvolver e validar estratégias que possibilitem o emprego de máquinas de medir por coordenadas de referência para a calibração de peças padrão com geometrias complexas, pois fatores como a complexidade e diversidade geométrica, bem como a precisão dimensional das características medidas em tais peças, restringem a aplicação desta tecnologia. Dentro deste contexto, neste trabalho desenvolveu-se e avaliou-se uma metodologia para aplicar de forma ágil e confiável a tecnologia da medição por coordenadas para a calibração de peças padrão com geometrias complexas e medição de peças complexas normalizadas (tendo as engrenagens como estudo de caso), comparando aspectos como tempos, custos, incerteza de medição e facilidade de operação envolvidas no uso desta tecnologia em relação aos sistemas dedicados/métodos convencionais. Os resultados permitiram demonstrar a boa aplicabilidade da tecnologia da medição por coordenadas para essas tarefas de medição e calibração, com boa confiabilidade metrológica e com grandes vantagens operacionais em relação a métodos clássicos de medição.

Palavras-chaves: Tecnologia da medição por coordenadas; Peças padrão com geometrias complexas; Confiabilidade metrológica.

Abstract

The coordinate measuring has increased itself in its activation area in operations of geometric control due to its elevated level of flexibility, universality, automation, as well as its low levels of uncertainty towards the geometric and dimensional tolerances of great number of parts of the industry. Classically, coordinate measuring machines have been used for the control of parts with geometric complexes, meanwhile, developing and validating strategies that make possible the use of reference coordinate measuring machines for the calibration of standard parts with geometric complexes has become one of today's challenges, for factors such as geometric complexity and diversity, as well as, dimensional precision of characteristic measurements in such parts unable the use of this technology. Because of the above, in this project, a methodology of applying the coordinate measurement technology for the calibration of standard parts with complex geometry and measurement of normalized complex parts in a safe and easy way has been developed and evaluated (having the gears as case study), comparing aspects such as time, costs, uncertainty of measurement and facilitated operation involved in the use of this technology in relation to dedicated systems/conventional methods. The results enabled us to ensure a good applicability of the coordinate measurement technology for the use of measurement and calibration, with a reliability metrology and great operational advantages compared to the classic measuring methods.

Key-words: Coordinate measurement; Complex standard parts; Reliability metrology.

Este trabalho é dedicado às pessoas que mais amo:
minha esposa Roselane; meu filho Romero;
minha mãe; meu pai (*in memoriam*); e minhas
irmãs.

Agradecimentos

- A DEUS, pela proteção, bênçãos e oportunidades derramadas em minha vida.
- À UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina, pelo acolhimento e por ter sido o palco da realização deste trabalho e do forró em que encontrei minha esposa.
- A CAPES pelo financiamento e incentivo ao Programa de Mestrado de Metrologia Científica e Industrial da UFSC.
- Em especial ao Prof. André Roberto de Sousa, pelas orientações, dedicação, apoio e amizade a mim oferecido.
- À Fundação CERTI, particularmente ao Laboratório de Medição por Coordenadas, que na medida do possível disponibilizou pessoal e infra-estrutura laboratorial para a realização da parte experimental deste trabalho.
- Ao colega Ademir Linhares, por seu esforço na realização de alguns dos experimentos e na transmissão de conhecimentos.
- À minha esposa Roselane, pelo carinho, apoio e consolo nos momentos em que a saudade de casa, dos parentes e amigos apertou forte em meu peito.
- À minha mãe, irmãs, parentes e amigos, por seu amor, dedicação, conselhos, apoio e compreensão despendidos em todas as realizações de minha vida.
- À empresa Mercedes-Benz do Brasil, aos amigos Anésio e Lero, pela oportunidade e hospitalidade em minha visita a seus laboratórios, as quais trouxeram grandes contribuições para este trabalho.
- A todos os colegas, professores e funcionários do LABMETRO que de alguma forma contribuíram para o sucesso deste trabalho.
- Ao meu pai (*in memoriam*) por ser meu referencial e fonte de inspiração ao longo de minha caminhada.

Sumário

Aprovação	ii
Resumo	iii
Abstract	iv
Dedicatória	v
Agradecimentos	vi
CAPÍTULO 1	
Desafios Técnicos e Econômicos na Calibração de Peças Padrão e na Medição de Peças com Geometrias Complexas	1
1.1 Uso de peças padrão calibradas no processo de garantia da conformidade dimensional na produção.....	4
1.2 Aspectos do controle dimensional de peças complexas normalizadas utilizando sistemas dedicados.....	5
1.3 A proposta de trabalho.....	8
CAPÍTULO 2	
O Uso de Peças Padrão na Garantia da Qualidade Dimensional na Produção Seriada	10
2.1 Objetivos e Vantagens do Uso de Peças Padrão.....	10
2.2 Características e Requisitos das Peças Padrão.....	16
2.3 Aspectos da Calibração de Peças Padrão.....	16
CAPÍTULO 3	
Controle Geométrico de Peças com Geometrias Complexas Padronizadas. Estudo de Caso: Engrenagens	20
3.1 Garantia da Qualidade Dimensional em Engrenagens.....	22
3.2 Controle Dimensional de Engrenagens.....	24
3.3 Métodos analíticos de medição de engrenagens.....	26
3.4 Sistemas Dedicados à Medição de Engrenagens Versus CMMs.....	29
3.5 Principais padrões utilizados na calibração de sistemas de medição de engrenagens.....	31

CAPÍTULO 4

Potenciais da Medição por Coordenadas para a Medição/Calibração de Peças Padrão com Geometrias Complexas.....	33
4.1 Potencialidades Técnicas da Medição por Coordenadas.....	33
4.2 Desafios para a Obtenção de uma Boa Confiabilidade Metrológica na Medição por Coordenadas.....	35
4.2.1 Principais Fontes de Incerteza na Medição por Coordenadas.....	35
4.3 Análise da Aplicabilidade de CMMs para a Medição e Calibração de Peças Padrão com Geometrias Complexas.....	39
4.3.1 Máquinas de Medir por Coordenadas de Referência.....	39
4.3.2 A Rastreabilidade das Medições em CMMs de Referência.....	40
4.3.3 Aspectos da Aplicabilidade das CMMs na calibração de peças padrão.....	42

CAPÍTULO 5

Proposição de uma Metodologia para Medição/Calibração de Peças Padrão com Geometrias Complexas em Máquinas de Medir por Coordenadas.....	45
5.1 Objetivos Gerais da Metodologia.....	46
5.2 Metodologia Proposta.....	46
5.3 Módulo Análise Prévia da Viabilidade da Medição/Calibração de Peças Padrão Utilizando-se uma Máquina de Medir por Coordenadas.....	47
5.4 Módulo Análise da “Função Metrológica” da Peça Padrão.....	48
5.5 Módulo Análise do Projeto e Processo de Fabricação da Peça Padrão.....	48
5.6 Módulo Elaboração do Procedimento de Medição.....	49
5.6.1 Planejamento da Medição.....	50
5.6.2 Estratégia de Medição.....	52
5.7 Módulo Medição e Estimativa da Incerteza.....	54

CAPÍTULO 6

Aplicação e Avaliação Experimental da Medição por Coordenadas na Medição e Calibração de Peças Padrão.....	56
6.1 Análise Experimental da Tecnologia da Medição por Coordenadas como Padrão na Calibração de Peças Padrão.....	56
6.1.1 Calibração de Tampa-mancal de Motor Elétrico para Avaliação do Processo de Medição.....	57
6.1.2 Calibração de uma Engrenagem Padrão para Avaliação do Processo de Medição...	64
6.2 Avaliação das Potencialidades da Tecnologia de Medição por Coordenadas Frente aos Sistemas Universais de Medição de Engrenagem.....	70
6.2.1 Avaliação da CMM contra Sistemas Universais de Medição de Engrenagens Não Automatizados.....	70
6.2.2 Avaliação da CMM contra Sistemas Universais de Medição de Engrenagens com Elevado Nível de Automatização.....	74

CAPÍTULO 7

Conclusões e Considerações Finais.....	81
---	-----------

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	84
--	-----------

Capítulo 1

Desafios Técnicos e Econômicos na Calibração de Peças Padrão e na Medição de Peças com Geometrias Complexas

O panorama atual, em que o desenvolvimento tecnológico dos sistemas mecânicos tem que vir acompanhado da redução de custos de produção, impõe vários desafios aos sistemas de manufatura. Um desses principais desafios consiste em garantir o atendimento das características geométricas especificadas em projeto com a máxima produtividade, conseguindo-se o máximo de resultados com o mínimo de custos.

A funcionalidade e a confiabilidade de componentes mecânicos dependem fortemente dessas suas características geométricas e o desafio de garantir a sua conformidade geométrica aumenta à medida que a complexidade geométrica e precisão dimensional do componente aumentam, o que hoje é muito comum na indústria. A figura 1.1 mostra os muitos fatores envolvidos em um processo de manufatura e que influenciam a garantia da conformidade dimensional das peças.

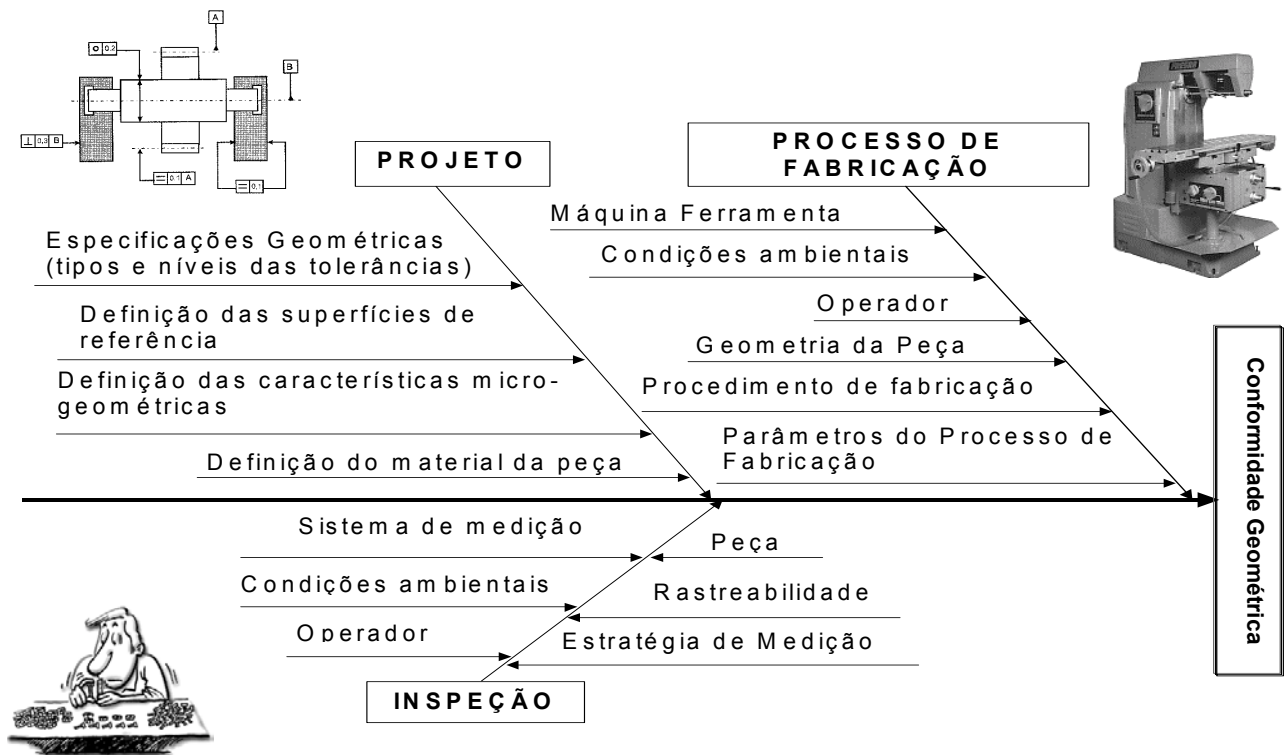


Figura 1.1 – Fatores envolvidos na conformidade geométrica de peças

Devido a influências de fatores externos e internos, os processos de fabricação produzem peças com uma certa variabilidade e imperfeições em suas características. Os níveis dessa variabilidade e imperfeições irão definir a capacidade do processo de fabricação, isto é, sua capacidade de produzir peças dentro de limites de especificações [1-3]. A variabilidade dos resultados das medições realizadas sobre uma característica de um determinado produto também estará influenciada pela variabilidade do processo de medição utilizado, a qual poderá ser expressa através de sua incerteza de medição.

Nesse contexto, a garantia da conformidade dimensional de componentes complexos é grandemente potencializada se informações completas e confiáveis são obtidas com os métodos de controle, para diagnosticar o processo e mantê-lo sob controle. No panorama atual, além de assegurar a confiabilidade metrológica necessária na medição de todas as características funcionais da peça, deseja-se dos métodos de controle velocidade nas operações e a possibilidade de integração computacional com outros sistemas do ambiente de manufatura.

Devido à importância e complexidade geométrica de certos componentes, métodos de controle específicos e equipamentos dedicados foram desenvolvidos para a verificação dimensional. As máquinas de medir engrenagens e dispositivos de controle dedicados são alguns desses exemplos. São equipamentos com boa confiabilidade metrológica, mas que normalmente apresentam um custo alto, a grande maioria são operados manualmente e são dedicados a uma única tarefa.

Ainda no cenário de controle de peças com geometrias complexas, é crescente a utilização de peças padrão calibradas para uso na zeragem de dispositivos de controle, avaliação de processos de medição, dentre outras atividades. Essas peças são réplicas de uma peça de produção, fabricadas sob um controle mais rigoroso e medidas criteriosamente para conhecer as suas dimensões com incerteza bem mais baixa do que os métodos de controle normais da produção.

Tanto o controle de peças complexas com meios dedicados quanto a calibração de peças padrão são operações que atualmente apresentam deficiências técnico-econômicas. O uso de uma máquina dedicada para o controle de peças normalmente imobiliza um grande investimento para uma única função o que hoje se torna crítico devido à grande flexibilidade exigida na produção. A calibração de peças padrão com métodos convencionais, por sua vez, torna-se de difícil e cara execução. Considerando a diversidade de peças padrão, a calibração dessas peças será grandemente facilitada ao utilizar um sistema de medição flexível para a sua calibração.

Devido às suas potencialidades intrínsecas de alta flexibilidade, automatização e informatização, a tecnologia de medição por coordenadas torna-se uma candidata natural para atuar nessas operações. No entanto, devido à complexidade geométrica dessas peças e ao baixo nível de incerteza com que os resultados têm que ser obtidos, existem restrições quanto ao uso da medição por coordenadas em muitas dessas operações e o seu uso ainda não é plenamente difundido e aceito.

Esse trabalho se propõe a aprofundar nessa temática, ao avaliar do ponto de vista técnico a utilização da tecnologia de medição por coordenadas para a medição e calibração de peças

padrão¹ com geometrias complexas, procurando verificar na prática as vantagens e dificuldades da sua aplicação para essas tarefas.

1.1 Uso de peças padrão calibradas no processo de garantia da conformidade dimensional na produção

À princípio, qualquer peça poderá se tornar um padrão, desde que a mesma possua um baixo erro de forma e seja estável fisicamente, sendo a magnitude desta estabilidade dada em função da aplicação da peça padrão. Os critérios de fabricação da peça padrão, como intervalo de tolerância e acabamento superficial, irão depender do objetivo de sua utilização, podendo ser os mesmos critérios utilizados na fabricação das peças seriadas.

Diante da grande variedade de peças fabricadas pela indústria metal-mecânica que possuem boa estabilidade física, existe uma enorme gama de peças que poderão ser transformadas em peças padrão com o objetivo de facilitar/promover a rastreabilidade das medições/calibrações realizadas na indústria.

O uso de peças padrão se dá notadamente na zeragem de dispositivos de controle, na verificação dos sistemas de medição que realizam o controle geométrico no chão-de-fábrica, e como padrão para medição pelo método da substituição. Normalmente são peças retiradas da produção e posteriormente calibradas em sistemas medição com nível de incerteza adequado. A figura 1.2 exemplifica uma possível forma de utilização das peças padrão.

Estas peças padrão com geometrias complexas oferecem grandes dificuldades em sua calibração, devido à complexidade e diversidades de suas características geométricas, bem como à necessidade de obtenção de uma baixa incerteza de medição nos resultados. A dificuldade é imposta pela necessidade do controle de diversas características em uma mesma peça, sendo um exemplo desta situação à medição de um bloco de motor. Neste tipo de medição, precisa-se

¹ Para ajustar uma terminologia que será adotada ao longo do texto, nesse trabalho o termo *Peça Padrão com Geometria Complexa* se refere tanto a peças cujas características dimensionais e geométricas são normalizadas (engrenagens, cames, etc.), como a peças de produção que serão calibradas em sistemas de medição de referência, para serem utilizadas como padrões (réplica calibrada).

controlar diversos parâmetros da peça, tais como comprimentos, perfis, diâmetros, ângulos, etc., o que irá requerer uma grande variedade de sistemas de medição e calibradores (medidas materializadas).

Dessa forma, para garantir a confiabilidade metrológica de peças seriadas através da utilização de peças padrão, torna-se necessário o desenvolvimento de metodologias eficientes que garantam a confiabilidade da medição/calibração das peças padrão, e que também possam oferecer flexibilidade, diminuição dos tempos e custos.

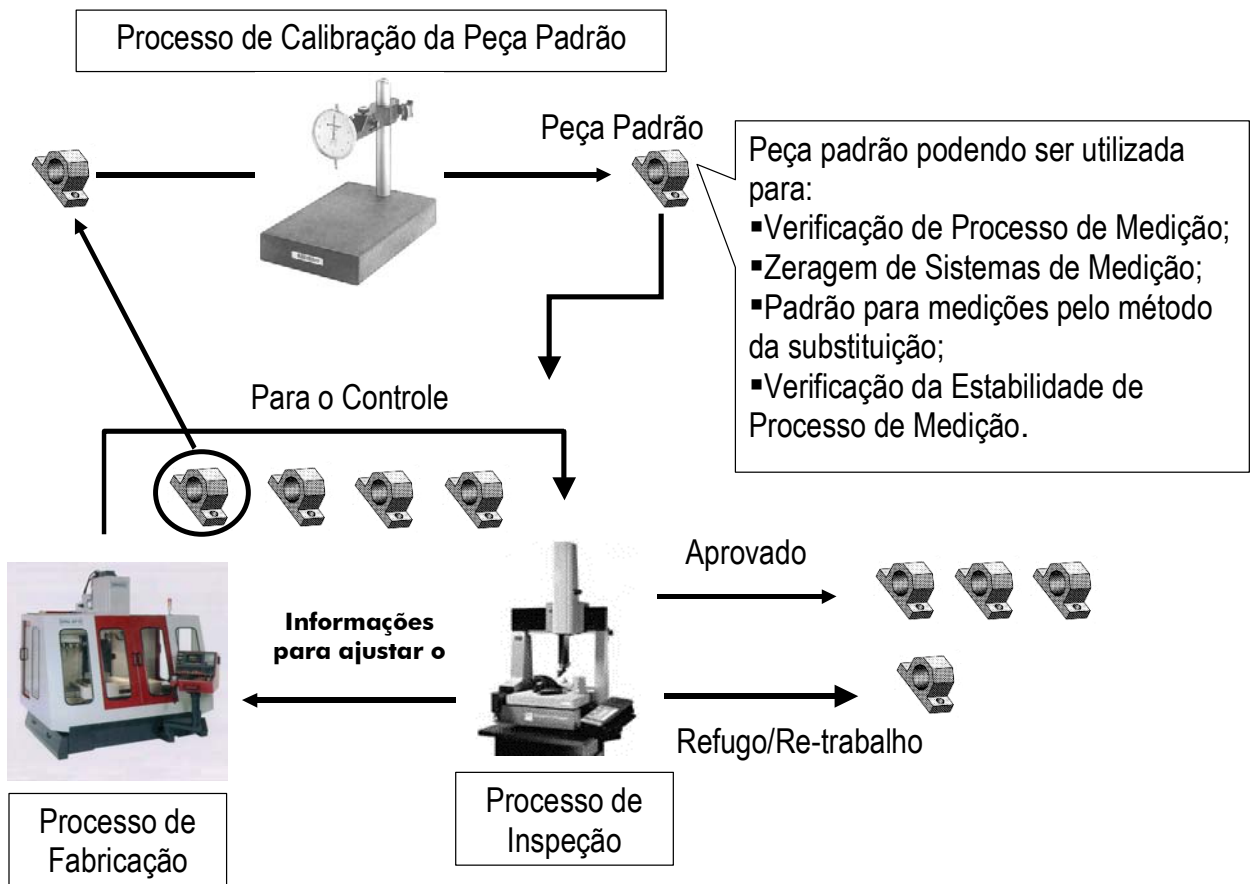


Figura 1.2 - Formas de utilização de uma peça padrão (adaptado de [7])

1.2 Aspectos do controle dimensional de peças complexas normalizadas utilizando sistemas dedicados

Elementos de máquinas como as engrenagens possuem uma geometria complexa e normalizada

em que parâmetros geométricos definidos (passo, ângulo de pressão, etc.) descrevem toda sua geometria e são utilizados para orientar o processo de fabricação e controle dimensional.

Por apresentar uma função vital dentro dos mecanismos em que atua, a geometria dessas peças deve ser fabricada dentro de limites de tolerância bastante estreitos para garantir a funcionalidade e confiabilidade do conjunto mecânico. Além das tolerâncias estreitas, a complexidade geométrica é um outro complicador no controle dimensional de engrenagens. Perfis e linhas de flanco, espaçamentos angulares e outros parâmetros são de difícil ou impossível medição por instrumentos convencionais.

Dado o grande volume dessas peças normalizadas na indústria, e as dificuldades para o seu controle geométrico, equipamentos dedicados foram desenvolvidos ao longo do tempo, com a função específica de controlar características geométricas dessas peças. As máquinas de medir cames e as várias máquinas de medir engrenagens são dois exemplos desses sistemas de medição.

Em comum, os sistemas de medição dedicados apresentam como características principais, além da sua óbvia inflexibilidade, uma boa confiabilidade metrológica e um alto custo de aquisição. Na indústria, existem sistemas com graus de automatização variados. Desde os completamente manuais até os de última geração, completamente automatizados e de custo muito alto. A figura 1.3 apresenta alguns desses sistemas.



Figura 1.3 - Sistemas dedicados com diferentes níveis de automatização utilizados para o controle de peças normalizadas

O desenvolvimento acentuado da tecnologia de medição por coordenadas nas últimas décadas e a presença cada vez maior dessa tecnologia nas empresas têm motivado os usuários cada vez mais a tentar utilizar a medição por coordenadas em substituição aos sistemas de controle dedicados. A grande flexibilidade da tecnologia e as enormes potencialidades matemáticas dos softwares de medição atuais têm possibilitado análises dimensionais quase ilimitadas nas peças. O grande nível de automatização das máquinas de medir e a integração com outros sistemas computacionais do ambiente de manufatura (sistemas CAD-CAM-CAE-CAQ) são outros motivadores da busca por utilizar uma máquina de medir por coordenadas para a medição de peças complexas normalizadas. Para os usuários, existe ainda a vantagem de não se ter um capital imobilizado em um equipamento que faz uma única tarefa.

Antecipando-se a essa tendência, os fabricantes de máquinas há tempos desenvolvem e possuem softwares específicos para a medição dessas peças normalizadas. No entanto, se os recursos matemáticos dos softwares possibilitam análises dimensionais quase ilimitadas, o mesmo não se pode afirmar da confiabilidade metrológica do processo de medição. A alta flexibilidade funcional da medição por coordenadas traz consigo uma incerteza de medição normalmente maior do que nos sistemas dedicados a uma tarefa. Essa incerteza de medição faz com que, embora possuindo os recursos matemáticos necessários nos softwares de medição, muitas máquinas não se mostram confiáveis para o controle dimensional de várias das peças normalizadas. Várias fontes de incerteza fazem com que os resultados não apresentem um nível de incerteza aceitável frente às tolerâncias das peças.

Existe assim, em muitos casos, o desafio de fazer o processo de medição ser confiável para poder-se tirar proveito da flexibilidade da medição por coordenadas e utilizá-la em substituição a sistemas dedicados para o controle de peças complexas normalizadas.

Várias literaturas reprovam o uso da medição por coordenadas em substituição aos sistemas dedicados [4-5], mas uma análise de adequabilidade simplista, sem considerar caso a caso fatores como a tolerância da peça, os característicos a medir, etc., pode levar a conclusões erradas.

Recentes avanços nas máquinas como os apalpadores de apalpação vetorial, mesas rotativas,

correção de erros dinâmicos e outros, têm possibilitado medições complexas com incertezas cada vez menores. Além disso, existem peças normalizadas com níveis de incerteza plenamente compatíveis com as máquinas atuais. Certamente haverá peças com um nível de precisão dimensional só atendidos por equipamentos de medição dedicados, mas a medição por coordenadas pode atender boa parte dessas peças.

O sucesso na aplicação da medição por coordenadas no controle de peças normalizadas com geometria complexas dependerá da aplicação de uma metodologia adequada de análise de viabilidade técnica/operacional e do desenvolvimento e validação de estratégias de medição consistentes para o controle. Em poucas aplicações pode-se afirmar, sem uma análise mais elaborada, que a medição por coordenadas é viável ou inviável. Para a maioria das peças, somente após uma análise de adequabilidade mais aprofundada pode-se ter essa decisão.

1.3 A proposta de trabalho

Frente às limitações técnico-econômicas dos métodos convencionais na calibração de peças padrão e na medição de peças com geometrias complexas e diante das potencialidades da medição por coordenadas, o atual trabalho se propôs a realizar estudos e ensaios para avaliar a viabilidade técnica da medição por coordenadas para estas tarefas.

A comprovação da adequabilidade da medição por coordenadas na medição/calibração de padrões com geometrias complexas possibilita uma alternativa vantajosa da indústria para garantir a rastreabilidade metrológica de seus padrões e peças de forma rápida, confiável e a um custo mais baixo frente aos métodos convencionais de medição/calibração destes padrões [6].

Ao longo do desenvolvimento do trabalho, foram abordadas questões relativas às peças padrão (formas de uso, características e métodos de medição/calibração), os aspectos envolvidos na garantia da confiabilidade metrológica da tecnologia da medição por coordenadas. Com base nessa fundamentação teórica, uma metodologia para a medição/calibração de padrões com geometrias complexas foi proposta e avaliada na prática, com peças de diferentes indústrias.

Essas análises técnicas e verificações experimentais foram realizadas utilizando como estudo de casos engrenagens de sistemas de transmissão de caminhões, engrenagens de motores hidráulicos, engrenagem impulsora de motores de partida e tampa-mancal de motor elétrico. Por razões de sigilo, os nomes das empresas serão omitidos ao longo do texto.

