

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Centro Tecnológico

PósMCI - Programa de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial

Labmetro – Laboratório de Metrologia e Automação

Departamento de Engenharia Mecânica

**“AVALIAÇÃO DOS PROCESSOS DE MEDIÇÃO NA INDÚSTRIA,
BASEADA NO IMPACTO ECONÔMICO DA OPERAÇÃO DE
CONTROLE GEOMÉTRICO”**

Dissertação submetida à: Universidade Federal de Santa Catarina para a
obtenção do Grau de Mestre em Metrologia

José Ignacio Donoso

Florianópolis, 23 de Agosto de 2000

**“AVALIAÇÃO DOS PROCESSOS DE MEDIÇÃO NA
INDÚSTRIA, BASEADA NO IMPACTO ECONÔMICO DA
OPERAÇÃO DE CONTROLE GEOMÉTRICO”**

José Ignacio Donoso

Especialidade: Metrologia Científica e Industrial

Esta dissertação foi julgada para obtenção do título de Mestre em Engenharia aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial.



Prof. Carlos Alberto Schneider, Dr. Eng.

ORIENTADOR

Albertazzi
Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng.

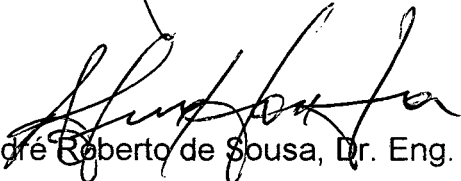
COORDENADOR DO CURSO DE MESTRADO EM METROLOGIA INDUSTRIAL E CIENTÍFICA

Banca Examinadora:



Prof. Abelardo Alves Queiroz, Ph. D.

Albertazzi
Prof. Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Dr. Eng.



Prof. André Roberto de Sousa, Dr. Eng.



Eng. Günther Pfeiffer, M. Sc.

*Este trabalho é dedicado a minha
esposa Marcela que sempre me
acompanhou e apoiou nesta
aventura longe de nossa terra.*

AGRADECIMENTOS

- Ao DICTUC S.A. pela a oportunidade de realizar um programa externo de mestrado.
- À UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina, por proporcionar uma ótima infraestrutura e corpo docente, dignos das melhores escolas.
- À CAPES pelo financiamento e incentivo ao Programa de Mestrado de Metrologia Científica e Industrial da UFSC.
- À Fundação CERTI, particularmente ao CMIP, pela possibilidade de participar de seus projetos, esperando haver contribuído de alguma forma nestes meses de trabalho.
- À Marcela, esposa, companheira, paciente nas horas difíceis e mãe dedicada, que esta sempre presente nas minhas principais conquistas.
- A Matias, que tão generoso me ofereceu olhares e sorrisos, foi capaz de me proporcionar forte incentivo para que eu nunca desistisse do meu objetivo maior: um futuro feliz para ele e Marcela.
- Aos meus pais, que sempre acreditaram em mim e muitas vezes renunciaram seus sonhos para que os meus, se tornassem realidade.
- A todos os familiares e amigos que sempre torceram pelo sucesso desta conquista.
- À empresa irmãos ZEN pelas facilidades oferecidas que permitiram concretizar o estudo prático da metodologia.
- Aos colegas do Labmetro - Laboratório de Metrologia e Automatização, que juntos unidos por um mesmo objetivo, apoiaram e incentivaram a realização deste trabalho.
- Em especial ao Professor Carlos Alberto Schneider, pelo apoio, dedicação, incentivo e amizade, durante estes meses de convívio.
- A todos que direta ou indiretamente contribuíram para o sucesso deste trabalho.

Resumo

“AVALIAÇÃO DOS PROCESSOS DE MEDIÇÃO NA INDÚSTRIA, BASEADA NO IMPACTO ECONÔMICO DA OPERAÇÃO DE CONTROLE GEOMÉTRICO”

Grande parte das peças hoje produzidas industrialmente tem sua funcionalidade, aparência e confiabilidade fortemente dependente de requisitos geométricos. Para assegurar tal conformidade geométrica, deve-se conjugar adequadamente condições de projeto geométrico, processo de fabricação e processo de medição ou inspeção. Tradicionalmente estas três condições são tratadas em separado, sendo que a especificação do processo de medição não influencia na determinação tanto do projeto quanto da fabricação.

Historicamente, têm-se utilizado uma série de métodos para determinar o processo de medição mais adequado, embora sendo a maioria deles muito simplista já que não consideram todas as variáveis que influenciam numa adequada avaliação. Particularmente não é tomada em conta a variável custo da qualidade, de forma que a escolha do processo de medição seja o mais eficiente possível, minimizando tais custos. A desarticulação entre projeto, fabricação e inspeção faz com que sejam muitas vezes induzidos grandes desperdícios.

Neste trabalho propõe-se uma metodologia para avaliar os processos de medição de forma integral e quantitativa, considerando todas as variáveis de projeto, fabricação e inspeção num só equacionamento que permita determinar, para cada possível alternativa, o custo total da qualidade associado. Dessa forma pode-se comparar em termos objetivos qual é a melhor opção, não só do processo de medição, como do processo de fabricação e quanto ao projeto geométrico, tendo como fator o custo resultante de cada uma.

Para verificar o desempenho prático da metodologia proposta, foram realizados estudos de caso. Estes estudos viabilizaram determinar a real aplicabilidade da metodologia proposta, identificar pontos de melhoria e comprovar sua efetiva factibilidade na indústria.

Palavras-chaves: *metrologia, processo de medição, seleção de sistemas de medição, custos da qualidade*

Abstract

"MEASURING PROCESSES EVALUATION IN THE INDUSTRY, BASED ON THE ECONOMIC IMPACT OF THE GEOMETRIC CONTROL OPERATION"

Almost every part that is industrially produced nowadays, has its functionality, appearance and reliability strongly dependent of geometric requirements. To assure such geometric conformity, the design, the production process and the measuring process must be conjugated properly. Traditionally these three conditions are treated separately, and the specification of the measuring process has no influence in the determination neither of the design nor the production.

Historically, a series of methods have been used to determine the more appropriate measuring process, although most of them are very simplistic since they don't consider all the variables that has influence in an appropriate evaluation. Particularly it is not considered the quality cost variable, so that the measuring process choice would be the most efficient possible, minimizing such costs. The lack of articulation among design, production and inspection, most of the times induce great wastes.

This work presents a methodology to evaluate the measuring process integrally and quantitatively, considering all of the design, production and inspection variables in an equation that allows the determination, for each possible alternative, of the total quality cost. This way an objective comparison of which it is the best option, not only for the measuring process, but also for the production process and to the design specification can be made, considering as a factor the resulting cost of each one.

In order to verify the practical performance of the this methodology, case studies were accomplished. These studies made possible the determination of the applicability of this methodology, the improvement points identification as well as the confirmation of its effective viability in the industry.

Keywords:

*metrology, measuring process, measuring systems
selection, quality costs*

Resumen

“EVALUACIÓN DE LOS PROCESOS DE MEDICIÓN EN LA INDÚSTRIA, BASADO EN EL IMPACTO ECONÓMICO DE LA OPERACIÓN DE CONTROL GEOMÉTRICO”

La mayoría de las piezas hoy producidas industrialmente, tienen su funcionalidad, apariencia y confiabilidad fuertemente dependientes de requisitos geométricos. Para asegurar tal conformidad geométrica, se deben conjugar adecuadamente condiciones de proyecto geométrico, proceso de fabricación y proceso de medición o inspección. Tradicionalmente estas tres condiciones son tratadas por separado, siendo que la especificación del proceso de medición no influencia en la definición tanto del diseño geométrico como del proceso de fabricación.

Históricamente, se han utilizado una serie de métodos para determinar el proceso de medición que sea mas adecuado para una tarea de medición, sin embargo, la mayoría de ellos son muy simplistas, ya que no consideran todas las variables que influyen sobre la medición. Particularmente no es tomada en cuenta la variable costo de la calidad, la cual es fundamental para que la selección del proceso de medición sea lo mas eficiente posible, de forma de minimizar tales costos. La desarticulación entre la determinación de las especificaciones de diseño, fabricación e inspección muchas veces induce a grandes desperdicios.

En este trabajo se propone una metodología para especificar los procesos de medición de forma integral y cuantitativa, considerando todas las variables de diseño, fabricación e inspección en un sólo modelo que permita determinar, para cada posible alternativa, el costo total de la calidad asociado. De esta forma, es posible determinar en términos objetivos cual es la mejor opción, no sólo de proceso de medición sino que también de diseño geométrico y de proceso de fabricación, teniendo como factor el costo resultante de cada una.

Para verificar el desempeño práctico de la metodología propuesta, fueron realizados estudios de caso. Estos estudios permitieron determinar la real aplicación de la metodología, identificar posibles mejoras y comprobar su efectiva viabilidad en la industria.

Palabras-claves: *metrología, proceso de medición, selección de sistemas de medición, costos de la calidad.*

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	iv
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
RESUMEN	vii
SUMÁRIO.....	viii
GLOSSÁRIO DE ABREVIATURAS.....	xi
CAPÍTULO 1 - ADEQUABILIDADE DOS PROCESSOS DE MEDIÇÃO, UMA PROPOSTA INTEGRAL.....	1
1.1 CONJUNÇÃO PARA A QUALIDADE INTRÍNSECA DAS PEÇAS.....	1
1.2 A REALIDADE EMPRESARIAL.....	3
1.3 PROPOSTA DO TRABALHO	5
CAPÍTULO 2 – A PRÁTICA ATUAL NA AVALIAÇÃO DOS PROCESSOS DE MEDIÇÃO	7
2.1 ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS CONSIDERADAS NOS DISTINTOS MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DOS PROCESSO DE MEDIÇÃO	7
2.1.1 Características de Projeto Geométrico.....	7
2.1.2 Características do Sistema de Medição	8
2.1.3 Características do Processo de Medição	9
2.1.4 Características do Processo de Fabricação	10
2.1.5 Características Operacionais e Econômicas.....	10
2.2 MÉTODOS EXISTENTES PARA A AVALIAÇÃO DOS PROCESSOS DE MEDIÇÃO	13
2.2.1 Método: EMPÍRICO.....	13
2.2.2 Método: RESOLUÇÃO	14
2.2.3 Método: ERRO MÁXIMO	15
2.2.4 Método: INCERTEZA DO SISTEMA DE MEDIÇÃO.....	15
2.2.5 Método: INCERTEZA DO PROCESSO DE MEDIÇÃO.....	16
2.2.6 Método: NORMA ISO 14253-1.....	18
2.2.7 Método: MSA – ANÁLISE DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO	19
2.3 COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS	20
2.4 PARECER COM RESPEITO À PRÁTICA ATUAL	21
CAPÍTULO 3 – PROPOSTA DE METODOLOGIA INOVADORA.....	22
3.1 ASPECTOS CONSIDERADOS NO MODELAMENTO.....	22
3.1.1 Premissas.....	22