Para descrever as atividades realizadas e os resultados obtidos, esta dissertação está estruturada com a seguinte seqüência e conteúdos:

- No capítulo 2 são discutidas as questões relativas ao uso e características de uma peça padrão calibrada, para uso como referência no processo de garantia da qualidade dimensional de peças da produção;
- O capítulo 3 fornece um estudo sobre o controle geométrico de peças complexas normalizadas, focalizando o estudo no controle de engrenagens;
- O capítulo 4 analisa o potencial da medição por coordenadas na calibração e medição de peças padrão com geometrias complexas;
- O capítulo 5 apresenta a proposta de uma metodologia que auxilie a calibração de peças padrão e a medição de peças com geometrias complexas em CMMs.
- O capítulo 6 faz estudo de caso do emprego da medição por coordenadas na medição/calibração dos padrões com geometria complexa através de ensaios.
- O capítulo 7 apresenta as conclusões deste trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2

O Uso de Peças Padrão na Garantia da Qualidade Dimensional na Produção Seriada

A metrologia é uma ferramenta essencial para a redução dos custos de produção de bens de consumo em geral, no entanto, os custos envolvidos com a aquisição, instalação, manutenção e calibração dos padrões e sistemas de medição, bem como os custos com a implantação e implementação de sistemas da qualidade e a utilização de mão-de-obra especializada são bastante elevados, o que certamente irá refletir no preço final do produto.

Ações devem ser realizadas para diminuir estes custos, desde a fase de estabelecimento das tolerâncias da peça e escolha dos padrões ou sistemas de medição que deverão ser utilizados, até a fase de medição propriamente dita.

Sendo assim, a correta utilização e eficiente calibração de peças padrão irá possibilitar o aumento e eficiência do seu uso no chão-de-fábrica, o que irá minimizar os custos metrológicos do produto.

2.1 Objetivos e Vantagens do Uso de Peças Padrão

É essencial que se tenha sistemas de medição calibrados para fornecer resultados rastreáveis a padrões nacionais e internacionais, pois a rastreabilidade das medições é um dos pré-requisitos da confiabilidade dos processos de medição utilizados nos processos de inspeção e uma das formas de se garantir a intercambiabilidade e funcionalidade das peças medidas. Portanto, torna-se necessário a calibração destes sistemas de medição.

As formas de se calibrar os sistemas de medição que realizam o controle dimensional e geométrico no chão de fábrica variam de acordo com seu tipo, com a incerteza necessária do padrão, com os tempos, custos e condições de contorno da calibração. Os principais padrões utilizados nestas calibrações estão visualizados na figura 2.1.

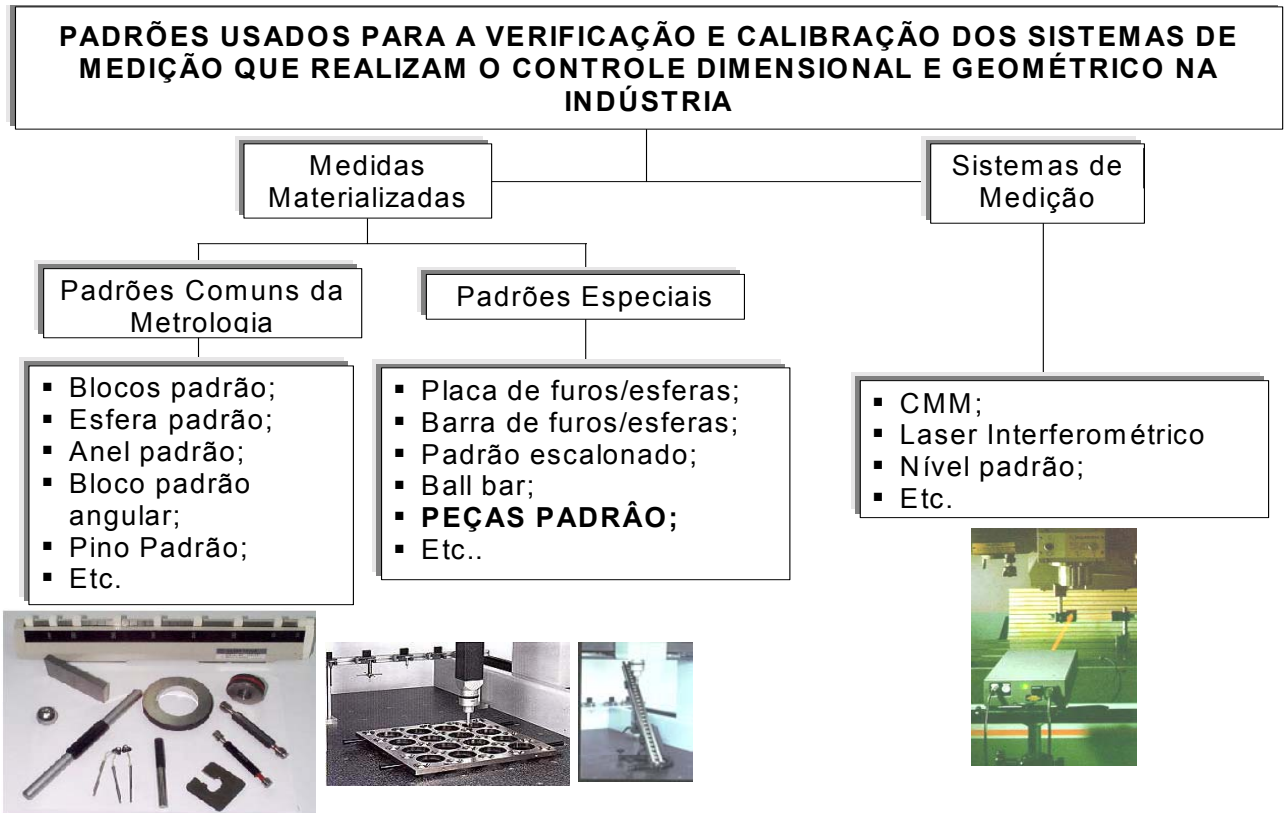


Figura 2.1 - Principais padrões utilizados na calibração de sistemas de medição responsáveis pelo controle metrológico realizado no chão de fábrica.

O principal objetivo do uso de peças padrão é oferecer rastreabilidade às medições no chão-de-fábrica de forma ágil, flexível e a um menor custo [6][8-10], compensando as limitações dos métodos convencionais de calibração.

Várias peças mecânicas possuem uma multiplicidade geométrica com a capacidade de agregar funções de diversos componentes em uma mesma estrutura. Para obter esta multiplicidade geométrica, estas peças necessitam muitas vezes de passarem por diversas etapas de processamento durante sua fabricação. Como a ação sobre o processo é, geralmente, mais econômica [8], a grande maioria das empresas optam pela inspeção das peças após cada etapa de seu processo de fabricação, oferecendo assim um controle metrológico e uma realimentação do

processo produtivo mais eficiente. Este tipo de controle irá requer um grande número de padrões e sistemas de medição, os quais necessitam ser calibrados periodicamente, gerando custos e barreiras aos processos produtivos.

O uso de peças padrão poderá, dependendo do caso, diminuir os custos e facilitar as atividades de inspeção, a partir do momento em que uma peça padrão poderá possuir diversas características calibradas (diminuindo assim o número de padrões necessários), ou ter um custo inferior aos padrões convencionais, bem como a mesma permitirá a diminuição dos tempos gastos em vários “setups” que são geralmente requeridos pelos métodos convencionais, além de ser uma calibração mais realista. A utilização das peças padrão se dá através das seguintes formas:

a) Zeragem de sistemas de medição.

Um exemplo desta aplicação é o caso da medição multiponto (figura 2.2), utilizada para um rápido controle geométrico das peças produzidas. Estes sistemas de medição possuem diversos transdutores os quais dificultam sua operação de zeragem do sistema de medição, operação esta que necessita ser realizada periodicamente para garantir a confiabilidade e estabilidade dos resultados de medição ao longo do tempo. Para realizar uma rápida zeragem deste sistema de medição, faz-se uso de uma peça padrão que possui suas características geométricas calibradas e bem próximas do seu valor nominal.

b) Verificação de tarefas específicas de sistemas de medição.

As peças padrão podem ser utilizadas para ensaios ou verificações específicas, onde são verificados os erros que um sistema de medição, por exemplo uma máquina de medir por coordenadas, comete em tarefas de medição ou geometrias de maior interesse [6][11].

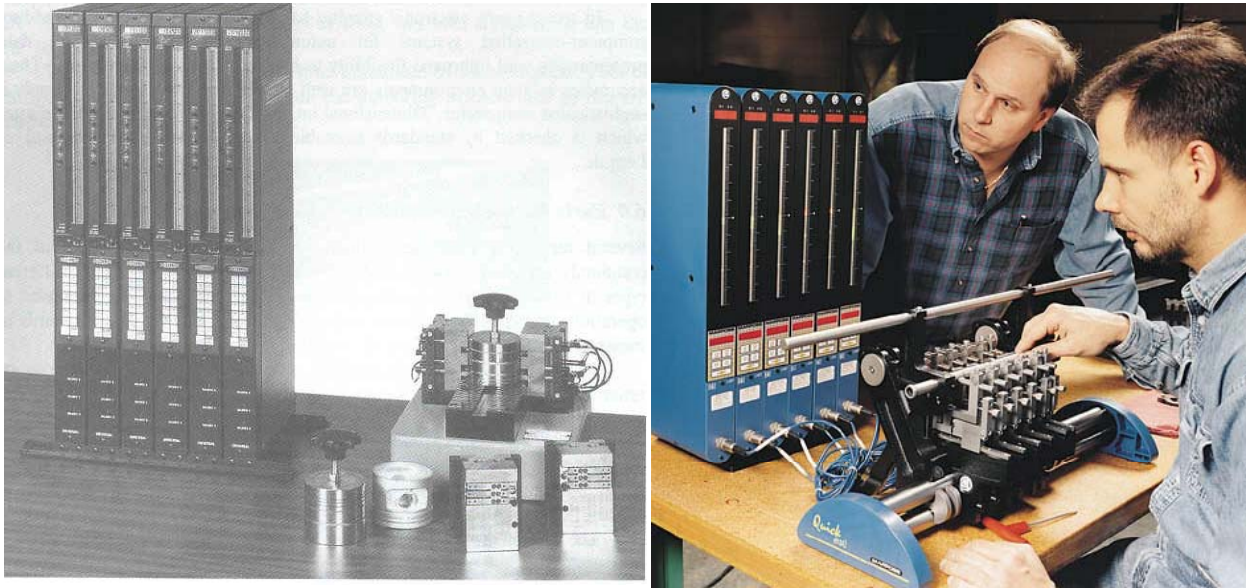


Figura 2.2 - Exemplos da utilização de uma peça padrão em uma medição multiponto [4]

c) Verificação da estabilidade de processos de medição.

Dependendo da complexidade, tempos e custos da calibração de determinados sistemas de medição, poderá existir um longo período de tempo decorrido entre calibrações, e durante este período poderá ocorrer a degradação das suas características metrológicas, como também perdas no controle ambiental e/ou mudanças relacionadas ao desempenho dos operadores, ou seja, fatos que venham comprometer a validade das medições. Logo, torna-se necessário que estas mudanças sejam identificadas o mais breve possível, para que a confiabilidade dos resultados não seja comprometida e, conseqüentemente, não estejam sendo cometidos erros na classificação das peças ou se esteja enviando informações incorretas para a realimentação dos processos de fabricação. A figura 2.3 apresenta as principais conseqüências dos erros de medição no processo de classificação de peças, onde desperdícios são cometidos quando peças não-conformes são aprovadas e peças conformes são reprovadas.

Assim como é realizado o controle dos processos de fabricação através do uso de ferramentas estatísticas, os processo de medição também poderão fazer uso destas ferramentas, pois através da medição de peças padrão poderá ser avaliada a capacidade e estabilidade destes processos de medição, possibilitando a realização de ações corretivas visando garantir a estabilidade e confiabilidade do controle metrológico [4][5-6][12-13].

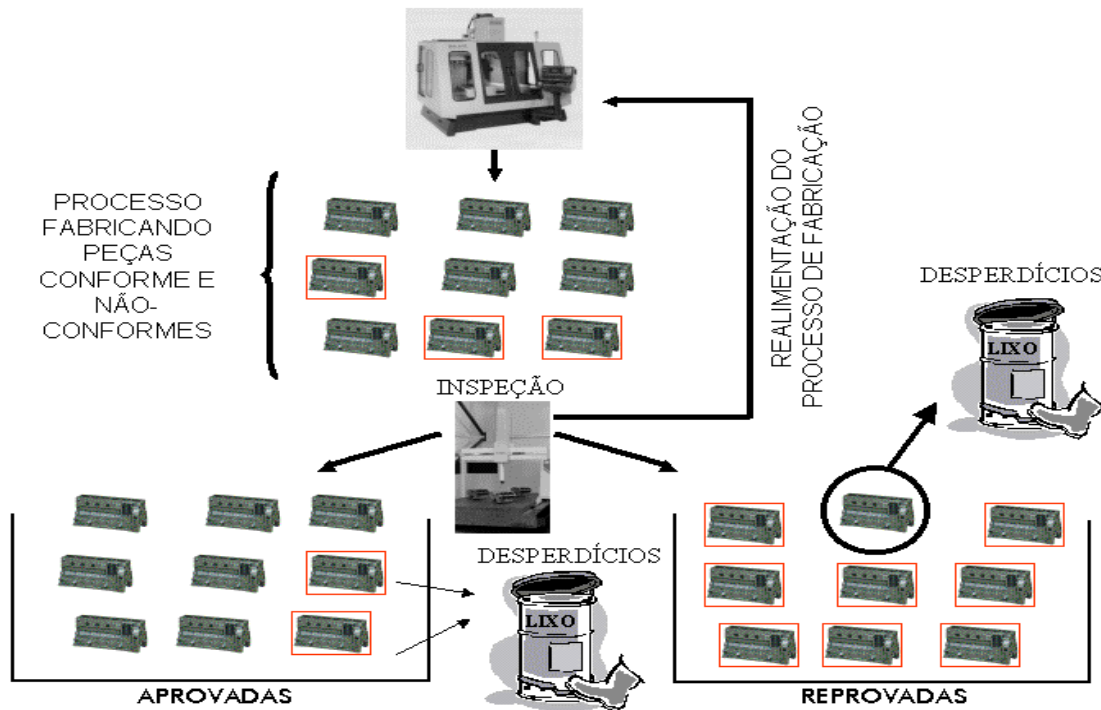


Figura 2.3 - Conseqüências dos erros de medição na qualificação de peças.

d) Promover medições através do método da substituição.

A medição de um objeto que possui suas características calibradas e rastreáveis a padrões nacionais ou internacionais, permite acessar diretamente os erros associados a uma tarefa de medição específica [14]. Logo, o método por substituição torna o sistema de medição um simples comparador, onde a diferença entre o resultado da medição do padrão e o correspondente valor de sua calibração é usado para corrigir a medição de um objeto que possui as mesmas características deste padrão. Os limites dos desvios existente entre as características do padrão e do objeto a ser medido, são estabelecidas por [15].

Como exemplo de utilização, o sistema RAMTIC - *Renishaw's Automated Milling, Turning and Inspection Center* – utiliza as peças padrão em seu método de medição por substituição [16]. O sistema RAMTIC é um conceito de usinagem automatizada, capaz de produzir lotes de diferentes componentes, de forma seriada e em longos períodos sem intervenção do operador, conjugando automaticamente na mesma máquina todas as operações de preparação do processo, usinagem e controle de qualidade das peças produzidas. A peça é usinada e, após a operação de acabamento final, a ferramenta de corte é substituída por um apalpador de medição, que mede então o padrão

e a peça recém usinada, para certificar-se de que as dimensões da peça estão dentro das tolerâncias desejadas. Com isso, a exatidão na medição é determinada pelo padrão, e não pela condição da máquina-ferramenta utilizada nesta situação como sistema de medição. Uma mesa rotativa de eixo horizontal garante a troca rápida entre a peça e o padrão. A operação pode ser visualizada na figura 2.4.

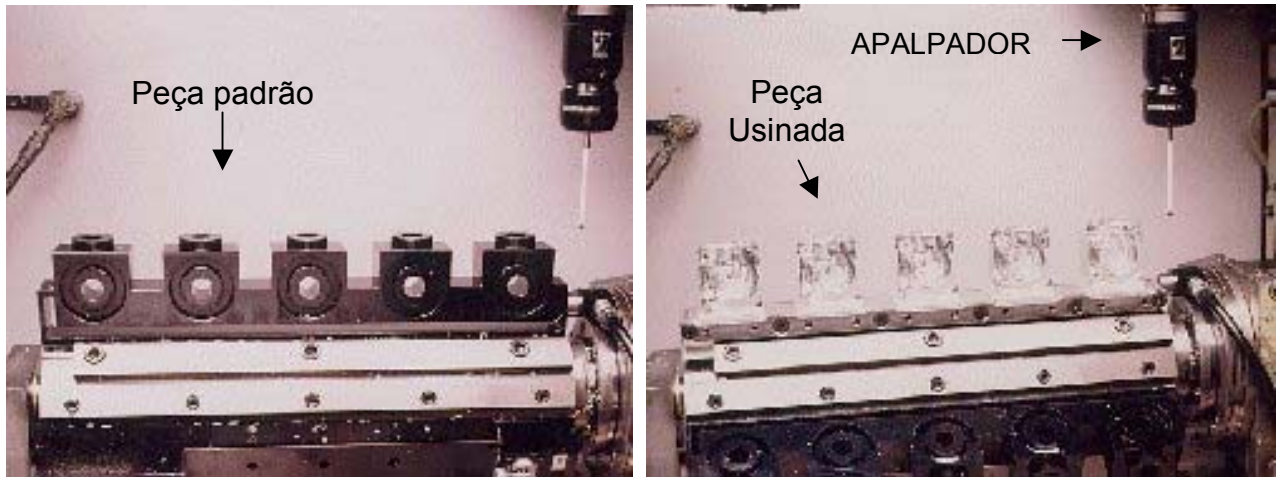


Figura 2.4 - Visualização da utilização da peça padrão pelo sistema RAMTIC

Diante destas formas de utilização das peças padrão, as principais vantagens do seu uso são:

- Promover e facilitar a realização de uma rápida verificação, zeragem e diagnóstico da confiabilidade dos processos de medição [6];
- Diminuição do número de padrões e dos tempos de “setups” gastos em verificações/calibrações realizadas no chão de fábrica. Contribuindo assim para a diminuição dos custos relativos à calibração destes sistemas e evitando-se possíveis gargalos na produção gerados por atividades de calibração demoradas;
- Por ser a verificação uma operação mais fácil de ser realizada, o tempo decorrido entre calibrações irá aumentar;
- Redução dos tempos de equipamento não disponível por calibração;
- Maior acesso aos operadores do padrão dos sistemas de medição devido ao seu baixo custo em relação aos padrões tradicionais (anéis padrão, bloco padrão, padrão escalonado, esquadro, etc.);
- Redução dos custos de fabricação devido às vantagens anteriores.

2.2 Características e Requisitos das Peças Padrão

O principal requisito das peças padrão é que as mesmas deverão possuir estabilidade física e geométrica frente a fatores térmicos, mecânicos e ao longo do tempo, bem como deverá ser comprovada a rastreabilidade da medição de suas características. Esta estabilidade e rastreabilidade deverão ser comprovadas periodicamente através de calibrações em sistemas de medição de referência [17]. A tabela 2.1 estabelece os requisitos das características geométrica das peças padrão em função do objetivo de sua utilização.

Tabela 2.1 - Requisitos geométricos das peças padrão em função do objetivo de sua utilização.

TAREFA	CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICA DA PEÇA PADRÃO (CGPP)
Verificação de Sistemas de Medição	Não é um requisito que as CGPP estejam próximas dos valores nominais, sendo esta condição aconselhável no caso das peças padrão serem utilizadas em operações envolvendo sistemas de medição não informatizados, para facilitar o seu uso.
Zeragem de Sistemas de Medição ou Dispositivos de Controle	CGPP próximas dos valores nominais.
Verificação da Estabilidade de Processos de Medição	Não é necessário que as CGPP estejam próximas dos valores nominal.
Medição por Comparação	Diferenças no comprimento dentro de $\pm 10\%$ ou $\pm 25\text{mm}$, seja qual for a maior; diferenças angulares dentro de $\pm 5^\circ$ [18].

As características do material da peça padrão (coeficiente de expansão, rigidez e dureza), independente do objetivo de sua utilização, deverão preferivelmente ser idênticos às características da peça que se deseja controlar, devido às questões funcionais da peça [15].

2.3 Aspectos da Calibração de Peças Padrão

A rastreabilidade é “a propriedade do resultado de uma medição ou do 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” [19].

De um modo geral a cadeia de rastreabilidade de um sistema de medição calibrado por uma peça padrão pode ser visualizado na figura 2.5. A forma detalhada desta cadeia de rastreabilidade irá

dependem da forma de calibração da peça padrão e dos sistemas de medição/padrões que o antecedem na cadeia de rastreabilidade.

A escolha do processo de medição a ser utilizado na calibração de peças padrão, envolve questões relacionadas ao(s) sistema(s) de medição necessário(s), o(s) método(s) de medição a ser(em) utilizado(s), ao operador e ao ambiente de realização da calibração. Os principais aspectos que deverão ser considerados na escolha do processo de medição a ser utilizado na calibração da peça padrão estão apresentados na figura 2.6.

Dentre estes fatores, a incerteza de medição do padrão utilizado na calibração da peça padrão, a diversidade geométrica das peças padrão, bem como a demanda e variedade deste tipo de calibração, poderão ser considerados como os principais fatores que deverão ser observados durante a escolha/aquisição do(s) sistema(s) de medição a ser(em) utilizado(s) nesta tarefa.

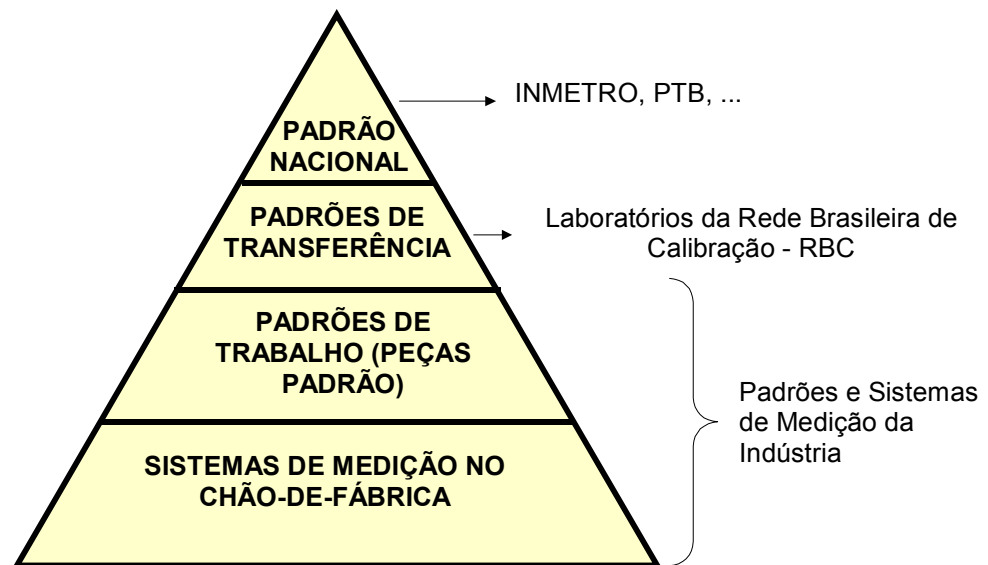


Figura 2.5 Hierarquia de calibração nacional de sistemas de medição calibrados com peças padrão (adaptado de [7] e [20])

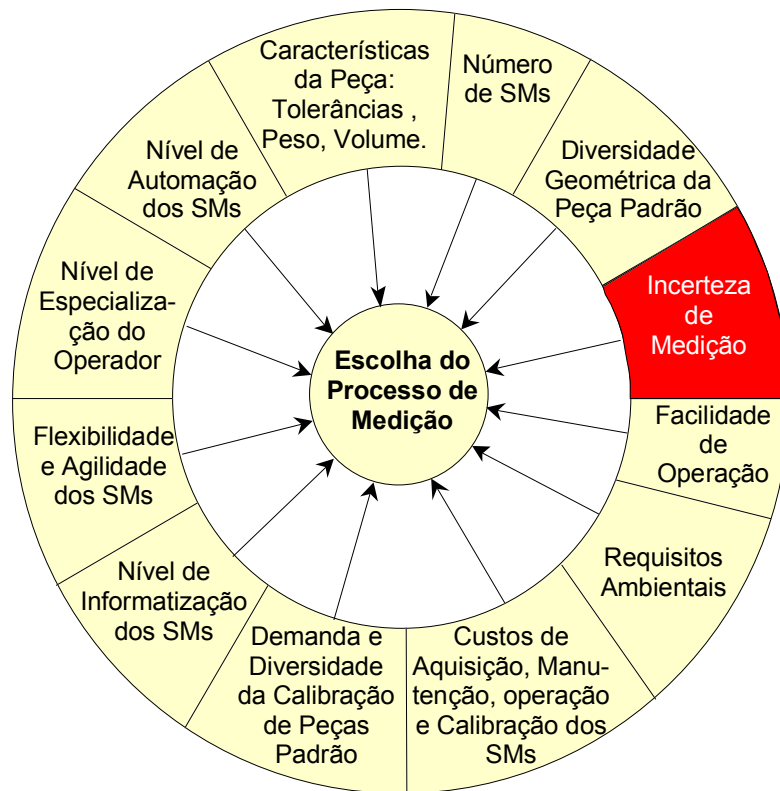


Figura 2.6 Características que deverão ser observadas na escolha do processo de medição a ser utilizado na calibração das peças padrão.

A relação entre a incerteza de medição (U) e a tolerância de fabricação (IT) é um dos aspectos de maior importância da metrologia [8][21]. O valor desta relação deverá ser determinada de forma adequada para cada caso de aplicação, ponderando-se entre o que é realizável e o que é necessário.

O valor da relação U/IT que é mais comumente empregado, por ser mais conservativo, é a chamada “regra de ouro da metrologia”, na qual se estabelece que a incerteza de medição deverá ser dez vezes menor que a tolerância da peça a ser verificada. O emprego deste valor em casos onde a tolerância é muito pequena poderá ser inviável tanto do ponto de vista técnico quanto do econômico, excetuando-se aplicações especiais (como por exemplo, o caso onde o custo associado ao refugo de peças boas é elevado) relações menos conservativas poderão ser usadas.

Sendo assim, a determinação do valor da relação U/IT deverá considerar fatores como:

- Importância da grandeza a ser controlada em relação as conseqüência derivadas dos erros de medição [6][8][22-24];
- Busca do equilíbrio técnico-econômico [25-27];
- Processo de fabricação sob controle estatístico [23];
- Conhecimento da capacidade do processo de produção e as principais fontes de incerteza no processo de medição [23];

À medida que descemos na cadeia de rastreabilidade, mais difícil e oneroso será alcançarmos a relação U/IT de 1/10. Isto certamente irá restringir a gama de sistemas de medição que poderão ser utilizados, logo, relações menos conservativas devem ser adotadas.