3.1.2	Determinação dos custos da qualidade, relacionados à tarefa de inspeção.....	25
3.2	DELIMITAÇÕES.....	27
3.2.1	Delimitações do Projeto Geométrico.....	28
3.2.2	Delimitações do Processo de Fabricação.....	28
3.2.3	Delimitações do Processo de Medição.....	28
3.2.4	Delimitações de acordo com o tipo de inspeção.....	29
3.3	VARIÁVEIS A CONSIDERAR NO ESTUDO.....	30
3.3.1	Variáveis associadas ao Projeto Geométrico.....	30
3.3.2	Variáveis associadas ao Processo de Fabricação.....	30
3.3.3	Variáveis associadas ao Processo de Medição.....	32
3.4	FORMULAÇÃO PROBABILÍSTICA.....	33
3.5	FORMULAÇÃO MATEMÁTICA.....	34
3.6	CONSIDERAÇÕES ECONÔMICAS.....	36
3.7	APLICABILIDADE DA METODOLOGIA PARA DIFERENTES TIPOS DE INSPEÇÃO.....	40
3.8	CONSOLIDAÇÃO DA METODOLOGIA.....	41
3.9	OPERACIONALIZAÇÃO DA METODOLOGIA.....	42
3.9.1	Caracterização do problema.....	43
3.9.2	Aquisição e preparação dos dados.....	43
3.9.3	Cálculo das probabilidades.....	48
3.9.4	Cálculo dos custos da qualidade.....	49
3.9.5	Análise dos resultados e recomendações.....	51
CAPÍTULO 4 – APLICAÇÕES DA METODOLOGIA E VALIDAÇÃO.....		52
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO PRÁTICO DA METODOLOGIA.....	52
4.2	ESTUDO DE CASO 1: SIMULADO.....	52
4.2.1	Métodos de avaliação dos processos de medição a considerar.....	53
4.2.2	Caracterização do problema.....	53
4.2.3	Aquisição e preparação dos dados.....	53
4.2.4	Cálculo das probabilidades.....	55
4.2.5	Cálculo dos custos da qualidade.....	56
4.2.6	Análise dos resultados e recomendações.....	57
4.2.7	Efeito do deslocamento dos limites de especificação.....	58
4.3	ESTUDO DE CASO 2: ZEN - ROLETE.....	59
4.3.1	Metodologia empregada pela empresa.....	60
4.3.2	Caracterização do problema.....	61
4.3.3	Aquisição e preparação dos dados.....	61
4.3.4	Cálculo das probabilidades.....	64
4.3.5	Cálculo dos custos da qualidade.....	66
4.3.6	Análise dos resultados e recomendações.....	67
4.4	ESTUDO DE CASO 3: ZEN – QUEBRA CANTO.....	70
4.4.1	Metodologia empregada pela empresa.....	71
4.4.2	Caracterização do problema.....	72
4.4.3	Aquisição e preparação dos dados.....	72

4.4.4 Cálculo das probabilidades	74
4.4.5 Cálculo dos custos da qualidade.....	75
4.4.6 Análise dos resultados e recomendações.....	77
4.5 DESEMPENHO DA METODOLOGIA PROPOSTA.....	78
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES.....	81
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84

ABREVIATURAS

CEP	Controle estatístico de processos.
DLE	Deslocamento dos limites de especificação.
FDP	Função de densidade de probabilidades.
GM	Grandeza a medir.
GUM	Guide to the expression on uncertainty in measurement.
ISO	International organization for standardization.
LI	Limite inferior de integração.
LIA	Limite inferior de aceitação.
LIE	Limite inferior de especificação.
LS	Limite superior de integração.
LSA	Limite superior de aceitação.
LSE	Limite superior de especificação.
M	Medida.
PF	Processo de fabricação.
PG	Projeto geométrico.
PM	Processo de medição.
R	Resolução.
SI	Sistema internacional de unidades.
SM	Sistema de medição.
T	Tolerância.
Td	Tendência.
VIM	Vocabulário internacional de termos fundamentais e gerais de metrologia
Vpf	Variabilidade do processo de fabricação.
VVC	Valor verdadeiro convencional.
μ	Média do processo.
σ	Desvio padrão do processo.

capítulo 1

ADEQUABILIDADE DOS PROCESSOS DE MEDIÇÃO, UMA PROPOSTA INTEGRAL

O mercado globalizado exige das empresas maior eficiência, de forma que forneçam produtos de melhor qualidade a preços competitivos e disponibilizados no momento adequado. Estes requisitos obrigam as empresas a investir na qualidade de seus produtos, diminuindo os custos de produção e o tempo requerido para inserir os produtos no mercado. As empresas que não cumprem estas condições estão condenadas a desaparecer.

Para assegurar a qualidade dos produtos e particularmente de seus diversos componentes e partes, tem-se imposto uma série de normas relativas a Sistemas de Gestão da Qualidade, tais como ISO 9000, QS 9000, VDA 6.1, etc.. Tais sistemas se ocupam não somente com o produto final, mas também com os processos pelos quais cada peça do produto passa, incluindo uma série de requisitos e considerações metrológicas para assegurar a qualidade.

A idéia é mudar o conceito “clássico” de controle de qualidade, e adotar um conceito mais moderno de fabricar (produzir) qualidade, ou seja produzir peças de qualidade, evitando retrabalho e refugo /01 a 04/. As empresas estão sendo muito exigidas pelo mercado e muitas estão perdendo a batalha.

Por sua vez, os laboratórios de calibração e ensaio que pretendem atender a este tipo de empresas devem demonstrar competência técnica para atingir seus requisitos. Por exemplo, implementando sistemas da qualidade laboratorial como o proposto pela ISO 17025, antiga ISO Guia 25 /05/. Neste contexto, a metrologia apresenta cada vez mais uma maior relevância, especialmente no contexto da qualidade industrial.