Em se tratando de peças padrão, a estratégia de medição é fundamental para a confiabilidade do processo de medição ou calibração. A definição das grandezas funcionais a calibrar e o estabelecimento de referências (*datum targets*) tornam-se vitais para fazer a peça padrão ser confiável para o processo de controle de peças seriadas.

Capítulo 3

Controle Geométrico de Peças com Geometrias Complexas Padronizadas. Estudo de Caso: Engrenagens

Como peças com geometrias complexas de grande utilização na indústria mecânica, as engrenagens se fazem presentes em vários mecanismos, aparelhos, máquinas ou motores, com as principais funções de:

- Transmissão de movimento e torque entre eixos;
- Variar a velocidade e o sentido de rotação de um eixo para outro;
- Ampliação ou redução do torque;
- Conversão de movimentos lineares em angulares ou vice-versa (através da associação de engrenagens com cremalheiras);
- Assegurar o sincronismo de movimento entre componentes mecânicos, garantindo o não deslizamento;
- Bombeamento de fluidos.

A complexidade geométrica das engrenagens é algo marcante, gerando grandes dificuldades em seu processo de fabricação e inspeção. As principais conseqüências dos seus erros geométricos são os elevados níveis de ruídos, vibrações, bem como danos em outras engrenagens, decréscimo do rendimento e falhas prematuras [4]. Dentre estes fenômenos, a vibração traz sérias conseqüências à funcionalidade, ao desempenho e ao tempo de vida dos sistemas que são constituídos pelas mesmas, pois as vibrações podem se propagar através de todo o conjunto mecânico atingindo e prejudicando peças situadas mesmo longe de suas origens. A figura 3.1

apresenta as formas nas quais a falta de qualidade nas engrenagens podem ser manifestadas.

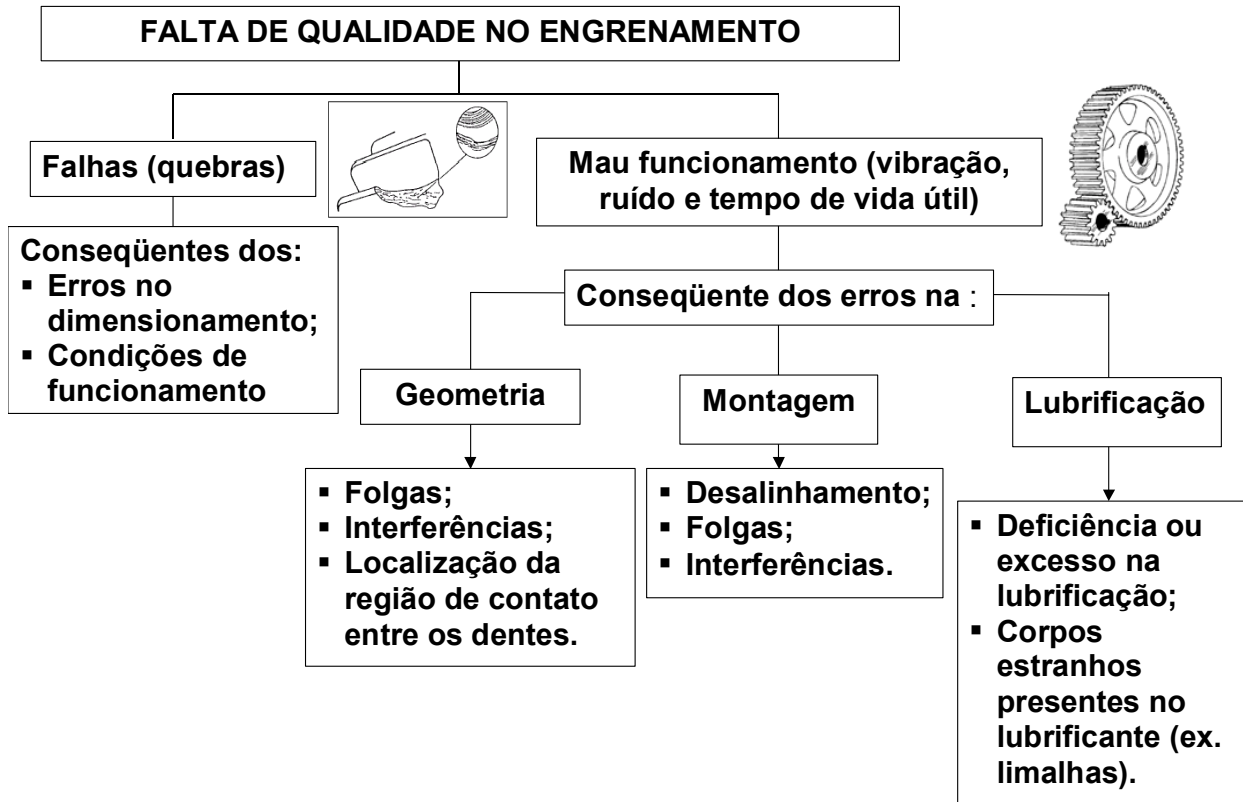


Figura 3.1 - Sintomas e conseqüências da falta de qualidade no engrenamento

Um controle eficiente das características das engrenagens consiste principalmente em supervisionar permanentemente o processo de fabricação, permitindo assim aperfeiçoá-los. Esta supervisão consiste na medição das engrenagens produzidas com o objetivo de encontrar as fontes de erros do processo de fabricação.

Para esta finalidade, isto é, a descoberta de erros e das fontes dos mesmos, foram criados diversos sistemas de medição especialmente projetados para o controle de engrenagens. A interpretação inteligente dos resultados destas medições, bem como a preocupação com questões como rastreabilidade e incerteza das medições, permitem descobrir e eliminar as fontes de erros, contribuindo desta forma para reduzir a parcela de refugos ao mínimo.

3.1 Garantia da Qualidade Dimensional em Engrenagens

São diversas as origens dos erros em engrenagens, e para um eficiente controle dos processos de

fabricação, torna-se necessário identificar as fontes de erro para a implementação das ações corretivas. As principais origens dos erros dimensionais e geométricos em engrenagens são:

- Erros geométricos da máquina e da ferramenta de usinagem;
- Movimentos não conjugados de geração, devido a deformações elásticas e erros geométricos das engrenagens pertencentes à máquina ferramenta que fabrica as engrenagens;
- Rigidez da máquina, peça (engrenagem a ser usinada) e ferramenta de corte;
- Uso de ferramentas com o gume de corte gasto ou danificado;
- Excesso de vibração da máquina ferramenta;
- Batimento do mandril porta engrenagem;
- Não concordância entre o eixo da engrenagem e o eixo do mandril;
- Erros causados por uma inadequada fixação do blanque e/ou ferramenta de corte [28];
- Falhas de lubrificação no processo de usinagem;
- Baixa qualidade do blanque;
- Deformações oriundas do processo de tratamento térmico;
- Influências do ambiente de medição;
- Deformações térmicas da máquina ferramenta, da ferramenta de corte e da engrenagem sendo fabricada.

Além de classificar as engrenagens medidas, bem como oferecer subsídios ao controle dos processos de fabricação, as medições de engrenagens possibilitam a realização de tarefas como a determinação do desgaste da ferramenta de corte, a análise dos efeitos do tratamento térmico na engrenagem e guiar o “setup” das máquinas ferramentas utilizadas no processo de fabricação de engrenagens. A figura 3.2 exemplifica a inserção dos processos de medição de engrenagens dentro de um processo de fabricação de engrenagens (devemos ressaltar que apesar de ser uma prática bastante comum na indústria, não se deve liberar um processo com uma única peça conforme).

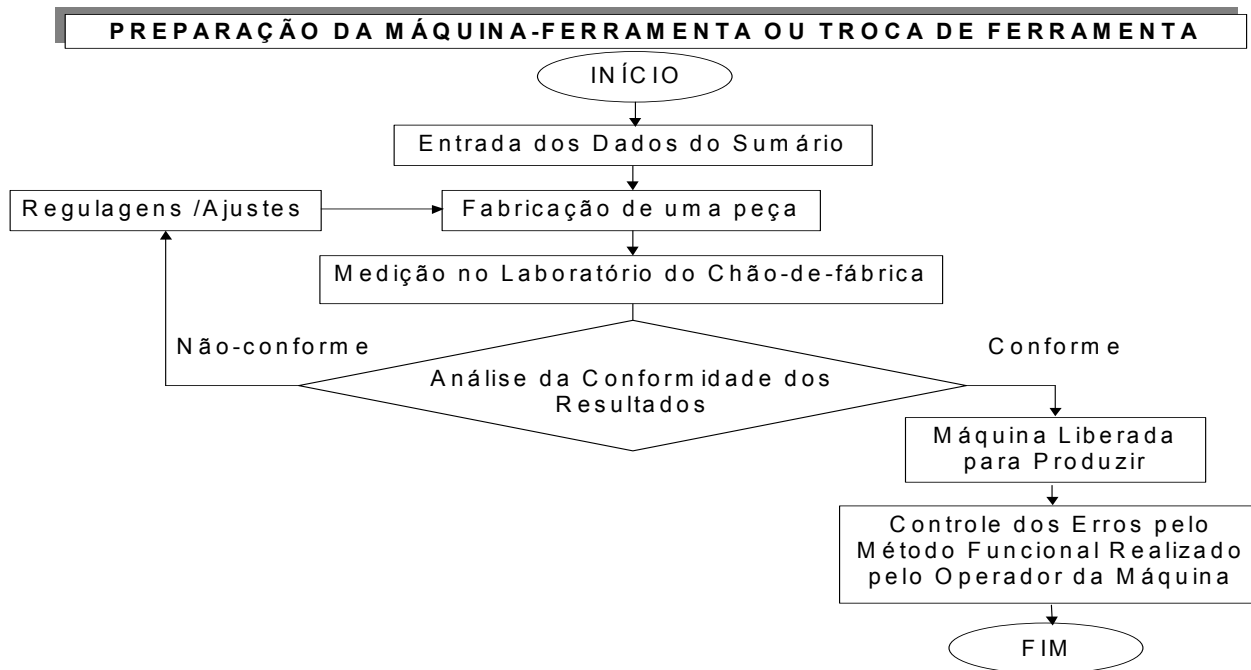


Figura 3.2 - Fluxograma do controle do processo de fabricação de engrenagens realizado na indústria

Os níveis de qualidade de engrenagens são estabelecidos pela norma DIN 3960 [29], onde são apresentadas doze classes de qualidade. Para cada classe de qualidade estão fixadas as tolerâncias dos parâmetros das engrenagens. A tabela 3.1 apresenta as principais aplicações de engrenagens de acordo com a sua classe de qualidade.

Tabela 3.1 - Exemplos de aplicações de engrenagens de acordo com as classes de qualidade.

CLASSES DE QUALIDADE	APLICAÇÕES
01	Atualmente, dificilmente é utilizada, tal a dificuldade para sua obtenção. Foi criada prevendo-se uma utilização futura.
02	São utilizadas em indústrias de precisão (relojoaria e aparelhos de precisão).
03	São utilizadas como padrão em laboratórios de controle. São consideradas engrenagens de precisão.
04	Utiliza-se na fabricação de engrenagens padrão, engrenagens para aviação, engrenagem de alta precisão para torres de radar.
05	São utilizadas em aviões, máquinas operatrizes, instrumentos de medidas, turbinas, etc.
06	Utiliza-se em automóveis, ônibus, caminhões, navios, em ponte de alta rotação.
07	Engrenagens Sheivadas são empregadas em veículos, máquinas operatrizes, máquinas de levantamento e transporte, etc.
08 e 09	São as mais empregadas, pois não precisam ser retificadas. Utilizam-se em máquinas em geral.
10 a 12	São engrenagens mais rústicas, normalmente utilizadas em máquinas agrícolas.

3.2 Controle Dimensional de Engrenagens

Os parâmetros das engrenagens são, tradicionalmente, determinados em sistemas de medição especiais [5][30-34]. O processo de medição de engrenagens a ser utilizado irá depender de fatores como: nível de exatidão requerido; magnitude da tolerância especificada (classe de qualidade à qual a engrenagem pertence); tamanho da engrenagem; número de engrenagens produzidas; nível de automação e informatização desejado da medição; e custo da inspeção.

Os dois principais métodos de medição utilizados no controle de engrenagens são o método funcional e o analítico. O método funcional é uma forma qualitativa de se classificar as engrenagens, isto é, o resultado da medição irá fornecer uma idéia dos níveis de erros dimensionais e geométricos da engrenagem, não fornecendo subsídios para se determinar as origens de tais erros [28].

O principal método funcional utilizado consiste na simulação do engrenamento da engrenagem que se deseja controlar com uma engrenagem padrão (figura 3.3), onde as variações da distância entre eixos são medidas e/ou registradas para análise do engrenamento. Durante esta medição, os defeitos da engrenagem ensaiada transformam-se em deslocamentos do eixo da engrenagem padrão, dando uma idéia da qualidade da engrenagem que se está sendo controlada, pois os níveis dos erros da engrenagem padrão são conhecidos e pequenos [35].

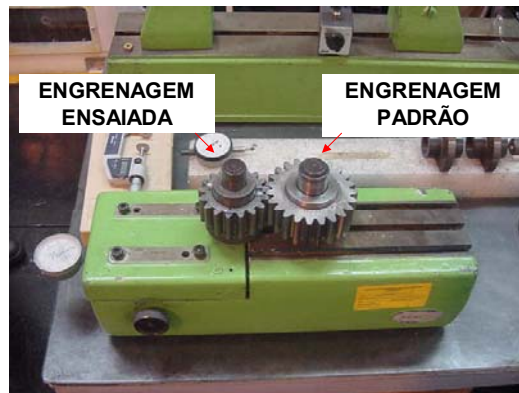


Figura 3.3 - Foto de um sistema de medição utilizado para o controle de engrenagens através do método funcional

A principal desvantagem deste método de medição é a impossibilidade de se conhecer as origens

dos erros, logo o mesmo não é capaz de realimentar analiticamente o processo de fabricação. Sendo este método bastante utilizado na medição de 100% das engrenagens fabricadas (controle geralmente realizado pelo próprio operador da máquina-ferramenta utilizada para fabricar engrenagens) ou no recebimento de lotes de engrenagens por clientes, por ser um método rápido e capaz de fornecer uma visão geral da qualidade da engrenagem.

Outra medição que também poderá ser considerada um método funcional é o controle de engrenagens através do nível de ruído existente durante a simulação do engrenamento com uma engrenagem padrão, possibilitando a identificação de alguns tipos de erros geométricos presentes na engrenagem, através da análise do tipo de ruído.

O método analítico de controle de engrenagens permite que os parâmetros da engrenagem sejam medidos separadamente, possibilitando identificar as origens dos erros geométricos da engrenagem e realizar uma realimentação do processo de fabricação. O princípio do método consiste na medição da discrepância existente entre o valor real do parâmetro e o seu valor teórico.

Os principais parâmetros controlados em engrenagens através do método analítico são: Desvios de forma (erros no perfil) e na orientação (linha de flanco) do dente da engrenagem, erros na espessura e no passo dos dentes, bem como o batimento radial da engrenagem. Estes desvios são representados através dos parâmetros apresentados na tabela 3.2 sendo os mesmos definidos na norma DIN 3960 [29].

Tabela 3.2 Principais parâmetros controlados em uma engrenagem

GRANDEZA	PARÂMETROS
Desvios de forma do dente	Desvio total de perfil (evolvente): F_{α} Desvio de forma de perfil (evolvente): $f_{r\alpha}$ Desvio angular do perfil (evolvente): $f_{H\alpha}$:
Orientação do dente	Desvio total da linha de flanco: F_{β} Desvio de forma da linha de flanco: $f_{r\beta}$ Desvio angular da linha de flanco: $f_{H\beta}$:
Desvios de divisão (ou passo)	Desvio individual de divisão: f_p . Desvio acumulado de divisão: F_{pk} . Desvio total de divisão: F_p .
Batimento Radial	Desvio de batimento radial: F_r

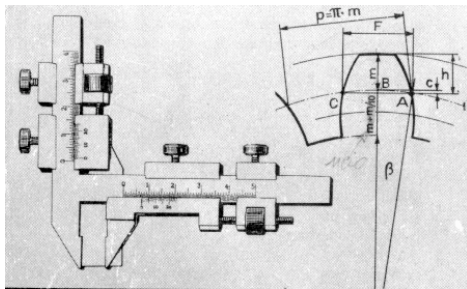
3.3 Métodos analíticos de medição de engrenagens

Podemos dividir os sistemas de medição que realizam o controle analítico de engrenagens em duas classes: os sistemas dedicados e os sistemas flexíveis de controle de engrenagens (figura 3.4).



Figura 3.4 - Opções para a medição de forma analítica de engrenagens

Devido às características e complexidade geométrica das engrenagens, vários sistemas foram especialmente desenvolvidos para a sua medição. Pode-se optar pelo controle de todos os parâmetros da engrenagem em um sistema universal de medição de engrenagens, ou pela utilização de um sistema de medição específico para cada parâmetro que se deseja controlar. A figura 3.5 apresenta os principais tipos de sistemas de medição dedicados ao controle de engrenagens.



PAQUÍMETRO DE DUPLO CURSOR



MEDIDOR DO PASSO



**MÁQUINA UNIVERSAL DE MEDIR
ENGRENAGENS**



**SISTEMA UNIVERSAL DE MEDIÇÃO DE
ENGRENAGENS (PRIMAR MX4)**



**SISTEMA UNIVERSAL DE MEDIÇÃO DE ENGRENAGENS
(KLINGELNBERG HOEFLER PNC)**

Figura 3.5 - Principais sistemas de medição dedicados ao controle de engrenagens

A escolha de um sistema de medição de engrenagens a ser utilizado em um processo de inspeção irá depender de inúmeros fatores. A figura 3.6 apresenta as principais características de alguns sistemas de medição.

SISTEMA DE MEDIÇÃO	CARACTERÍSTICAS						
	Agilidade	Parâmetros Medidos	Nível de Automação	Nível de Informatização	Facilidade de operação	Nível de Incerteza	Custo de Aquisição
Paquímetro de Duplo Cursor	↓	1	X	↓	↑	↑	↓
Aparelhos portáteis para a medição do Passo	↑	1	X	↓	↑	↑	↓
Máquinas Universais de Medição de Engrenagens	↓	V	X	X	↑	↑	↑
Sistemas CNC de Medição de Engrenagens	↑	V	↑	↑	↓	↓	↑

Onde : ↑ - Grande; ↓ - Pequena; X - Não existe; 1 - Um único parâmetro; V - Vários parâmetros.

Figura 3.6 – Características de sistemas dedicados à medição de engrenagens e o nível de suas características.

Os sistemas flexíveis possuem a grande vantagem de poderem ser utilizados não somente para a medição de engrenagens. Sistemas como paquímetros, micrômetros, relógios comparadores são utilizados na medição de características como espessura do dente ou batimento radial. As máquinas de medir por coordenadas, por sua grande flexibilidade, e pelo seu alto nível de automação e informatização das medições, busca-se aplicá-la no controle de engrenagens. A figura 3.7 apresenta os principais sistemas de medição flexíveis utilizados no controle metrológico de engrenagens.



Figura 3.7 - Principais sistemas de medição flexíveis utilizados na medição de engrenagens

3.4 Sistemas Dedicados à Medição de Engrenagens Versus CMMs

Para facilitar a realização desta comparação, separou-se os sistemas dedicados à medição de engrenagens em dois grupos: o Grupo 1, formado pelos sistemas não informatizados e não automatizados (Ex.: máquinas universais de medição de engrenagens, paquímetro de duplo cursor, sistemas de medição portáteis para a medição do passo, etc.), e o Grupo 2 formado por sistemas caracterizados pelo seu alto nível de informatização e automação das medições (fundamentalmente formado por sistemas universais CNC de medição de engrenagens).

A comparação do desempenho metrológico entre os sistemas de medição que formam o grupo 1 e as CMMs é algo bastante complexo, devido às grandes diferenças do contexto onde esses dois grupos de sistemas de medição são aplicados. Devido a quase que total inexistência de informatização e automação das medições, os sistemas de medição do grupo 1 são utilizados geralmente no controle de pequenos lotes de engrenagens ou na verificação de parâmetros específicos da engrenagem, realizadas pelo próprio operador da máquina-ferramenta utilizada em sua fabricação, para uma rápida avaliação da conformidade da característica recém fabricada. O contexto de aplicação das CMMs é caracterizado pela necessidade do controle de um grande número de peças e integração direta do controle metrológico com a produção, exigindo assim a adoção de sistemas com elevados níveis de informatização e automação.

Questões como velocidade de medição, nível de informatização e automação, bem como a

incerteza de medição, são essenciais na busca de sistemas de medição capazes de atender às imposições geradas pela rapidez, flexibilidade e exatidão características dos processos produtivos modernos. Logo, o uso de sistemas de medição CNC no controle dos modernos processos de fabricação de engrenagens torna-se essencial, fazendo com que as máquinas de medir por coordenadas (CMMs) e os sistemas CNC dedicados ao controle de engrenagens sejam as duas grandes opções para este tipo de controle.

A principal razão da utilização de CMMs no lugar de sistemas CNC dedicados à medição de engrenagens é quando os usuários de tais sistemas de medição não tem uma dedicação constante (“full-time”) de medição de engrenagens. Pois se o requerimento não está próximo de 100%, corre-se o risco de não obter o retorno do investimento, devido aos altos custos envolvidos na utilização de sistemas dedicados a medição de engrenagens [28]. Logo, existem empresas que fazem uso das CMMs para o controle metrológico de engrenagens (figura 3.8).

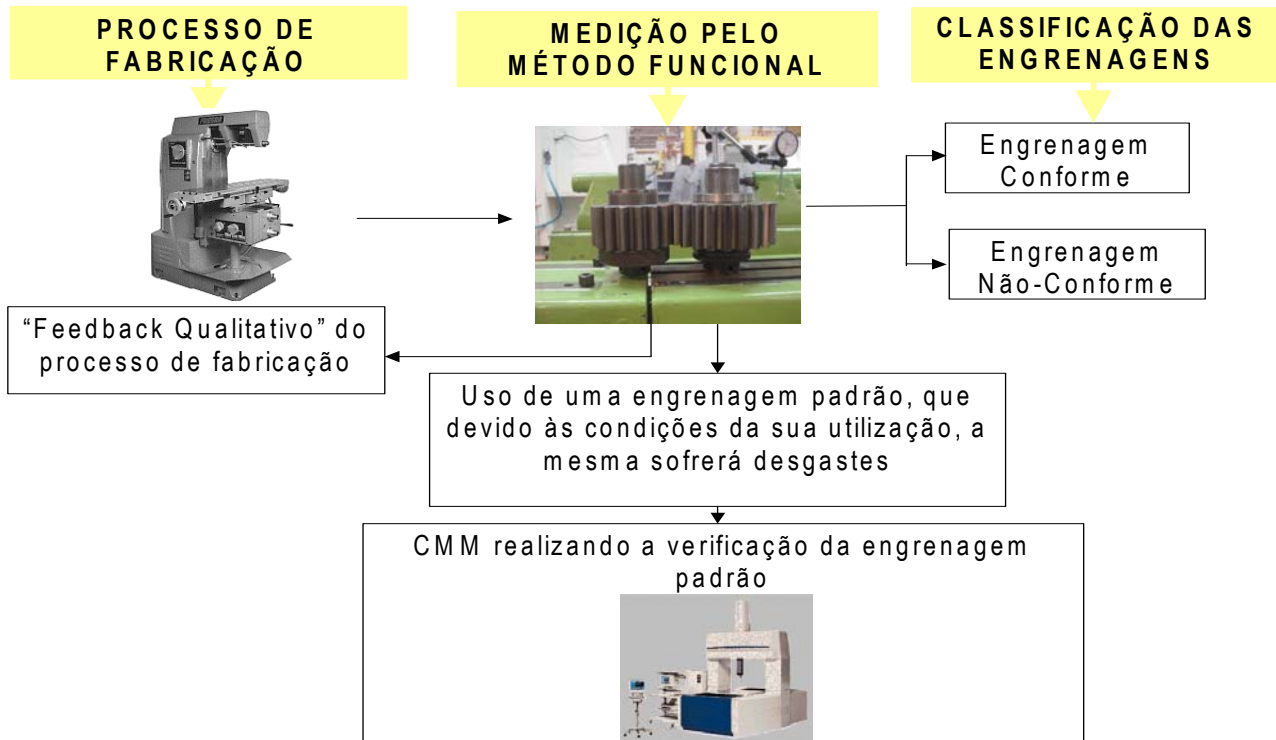


Figura 3.8 - Exemplo da utilização esporádica de CMMs na medição de engrenagens

Embora existam afirmações de parte a parte sobre a adequabilidade ou não das CMMs para o controle de engrenagens, ainda faltam fatos conclusivos sobre o limite de aplicabilidade das mesmas para esta tarefa. O autor da referência [5] tem como um dos argumentos principais a

impossibilidade de utilização de Máquinas de Medir por Coordenadas na medição de engrenagens, o fato da tarefa de medição de engrenagens envolver o movimento de pelo menos dois eixos da máquina, elevando-se assim grandemente os erros de medição, fato este que não acontece na medição em aparelhos dedicados onde a engrenagem é fixa em um eixo rotativo minimizando a movimentação dos eixos de medição do sistema de medição. Esta afirmação deixa de ter sentido no momento que utilizamos uma mesa rotativa como acessório de medição em CMMs.

Não são todas as CMM que estão em par de igualdade com os sistemas de medição CNC dedicados à medição de engrenagens, mas certamente os modelos que se encontram no topo da linha estarão [28]. No entanto, existirão casos onde CMMs menos sofisticadas poderão atender satisfatoriamente os requerimentos de um controle metrológico de engrenagens, por exemplo, casos onde as tolerâncias geométricas das engrenagens são mais abertas.

Como a medição de engrenagens requer a análise de uma larga quantidade de pontos, o usuário que desejar utilizar uma CMM para o controle metrológico de engrenagens deverá optar preferencialmente por um modelo que tenha a capacidade de realizar “scanning”, medição autocentrada e possua uma mesa rotativa.

A análise sobre a adequabilidade ou não de CMMs para a medição de engrenagens, na verdade, dependerá fundamentalmente da relação entre as tolerâncias de fabricação e a incerteza de medição da máquina de medir por coordenadas utilizada.

3.5 Principais padrões utilizados na calibração de sistemas de medição de engrenagens

Devido a fatores como a complexidade e precisão geométrica característica de engrenagens, torna-se necessário o uso de padrões especiais para a calibração dos sistemas de medição de engrenagens. Os principais padrões utilizados para esta tarefa estão visualizados na figura 3.9.



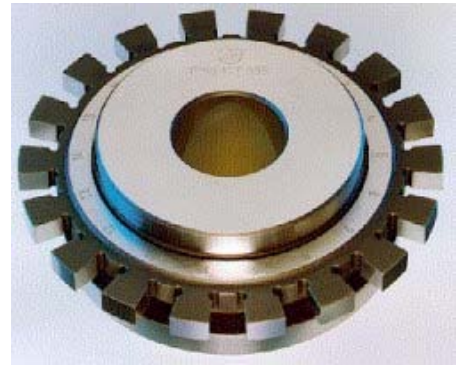
PADRÃO DE EVOLVENTE:

- Tamanho: $d_b = 25 \text{ mm}$ a 400 mm
- Incerteza de Calibração para $f_{H\alpha}$:
 $U_{95\%} = 0,4 \text{ } \mu\text{m} - 0,8 \text{ } \mu\text{m}$ ($k=2$)



PADRÃO DE INCLINAÇÃO DA HÉLICE:

- Tamanho: $d_b = 60 \text{ mm}$ a 200 mm
- Incerteza de Calibração para $f_{H\beta}$:
 $U_{95\%} = 0,5 \text{ } \mu\text{m} - 1,3 \text{ } \mu\text{m}$ ($k=2$)



PADRÃO DE PASSO:

- Tamanho: $d_b = 160 \text{ mm} - 334 \text{ mm}$
- Incerteza de Calibração para F_p :
 $U_{95\%} = 0,2 \text{ } \mu\text{m}$ ($k=2$)

Figura 3.9 - Principais padrões utilizados na calibração de sistemas de medição de engrenagens [36].

Devido ao alto custo desses padrões (custos com a aquisição, manutenção e calibração), os usuários de sistemas de medição de engrenagens sub-contratam laboratórios para a calibração de seus sistemas de medição. Aqui novamente, diante dos altos custos da aquisição e utilização destes padrões convencionais, é ressaltada a importância do usuário possuir uma engrenagem padrão (réplica calibrada), para verificar seus sistemas de medição de modo a monitorar a confiabilidade do seu processo de medição.

Capítulo 4

Potenciais da Medição por Coordenadas para a Medição/Calibração de Peças Padrão com Geometrias Complexas

Devido às limitações operacionais e metrológicas dos métodos convencionais de medição e calibração de peças padrão com geometrias complexas, bem como da crescente procura por este tipo de medição, tem-se buscado um sistema de medição que realize esta operação de medição de forma confiável, rápida, flexível e com baixos custos.

Diante das potencialidades da medição por coordenadas e dos seus contínuos avanços, a custos decrescentes, esta tecnologia tem-se tornado uma ótima opção na medição/calibração de peças padrão com geometrias complexas.

Apesar das grandes potencialidades desta tecnologia, requer-se um pleno conhecimento das principais fontes de incerteza envolvidas no processo de medição, bem como a adoção de procedimentos para garantir a confiabilidade metrológica de suas medições.

4.1 Potencialidades Técnicas da Medição por Coordenadas

A flexibilidade das máquinas de medir por coordenadas é, sem dúvida, a maior vantagem oferecida por esta tecnologia. A sua capacidade de adaptar-se rapidamente a diferentes tipos de medições requeridas pelo controle dimensional e geométrico de componentes mecânicos, a torna a principal opção na medição de peças com geometrias complexas [37-41]. A figura 4.1 apresenta

as principais potencialidades do uso da tecnologia da medição por coordenadas.

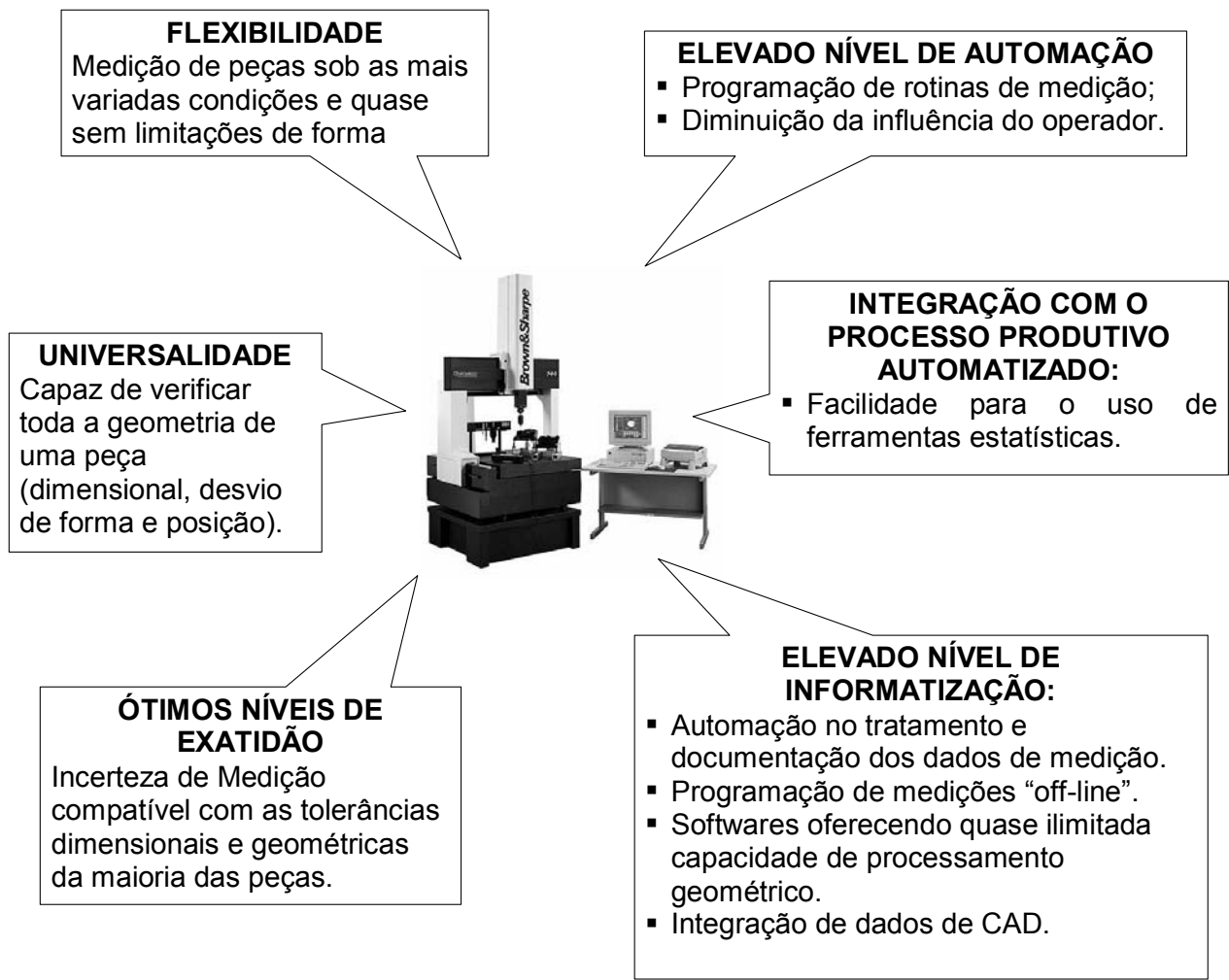


Figura 4.1 - Principais potencialidades das CMMs

O potencial de aplicação das CMMs é muito grande. Com elas é possível o controle de dimensões lineares em uma ou duas direções, posições em três direções, alturas, rebaixos, superfícies cônicas e inclinadas, contornos ou perfis, desvios geométricos, posicionamento de furos, e inter-relacionamento geométrico [42]. Quando comparada com as técnicas de medição convencionais, a metrologia por coordenadas oferece algumas vantagens, como as apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Comparação da medição por coordenadas em relação aos métodos convencionais (adaptado de [4])

METROLOGIA 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
Comparação dos resultados com medidas materializadas	Comparação dos resultados com modelos matemáticos
Determinação separada de dimensões, erros de forma e posição, utilizando diferentes instrumentos de medição	Determinação conjunta de dimensão, forma e posição, na maior parte das vezes, numa 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
Menor complexidade na utilização	Maior complexidade de utilização

4.2 Desafios para a Obtenção de uma Boa Confiabilidade Metrológica na Medição por Coordenadas

Podemos considerar as máquinas de medir por coordenadas - CMMs - como sendo sistemas de medição com excelente nível de exatidão. Porém, devido ao desconhecimento e/ou negligências a fatores que venham a influenciar sua confiabilidade, o nível de incerteza dos resultados das medições poderá ser muito superior ao nível de exatidão especificado por seu fabricante, fazendo com que a mesma não possa ser utilizada para o controle de peças com tolerâncias dimensionais e geométricas mais apertadas.

A desconsideração com as especificações do equipamento, a inadequada preparação do ambiente e o desconhecimento das fontes de incerteza que atuam sobre o processo de medição, podem ser as origens de elevados níveis de incerteza em medições utilizando-se CMMs.

4.2.1 Principais Fontes de Incerteza na Medição por Coordenadas

As fontes de incerteza associadas à medição por coordenadas podem ser classificadas dentro de quatro grupos (CMM, ambiente de medição, peça, operador juntamente com a estratégia de medição), visualizados na figura 4.2 [37-44].

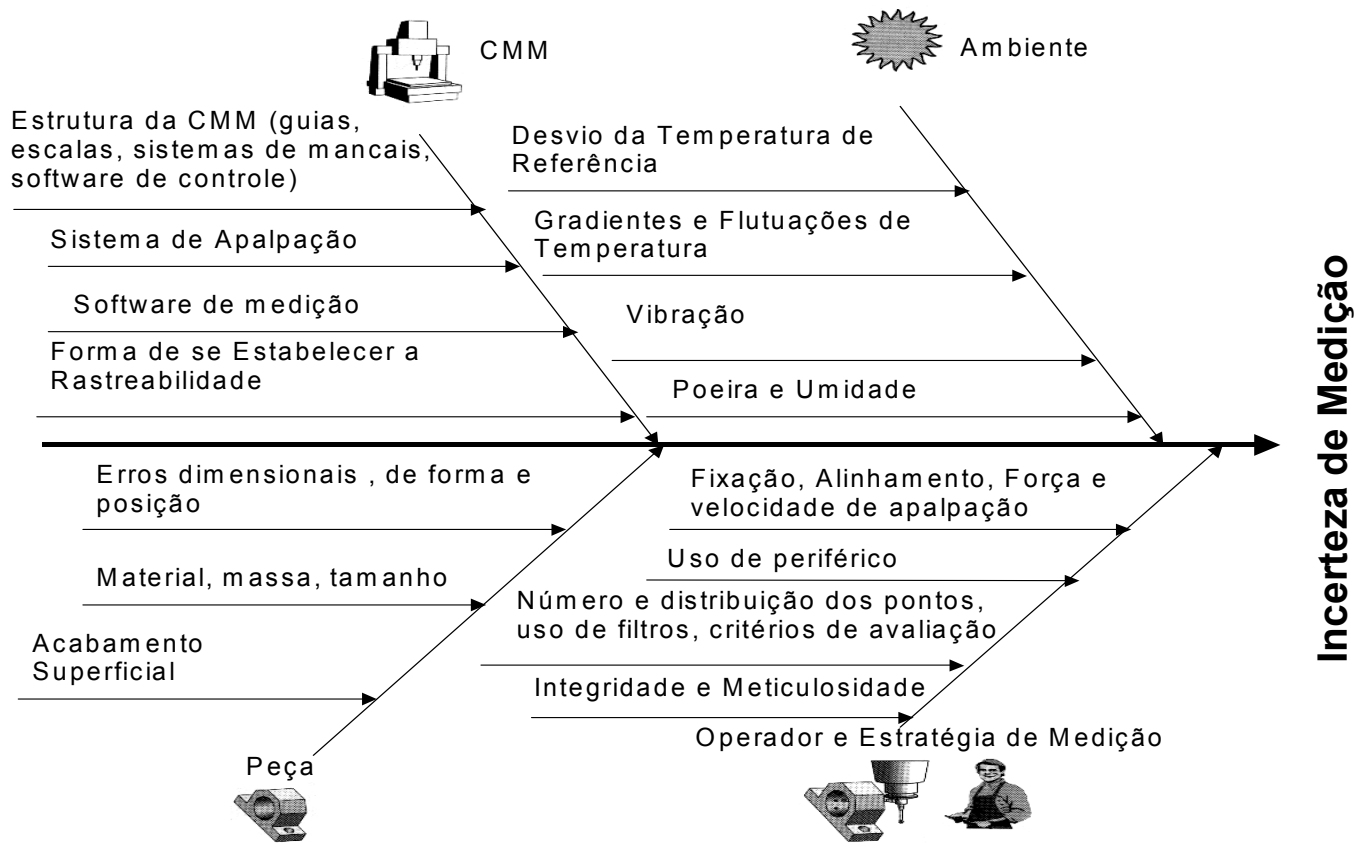


Figura 4.2 - Principais fontes de incerteza na medição por coordenadas (adaptado de [9] e [45])

As fontes de incerteza provenientes da CMM podem ser divididas basicamente em três subsistemas: estrutura da CMM, sistema de apalpação e software de medição. Cada subsistema possui várias fontes de erro que poderão influenciar no resultado da medição. Estas fontes de incerteza são geralmente minimizadas pelo fabricante da máquina, que através de um processo de calibração capaz de separar seus erros, poderá compensá-los via software. No entanto, é de grande importância que o operador conheça as fontes de erros da máquina, bem como seu princípio de medição e suas limitações, para que o mesmo possa estabelecer estratégias de medição que venham minimizar as influências destes erros. As principais influências do ambiente na medição em CMMs estão relacionadas às condições de temperatura, poeira e vibração (figura 4.3).

Pode-se dizer que existem três formas da temperatura influenciar nos resultados das medições, são elas: desvio da temperatura de referência; flutuações no tempo e gradientes de temperatura na máquina e no ambiente. Estes fatores afetam tanto a CMM quanto a peça, pois expansões ou

contrações lineares podem levar a desvios nos resultados.

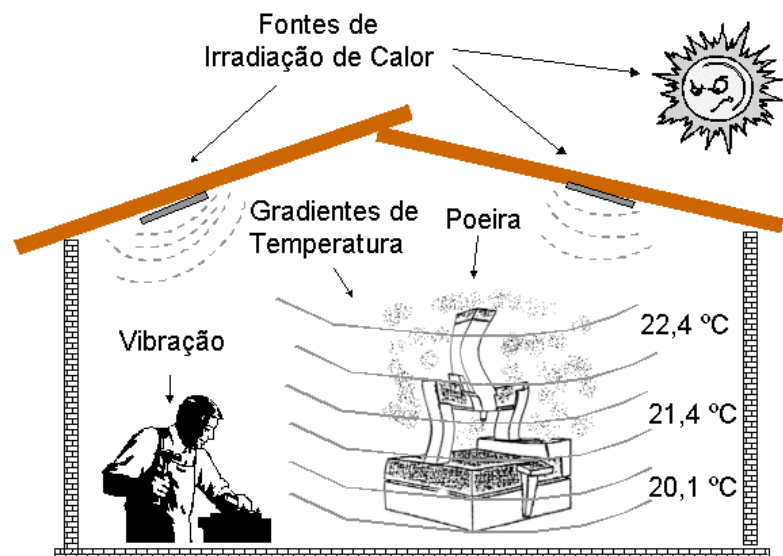


Figura 4.3 - O ambiente como fonte de incerteza na medição por coordenadas

Apesar de existir a possibilidade de se compensar/minimizar os efeitos da temperatura, seja matematicamente ou através do uso de máquinas com maior robustez aos efeitos de temperatura (máquinas com guias feitas de matérias 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.

Além dos efeitos devido à temperatura do ambiente, torna-se necessário realizar ações que minimizem as influências de vibrações, causadas tanto pelo movimento da própria máquina como vibrações propagadas através do ambiente, como também o controle da poeira presente no laboratório.

Apesar da robustez operacional de algumas máquinas de medir por coordenadas, a preparação do ambiente onde as mesmas irão operar deverá ser feita de forma criteriosa, pois os níveis de temperatura, poeira e vibração poderão restringir os tipos de máquinas que poderão operar eficientemente neste ambiente ou exigir a adoção de ações para minimizar suas influências.

Uma destas ações será a climatização do ambiente de medição, que envolve uma série de aspectos, como a escolha dos locais de insuflação de ar frio, fluxo de ar dentro do laboratório, localização da CMM e fontes de calor [46]. O ideal é que a máquina seja mantida sob as mesmas condições de sua calibração (estas condições deverão estar descritas no certificado de calibração), para garantir uma maior confiabilidade dos resultados das medições.

Em relação à peça, suas características macro (desvios dimensionais, de forma e posição) e micro geométricas (rugosidade) são os principais fatores que a tornam uma fonte de incerteza, além de aspectos como rigidez, dureza e condutibilidade térmica da peça.

Os desvios de forma da peça podem ocasionar uma considerável contribuição na incerteza de medição, especialmente se o número de pontos medidos é reduzido, ou se os mesmos encontram-se concentrados numa pequena área da superfície (seja por uma estratégia de medição inadequada ou devido a dificuldades de acesso impostas pela própria peça) [38-39].

O operador influencia a medição de várias formas, na medida em que é o responsável pela fixação e posicionamento da peça, 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 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.

A forma de fixação da peça na CMM é uma fonte de incerteza de medição devida a deformações ocasionadas pela força de fixação ou pelo peso próprio da peça.

Diante das influências do operador, juntamente com a estratégia de medição, torna-se essencial à adoção de metodologias e procedimentos que estabeleçam critérios que minimizem as influências das principais fontes de incerteza presentes nas operações de medição e calibração realizadas em

CMMs [48].

4.3 Análise da Aplicabilidade de CMMs para a Medição e Calibração de Peças Padrão com Geometrias Complexas

Frente às vantagens proporcionadas pela utilização da tecnologia da medição por coordenadas, a sua utilização na medição/calibração de peças padrão com geometrias complexas ocorrerá para suprir carências dos métodos clássicos de medição/calibração, como velocidade, exatidão, nível de automação, informatização, flexibilidade e universalidade. Além do que, as CMMs de referência possuem níveis de incertezas que permitem a sua utilização em operações de calibração de padrões e instrumentos de medição [49].

4.3.1 Máquinas de Medir por Coordenadas de Referência

As CMMs de referência são máquinas com baixo nível de incerteza de medição, conseguida através de sua ótima exatidão e da contínua minimização das influências das suas principais fontes de incertezas presentes nas operações de medição e calibração.

As principais medidas adotadas para minimizar as influências das fontes de incerteza e garantir a estabilidade das medições são:

- Adequada instalação da máquina em seu ambiente de operação;
- Controle eficiente das condições ambientais do local de instalação da máquina (controle de temperatura, vibração e poeira) [46][50];
- Treinamento do operador;
- Implantação e implementação de um sistema da garantia da qualidade [17];
- Realização de calibrações periódicas.

A figura 4.4 apresenta um laboratório de referência (Laboratório de Medição por Coordenadas da Fundação CERTI [51]) onde uma CMM de alta exatidão está instalada em um ambiente sob rigoroso controle das condições ambientais. Sob essas condições, a CMM possui uma incerteza de medição a partir de $\pm 0,8 \mu\text{m}$.



Figura 4.4 - Máquina de medir por coordenadas de referência do Laboratório de Medição por Coordenadas da Fundação CERTI

A implementação de um sistema de garantia da qualidade irá estabelecer o uso de procedimentos de medição/calibração, bem como a normalização das atividades laboratoriais que possam influenciar a qualidade das operações laboratoriais.

4.3.2 A Rastreabilidade das Medições em CMMs de Referência

A cadeia de rastreabilidade da CMM irá depender do seu tipo (CMM tipo coluna, horizontal, portal ou ponte) e dos padrões de transferência utilizados [4]. A figura 4.4 apresenta um exemplo de uma cadeia de rastreabilidade de uma CMM de referência.

Os principais padrões de transferência utilizados na calibração de CMMs estão visualizados na figura 4.6. O objetivo da utilização destes padrões é oferecer rastreabilidade às medições e, dependendo do tipo do mesmo, possibilitar a aplicação de uma metodologia para a determinação das componentes de erros da CMM e sua compensação por software (CAA – *Computer Aided Accuracy*) [52-53].

Os padrões corporificados convencionais utilizados na calibração de CMMs possuem geometrias simples e verificam a incerteza da medição de características lineares ou semelhantes às características geométricas do padrão. Sendo assim, a especificação da incerteza da máquina ao medir geometrias complexas, poderá não ser realista. A utilização do método CMM Virtual ou a

realização de medições por comparação, são formas de se estabelecer coerentemente a incerteza da medição de geometrias complexas através do uso dos padrões convencionais.

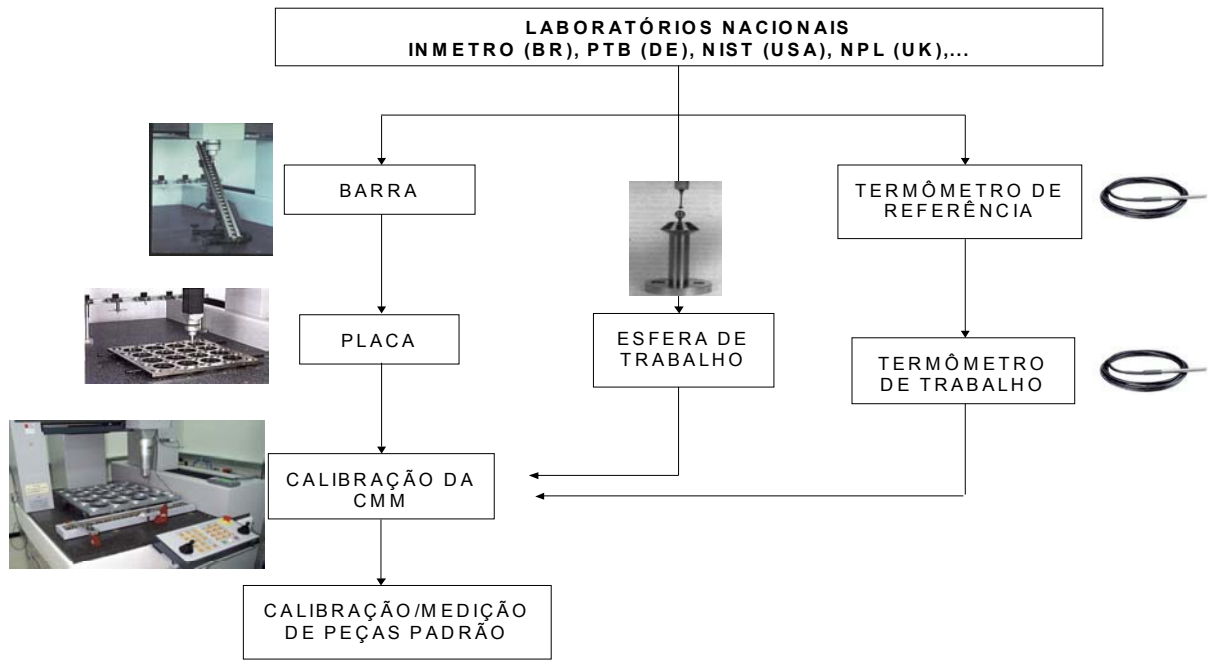


Figura 4.5 - Exemplo de uma cadeia de rastreabilidade de uma CMM de referência [52]



Figura 4.6 - Principais padrões utilizados na calibração de CMMs [53][4].

4.3.3 Aspectos da Aplicabilidade das CMMs na calibração de peças padrão

Classicamente, as CMMs têm sido utilizadas para o controle de peças com geometrias complexas, como pode ser visto na figura 4.7. O desafio que se coloca agora é desenvolver e validar estratégias que possibilitem o emprego de CMMs para a calibração de peças padrão. Esse desafio é dificultado tanto pela precisão dimensional como pela complexidade geométrica das peças padrão.



Figura 4.7 - Medição de peças com geometrias complexas em CMMs.

Os erros impostos pela complexidade geométrica da peça são evidenciados numa recente pesquisa realizada pelo Professor Álvaro Abackerli [54], na qual foi realizada uma intercomparação laboratorial que se baseia na circulação e na medição de uma peça padrão, a partir da qual suas características são avaliadas em bases comparativas e um diagnóstico sobre resultados, equipamentos instalados, recursos humanos disponíveis e estratégias de medição é elaborado. A figura 4.8 ilustra a medição da peça padrão.

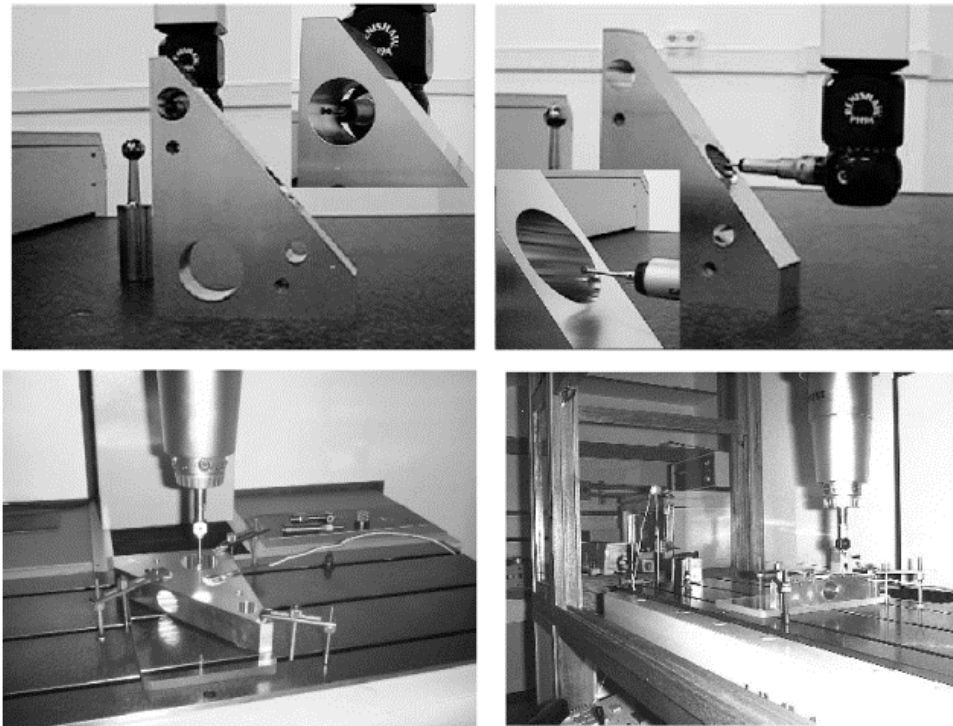


Figura 4.8 - Ilustrações da medição da peça padrão

A peça padrão utilizada nesta intercomparação laboratorial envolve diferentes tipos de medições: dimensões de elementos geométricos; posições; ângulos; distâncias; e erros de forma (figura 4.9).