1.1. CONJUNÇÃO PARA A QUALIDADE INTRÍNSECA DAS PEÇAS

A funcionalidade, aparência e confiabilidade das peças, na maioria dos casos, dependem fortemente de suas características geométricas. No processo produtivo, pode-se identificar claramente três etapas que influenciam fortemente essas propriedades. Em primeiro lugar, as especificações geométricas são fixadas na fase de projeto. Estas devem ser tais que assegurem a fabricação de um produto de qualidade. Em segundo lugar tem-se a fabricação, onde o atendimento das especificações permitirá assegurar um produto geometricamente conforme. Por último tem-se a inspeção onde a identificação de peças conformes e não conformes permitirá verificar e assegurar que as peças disponibilizadas satisfaçam as especificações estabelecidas na fase de projeto.

A conformidade geométrica das peças pode ser concebida como um “templo”, sustentado por três bases que são Projeto Geométrico, Processo de Fabricação, e Processo de Medição (fig. 1.1). Cada uma delas considera algumas características que permitem assegurar a conformidade geométrica das peças. Dessa forma, Tolerância, Variabilidade do Processo de Fabricação e Incerteza da Medição são algumas das principais características envolvidas.

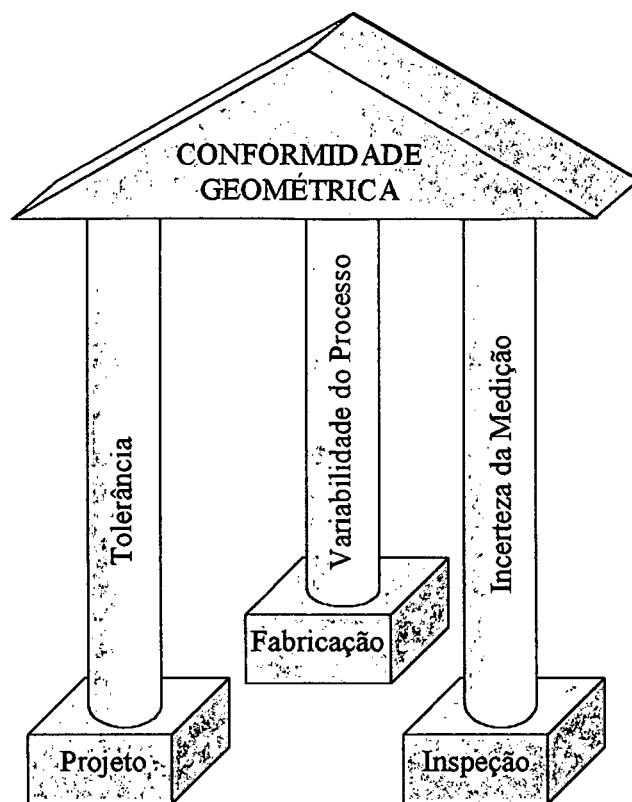


Figura 1.1: Templo da conformidade geométrica de peças

Não é possível pensar num produto conforme, no caso de algum dos pilares ser desconsiderado. Um projeto mal-concebido, um processo de fabricação incapaz e/ou um processo de medição inadequado pode gerar peças não conformes com as especificações geométricas. No outro extremo, especificações de projeto muito exigentes, processos de fabricação excessivamente capazes e/ou processos de medição muito precisos permitem oferecer bom produtos, mas a custos muito altos, os quais podem inviabilizar o produto no mercado /06/.

Dessa forma, para que o produto obtenha sucesso comercial (dadas as exigências do mercado globalizado), é preciso determinar a combinação ótima entre projeto, processo de fabricação e processo de medição. Assim, será possível assegurar que os requisitos do cliente sejam cumpridos, além de minimizar os custos e os tempos de produção. Em particular, os processos de medição implementados pelo fornecedor devem ser adequados. Isto significa que devem atestar/avaliar a conformidade geométrica das peças liberadas para os clientes, minimizando os custos de inspeção.

Em relação à tarefa de inspeção é preciso esclarecer o significado de dois termos que, normalmente são utilizados como sinônimos, mas que representam conjuntos distintos. Os termos são Sistema de Medição (SM) e Processo de Medição (PM). O primeiro representa o instrumento ou conjunto de elementos (cadeia de medição), tipicamente calibrado em condições de laboratório, que transformam a grandeza a medir em uma medida. Por sua vez, o segundo representa o SM operando nas condições reais de medição. Entre estas condições, destacam-se as influências do próprio SM, dos operadores, do procedimento, do meio ambiente, do próprio objeto a medir e do material do qual é feito (fig. 1.2) /07, 08/.

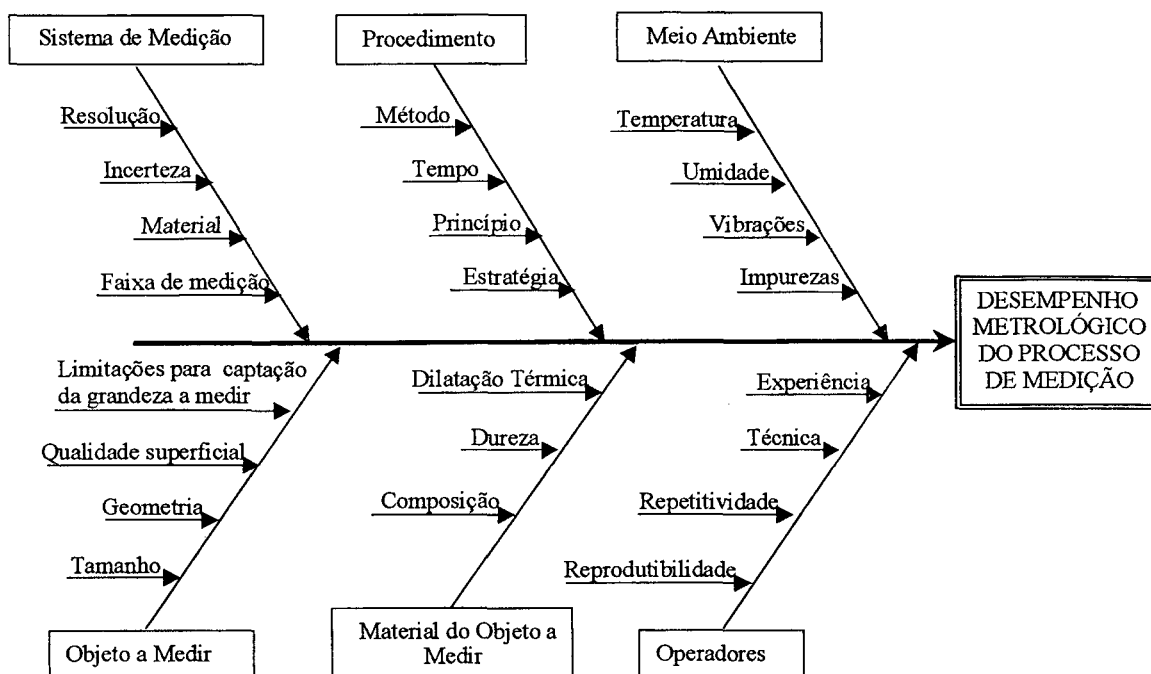


Figura 1.2: Condições que influenciam o desempenho metrológico de um processo de medição

1.2. A REALIDADE EMPRESARIAL

A realidade industrial em relação aos aspectos que influenciam na conformidade geométrica das peças, que afetam a qualidade dos produtos, pode assim ser resumida:

a) Projeto

No mercado atual, as tolerâncias (T) das grandezas a controlar nas peças são cada dia mais apertadas e exigentes. Como exemplo, na figura 1.3, tem-se uma lista de tolerâncias dimensionais típicas para produtos de diferentes setores industriais /07/. Nessa figura pode-se verificar o alto nível de exigência em relação às tolerâncias. Para poder controlar tais especificações de forma adequada é preciso dispor de um PM com um correspondente nível metrológico.

b) Processo de Fabricação

Na atualidade, não é possível pensar num produto que não seja gerado a partir de processos de fabricação (de aqui em diante PF) de qualidade, incluindo os meios de produção, os sistemas de gerenciamento e as pessoas. Da mesma forma, entregar aos clientes peças não conformes é considerado inaceitável, particularmente em inspeções de recebimento para zero defeito, onde o lote todo pode ser rejeitado pela presença de uma só peça fora das especificações. Dessa forma, se a única forma de ser competitivo é “produzir” peças conformes, é fundamental o dispor de PFs capazes ou seja onde as peças sejam produzidas dentro das especificações. Dessa forma, há uma diminuição do risco de que peças não conformes cheguem aos clientes, sejam estes internos ou externos.

QUADRO DE TOLERÂNCIAS DE PRODUTOS MODERNOS			
Tolerância	Mecânicos	Eletrônicos	Ópticos
200 μm	- Acessórios automotivos	- Peças elétricas de uso geral (p. ex. motores, conectores)	- Corpos de câmeras, telescópios e binoculares
50 μm	- Peças mecânicas de uso geral	- Transistores, diodos - Cabeças magnéticas para gravadores	- Diafragma de câmeras, dispositivos de fixação de lentes para câmaras e microscópios
5 μm	- Partes mecânicas de alguns relógios - Mancais para máquinas-ferramentas - Algumas engrenagens - Partes rotativas de compressores	- Relés elétricos, resistores - Condensadores - Waffers de silício - Máscaras para TV colorido	- Lentes - Prismas - Fibras ópticas e conectores multi-modo
0,5 μm	- Rolamentos de esferas e roletes - Fios trefilados de grande exatidão - Servo-válvulas hidráulicas - Mancais aerostáticos - Mancais aerodinâmicos para giro	- Escalas magnéticas, - Dispositivo de carga acoplado (CCD) - Osciladores de quartzo - Memórias magnéticas - Linhas, transdutores de pressão - Cabeças impressoras térmicas	- Lentes de precisão - Escalas ópticas - Máscaras para circuito integrado - Espelhos para polígonos (laser) - Espelhos para raios X - Conectores para fibra óptica
0,05 μm	- Blocos padrão - Indentadores de diamante - Mesas XY de grande exatidão	- Memórias - Vídeo disco (eletrônica)	- Plano óptico - Lentes fresnel - Grade de difração - Vídeo disco (óptica)
0,005 μm		- Integração em muito longa escala (VLSI) - Filmes superfinos	- Grades de difração de grande exatidão

Figura 1.3: Tolerâncias de fabricação típicas em setores industriais /07/.

c) Inspeção

A conformidade geométrica das peças fabricadas só é passível de demonstração e verificação através da utilização de processos de medição (PM) adequados. A disponibilidade de PM adequados, além de contribuir para a avaliação da conformidade geométrica das peças, permite conhecer e por conseguinte, corrigir desvios e variações no comportamento dos PFs /08/. Dessa forma, o PM não só permite classificar peças dentro e peças fora de especificação, mas também permite melhorar o desempenho dos PFs.

d) Considerações gerais

Para avaliar e comparar processos de medição, em termos econômicos, utiliza-se a ferramenta “Custos da Qualidade” (a norma NBR ISO 8402 recomenda o termo “Custos Relativos à Qualidade”). Os custos da qualidade podem ser classificados em quatro subgrupos de acordo com sua origem (fig. 1.4). São eles: custos de prevenção, custos de avaliação, custos de falha interna e custos de falha externa. Os dois primeiros estão relacionados aos custos incorridos por ações que tentam assegurar a conformidade e os dois últimos com custos incorridos devido a peças não conformes. Peças não conformes podem também gerar um aumento nos custos de avaliação /08, 09/. Dada a ampla abrangência dessa ferramenta, para determinar a adequabilidade dos PMs devem ser considerados apenas aqueles custos que tem relação com tal aspecto.