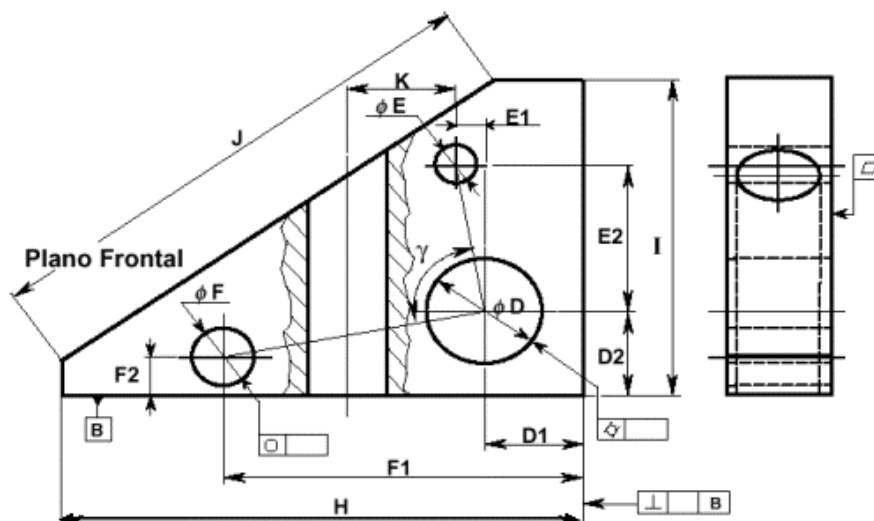


Figura 4.9 - Cotas da peça padrão

A definição dos valores de referência das características da peça padrão, com os quais os resultados dos participantes foram comparados, foi realizada através da calibração da mesma no

laboratório INMETRO/DIMCI/DIMEC². Os resultados mostram que para cotas simples (por exemplo o diâmetro ϕD , as cotas D1 e D2) a diferença em relação aos valores de referência são pequenas e à proporção que ocorre um aumento na complexidade envolvida na medição das cotas (por exemplo as cotas J e K, e o ângulo γ), acompanha-se um aumento significativo do erro de medição em relação aos valores de referência, o que demonstra que para todas as atividades que fazem uso de peças padrão, além de se requer um nível de incerteza bastante baixo, a exploração das vantagens das CMMs não será possível sem uma rigorosa metodologia de medição/calibração e uma criteriosa aplicação e validação experimental.

Neste trabalho essa questão foi abordada dos pontos de vista teórico e prático. No capítulo 5 está descrita uma metodologia para a medição/calibração de peças padrão com geometrias complexas e nos capítulos 6 e 7 descrevem os resultados em casos práticos da aplicação desta metodologia.

² Instituto Nacional de Normalização Metrologia e Qualidade Industrial, Diretoria de Metrologia Científica e Industrial, Divisão de Metrologia Mecânica.

Capítulo 5

Proposição de uma Metodologia para Medição/Calibração de Peças Padrão com Geometrias Complexas em Máquinas de Medir por Coordenadas

A necessidade da simultaneidade na realização do projeto de uma peça e do planejamento do seu processo de fabricação e inspeção, a chamada engenharia simultânea, como forma de melhorar a qualidade dos produtos e a diminuição dos tempos e custos para lançá-lo no mercado é algo fundamental [12]. O sucesso no emprego de peças padrão também dependerá de sua inserção dentro deste contexto, isto é, uma análise criteriosa do seu projeto, processo de fabricação e do processo de inspeção utilizado na produção, irá determinar os objetivos da sua utilização e seus requisitos metrológicos, como forma de assegurar uma maior confiabilidade em sua utilização.

Em qualquer medição, os procedimentos empregados são determinantes para a confiabilidade dos resultados. Particularmente na medição por coordenadas, o estabelecimento de procedimentos de medição eficientes é um desafio bem maior do que nas medições convencionais, devido à complexidade das operações de medição [46]. Juntado-se esta complexidade inerente à medição por coordenadas com a complexidade imposta pelas peças padrão com geometrias complexas, o estabelecimento de procedimentos de medição eficientes, que venham minimizar as influências das fontes de incerteza de medição, principalmente as oriundas do operador juntamente com a estratégia de medição, é um desafio e necessidade na

medição e calibração de peças padrão utilizando-se máquinas de medir por coordenadas.

O emprego de metodologias/procedimentos de medição simples e flexíveis diminuem as influências das principais fontes de incerteza, assegurando a confiabilidade dos resultados de medição, bem como a diminuição dos tempos gastos durante o planejamento da medição, contribuindo para a diminuição dos custos envolvidos na calibração/medição das peças padrão.

5.1 Objetivos Gerais da Metodologia

Os principais objetivos e a importância da utilização de uma metodologia para a calibração de peças padrão utilizando-se CMMs de referência são:

- Orientar e sistematizar as atividades laboratoriais necessárias para a eficiente realização dos serviços de medição/calibração;
- Focalizar na importância e necessidade do planejamento de medições/calibrações;
- Minimizar as influências das principais fontes de incerteza para aumentar a confiabilidade metrológica;
- Reduzir a complexidade, os tempos e os custos envolvidos neste tipo de medição/calibração;

Como o universo de peças padrão com geometrias complexas é muito vasto, certamente não existirão procedimentos únicos que auxiliem na medição/calibração das mesmas, sendo assim, torna-se necessário à criação de uma metodologia universal que sistematize de forma eficiente às questões mais importantes envolvidas nesta tarefa.

5.2 Metodologia Proposta

A metodologia proposta possui módulos que auxiliarão na abordagem e solução de questões relacionadas com a medição/calibração de peças padrão com geometrias complexas. A figura 5.1 apresenta os módulos da metodologia.

Por se tratar de uma calibração em CMMs de referência, ficará implícito que já existe, por parte do laboratório, uma grande preocupação com as questões relacionadas com as incertezas

provenientes do ambiente de instalação da máquina. De qualquer forma, atividades de estabilização térmica e compensação dos erros relacionados com a temperatura da peça e da máquina deverão ser realizadas para diminuir as incertezas das medições/calibrações.

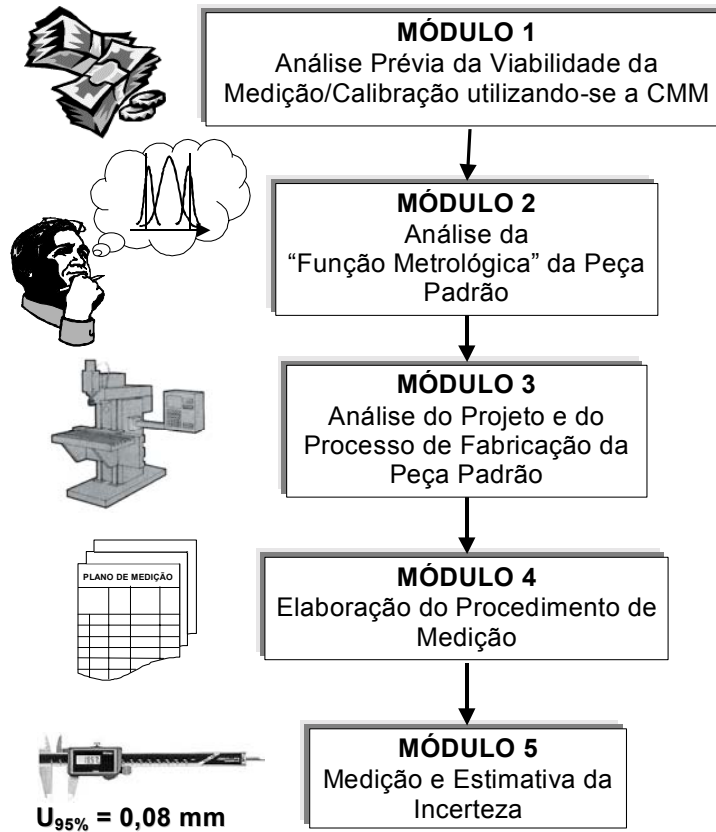


Figura 5.1 - Apresentação dos módulos que caracterizam a metodologia

5.3 *Módulo Análise Prévia da Viabilidade da Medição/Calibração de Peças Padrão Utilizando-se uma Máquina de Medir por Coordenadas.*

O principal aspecto que deverá ser observado neste módulo é a relação entre a incerteza de medição da CMM e as tolerâncias geométricas da peça padrão. Como já discutido na Seção 2.3, o valor desta relação irá depender de fatores como a importância das características sendo medidas, do conhecimento das fontes de incerteza do processo de medição, bem como da capacidade do processo de fabricação.

Deverá ser realizada uma avaliação dos recursos da CMM (recursos de software, periféricos,

dispositivos de fixação) em relação às solicitações da medição, bem como a análise da viabilidade econômica e o tempo gasto durante todas as etapas da medição (módulo 1 ao módulo 5).

O requerimento da capacitação dos recursos humanos envolvidos no processo de medição aumenta com o crescimento da complexidade da tarefa de medição, gerando um comprometimento por parte do operador não só com os aspectos operacionais do sistema de medição, mas principalmente com os aspectos metrológicos envolvidos na medição/calibração.

5.4 Módulo *Análise da “Função Metrológica” da Peça Padrão*

A análise dos aspectos da “função metrológica” da peça padrão sugere uma avaliação criteriosa do objetivo da sua utilização (calibração, verificação ou zeragem de sistema de medição), para que se possa estabelecer a incerteza alvo da medição/calibração, bem como estabelecer a estratégia de medição a ser utilizada. A figura 5.2 apresenta a relação entre a estratégia de medição a ser utilizada com o objetivo da utilização da peça padrão.

OBJETIVO DA UTILIZAÇÃO DA PEÇA PADRÃO	ESTRATÉGIA DE MEDIÇÃO A SER UTILIZADA
Calibração dos Sistemas de Medição	Idêntica à utilizada na inspeção
Zeragem de Sistemas de Medição ou Dispositivos de Controle	Idêntica à utilizada na inspeção
Verificação da Estabilidade de Processos de Medição	Não será obrigatório que a estratégia de medição seja idêntica à utilizada na inspeção. Contudo, a estratégia utilizada durante a verificação da estabilidade deverá ser a mesma tanto na calibração quanto na inspeção
Medição por Comparação	Mesma estratégia de medição

Figura 5.2 - Relação entre a estratégia de medição a ser utilizada com o objetivo da utilização da peça padrão.

5.5 Módulo *Análise do Projeto e Processo de Fabricação da Peça Padrão*

O projeto consegue, através da fixação dos sistemas de referência e das especificações de tolerâncias, estabelecer os requisitos funcionais da peça [55-56].

É essencial utilizar como sistemas de referência para a medição da peça o sistema estabelecido no projeto da peça, que certamente também será utilizado no processo de fabricação [12], pois o

mesmo é estabelecido de forma a garantir a funcionalidade da peça.

Nesta etapa, o papel do metrologista será [55]:

- Entender os símbolos de tolerâncias geométricas e seus significados;
- Pleno conhecimento da funcionalidade da peça;
- Entender a variedade de medições necessárias;
- Respeitar o projeto no que se diz respeito ao estabelecimento de sistemas de referência da peça.

O conhecimento dos processos de fabricação utilizados e as possíveis influências dos mesmos sobre a peça (erros macro e micro geométricos) auxilia no estabelecimento da estratégia de medição, para que sua influência seja minimizada.

No caso de peças padrão normalizadas, deverá ser buscado em normas os requisitos e aspectos que definem os critérios de medição/calibração, podendo ser dado como exemplo o requisito da medição dos parâmetros das engrenagens como o batimento radial, passo, espessura dos dentes e linha de flanco em relação ao diâmetro primitivo da mesma, o que irá fixar o valor do diâmetro do apalpador ao módulo da engrenagem.

5.6 Módulo *Elaboração do Procedimento de Medição*

Um procedimento de medição/calibração tem como objetivos principais sistematizar as ações laboratoriais para minimizar as influências das fontes de incerteza, reduzir a complexidade envolvida na calibração, bem como reduzir os tempos e custos envolvidos nestas operações. As etapas como identificação da peça, limpeza e estabilização térmica deverão ser realizadas como estabelecidas no manual de qualidade do laboratório. As principais etapas de um procedimento de medição estão visualizadas na figura 5.3.

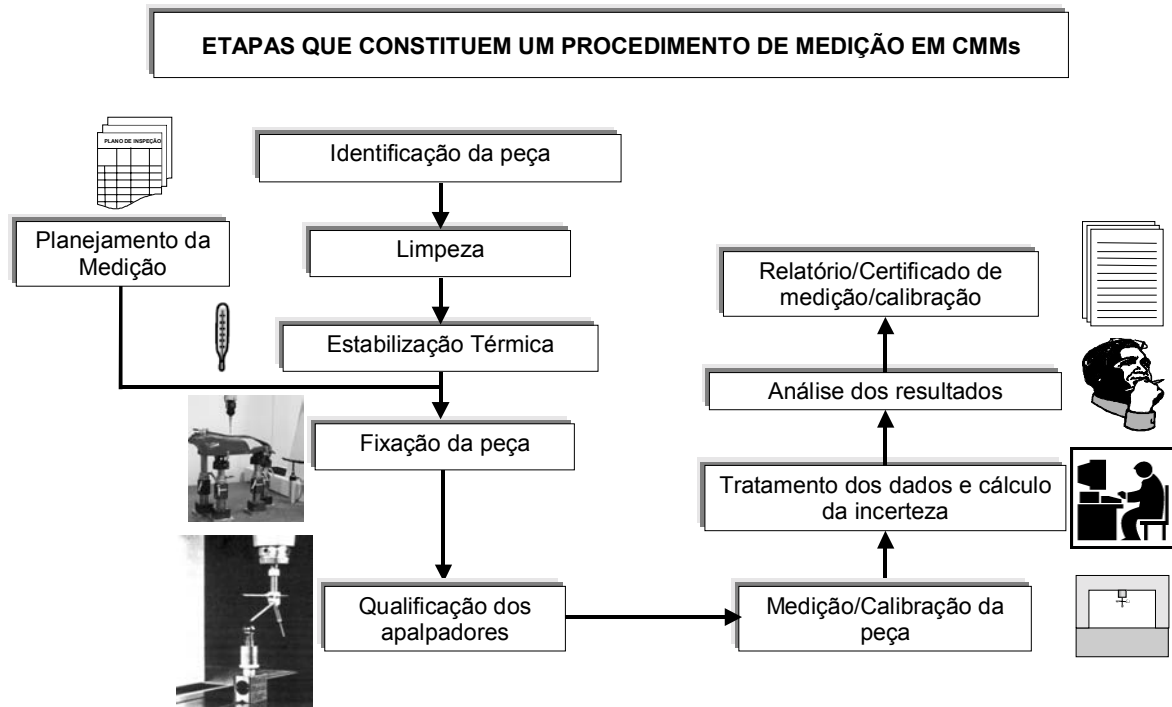


Figura 5.3 - Principais etapas que constituem um procedimento de medição/calibração em CMMs

5.6.1 Planejamento da Medição

O planejamento da medição é a etapa do processo de medição/calibração de peças padrão que consome mais tempo, e também é o grande responsável pelo sucesso da medição/calibração, pois são varias as tarefas envolvidas em uma medição utilizando-se uma CMM (figura 5.4).

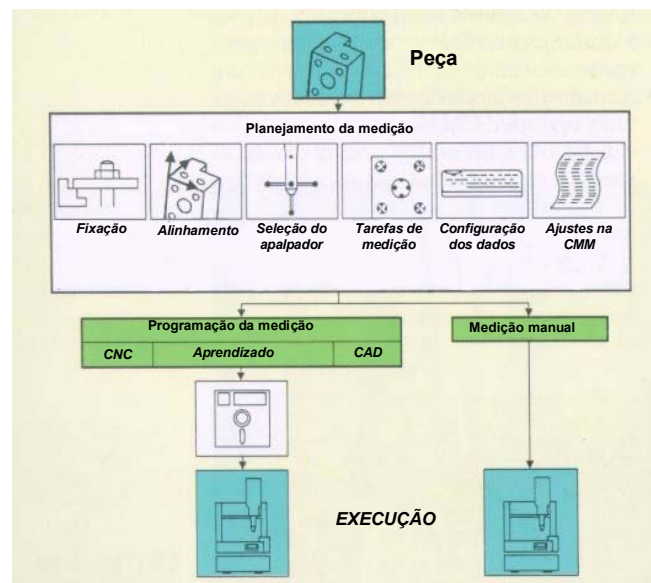


Figura 5.4 - Esquema das atividades a serem realizadas em uma medição em CMMs [39]

Todas as atividades do processo de medição são planejadas em função de vários aspectos. Os principais aspectos que deverão ser considerados em cada etapa do processo de medição em CMMs estão visualizadas na figura 5.5.

Algumas atividades realizadas durante a medição (fixação da peça, escolha do local no volume da CMM, definição do sistema de referência da peça, etc.) podem ser responsáveis por um aumento na incerteza da medição. A figura 5.6 apresenta as principais origens dos erros em algumas atividades do processo de medição e também são apresentadas na figura 5.7 recomendações para minimizar a incerteza da medição.

TAREFAS	ASPECTOS A SEREM OBSERVADOS								
	Acesso às características da peça	Características geométricas	Características macro e micro geométricas da peça	Software de medição	Material da peça (dureza, massa e rigidez)	Projeto da peça	Incerteza da CMM	Nível de Incerteza desejado	Tempo de medição/calibração
Fixação da peça	X				X				X
Configuração do apalpador	X	X							
Diâmetro da esfera de apalpação	X	X	X						
Uso de acessórios	X	X							
Força e velocidade de apalpação					X			X	X
Estratégia de medição		X	X	X				X	X
Definição do sistema de coordenadas da peça						X			
Escolha do local no volume da medição da CMM							X	X	

Figuras 5.5 - Aspectos que deverão ser observados no planejamento de cada tarefa a ser realizada em medições utilizando-se CMMs.

TAREFAS	ORIGENS DOS ERROS
Análise do Projeto da Peça	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Erros na interpretação do desenho da peça ▪ Entendimento incorreto ou incompleto da tarefa de medição ▪ Definição de referências incorretas no alinhamento da peça.
Qualificação dos Sensores de Medição	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Velocidade de apalpação excessiva; ▪ Tomadas de pontos em direção oblíqua à superfície da esfera; ▪ Número e distribuição dos pontos inadequados; ▪ Sujeira no apalpador ou esfera padrão.
Posicionamento da Peça na Máquina	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Sistema de referência da peça desalinhado aos eixos da máquina; ▪ Longe da posição em que o eixo da máquina foi calibrado;
Controle Ambiental	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Proximidade ou contato do operador/fontes de calor com a peça; ▪ Relaxamento do controle ambiental; ▪ Incompleta estabilização térmica da peça.
Fixação da Peça	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Peças movimentando-se durante a medição; ▪ Deformação da peça por esforços excessivos ou posição inadequada.
Escolha dos Recursos de Medição	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Escolha de um recurso inadequado para a medição pretendida (principalmente os recursos de software); ▪ Erros na interpretação dos resultados.
Estratégia de Apalpação	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Desconsideração da presença de erros de forma na peça durante a medição e/ou no alinhamento do sistema de coordenadas da peça; ▪ Tomada de pontos em locais inadequados da peça; ▪ Escolha inadequada do sensor; ▪ Escolha inadequada no número de pontos a serem tomados; ▪ Posicionamento inadequado do apalpador.

Figura 5.6 - Principais origens dos erros em algumas atividades do processo de medição

TAREFAS	RECOMENDAÇÕES
Fixação da peça	<ul style="list-style-type: none"> ▪ A fixação deverá garantir que a peça não se mova durante a medição devido à força de apalpação; ▪ O acesso às características a serem medidas seja feito preferencialmente em um único "setup"; ▪ Sistema de coordenadas da peça alinhado aos eixos da máquina.
Força e Velocidade de medição	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mesma utilizada no processo de qualificação do apalpador; ▪ Deverão ser evitadas deformações na peça conseqüente da elevada força de medição.
Escolha do Local no Volume da CMM	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Peça próxima as escalas da máquina em CMMs sem CAA; ▪ Local com menor incerteza de medição; ▪ Uso do método CMM Virtual para estabelecer o local no volume da máquina que apresentarão os menores níveis de incerteza para a tarefa de medição a ser realizada.

Figura 5.7 - Recomendações para minimizar a incerteza de medição.

5.6.2 Estratégia de Medição

Sendo a definição da estratégia de medição dependente da qualificação dos recursos humanos

envolvidos, reforça-se a necessidade de capacitação dos mesmos [46]. A estratégia de medição é a definição do número e distribuição dos pontos, o uso de filtros e métodos de avaliação envolvidos na medição de uma determinada característica de uma peça.

O princípio da medição por coordenadas consiste na localização de pontos na superfície da peça em relação ao sistema de coordenadas da máquina. Estes pontos necessitam ser analisados para criar um modelo geométrico da característica medida, usualmente chamado de “substitute geometry” [57]. Este modelo geométrico criado será comparado com as especificações do projeto.

Independente do sistema de medição utilizado, os erros de forma da peça poderão gerar diferenças significativas em resultados de medições, quando usadas diferentes estratégias de apalpação (aqui definido como sendo o número e distribuição dos pontos sobre a característica a ser medida) e/ou diferentes algoritmos de ajuste. A figura 5.8 visualiza a influência da estratégia de apalpação sobre uma característica contendo erros de forma.

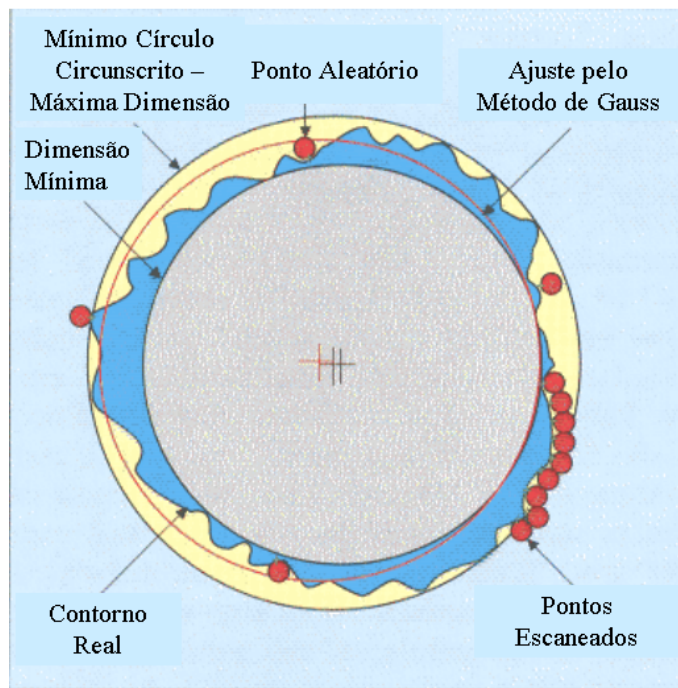


Figura 5.8 - Visualização da influência da estratégia de apalpação em características contendo erros de forma.

A incerteza dos resultados na medição de características com erros de forma diminuem com o aumento do número de pontos medidos. Porém, o tempo requerido para a medição também

aumenta, tendo como consequência um maior custo da medição [57-63].

O número e a distribuição dos pontos sobre a característica deverão ser definidos de tal maneira que as zonas da superfície que são significativas para o critério de avaliação sejam medidas com a mais baixa possibilidade de perdas de informações [60].

O conhecimento dos erros de forma característicos do processo de fabricação da peça a ser medida ajudará a estabelecer um número ótimo de pontos que deverão ser tomados sobre a superfície, e realizar um balanço entre a necessidade de informações confiáveis e considerações econômicas [60].

Além dos erros de forma da peça a se medida, a “Substitute Geometry” poderá ser influenciada por fatores como:

- Erros sistemáticos e aleatórios da CMM;
- Erros de apalpação (erro na direção de compensação do raio, escorregamento do apalpador) e erros característicos do sistema de apalpação;
- Acabamento superficial;
- Exatidão e robustez do algoritmo do software de medição.

Alternativas como a tomada de pontos uniformemente distribuídos sobre a característica a ser medida, os métodos da medição por comparação e por rebatimento poderão ser utilizados para minimizar as influências da estratégia de medição.

5.7 Módulo *Medição e Estimativa da Incerteza*

O procedimento de medição, definido durante a fase de planejamento da medição, deverá ser respeitado integralmente, pois o mesmo foi elaborado de acordo com questões funcionais da peça, bem como objetivando a minimização das principais fontes de incerteza e otimização do tempo de medição.

Só deverá ser iniciada a medição se existir uma comprovação de que as condições ambientais (como temperatura, umidade, poeira e vibração) encontram-se estáveis e dentro dos limites especificados.

As principais fontes de incerteza deverão ser levantadas e quantificada a influência de tais fontes sobre o resultado da medição. A atribuição dos valores da contribuição das fontes de incerteza deverá ser realizada de forma criteriosa para que se tenha uma incerteza de medição realista. Ensaio, medições e ou calibrações poderão ser realizadas para auxiliar na tarefa de quantização da influência das fontes de incerteza no resultado de medição. A figura 5.9 apresenta as principais fontes de incerteza presentes no cálculo de incerteza de medições/calibrações realizadas em CMMs [64-67].

FONTES DE INCERTEZA
Repetitividade
Resolução
Incerteza da Máquina
Incerteza de Medição da Temperatura da Peça
Incerteza de Medição da Temperatura da Máquina
Incerteza Relativa ao Coeficiente de Expansão Térmica da Máquina (CMM)
Incerteza Relativa ao Coeficiente de Expansão Térmica da Peça
Variação de Temperatura Durante a Medição
Incerteza de Fixação da Peça
Incerteza do Padrão ³
Incerteza de Fixação do Padrão
Flutuação do Zero

Figura 5.9 - Principais fontes de incerteza presentes no cálculo de incerteza de medições/ calibrações em Máquinas de Medir por Coordenadas

O capítulo 6 irá apresentar os resultados de vários experimentos que foram realizados com o objetivo de validar a metodologia de calibração/medição de peças padrão com geometrias complexas proposta por este trabalho, bem como avaliar a tecnologia da medição por coordenadas em relação às técnicas de medição convencionais utilizadas na medição de peças padrão normalizadas.

³Quando realizadas medições pelo método da substituição

Capítulo 6

Aplicação e Avaliação Experimental da Medição por Coordenadas na Medição e Calibração de Peças Padrão

Este capítulo apresenta no item 6.1 os experimentos que foram realizados com o objetivo de validar a metodologia proposta no capítulo 5, para analisar a viabilidade da tecnologia da medição por coordenadas para a calibração de peças padrão e medição de peças com geometrias complexas. Complementarmente, no item 6.2, serão apresentados os experimentos destinados à avaliação do desempenho metrológico das máquinas de medir por coordenadas em relação aos sistemas universais de medição de engrenagens.

6.1 Análise Experimental da Tecnologia da Medição por Coordenadas como Padrão na Calibração de Peças Padrão

Foram realizados dois experimentos com o objetivo de avaliar técnica e economicamente o uso da tecnologia da medição por coordenadas na calibração de peças padrão. Os dois experimentos foram escolhidos de forma a retratar as verdadeiras dificuldades encontradas na calibração de peças padrão e avaliar as potencialidades do uso das CMMs na realização destas tarefas de calibração.