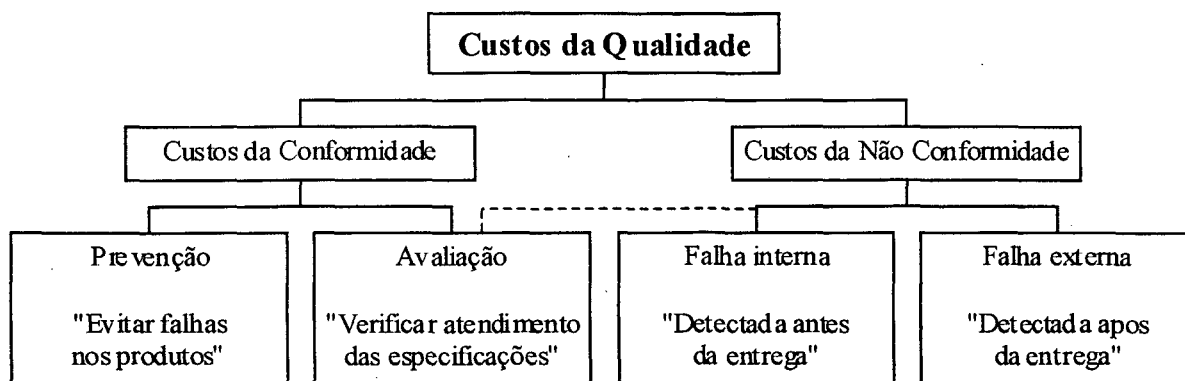


Figura 1.4: Classificação dos custos da qualidade

Para diminuir os custos da qualidade, devem-se focalizar os esforços para minimizar o total, pois de nada serve tentar diminuir só uma parcela dos custos se as outras aumentam. Dessa forma, em alguns casos a solução é aumentar um pouco um dos custos, desde que outros custos diminuam mais fortemente. Tipicamente, o fato de diminuir os custos de avaliação, especialmente relacionados com os PMs, podem provocar custos de não conformidade muito maiores, o que normalmente não é considerado.

Na atualidade, não existem ferramentas que auxiliem na especificação dos PMs de modo a otimizar os custos da qualidade associados. Muitas vezes, as recomendações para a especificação de PM vêm de normas ou regulamentos técnicos, leis, recomendações, especificações de segurança e práticas históricas, etc. Muitas destas orientações não asseguram que os PMs minimizem os custos da qualidade. Por outro lado, de acordo com a técnica atual aplicada na indústria, a especificação do PM é só um resultado das condições presentes e não uma ferramenta que permite otimizar tais custos associados.

Os métodos existentes que permitem especificar PM não consideram todas as características que podem influenciar nos custos. Este tema será tratado mais profundamente no item 2.2 do presente trabalho. Tais métodos, em geral, são muito simplistas e desconsideram uma série de aspectos importantes que influenciam nos custos. O fato de não considerar esses custos se deve principalmente à falta de uma metodologia que auxilie na avaliação. Estes métodos podem levar a tomar decisões erradas, provocando inclusive custos não otimizados.

1.3. PROPOSTA DO TRABALHO

O presente trabalho tem por objetivo principal, desenvolver uma metodologia que permita às empresas avaliar os PMs, baseados no impacto econômico da operação de controle geométrico, a partir de um modelamento que considera tanto as condições de projeto, como de PF e de PM. Dessa forma, será possível comparar diferentes PMs em termos dos custos da qualidade associados a cada um.

Complementarmente, o trabalho busca fornecer ferramentas que auxiliem na definição das condições de projeto, fabricação e inspeção que devem ser consideradas para minimizar os custos da qualidade. Da mesma forma, pretende-se auxiliar na identificação das condições críticas (aquelas que influenciam mais fortemente) no custo da qualidade das peças produzidas, de forma a concentrar os esforços em tais fontes.

O trabalho será focado na geração de uma metodologia, a mais simples possível, de modo que possa ser aplicada no chão de fábrica. Embora os conceitos possam ser aplicáveis a todas as situações e magnitudes, este trabalho será focado no controle geométrico por ser o caso mais freqüente.

No desenvolvimento deste trabalho, uma vez fixado seus objetivos, foi efetuada uma revisão bibliográfica dos aspectos relacionados ao trabalho como: métodos de seleção atualmente utilizados na indústria, normalização, terminologia, ferramentas passíveis de utilização para o desenvolvimento da metodologia. Todo o material compilado auxiliou no aprofundamento da temática, permitindo concluir que não existia uma solução para o problema apresentado. Este espectro de conhecimentos teóricos relevantes e a realidade atual da empresa estão apresentados no Capítulo 1.

Para compreender a prática atual na especificação de PM, foram estudados os métodos utilizados na indústria hoje em dia. Estes métodos foram caracterizados e comparados entre si, utilizando uma série de parâmetros de interesse. Foi constatado que os atuais métodos de avaliação dos PMs empregados, não consideram todas as características relevantes. Confirma-se assim a necessidade de desenvolver uma solução avançada para satisfazer tal requisito apresentado. Isto é apresentado no Capítulo 2.

Na seqüência procedeu-se a um modelamento matemático, o qual serviria de base para a metodologia. Para o desenvolvimento da metodologia foi necessário identificar e especificar as variáveis a considerar. Em paralelo foram levantados os requisitos e condições para os quais a metodologia tem aplicabilidade. A metodologia foi operacionalizada e implementada através de um software adequado, apresentado no Capítulo 3.

Uma vez determinada a forma de operacionalização, a próxima etapa foi de avaliação da metodologia, na qual foram realizados alguns estudos de casos (tanto teóricos, como práticos) /10,11/. Com base nos resultados dos estudos de caso e na experiência da avaliação, o modelo foi aperfeiçoado. Paralelamente, os requisitos a cumprir e condições de aplicabilidade foram complementados. Este aprendizado constitui a essência do Capítulo 4.

O ambiente de desenvolvimento, estudo e pesquisa foi extremamente favorável pela experiência existente e trabalhos em andamento no CMIP – Centro de Metrologia e Inovação em Processos da Fundação CERTI, bem como em algumas de suas empresas clientes, onde foram conduzidos alguns experimentos de avaliação.

capítulo 2

A PRÁTICA ATUAL NA AVALIAÇÃO DOS PROCESSOS DE MEDIÇÃO

Com o objetivo de apresentar uma metodologia de avaliação dos processos de medição que aborde tal temática de forma integral, baseando-se no impacto econômico da operação de controle geométrico, no presente capítulo se desenvolve uma análise da prática atualmente utilizada na indústria. Primeiramente são apresentadas uma série de características a serem consideradas pelos métodos de avaliação, e posteriormente, sete dos métodos mais utilizados atualmente pela indústria para avaliação de processos de medição são descritos.

Com relação às características, é estabelecida uma comparação do desempenho dos diferentes métodos, verificando se estes são sensíveis ou não às mesmas. Por último, e em consequência da comparação, emite-se um parecer em relação à prática atual, fundamentando a necessidade do desenvolvimento de uma nova metodologia.

2.1. ANÁLISE DAS CARACTERÍSTICAS CONSIDERADAS NOS DISTINTOS MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DOS PROCESSOS DE MEDIÇÃO

Para poder definir e comparar os principais métodos atualmente disponíveis para avaliação dos processos de medição, é preciso previamente conhecer as diferentes características metrológicas e operacionais envolvidas. Tais características foram classificadas em cinco subgrupos:

- Projeto Geométrico (PG),
- Sistema de Medição (SM),
- Processo de Medição (PM),
- Processo de Fabricação (PF),
- Características Econômicas e Operacionais.

Estes subgrupos estão relacionados com as três bases do Templo da Conformidade Geométrica. O primeiro subgrupo representa o Projeto, o segundo e terceiro representam a Inspeção, o quarto representa a Fabricação e o quinto é geral e se relaciona às três bases.

2.1.1. Características de Projeto Geométrico (PG)

Para especificar um processo de medição adequadamente, é preciso conhecer perfeitamente a tarefa de medição e caracterizar a grandeza a medir, bem como estabelecer as condições de contorno que envolvem a medição /08/. Isto permite estabelecer tolerâncias que sejam adequadas para a função reservada para tal grandeza. Igualmente errado pode ser o estabelecimento de tolerâncias muito apertadas como tolerâncias muito folgadas. Dessa forma, o conhecimento da geometria necessária ao produto e sua função são requisitos básicos para estabelecer tolerâncias que sejam realmente representativas dos limites de boa operabilidade.

a) Faixa de valores que o mensurando pode assumir (amplitude)

Faixa de valores que o sistema de medição deve permitir medir. O PM utilizado deve permitir cobrir a amplitude de valores possíveis de medir. Se não é possível com um só, empregar um conjunto de sistemas de medição que consiga cobri-la.

b) Tolerância (T)

Faixa de valores dentro da qual a grandeza a medir deverá estar localizada. O processo de medição escolhido deve ter uma “qualidade metrológica” (exatidão e incerteza) compatível com a tolerância da grandeza a medir. Dessa forma, será capaz de discriminar diferentes níveis de peças tanto dentro como fora de tais tolerâncias /12 a 14/.

2.1.2. Características do Sistema de Medição (SM)

Para especificar um processo de medição, deve-se dispor de um SM que cumpra certos requisitos. Dessa forma, tem-se estabelecido quatro características que determinam o comportamento metrológico do SM. Estas são:

a) Resolução (R)

Capacidade de discriminação. O sistema de medição deve ter uma capacidade de discriminação de acordo com as tolerâncias da grandeza a medir. Ele também deve ser capaz de identificar diferentes níveis tanto de peças dentro quanto fora das especificações geométricas.

b) Tendência do sistema de medição (Tdsm)

Erro sistemático de um sistema de medição, tipicamente, determinado através da calibração. Na medida que se possa identificar e quantificar tal tendência durante a calibração, é possível ajustar, regular ou simplesmente descartar um SM para uma tarefa em particular. Caso contrário, na medição, pode-se cometer erros significativos. A Tdsm pode causar um efeito na inspeção de peças muito pior que um erro aleatório da mesma magnitude /15/.

c) Repetitividade, determinada na calibração

Repetitividade das indicações do SM obtida nas condições de calibração (mesmo metrologista, mesmo procedimento de calibração, condições ambientais estáveis, entre outras). As indicações podem variar de uma leitura para outra. Por isso, a calibração requer mais de uma leitura para cada ponto calibrado.

d) Condições de calibração

Condições nas quais a calibração de um sistema de medição é feita e que permitem caracterizá-la, por exemplo: nível metrológico dos padrões, temperatura durante a calibração, nível tecnológico do laboratório e idoneidade dos técnicos, procedimentos empregados, etc. influenciam no resultado da calibração e por conseguinte, na Incerteza do sistema de medição e na rastreabilidade dos resultados das medições feitas pelo SM em questão.