6.1.1 Calibração de Tampa-mancal de Motor Elétrico para Avaliação do Processo de Medição

Neste experimento buscou-se uma peça caracterizada por uma média diversidade e complexidade de características geométricas a serem controladas, evidenciando a necessidade de um sistema flexível e informatizado para agilizar as operações de calibração de tais peças. A peça escolhida foi a tampa de um motor elétrico, que tem como principal objetivo fixar o rolamento que servirá como mancal ao eixo do rotor (figura 6.1).



Figura 6.1 - Peça escolhida para ser transformada em uma peça padrão

O projeto da peça define as suas superfícies de referência, bem como suas tolerâncias dimensionais e geométricas, de forma a garantir a funcionalidade e intercambialidade da mesma. A figura 6.2 apresenta as cotas que serão calibradas na peça padrão, onde percebe-se a presença de tolerâncias dimensionais e de várias tolerâncias de forma e posição.

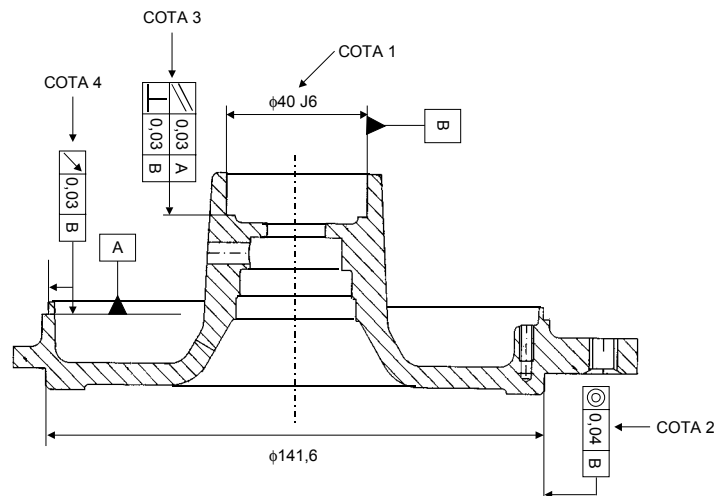


Figura 6.2 - Apresentação das cotas da peça padrão que serão calibradas

Este experimento teve como principal objetivo avaliar a adequabilidade das CMMs para calibração de peças padrão com geometrias complexas. As principais atividades que constituíram este experimento foram:

- Avaliação criteriosa do projeto e das possíveis influências dos processos de fabricação sobre as características macro e micro geométricas da peça. Sendo escolhidas quatro cotas que representassem as principais tarefas e dificuldades de medição (cotas já apresentadas na figura 6.2);
- Criação de um procedimento de medição que minimizasse as influências das principais fontes de incerteza, tendo o cuidado de respeitar o projeto da peça, no que se diz respeito aos seus sistemas de referência, e estabelecer uma estratégia de medição de acordo com a funcionalidade da peça, sendo as especificações de tolerâncias também uma base para a definição desta estratégia;
- Calibração da peça padrão em uma máquina de medir por coordenadas de referência (Zeiss ZMC 550 do Laboratório de Medição por coordenadas da Fundação CERTI) e uso desta peça padrão como padrão para levantamento dos erros cometidos por uma CMM de produção, na medição dos parâmetros calibrados da peça padrão. A figura 6.3 ilustra a medição da peça padrão na CMM de referência e na máquina a calibrar (CMM LK G80-C), sendo apresentada na figura 6.4 uma esquematização do experimento.

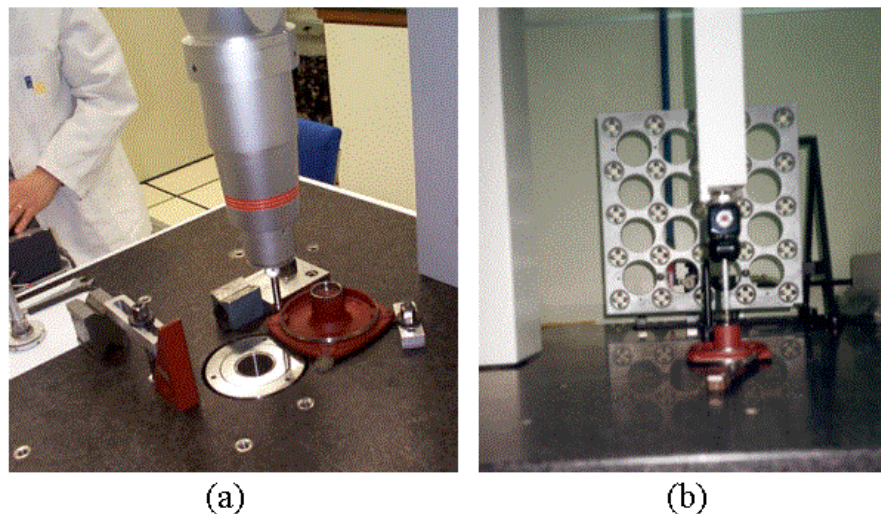


Figura 6.3 - Ilustração das medições da peça padrão: (a) Medição na CMM Zeiss ZMC 550; (b) CMM LK;

Como forma de minimizar as influências dos erros macro e micro geométricos e influências do operador nos resultados das medições, foi utilizada a mesma estratégia de medição (número de pontos medidos e sua localização sobre a característica, força e velocidade de apalpação e diâmetro dos apalpadores) tanto na calibração da peça padrão quanto em sua medição na CMM LK.

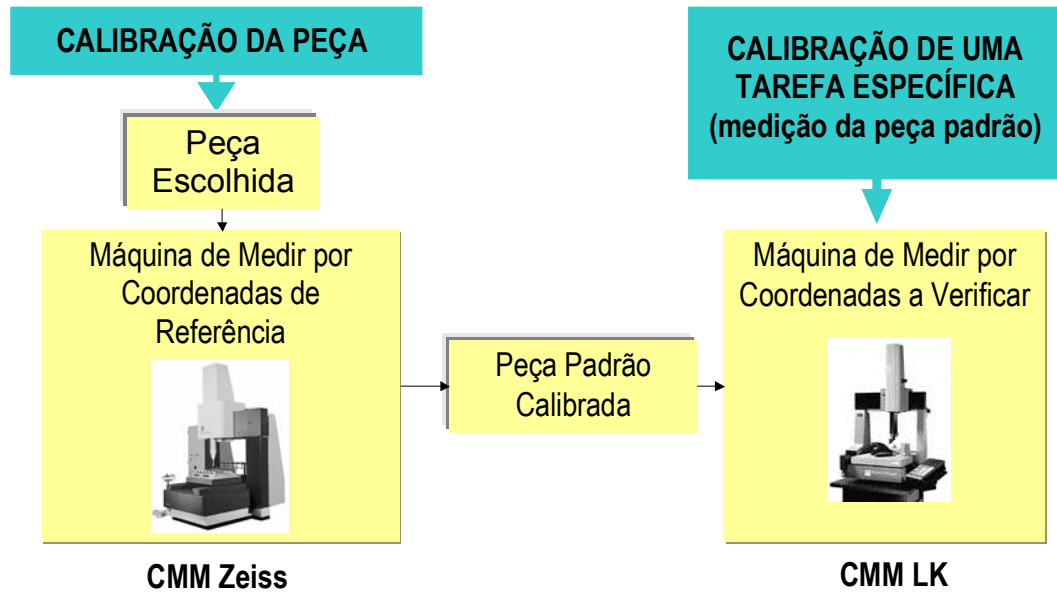


Figura 6.4 - Diagrama esquemático do experimento

Seguindo a metodologia proposta, os experimentos foram realizados e a partir dos resultados obtidos foram estimadas as incertezas. A tabela 6.1 apresenta o balanço de incerteza da calibração de uma das cotas da peça padrão, sendo também apresentado o balanço de incerteza de medição desta mesma cota pela CMM LK na tabela 6.2, como forma de visualizar as principais fontes de incerteza consideradas relevantes na avaliação da incerteza da calibração/medição da peça padrão neste experimento.

As principais fontes de incerteza constituíram na repetitividade das medições, na resolução da CMM, na incerteza gerada pela variação de temperatura laboratorial durante as medições e na incerteza relacionada à calibração da CMM de referência. A variação da temperatura do laboratório onde a CMM Zeiss encontra-se instalada foi de 0,3 °C e do laboratório da CMM LK foi de 1 °C. Considerando-se que esta variação na temperatura laboratorial irá influenciar mais fortemente a peça, pois as escalas da CMM encontram-se mais protegidas das variações térmicas

e está sujeita a correções realizadas pelo sistema de controle da própria máquina, poderemos considerar para efeito do cálculo da incerteza que o efeito de tal variação térmica estará concentrado sobre a peça. Outras fontes de incerteza como flutuação do zero, incerteza gerada pela má fixação da peça, incerteza relacionada com o coeficiente de dilatação térmica da peça e das escalas da máquina, bem como a incerteza proveniente do sistema de medição da temperatura laboratorial, não foram consideradas no balanço de incerteza devido suas influências serem nesse caso desprezíveis.

Tabela 6.1Balanço de incerteza da calibração da cota 1 da peça padrão

COMPONENTES DE INCERTEZA			DISTR. DE PROBABILIDADES		INCERTEZA PADRÃO (μm)	vi
Sím-bolo	FONTES	VALOR (μm)	TIPO	DIVISOR		
Re	Repetitividade (σ/\sqrt{n})	0,03	Normal	1	0,03	4
U_{CMM}	Máquina	1,37	Normal	2	0,69	49
$U_{\Delta T}$	Variação de Temperatura	0,14	Retangular	1,73	0,08	∞
U_R	Resolução da Máquina (R/2)	0,05	Retangular	1,73	0,03	∞
U_C	Incerteza padrão Combinada		Normal		0,7	52
$U_{95\%}$	Incerteza Expandida (95%)		Normal		1,4	

Tabela 6.2Balanço de incerteza da medição da cota 1 da peça padrão pela CMM LK

COMPONENTES DE INCERTEZA			DISTR. DE PROBABILIDADES		INCERTEZA PADRÃO (μm)	vi
Sím-bolo	FONTES	VALOR (μm)	TIPO	DIVISOR		
Re	Repetitividade (σ/\sqrt{n})	0,16	Normal	1	0,16	4
U_{PP}	Peça Padrão	1,42	Normal	2	0,71	49
$U_{\Delta T}$	Variação de Temperatura	0,46	Retangular	1,73	0,27	∞
U_R	Resolução da Máquina	0,05	Retangular	1,73	0,03	∞
U_C	Incerteza padrão Combinada		Normal		0,8	59
$U_{95\%}$	Incerteza Expandida (95%)		Normal		1,6	

A tabela 6.3 resume as incertezas calculadas para ambas as CMMs, em todas as cotas medidas. Através da análise destes resultados, podemos observar que a incerteza da peça padrão calibrada na CMM de referência fica na ordem de poucos micrometros, o que comprova a adequação da utilização das CMMs de referência na calibração de peças padrão. Além do pequeno valor da incerteza da calibração, a máquina apresentou um alto nível de repetitividade, flexibilidade e automação da medição, como também um menor tempo de calibração em relação aos tempos

gastos se utilizados métodos convencionais de calibração. Os tempos gastos em diversos *setups*, processamento dos resultados e circulação da peça por diversos sistemas/laboratórios de medição, são os responsáveis pelo elevado tempo gasto na calibração da peça padrão por métodos convencionais. A figura 6.5 apresenta o tempo gasto na calibração da peça padrão na CMM de referência e o tempo estimado de calibração da mesma por métodos convencionais. O custo de calibração de uma peça padrão em uma máquina de medir por coordenadas é calculado em função do tempo gasto nesta atividade (no laboratório de medição por coordenadas da Fundação CERTI é cobrado 28 US\$/h).

Tabela 6.3 - Apresentação dos resultados da calibração da peça padrão no SMP e medição da mesma no SMC

PARÂMETROS	RESULTADOS			
	CMM Zeiss	CMM LK		
	(RM \pm U _{95%}) mm	Tendência (mm)	U _{95%} (mm)	IT/U _{95%}
Cota 1 – Diâmetro	40,0056 \pm 0,0014	-0,0009	0,0016	10
Cota 2 - Concentricidade	0,03310 \pm 0,0022	-0,0083	0,0030	13,3
Cota 3 - Paralelismo	0,0082 \pm 0,0017	0,0028	0,0028	10,7
Cota 3 - Perpendicularidade	0,0170 \pm 0,0019	0,0000	0,0021	14,3
Cota 4 – Batimento Radial	0,0252 \pm 0,0026	-0,0038	0,0033	9,1
Cota 4 – Batimento Axial	0,0250 \pm 0,0024	-0,0012	0,0035	8,57

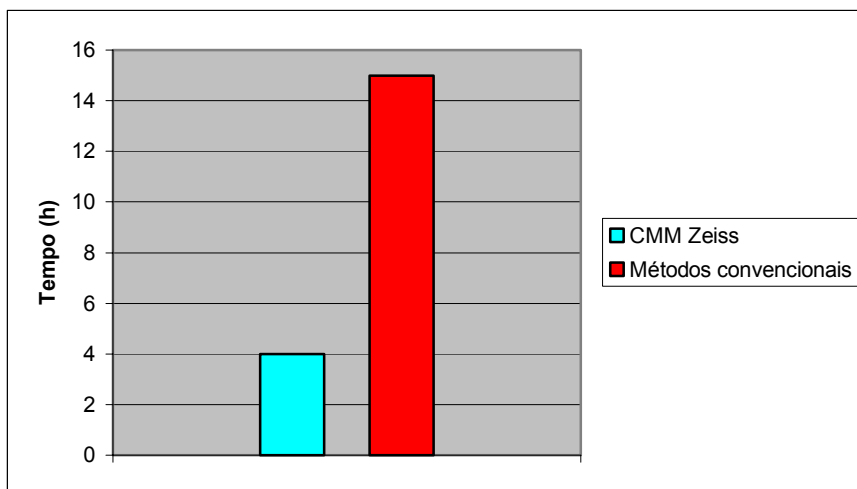


Figura 6.5 - Visualização dos tempos gastos na calibração da peça padrão pela tecnologia da medição por coordenadas e por métodos convencionais.

No caso particular desta peça, a menor relação entre o intervalo de tolerância e a incerteza de medição da característica medida ($IT/U_{95\%}$) foi de 8,57, que demonstra uma boa adequação dessa peça padrão para avaliar o sistema de medição e uma situação bastante confortável no controle metrológico de peças.

A utilização da peça padrão também possibilitou a comparação da incerteza de medição da CMM LK fornecida pelo método analítico de determinação da incerteza de medição em relação ao método experimental. O método analítico é aqui definido como sendo a forma de se estabelecer a incerteza de medição utilizando-se as equações (fornecidas pelo certificado de calibração da máquina) que estabelecem a incerteza de medição em função do comprimento medido, a tabela 6.4 apresenta estas equações para as CMMs utilizadas neste experimento. Sendo o método experimental definido como a incerteza fornecida através de medições pelo método da substituição, onde são utilizados padrões semelhantes às peças medidas. Esta abordagem torna-se necessária devido à grande utilização do método analítico na determinação da incerteza de medições realizadas por CMMs. Sendo este método responsável por problemas como a grande desuniformidade nos critérios para o estabelecimento da incerteza de medição não lineares como desvios de forma, concentricidade, batimentos, ângulos, etc. Além do que, estas incertezas são fornecidas em relação à média dos erros cometidos na calibração do padrão em diversas posições do volume de medição da CMM, o que poderá fornecer uma incerteza não realista em medições onde as fontes de incerteza provenientes dos erros geométricos da própria máquina são mínimas.

Tabela 6.4 - Equações das incertezas das máquinas de medir por coordenadas utilizadas neste experimento

SISTEMA DE MEDIÇÃO	INCERTEZA 1D	INCERTEZA 2D	INCERTEZA 3D
CMM Zeiss	$(1+L/400) \mu\text{m}^*$	$(1,25+L/325) \mu\text{m}$	$(1,5+L/250) \mu\text{m}$
CMM LK	$(2,5+L/90) \mu\text{m}$	$(3,25+L/86,5) \mu\text{m}$	$(4+L/83) \mu\text{m}$

Observação: O valor de entrada do "L" é em milímetros para todas as equações

A tabela 6.5 apresenta os valores encontrados para a incerteza de medição da peça padrão na CMM LK utilizando-se o método analítico e o método experimental sem e com a soma dos erros sistemáticos à incerteza. Podemos observar que a incerteza fornecida pelo método analítico é

relativamente maior que a incerteza fornecida pelo método experimental, demonstrando a importância da utilização de peças padrão ou padrões convencionais como ferramenta para se estabelecer uma incerteza de medição mais realista, diante da complexidade de utilização do método CMM VIRTUAL, que seria a outra opção da avaliação da incerteza de medição em máquinas de medir por coordenadas calibradas por métodos lineares de medição. A apresentação da incerteza de medição obtida pelo método experimental somada ao erro sistemático se deve por ser esta a prática utilizada em operações de medição do chão-de-fábrica.

A figura 6.6 apresenta para cada cota medida na peça padrão pela CMM LK, a parcela de sua tolerância consumida pela incerteza de medição estabelecidas pelo método analítico, pelo método experimental com e sem a adição dos erros sistemáticos. A análise de tal figura demonstra a importância do estabelecimento de critérios coerentes para a determinação da incerteza de medição, pois a mesma é responsável pelo decréscimo da região de aceitação da peça.

Tabela 6.5 Resultados da incerteza de medição da peça padrão pela CMM LK utilizando-se o método analítico, o método experimental e a incerteza sem correção dos erros sistemáticos

COTAS	INCERTEZA MÉTODO ANALÍTICO (μm)	INCERTEZA MÉTODO EXPERIMENTAL	
		Incerteza Corrigida (μm)	Incerteza não corrigida (Somando-se os erros sistemáticos) (μm)
Cota 1 – Diâmetro	3,9	1,6	2,5
Cota 2 - Concentricidade	6,1	3,0	11,3
Cota 3 – Paralelismo	5,0	2,8	5,6
Cota 3 - Perpendicularidade	4,7	2,1	2,1
Cota 4 – Batimento Radial	6,2	3,3	7,1
Cota 4 – Batimento Axial	6,3	3,5	4,7

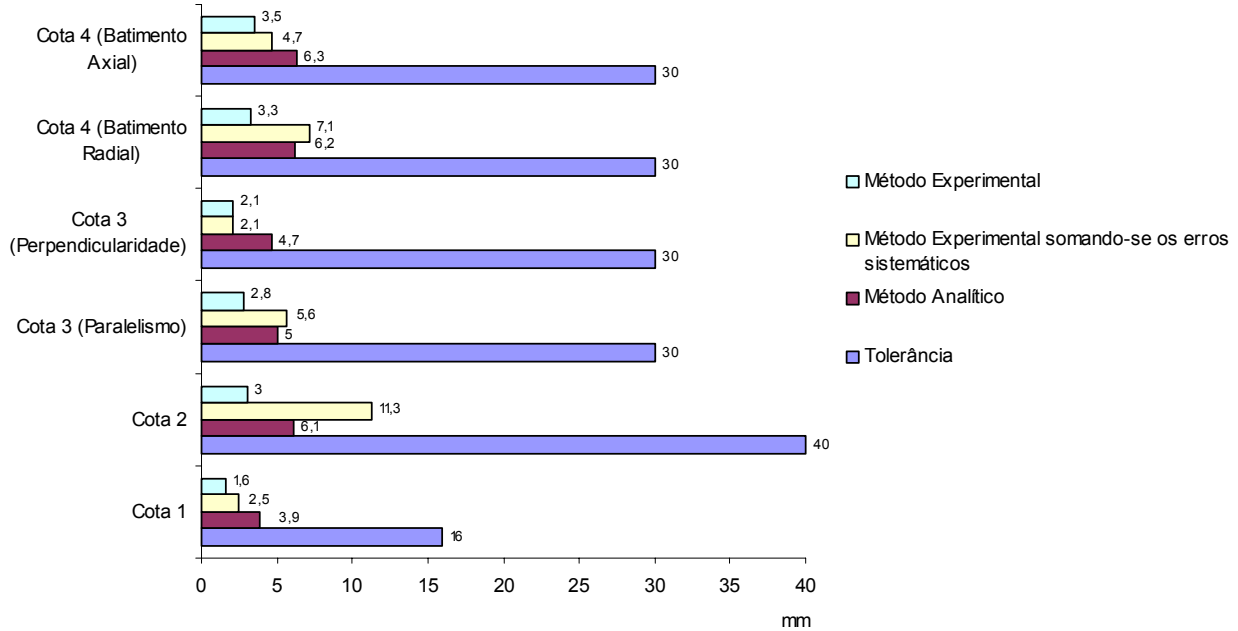


Figura 6.6 - Visualização da abrangência da incerteza de medição sobre o intervalo de tolerância pelos diversos métodos utilizados

A utilização da peça padrão calibrada em uma CMM de referência para verificação/calibração de sistemas de medição, mostrou-se extremamente eficiente, com boa compatibilidade dos resultados da calibração e medição da peça padrão, bem como da facilidade, flexibilidade, rapidez e custo da calibração.

Diante da maior facilidade de calibração da peça padrão, a mesma será uma ferramenta eficiente e vantajosa para a realização de periódicas verificações/calibrações de processos de medição, principalmente aqueles cuja calibração do sistema de medição é caracterizada por sua complexidade, elevados tempos e custos, resultando num elevado tempo decorrido entre calibrações. Logo, o uso de peças padrão proporcionará uma maior confiabilidade dos resultados das medições, evitando-se erros no processo de classificação de peças (peças boas reprovadas e/ou peças ruins aprovadas) e o envio de informações incorretas para realimentação dos processos de fabricação.

6.1.2 Calibração de uma Engrenagem Padrão para Avaliação do Processo de Medição

Este experimento surgiu da necessidade de uma empresa fabricante de engrenagens em

investigar a adequabilidade e capacidade do seu processo de medição de engrenagens, para o qual utiliza uma máquina de medir por coordenadas DEA MISTRAL como sistema de medição. Para estimar a capacidade do processo de medição de engrenagens, foi necessária a utilização de duas engrenagens padrão (figura 6.7), sendo estas, engrenagens retiradas da produção e calibradas em um sistema de medição de referência. Neste experimento o sistema de medição de referência utilizado também foi a CMM Zeiss ZMC 550 (ZMC – *Zahnradmesscenter* – Centro de Medição de Engrenagens) do Laboratório de Medição por Coordenadas da Fundação CERTI. Esta CMM possui características próprias e direcionadas para o controle de engrenagens. Como dispositivo auxiliar a CMM possui uma mesa rotativa e software de medição dedicada a medição de engrenagens. A figura 6.8 apresenta a medição nesta CMM.



Figura 6.7 - Engrenagens padrão utilizadas: (a) engrenagem acabada; (b) engrenagem bruta.

Antes de se estabelecer o procedimento de medição a ser utilizado na calibração das engrenagens padrão, foi observado de que forma era realizada a medição da engrenagem na CMM do chão-de-fábrica (observou-se o procedimento utilizado para definir o eixo de referência da peça, sua fixação na máquina, bem como o diâmetro do apalpador, a força e a velocidade de medição) como forma de minimizar as influências da estratégia de medição sobre os resultados, identificação de possíveis causas de erros e proposição de melhorias para o processo de medição.

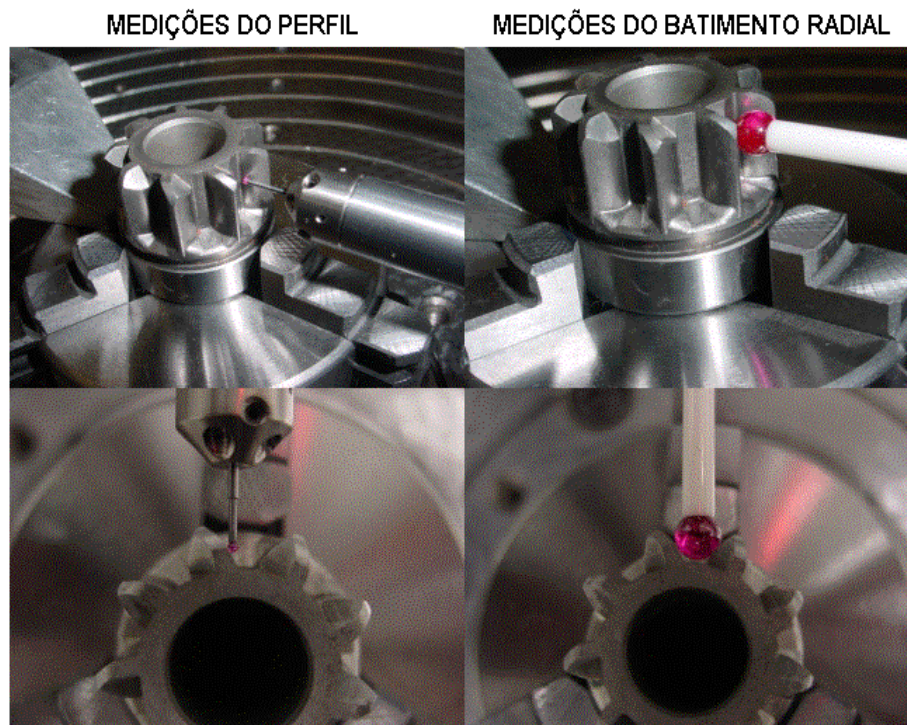


Figura 6.8 - Medição da engrenagem na CMM Zeiss ZMC 550 do Laboratório de Medição por Coordenadas da Fundação CERTI

A CMM Zeiss apresentou um excelente nível de repetitividade, flexibilidade e facilidade para a automação da medição. O preenchimento do software de medição de engrenagens foi a atividade que consumiu mais tempo na calibração, devido ao grande volume de informações a serem fornecidas relativas aos parâmetros da engrenagem e a forma de realização da medição, bem como a má qualidade da tradução do software. O custo da calibração das engrenagens padrão, assim como na peça padrão, é calculado com base no tempo gasto em todo processo de medição de engrenagens. Sendo que o tempo irá ser reduzido drasticamente, conseqüentemente o custo da medição será reduzido, caso seja necessário uma nova medição da mesma ou de uma engrenagem similar.

A tabela 6.6 apresenta as principais fontes de incerteza consideradas na calibração da engrenagem padrão. A maior incerteza na calibração da engrenagem padrão foi de $U_{95\%} = 4,6 \mu\text{m}$ na medição do perfil da engrenagem, fornecendo um valor para a relação entre o intervalo de tolerância e a incerteza de medição ($IT/U_{95\%}$) de 8,04, índice considerado satisfatório.

Tabela 6.6 - Balanço de incerteza da calibração de uma das engrenagens padrão na CMM de referência

COMPONENTES DE INCERTEZA			DISTR. DE PROBABILIDADES		INCERTEZA PADRÃO (μm)	vi
Sím-bolo	FONTES	VALOR (μm)	TIPO	DIVISOR		
Re	Repetitividade ($\sigma/n^{0,5}$)	1,63	Normal	1	1,63	4
U_{CMM}	Máquina	1,62	Normal	2	0,81	50
$U_{\Delta T}$	Variação de Temperatura	0,10	Retangular	1,73	0,06	∞
U_R	Resolução da Máquina (R/2)	0,05	Retangular	1,73	0,03	∞
U_C	Incerteza padrão Combinada		Normal		1,8	6
$U_{95\%}$	Incerteza Expandida (95%)		Normal		4,6	

A maior incerteza encontrada na medição da engrenagem padrão pela CMM do chão-de-fábrica foi de $U_{95\%} = 6,5 \mu\text{m}$ na medição da linha de flanco. As principais fontes de incerteza estão apresentadas na tabela 6.7.

Tabela 6.7 - Balanço de incerteza da medição de uma das engrenagens padrão na CMM do chão-de-fábrica

COMPONENTES DE INCERTEZA			DISTR. DE PROBABILIDADES		INCERTEZA PADRÃO (μm)	vi
Sím-bolo	FONTES	VALOR (μm)	TIPO	DIVISOR		
Re	Repetitividade ($\sigma/n^{0,5}$)	1,63	Normal	1	1,63	1
U_{PP}	Máquina	4,33	Normal	2	2,16	50
$U_{\Delta T}$	Variação de Temperatura	0,69	Retangular	1,73	0,40	∞
U_R	Resolução da Máquina	0,05	Retangular	1,73	0,03	∞
U_C	Incerteza padrão Combinada		Normal		2,7	8
$U_{95\%}$	Incerteza Expandida (95%)		Normal		6,5	

Com base nos resultados das medições das engrenagens foram calculados os índices de capacidade C_g e C_{gk} do processo de medição utilizado no chão-de-fábrica. A determinação destes índices para o processo de medição de engrenagens, fornece uma avaliação do desempenho do processo de medição em função dos limites de especificação da peça. O processo de medição é considerado capaz quando os índices C_g e C_{gk} são superiores a 1,33. A tabela 6.8 apresenta o intervalo de tolerância (IT), os maiores erros de medição, bem como os menores índices de capacidade encontrados na medição de cada parâmetro da engrenagem. Os erros foram determinados em relação aos resultados das medições no sistema de medição de referência.

Tabela 6.8 - Resultados da avaliação da capacidade do processo de medição utilizando-se as engrenagens padrão

ENGRENAGEM PADRÃO BRUTA			
PARÂMETROS	IT (μm)	Erro Máximo (μm)	C _{gk} Mínimo
Passo angular dos dentes	80	3	3,9
Batimento radial	80	4	3,4
Desvio de perfil	37	5	3,2
Desvio de linha de flanco	35	4	0,8
ENGRENAGEM PADRÃO ACABADA			
PARÂMETROS	IT (μm)	Erro Máximo (μm)	C _{gk} Mínimo
Passo angular dos dentes	80	2	3,4
Batimento radial	80	17	2,9
Desvio de perfil	37	7	1,8
Desvio de linha de flanco	35	5	1,8

A análise de tais resultados, bem como as observações realizadas durante a realização do experimento, fornecem as seguintes conclusões:

- O processo de inspeção apresentou seus índices de capacidade C_{gk} superiores a 1,33 em todas as medições, excetuando-se o desvio de linha de flanco na engrenagem bruta. Porém, após análise do gráfico desta medição (figura 6.9) observou-se à existência de um ponto medido fora da média, provavelmente causado por uma rebarba, sujeira no apalpador/peça, ou erro de apalpação, o qual levou todo o erro para um valor bem diferente do valor medido pela CMM de referência. Este é um problema freqüente na medição por coordenadas, o qual poder ser solucionado através da utilização de softwares de medição de engrenagens contendo filtros, o qual iria desconsiderar pontos relativamente afastados da região média dos pontos adquiridos. Outra solução seria a repetição da medição deste ponto, ou sua desconsideração durante o tratamento dos dados.

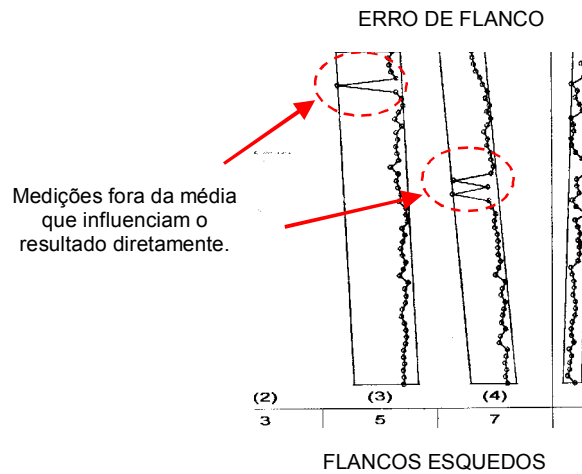


Figura 6.9 - Visualização dos pontos tomados fora da média

- A estratégia de medição é fundamental para garantir a confiabilidade dos resultados das medições. Um exemplo da influência da adoção de estratégias de medição inadequada é apresentado na figura 6.10. Nesta medição, a tomada de pontos sobre o eixo da engrenagem poderá estar sujeita ao escorregamento do apalpador sobre a superfície durante a medição dos pontos que irão gerar o eixo de referência da peça. Este erro na definição do eixo de referência, certamente irá influenciar os resultados da medição de parâmetros como a linha de flanco da engrenagem. Logo, a estratégia de medição deverá ser criteriosamente estabelecida, pois se corre o risco de atribuir a origem dos erros ao sistema de medição, incapacitando-o para a realização da tarefa de medição.

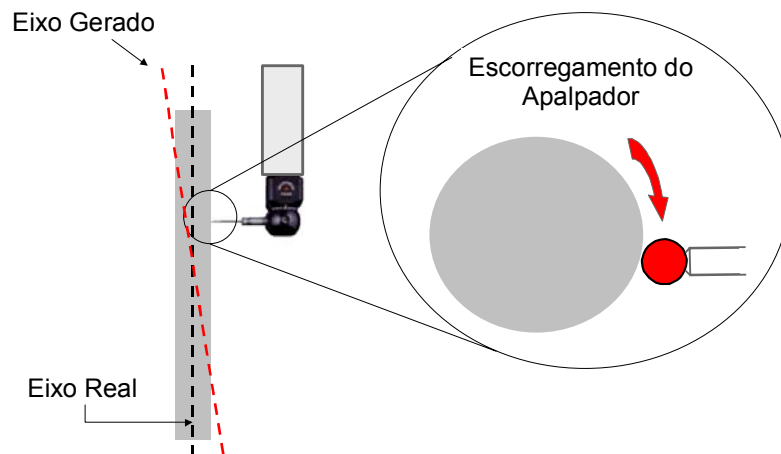


Figura 6.10 - Ilustração do erro causado pelo escorregamento do apalpador na aquisição de pontos que irão gerar o eixo de referência da peça

- É fortemente recomendável que as indústrias fabricantes de engrenagens, tenham engrenagens calibradas em máquinas de maior exatidão, que possam ser medidas periodicamente para verificar a capacidade da máquina ao longo do tempo. Vários problemas no processo de medição, com influência sobre a qualidade das peças, só foram detectados através da utilização desta peça padrão. Sem a utilização destas engrenagens padrão a única forma da indústria fabricante de engrenagem deste experimento ter uma noção e acompanhamento da capacidade do seu processo de medição de engrenagens seria através da utilização de padrões convencionais de calibração de sistemas de medição de engrenagens, caracterizados pelo seu alto custo de aquisição, manutenção e calibração.
- A existência de padrões convencionais de calibração de sistemas de medição de engrenagens no Laboratório de Medição por Coordenadas da Fundação CERTI iria possibilitar a determinação dos erros sistemáticos da CMM na medição de uma determinada classe de engrenagens, bem como verificar a capacitação dos operadores neste tipo de medição.

6.2 Avaliação das Potencialidades da Tecnologia de Medição por Coordenadas Frente aos Sistemas Universais de Medição de Engrenagem

Foram realizados dois experimentos objetivando a avaliação das potencialidades da tecnologia da medição por coordenadas na medição de peças complexas normalizadas frente aos sistemas universais de medição de engrenagem. Entendendo-se por sistemas universais de medição aqueles projetados exclusivamente para a medição de parâmetros de engrenagens.

6.2.1 Avaliação da CMM contra Sistemas Universais de Medição de Engrenagens Não Automatizados

Este experimento teve como objetivo principal comparar a utilização de CMMs em relação aos sistemas universais de medição não informatizados no processo de medição de engrenagem. Foi realizada a comparação dos resultados obtidos na medição de uma engrenagem pelo laboratório de medição por coordenadas da fundação CERTI e dos resultados obtidos pela máquina

universal de medição de engrenagens de uma indústria fabricante de motores hidráulicos. A figura 6.11 ilustra as medições nestes dois sistemas de medição.

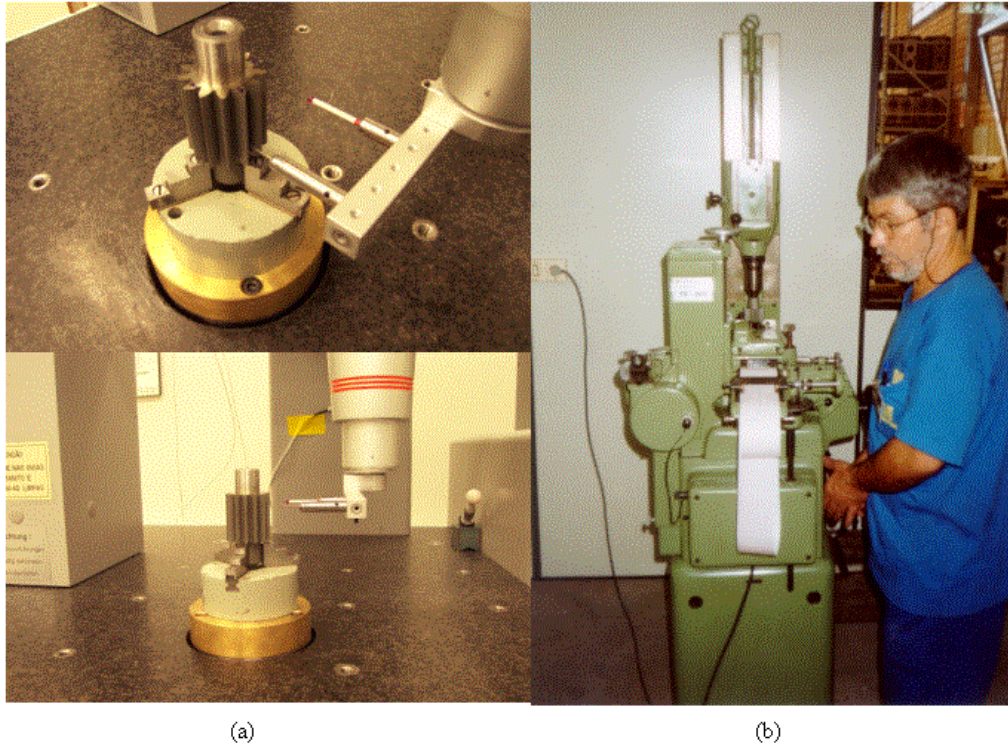


Figura 6.11 - Medição da engrenagem: (a) CMM Zeiss 550 da Fundação CERTI; (b) Máquina Universal de Medição de engrenagens.

A engrenagem medida tem como função o bombeamento de fluidos em um motor hidráulico. Erros em sua geometria terão conseqüências diretas na eficiência do motor hidráulico, no tempo de vida do motor, nos níveis de vibração e ruído durante o seu funcionamento.

A máquina universal de medição de engrenagens é a MAAG-ZAHNRADER e encontra-se instalada em um laboratório de metrologia do chão-de-fábrica, realizando o monitoramento dos processos de fabricação de engrenagens. Este processo de medição realiza o controle do erro de forma total do perfil e da linha de flanco das engrenagens medidas. Os resultados das medições são fornecidos de forma gráfica em um papel milimetrado com menor divisão representando 4 μm (figura 6.12). No laboratório de metrologia do chão-de-fábrica não existe uma grande preocupação com o controle das condições ambientais e na qualificação dos recursos humanos.

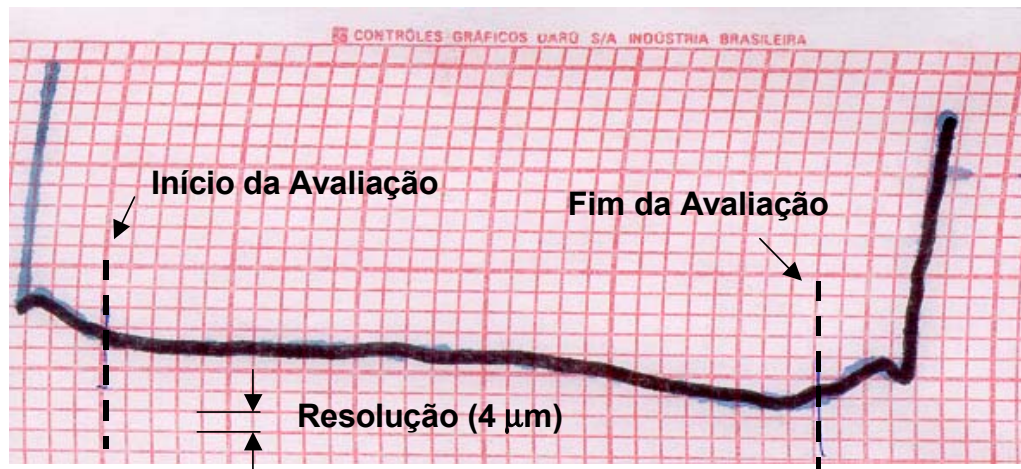


Figura 6.12 - Resultado gráfico da medição do parâmetro linha de flanco pela máquina universal de medição de engrenagens

Devido ao elevado tempo gasto na realização das medições, bem como à não automatização das mesmas, a utilização de sistemas universais de medição de engrenagens não informatizados inviabiliza a realização de um monitoramento mais eficiente dos processos de fabricação de engrenagens, também tornando o processo de medição fortemente influenciado pelo operador.

A tabela 6.9 apresenta os resultados das medições realizadas na CMM e na máquina universal de medição de engrenagens. As incertezas de medição apresentadas pelo sistema universal de medição são superiores as incertezas fornecidas pela medição por coordenadas. Estas diferenças nos níveis de incerteza podem ser atribuídas à própria idade da máquina universal, falta de ajuste e regulagem, seu princípio de funcionamento, tecnologia empregada, forma de tratamento de dados, influências do operador (sistema de medição completamente manual) e ambiente de instalação da máquina.

Apesar das máquinas possuírem um menor custo de aquisição, instalação e manutenção, tal tecnologia não é capaz de atender a requisitos como elevado nível de automação, baixos níveis de incerteza e grande velocidade de medição, impostos pelos sistemas de manufatura atuais, caracterizados por seu alto nível de automação e grande volume de medição.

Tabela 6.9 - Resultado da medição da engrenagem na máquina universal e na CMM Zeiss da fundação CERTI

Dente	Parâmetro	Máquina Universal		CMM	
		Média (μm)	Desvio Padrão (μm)	Média (μm)	Desvio Padrão (μm)
1 esq.	F_{α}	38	2,8	20,5	0,7
1 dir.	F_{α}	39	1,4	25,0	0,0
4 esq.	F_{α}	44	5,7	16,0	0,0
4 dir.	F_{α}	80	0,0	22,5	0,7
7esq.	F_{α}	36	0,0	13,5	0,7
7 dir.	F_{α}	38	2,8	21,0	0,0
10 esq.	F_{α}	26	2,8	17,0	0,0
10 dir.	F_{α}	32	0,0	25,0	0,0
1 esq.	F_{β}	37	1,4	17,0	0,0
1 dir.	F_{β}	60	5,7	22,5	0,7
4 esq.	F_{β}	20	0,0	17,0	0,0
4 dir.	F_{β}	50	2,8	15,0	0,0
7esq.	F_{β}	26	2,8	10,5	0,7
7 dir.	F_{β}	30	2,8	21,5	0,7
10 esq.	F_{β}	44	0,0	12,0	0,0
10 dir.	F_{β}	34	2,8	15,5	0,7

As tabelas 6.10 e 6.11 apresentam o balanço de incerteza da medição da engrenagem na CMM e no sistema universal de medição de engrenagens, como forma de visualizar as principais fontes de incerteza deste experimento. A ordem de grande da incerteza de medição das engrenagens medidas na máquina de medir por coordenadas foi de 2,1 μm e da máquina universal sua incerteza ficou na ordem de 8,6 μm . Devido ao intervalo de tolerância dos parâmetros da engrenagem medida ser de 20 μm , uma incerteza da ordem de 8,6 μm demonstra a atual não adequação deste sistema universal de medição de engrenagens para o controle metrológico de engrenagens.

Tabela 6.10 - Planilha do cálculo da incerteza da engrenagem na CMM Zeiss da Fundação CERTI

COMPONENTES DE INCERTEZA			DISTR. DE PROBABILIDADES		INCERTEZA PADRÃO (μm)	vi
Sím-bolo	FONTES	VALOR (μm)	TIPO	DIVISOR		
Re	Repetitividade ($\sigma/n^{0,5}$)	0,49	Normal	1	0,49	1
U_{CMM}	Máquina	1,74	Normal	2	0,87	50
$U_{\Delta T}$	Varição de Temperatura	0,14	Retangular	1,73	0,12	∞
U_R	Resolução da Máquina (R/2)	0,05	Retangular	1,73	0,03	∞
U_C	Incerteza padrão Combinada		Normal		1,0	44
$U_{95\%}$	Incerteza Expandida (95%)		Normal		2,1	

Tabela 6.11 - Planilha do cálculo da incerteza da engrenagem na máquina universal de medição de engrenagens

COMPONENTES DE INCERTEZA			DISTR. DE PROBABILIDADES		INCERTEZA PADRÃO (μm)	vi
Sím-bolo	FONTES	VALOR (μm)	TIPO	DIVISOR		
Re	Repetitividade ($\sigma/n^{0,5}$)	4,0	Normal	1	4,0	
U_{CMM}	Máquina	*****	Normal	2	*****	*** **
$U_{\Delta T}$	Varição de Temperatura	1,4	Retangular	1,73	0,8	∞
U_{R}	Resolução da Máquina (R/2)	2,0	Retangular	1,73	1,2	∞
U_{C}	Incerteza padrão Combinada		Normal		4,3	∞
$U_{95\%}$	Incerteza Expandida (95%)		Normal		8,6	

Dessa forma, mesmo sem poder avaliar o erro sistemático de ambas, pode-se afirmar que a CMM possui uma incerteza não corrigida bem menor que a máquina universal de medição de engrenagens. Além disso, a CMM é capaz de avaliar mais parâmetros na engrenagem; maior velocidade de medição e maior flexibilidade.

Essas informações qualitativas e a constatação quantitativa da incerteza da CMM ($\pm 2 \mu\text{m}$) com o intervalo de tolerância da engrenagem ($20 \mu\text{m}$) qualificam a CMM para realizar o controle dessa peça padrão com geometria complexa de forma confiável e com grandes vantagens operacionais.

Seria de grande valia a estimativa dos erros sistemáticos de ambos os sistemas através da utilização de padrões convencionais de calibração de sistemas de medição de engrenagens.

6.2.2 Avaliação da CMM contra Sistemas Universais de Medição de Engrenagens com Elevado Nível de Automatização

Esse experimento teve como objetivo principal avaliar fatores como incerteza de medição, tempos, custos, facilidade de operação, nível de especialização do operador de processos de medição de engrenagens utilizando-se CMMs em relação a processos que utilizam sistemas universais de medição com elevado nível de automação, bem como avaliar o procedimento de medição de engrenagens utilizado pelo Laboratório de Medição por Coordenadas da Fundação CERTI.

O experimento consistiu na intercomparação da medição de uma mesma engrenagem (figura 6.13) em dois sistemas de medição instalados em ambientes diferentemente contextualizados.



Figura 6.13 - Engrenagem utilizada no experimento

Estão apresentadas na tabela 6.12 as principais características dos sistemas de medição utilizados. A análise desta tabela mostra que a engrenagem foi medida em diferentes sistemas de medição, sob diferentes condições ambientais, estratégia de medição e nível de qualificação dos operadores. A tabela 6.13 apresenta as incertezas de medição da Primar MX4 fornecida por seu fabricante.

Tabela 6.12 - Caracterização dos sistemas de medição utilizados

SISTEMA DE MEDIÇÃO	LOCAL DE INSTALAÇÃO	CARACTERÍSTICAS
CMM Zeiss 550	Lab. de Med. por Coordenadas da Fundação CERTI	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Excelente controle das condições ambientais; ▪ Operadores treinados; ▪ Sistema da garantia da qualidade implementado; ▪ Sistema de medição altamente flexível e com grande volume de medição; ▪ Custo de aquisição em torno de US\$ 250.000.
Primar MX4	Laboratório de Metrologia ⁴	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bom controle ambiental e nível de qualificação do operador; ▪ Sistema da garantia da qualidade não implementado; ▪ Sistema de Medição mais robusto as condições ambientais; ▪ Sistema de Medição dedicado, de alto custo e totalmente automatizado; ▪ Custo de aquisição em torno de US\$ 500.000.

⁴ Laboratório de Metrologia de uma industria metal-mecânica de grande porte.

Tabela 6.13 - Incertezas fornecidas pelo fabricante da Primar MX4

INCERTEZAS FORNECIDAS PELO FABRICANTE DA PRIMAR MX4 (L em milímetros)	
INCERTEZA 2D	$(1,5+0,002*L) \mu\text{m}$
INCERTEZA 3D	$(2+0,003*L) \mu\text{m}$
ERRO DE FORMA	$(0,1+0,0008*L) \mu\text{m}$
BATIMENTO RADIAL	$(0,07+0,0008*L) \mu\text{m}$

Buscou-se, dentro do possível, realizar a medição da engrenagem em ambos os sistemas de medição sob idênticas condições (engrenagem limpa e estabilizada termicamente com o sistema de medição, medição sob os mesmos dentes, mesma região de avaliação dos resultados, etc). A figura 6.14 ilustra as medições realizadas na Primar MX4.

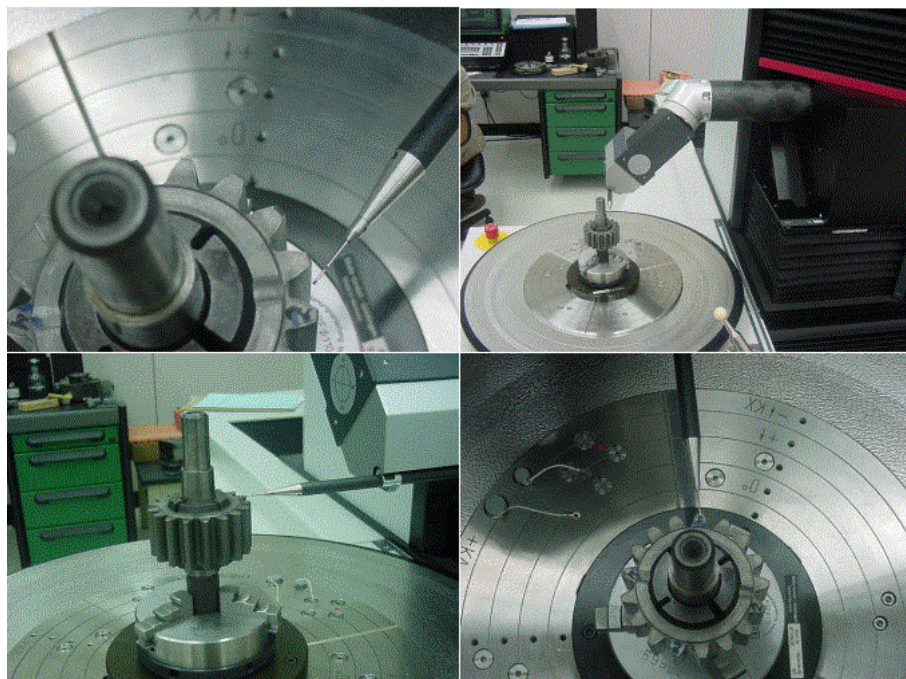


Figura 6.14 - Ilustração da medição da engrenagem no sistema universal de medição de engrenagens Primar MX4.

As tabelas 6.14 e 6.15 apresentam as planilhas utilizadas para o cálculo da incerteza da medição da engrenagem na CMM Zeiss da Fundação CERTI e na Primar MX4. A maior incerteza encontra na medição de parâmetros da engrenagem pela CMM Zeiss foi de $2 \mu\text{m}$ e na Primar foi de $1,1 \mu\text{m}$.

Uma análise das planilhas mostra que a principal componente de incerteza das medições na CMM é a incerteza fornecida pela calibração da máquina, pois este valor foi determinado com

base na incerteza “3D” (incerteza na medição envolvendo os três eixos da máquina) fornecida pelo seu certificado de calibração, o que podemos afirmar com base no Experimento I que esta incerteza muitas vezes não é realista na medição de parâmetros não lineares. Este fato não acontece no balanço de incerteza da Primar, porque o fabricante especifica uma incerteza para a medição de erros de forma e batimento radial.

As próprias equações fornecidas pelo fabricante da Primar MX4 (tabela 6.13) demonstram a não adequação da utilização da equação de incerteza 3D na medição de erros de forma e batimento radial (tipo de medição realizada na determinação do erro de forma do perfil e da linha de flanco de engrenagens). Porém esta equação foi utilizada nas medições realizadas pela CMM por falta de informações de quanto seria este valor, o que certamente caracteriza um erro, pois se atribui uma incerteza superior à verdadeiramente obtida pela CMM em tais medições.

Tabela 6.14 - Balanço de incerteza da medição da engrenagem na CMM do Laboratório de Medição por Coordenadas da Fundação CERTI

COMPONENTES DE INCERTEZA			DISTR. DE PROBABILIDADES		INCERTEZA PADRÃO (μm)	vi
Sím-bolo	FONTES	VALOR (μm)	TIPO	DIVISOR		
Re	Repetitividade ($\sigma/n^{0,5}$)	0,35	Normal	1	0,35	1
U_{CMM}	Máquina	1,82	Normal	2	0,91	50
$U_{\Delta T}$	Variação de Temperatura	0,28	Retangular	1,73	0,16	∞
U_{R}	Resolução da Máquina (R/2)	0,05	Retangular	1,73	0,03	∞
U_{C}	Incerteza padrão Combinada		Normal		0,96	39
$U_{95\%}$	Incerteza Expandida (95%)		Normal		2	

Tabela 6.15 - Balanço de incerteza da medição da engrenagem na Primar MX4 do laboratório de metrologia do chão-de-fábrica

COMPONENTES DE INCERTEZA			DISTR. DE PROBABILIDADES		INCERTEZA PADRÃO (μm)	vi
Sím-bolo	FONTES	VALOR (μm)	TIPO	DIVISOR		
Re	Repetitividade ($\sigma/n^{0,5}$)	0,35	Normal	1	0,35	1
U_{PP}	Máquina	0,13	Normal	2	0,07	50
$U_{\Delta T}$	Variação de Temperatura	0,92	Retangular	1,73	0,53	∞
U_{R}	Resolução da Máquina	0,05	Retangular	1,73	0,03	∞
U_{C}	Incerteza padrão Combinada		Normal		0,55	∞
$U_{95\%}$	Incerteza Expandida (95%)		Normal		1,1	

Os resultados obtidos neste experimento (tabelas 6.16 e 6.17) demonstram os excelentes níveis de repetitividade dos sistemas de medição utilizados neste experimento, permitindo concluir que os equipamentos irão apresentar uma incerteza de medição corrigida muito próxima entre si. No entanto, a comparação dos resultados através do erro normalizado mostrou que as medições são incompatíveis (erro normalizado superior a 1 em todas as medições). Esta incompatibilidade dos resultados entre os sistemas de medições é fruto de fatores como:

- Utilização de diferentes estratégias de medição:
 - a. A engrenagem foi medida na Primar MX4 acoplando-a a um eixo (figura 6.15), diferentemente da medição realizada na CMM Zeiss, onde o eixo de referência da peça foi criado a partir do furo onde o eixo da engrenagem será acoplado. Sendo assim, o eixo introduzido na medição da engrenagem na Primar, poderá introduzir erros devido à sua excentricidade e erros de forma;
 - b. Diferença na estratégia de determinação do eixo de giro da mesa rotativa.
- Complexidade de preenchimento do software de medição de engrenagens, o qual poderá ter acarretado um erro na entrada dos parâmetros da engrenagem medida;
- Operadores com níveis diferentes de qualificação.

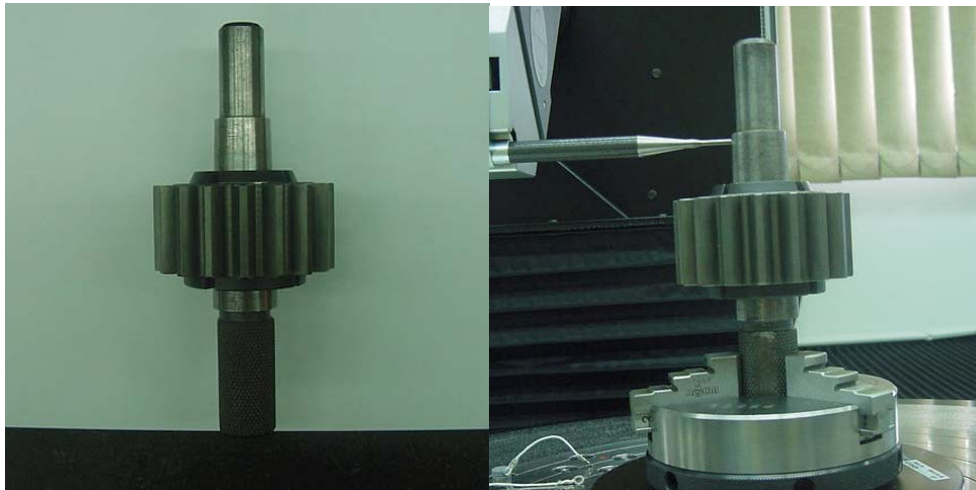


Figura 6.15 - Engrenagem acoplada em um eixo para a medição na Primar MX4

Tabela 6.16 - Apresentação dos resultados das medições de perfil e linha de flanco da engrenagem realizada na CMM e no sistema universal de medição de engrenagens Primar MX4

Dente	PERFIL					LINHA DE FLANCO				
	Parâmetro	Primar		CMM CERTI		Parâmetro	Primar		CMM CERTI	
		Média (µm)	Desvio Padrão (µm)	Média (µm)	Desvio Padrão (µm)		Média (µm)	Desvio Padrão (µm)	Média (µm)	Desvio Padrão (µm)
1 esq.	F_{α}	27	0,1	15,5	0,1	F_{β}	30	0,1	41,6	0,6
	$f_{H\alpha}$	-16	0,0	13,9	0,0	$f_{H\beta}$	-14	0,0	26,4	0,5
	$f_{f\alpha}$	22	0,1	16,1	0,0	$f_{f\beta}$	23	0,0	30,5	0,2
1 dir.	F_{α}	31	0,1	23,6	0,0	F_{β}	20	0,1	21,7	0,0
	$f_{H\alpha}$	-19	0,1	19,7	0,3	$f_{H\beta}$	-4	0,1	4,3	0,0
	$f_{f\alpha}$	23	0,1	16,6	0,4	$f_{f\beta}$	19	0,1	23,9	0,1
5 esq.	F_{α}	17	0,1	17,8	0,0	F_{β}	17	0,3	25,8	0,4
	$f_{H\alpha}$	-6	0,0	18,6	0,1	$f_{H\beta}$	0	0,0	1,0	0,1
	$f_{f\alpha}$	14	0,1	9,0	0,0	$f_{f\beta}$	17	0,3	26,3	0,5
5 dir.	F_{α}	25	0,0	19,7	0,1	F_{β}	18	0,1	31,0	0,1
	$f_{H\alpha}$	-7	0,1	11,9	0,1	$f_{H\beta}$	-1	0,1	11,1	0,0
	$f_{f\alpha}$	23	0,1	13,5	0,1	$f_{f\beta}$	18	0,0	26,1	0,2
9 esq.	F_{α}	16	0,1	22,3	0,0	F_{β}	19	0,4	26,5	0,1
	$f_{H\alpha}$	5	0,0	24,6	0,1	$f_{H\beta}$	2	0,0	1,1	0,1
	$f_{f\alpha}$	14	0,1	9,6	0,4	$f_{f\beta}$	18	0,4	26,1	0,1
9 dir.	F_{α}	16	0,2	23,0	0,0	F_{β}	22	0,0	36,9	0,2
	$f_{H\alpha}$	5	0,0	19,9	0,4	$f_{H\beta}$	11	0,0	24,8	0,1
	$f_{f\alpha}$	18	0,1	14,0	0,1	$f_{f\beta}$	17	0,1	25,4	0,3
13 esq.	F_{α}	19	0,0	22,9	0,1	F_{β}	26	0,1	42,2	0,4
	$f_{H\alpha}$	-10	0,0	25,1	0,3	$f_{H\beta}$	-16	0,1	33,8	0,4
	$f_{f\alpha}$	15	0,1	10,8	0,1	$f_{f\beta}$	19	0,3	27,0	0,1
13 dir.	F_{α}	15	0,0	26,5	0,0	F_{β}	22	0,0	25,4	0,1
	$f_{H\alpha}$	-0,3	0,0	26,9	0,1	$f_{H\beta}$	-3	0,1	6,4	0,2
	$f_{f\alpha}$	15	0,0	13,4	0,0	$f_{f\beta}$	21	0,1	27,6	0,1

Tabela 6.17 - Apresentação dos resultados das medições do batimento radial e do passo da engrenagem realizada na CMM e no sistema universal de medição de engrenagens

Parâmetro	PRIMAR		CMM CERTI	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Fr	52,2	0,3	27,4	0,9
Fp	64,8	0,1	32,8	1,6
fp (esq.)	15,9	0,2	10,0	0,0
fp (dir.)	13,1	0,0	8,0	0,0
fu (esq.)	12,7	0,1	8,2	0,4
fu (dir.)	9,6	0,0	6,2	0,4

O fator de correção do perfil da engrenagem foi erroneamente omitido no preenchimento do software de medição da Primar MX4. Numa tentativa de minimizar os efeitos deste erro, a medição na CMM Zeiss também foi realizada sem a adição do parâmetro correção de perfil no preenchimento do software. Este fato coloca em dúvida se os softwares de ambas as máquinas irão processar de forma semelhante os resultados das medições, quando não se utiliza este fator.

A estratégia de medição é fundamental na medição de engrenagens. Este fato ficou evidenciado quando se mediu uma mesma engrenagem, no mesmo sistema de medição e com o mesmo operador, apenas modificando-se a forma de alinhamento do eixo da peça, onde alinhou-se a mesma pelo furo do eixo da engrenagem e posteriormente pelos seus dentes. Neste experimento foram encontrados erros da ordem de 15 μm na medição de parâmetros como perfil e linha de flanco. Sendo assim, para uma intercomparação da medição de engrenagens, torna-se necessária uma definição bastante rígida da estratégia de medição a ser utilizada em ambos os sistemas de medição.

Verifica-se, portanto, que pouco adianta se ter um sistema de medição de altíssima sofisticação sem um adequado planejamento da medição e qualificação dos recursos humanos.

Por ser a Primar MX4 uma máquina mais moderna, dedicada à medição de engrenagens e erros de forma de peças de revolução, bem como sua maior robustez as condições ambientais, ela possivelmente fornecerá uma incerteza de medição um pouco menor que a Zeiss ZMC 550 na medição de engrenagens. Se ambas são uma ótima opção para o controle metrológico automatizado de engrenagens, diante dos seus excelentes níveis de automação e baixos níveis de incerteza, a CMM é mais flexível (em outras tarefas) e possui custo bem menor. Quanto ao tempo de medição, por serem ambos sistemas de medição CNC, o tempo de medição irá depender fortemente da habilidade e competência do operador para definição da estratégia de medição e preenchimento do software.

Para quantificar as tendências dos dois sistemas de medição seria necessária medir uma peça padrão calibrada, no caso padrões para calibração de sistemas de medição de engrenagens (figura 3.9, capítulo 3). No entanto, devido ao alto custo desses padrões (cerca de US\$ 10.000,00), isso foi inviável neste trabalho.

Capítulo 7

Conclusões e Considerações Finais

A flexibilidade da tecnologia da medição por coordenadas potencializada pelo crescente desenvolvimento tecnológico das máquinas de medir por coordenadas motivou o desenvolvimento das seguintes atividades como principais objetivos deste trabalho:

- Buscar indicadores da eficiência operacional e metrológica das máquinas de medir por coordenadas, na calibração e medição de peças padrão com geometrias complexas utilizadas no controle da qualidade da produção seriada;
- Comparar o desempenho de uma máquina de medir por coordenadas de referência frente aos sistemas universais de medição de engrenagens. Pois, dado o elevado grau de complexidade e diversidade geométrica das medições envolvendo engrenagens, a utilização de CMMs é algo de pouco consenso e difusão na indústria.

A busca dos indicadores das vantagens operacionais e metrológicas se deu através do estudo bibliográfico e na realização de experimentos considerando casos reais da aplicação, medição e calibração de peças padrão com geometria complexas.

A avaliação prática comprovou a adequabilidade operacional e metrológica da utilização de máquinas de medir por coordenadas de referência na calibração/medição de peças padrão com geometrias complexas, diante dos baixos níveis de incerteza de medição obtidos nos experimentos, da compatibilidade dos resultados, dos excelentes níveis de flexibilidade e

automação das medições, dos baixos custos e tempos oferecidos pela utilização das máquinas de medir por coordenadas frente aos métodos clássicos de calibração/medição.

As máquinas de medir por coordenadas de referência caracterizam-se por sua excelente repetitividade e reprodutibilidade das medições, bem como por serem utilizadas sob cuidadosa preparação do ambiente de instalação da máquina, rigoroso controle das condições ambientais, e com a utilização de mão-de-obra qualificada e a constante preocupação com todas as questões que envolvam a qualidade das medições por parte do laboratório. Tomando como base os resultados dos experimentos realizados ao longo deste trabalho de dissertação, pode-se afirmar que a principal limitação do uso de máquinas de medir por coordenadas de referência na medição/calibração de peças padrão com geometrias complexas é a relação entre o intervalo de tolerância da característica medida e incerteza de medição da CMM de referência. No entanto, os baixos níveis de incerteza, tempos e custos em relação aos métodos clássicos de calibração/medição de peças padrão, obtidos pelos experimentos realizados no Laboratório de Medição por Coordenadas da Fundação CERTI, comprovam a adequabilidade do uso de CMMs de referência para calibrações/medições de uma enorme gama de peças com geometrias complexas da indústria metal-mecânica.

Ao longo dos experimentos realizados, o uso de peças padrão calibradas mostrou-se como sendo uma forma de expressão mais realista do nível de incerteza de medições frente aos métodos clássicos de calibração, métodos estes que geralmente não refletem as verdadeiras condições da medição, além do seu elevado custo, tempos e complexidade.

- As principais contribuições técnico-científicas deste trabalho foram:
- Desenvolvimento de uma metodologia abrangente para auxiliar a realização de operações de calibração de peças padrão e medição de peças com geometrias complexas em máquinas de medir por coordenadas. Esta metodologia buscou garantir de forma ágil, flexível e eficiente a confiabilidade metrológica necessária à realização destas atividades, agregando vantagens econômicas e operacionais que conjuntamente configuram a

utilização de máquinas de medir por coordenadas de referência uma alternativa mais vantajosa e atrativa para calibração/medição de peças padrão com geometrias complexas;

- Sistematização de informações relativas à tecnologia de medição por coordenadas, ao uso e calibração de peças padrão, e sobre o controle metrológico de engrenagens, contribuindo para o desenvolvimento e aperfeiçoamento da cultura metrológica das pessoas que tiverem contato com este trabalho ou que desejam aplicar estes conhecimentos;
- Desenvolvimento de uma alternativa simples, econômica, eficaz, confiável e acessível da indústria oferecer rastreabilidade e confiabilidade metrológica as suas operações de medição, verificação e zeragem de dispositivos, utilizadas para o controle geométrico das peças produzidas;
- Comprovação da adequabilidade operacional e metrológica da utilização de máquinas de medir por coordenadas para a medição de engrenagens;
- A constatação da adequabilidade das máquinas de medir por coordenadas de referência para a calibração/medição de peças padrão com geometrias complexas constitui uma nova oportunidade de negócios para laboratórios de medição por coordenadas prestarem à indústria.

Algumas sugestões de trabalhos que podem vir a contribuir dentro da proposição deste trabalho de utilizar máquinas de medir por coordenadas de referência para medição e calibração de peças padrão com geometrias complexas estão listadas abaixo:

- Utilização de padrões convencionais de calibração de sistemas de medição de engrenagens para verificação dos erros sistemáticos de uma máquina de medir por coordenadas de referência na medição de engrenagens;
- Estimativa experimental da incerteza da medição por coordenadas para tarefas específicas (dimensional, forma e posição).

Referências Bibliográficas

- [1] SOUSA, A.R., **Padrões corporificados e a tecnologia de medição por coordenadas inovando a qualificação geométrica de centros de usinagem**, Tese de doutorado, UFSC, 204 p, 2000.
- [2] PFEIFER, T., TORRES, F., **Manual de gestión e ingeniería de la calidad**. 1.ed. espanhola. Zaragoza: Mira Editores. ISBN.: 84-89859-43-4. 586p. 1999.
- [3] QS 9000, **Requisitos do Sistema da Qualidade**. Tradução da 3ª ed. Americana. São Paulo: IQA – Instituto de Qualidade Automotiva, 113p. Março de 1998.
- [4] BOSCH, J.A., **Coordinate Measuring Machines and Systems**. ISBN 0-8247-9581-4. Marcel Dekker, INC, 443p. New York, 1995.
- [5] REIBNER, H., **Engrenagens medidas em aparelhos de medição de forma**, Máquinas e Metais, p 46–55, maio 2001.
- [6] MASS, G.A.A., **A Tecnologia de medição por coordenadas na solução de problemas da indústria: Sistematização de informações e do processo metrológico do laboratório prestador de serviços**. Dissertação de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, 103p. Florianópolis, mar. 2001.

- [7] SCHNEIDER, C.A., **Modos de a empresa garantir a rastreabilidade metrológica de seus produtos/serviços aos padrões nacionais**. Seminário Internacional de Metrologia para Controle da Qualidade, sessão 3, módulo A, artigo 1. Florianópolis, 1995.
- [8] GIGO, L.G., **Estação de Medição por Coordenadas na Produção de Peças Complexas – Metodologia de Especificação**, Dissertação, Mestrado em Metrologia Científica e Industrial, UFSC, 87p., Florianópolis, Brasil, nov. 1999.
- [9] WECKENMANN, A. KNAUER, M., **Causes and consequences of measurement uncertainty in production metrology**. VI IMEKO Symposium, Metrology for Quality Control in Production. Wien, p 693 – 698. 1998.
- [10] WÄLDELE, F., **Uncertainty of Coordinate Measurements - Two examples**. Seminário Internacional de Metrologia para o Controle da Qualidade, Florianópolis, Brasil, 21 a 22 Agosto, 1997.
- [11] BRINKMANN, R.; BOSCH, R., **Capability of Coordinate Measuring Machines – Guideline VDI/VDE 2617 Part 7**, Seminário Internacional da Metrologia para controle da qualidade, Florianópolis, SC, ago. 1996.
- [12] WINCHELL, W., **Inspection and Measurement in Manufacturing – keys to process planning and improvement**, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Michigan, 1996, 198 p.
- [13] NIST, **Engineering Statistic Handbook**, Disponível em: <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/index.htm>. Acesso em: 11 nov. 2002.
- [14] SCHWENKE, H.; TRAPET, E.; WÄLDELE, F., **Pushing the Limits of Accuracy of Coordinate Measurements**. Proceeding of the 9th International Precision Engineering Seminar, 4th International Conference on Ultraprecision in Manufacturing Engineering, Braunschweig, Germany, vol. 1, p. 331-335, 26-30 maio. 1997.

- [15] EAL – G17. **Coordinate Measuring Machine Calibration – Publication Reference.** European Cooperation for Accreditation of Laboratories. Edition 1, 1995.
- [16] RENISHAW, RAMTIC - **Renishaw's Automated Milling, Turning and Inspection Center.** Disponível em: <http://www.renishaw.com>. Acesso em: maio 2002.
- [17] NBR ISO/IEC 17025, **Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração.** Rio de Janeiro: ABNT, 20p. 2001.
- [18] ISO 15530-4. **Geometrical Product Specification (GPS) – Techniques of Determining the Uncertainty of Measurement in Coordinate Metrology – Part 4: Experimental Uncertainty Assessment for the Substitution Method Using Calibrated Objects.** Working draft international standard. 1998.
- [19] INMETRO, **Vocabulário Internacional de Termos - VIM – Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia.** DIMCI, 52P. Duque de Caxias, 1995.
- [20] ILAC-G2: 1994, **Traceability of Measurements.** Disponível em: www.ilac.org/downloads/Ilac-g2.pdf. Acesso em: dez. 2002.
- [21] 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, 117p. Florianópolis. mar. 1993.
- [22] PHILLIPS, S.D. BORCHARDT, B. CASKEY, G., **Measurement Uncertainty Considerations for Coordinate Measuring Machines.** Precision Engineering Division, NIST, EUA, 28p, Abr. 1993.
- [23] SOARES JÚNIOR, L., **Confiabilidade metrológica no contexto da garantia da qualidade industrial: Diagnóstico e sistematização de procedimentos.** Dissertação de mestrado do

Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina, 111p. Florianópolis, abr. 1999.

- [24] SOUSA, A. R., **Medição por Coordenadas**, Apostilha de Curso, ETFSC, Florianópolis, SC, 1998.
- [25] NORONHA, J. L., **Avaliação da incerteza na calibração de padrão escalonado em máquinas de medir por coordenadas – método da comparação**. CONEM 2000 – Anais do Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Natal, 2000.
- [26] BRITO NETO, A. A; SOUSA, A.R., **A Utilização de Peças Padrão na Garantia da Confiabilidade Metrológica dos Processos de Medição da Indústria Metal-mecânica**, I Seminário Internacional de Metrologia na Indústria Automotiva, Metrosul III, Curitiba, out. 2002.
- [27] GONÇALVES JÚNIOR, A.A., **Metrologia – Parte 1**. Apostila do curso de mestrado em Metrologia Científica e Industrial. Florianópolis, abr. 2000.
- [28] HOOVER, S., **Simplifying Gear Metrology**. Quality on Line. Disponível em: <http://www.qualitymag.com>. Acesso em: dez. 2002.
- [29] DIN Taschenbuch 123, **Zahnradfertigung**, Beuth, 1993.
- [30] FARAGO, F.T., **Handbook of Dimensional Measurements**, Industrial Press, INC., NY, 1982.
- [31] USP, **Engrenagens I**. Disponível em: <http://www.bibvirt.futuro.usp.br/Apostila>. Acessado em: dez. 2002.
- [32] MUNOZ, G.S. **Controle Metrológico das Engrenagens**. Centro de Metrologia Industrial. INMETRO. 66p, 1989.
- [33] COOPER, C., **Coordinate Measuring Machines and the Gear Industry**. Disponível em: <http://geartechnology.com/mag/MMC.htm> . Acesso em: out. 2001.

- [34] VDI/VDE 2612. **Testing of involute cylindrical gears – Tooth trace testing.** Part 2.set. 1980.
- [35] SANTOS JUNIOR, M.J; IRIGOYEN, E.R.C., **Metrologia Dimensional: teoria e prática**, Porto Alegre, Ed. Universidade/UFRGS, 1995, 222p, ISBN 85-7025-308-7.
- [36] PTB, **Gear and thread standards.** Disponível em: <http://www.ptb.de/en/org/5/53/532/equip.htm>. Acesso em: dez. 2002.
- [37] TRAPET, E. and WÄLDELE, F., **Coordinate Metrology – Flexibility in Conflict with Accuracy?** Seminário Internacional da Metrologia para controle da qualidade, Florianópolis, SC, ago. 1997.
- [38] NEUMANN, H. J., **Industrial Coordinate Metrology: Ten years of innovations**, Verlag Moderne Industrie, 2000, 70p.
- [39] NEUMANN, H. J., **Coordinate Metrology: Technology and Application**, Verlag Moderne Industrie, 1990, 70p.
- [40] WÄLDELE F.; BUSCH, K.; KUNZMANN, H., **Calibration of coordinates measuring machines**, Precision Engineering, Vol. 4 (3), pp 139-144, 1995
- [41] MIGUEL, P.A.C., **Integração de máquinas de medir por coordenadas em sistemas produtivos automatizados.** Revista de Ciência e Tecnologia. v. 05, dez. 1996. p 79-92.
- [42] ABACKERLI, A. J., **Tecnologia de Medição por Coordenadas: Aplicação.** Apostilha de Curso, Fundação CERTI, Florianópolis, 1997.
- [43] KNAPP, W., **Measurement uncertainty on coordinate measuring machines.** VI IMEKO Symposium, Metrology for Quality Control in Production. Wien, p331 – 335. 1998.
- [44] VDI / VDE 2617. **Accuracy of Coordinate Measuring Machines, Part 1, Part 2.1 and Part 3**, 1995.

- [45] JIS B7440. **Test Code for Accuracy of Coordinate Measuring Machines**. 1987.
- [46] SOUSA, A.R., **Como utilizar a medição por coordenadas com eficiência e confiança**. Máquinas e Metais, maio 2001, p 114 – 127.
- [47] TRAPET, E., WÄLDELE F., **Quality Assurance of Coordinate Measuring Machines**, PTB – Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 1993.
- [48] OLIVEIRA, A.L, SOUZA, A.R, BRITO NETO, A.A., **Influências da Incerteza de Medição por Coordenadas na Conformidade Dimensional de Peças Seriadas**. EQUALAB, 2002, São Paulo, p 123 – 137.
- [49] NORONHA, J.L., **Aplicação da Máquina de Medir por Coordenadas na Calibração de Medidas Materializadas**, Qualify, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, UFSC, 55p., Florianópolis, Brasil, abr. 1999.
- [50] SOUSA, A. R., **Garantia da Confiabilidade Metrológica na Medição por Coordenadas**. Apostila de curso da Fundação CERTI. Florianópolis, 2001.
- [51] CERTI, **Serviços Metrológicos**. Disponível em: www.certi.com.br. Acesso em: dez. 2002.
- [52] KLEN, E.R., **Calibração de Máquinas de Medir por Coordenadas Utilizando Placas de Esferas – Uma técnica econômica, rápida e metrologicamente eficiente**, Dissertação, Mestrado em Metrologia Científica e Industrial, UFSC, Florianópolis, SC, nov. 1999.
- [53] VEIGA, C.L.N; KLEN, E.R., **É difícil calibrar CMMs?** Controle da Qualidade, n 59, Editora Banas, São Paulo, SP, p 48 – 54, abr. 1997.
- [54] ABACKERLI, A. J; ORREGO, R. M., **Intercomparação de medições em máquinas de medir por coordenadas – II**. Relatório parcial de projeto de pesquisa FAP-UNIMEP no. 205-99. Universidade Metodista de Piracicaba. Santa Bárbara d’Oeste – SP, set. 2001. 108pp.

- [55] GRIFFITH, G., **Measuring & Gaging Geometric Tolerances**, New Jersey, Prentice Hall, Carrer & Technology, 1993.
- [56] NBR 6409. **Tolerância geométricas – Tolerâncias de forma, orientação, posição e batimento – Generalidades, símbolos, definições e indicações em desenho**. Rio de Janeiro, ABNT, 19p. maio 1997.
- [57] HOCKEN, R.J., **Sampling issues in coordinate metrology**. International Forum on Dimensional Tolerancing and Metrology ASME. 1993.
- [58] KNAUER, M., **Objective-oriented measurement strategies**. VI IMEKO Symposium, Metrology for Quality Control in Production. Wien, p 693 – 698. 1998.
- [59] WECKENMANN, A., KNAUER, M., **The influence of measurement strategy on the uncertainty of CMM – Measurements**, Annals CIRP, Vol. 47, /1/ pp451-454, 1998.
- [60] WECKENMANN, A.; EITZERT, H.; GARNER, M.; WEBERT, H., **Functionality - oriented evaluation and sampling strategy in coordinate metrology**. Precision Engineering, Vol. 17, pp 244-252, 1995.
- [61] ANSI / ASME B89.4.1 (formerly ANSI / ASME B89.1.12M): **Methods for performance evaluation of coordinate measuring machines**, 1997.
- [62] ISO 10360-2 Coordinate Metrology Part 2. **Performance Assessment of Coordinate Measuring Machines (CMM)**, 1992.
- [63] BS 6808, **Coordinate Measuring Machines, Part 2, Methods for Verifying Performance**, British Standards Institute, London, UK, 1987.
- [64] INMETRO. **Guia para expressão da incerteza de medição**. Segunda Edição Brasileira do “Guide to the Expression of uncertainty in Measurement”, 120p. Diretoria de Metrologia Científica e Industrial - INMETRO. Rio de Janeiro, 1998.

- [65] VDI/VDE 2617 **Accuracy of Coordinate Measuring Machines – Characteristics and their cheking components of measurement deviation of the machine, Part 3.** VDI Verlag, Düsseldorf, 1986.
- [66] ISO/DTS 15530-3:2000. **Geometrical Product Specifications (GPS) – Coordinate measuring machines (CMM): Techniques for determining the uncertainty of measurement – Part 3: Uncertainty assessment using calibrated workpieces.** Working draft internacional standard.
- [67] WILHELM, R. G., HOCKEN, R., SCHWENKE, H., **Task specific uncertainty in coordinate measurement,** Annals CIRP, Vol. 50, p 553-563, 2001.