2.1.3. Características do Processo de Medição (PM)

Para especificar um PM, existe uma série de características, além do SM, que determinam seu desempenho metrológico (fig. 1.2). Dessa forma, tem-se estabelecido três aspectos que permitem sua descrição. Estes são:

a) Reprodutibilidade

Variação induzida por distintos operadores fazendo uma mesma tarefa de inspeção, seja em diferentes turnos, diferentes máquinas, diferentes SMs de uma mesma família, etc.

b) Condições de medição

Condições metrológicas reais presentes na medição que determinam o comportamento metrológico do PM, por exemplo: facilidade para posicionar-se sobre o mensurando, tamanho da peça, forma da peça, forma do contato, força de medição, temperatura ambiental durante a medição, presença de poeira e/ou lubrificante, rebarbas, vibrações, fadiga do operador, iluminação, facilidade de acesso à zona de medição, agressividade do ambiente, etc. (fig. 2.1) /16/. Estas condições geram tendência e/ou incerteza de medição.

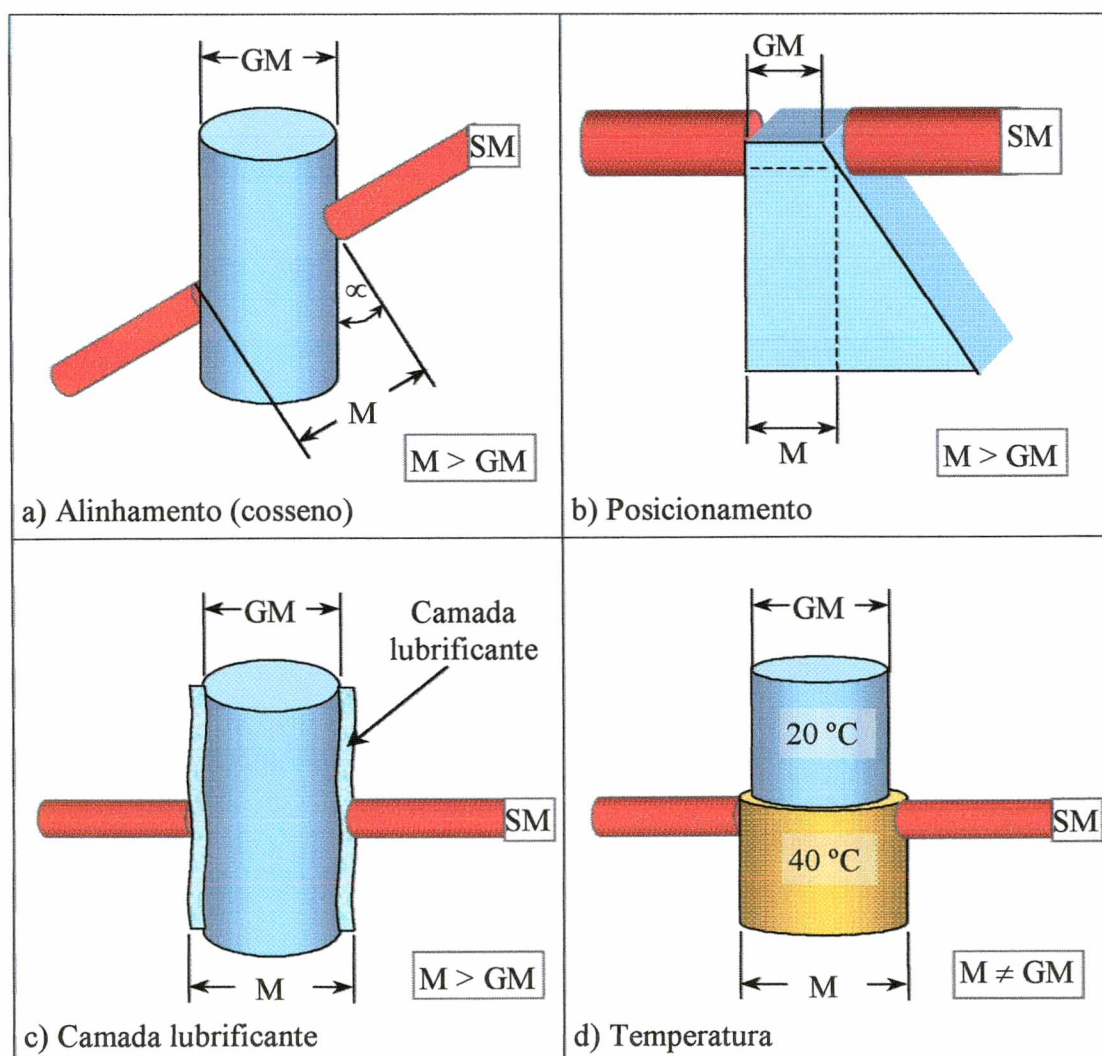


Figura 2.1: Alguns erros típicos ($M - GM$) na captação da grandeza geométrica de interesse GM.

No caso dos erros sistemáticos representados pela T_{dpm} , sua identificação, quantificação e sua correção são muito importantes, já que produzem problemas muito mais significativos que erros aleatórios da mesma magnitude. Na figura 2.1, são apresentados quatro casos onde a presença de erros de medição pode mudar significativamente a qualidade metrológica dos resultados. Dessa forma, o PM fornece uma Medida (M) diferente do valor verdadeiro da Grandeza a Medir (GM).

c) Estabilidade das indicações

Comportamento das indicações no tempo, seja no curto ou médio prazo. É importante que o PM tenha um comportamento estável ou que no mínimo tal variação seja considerada entre calibrações do SM respectivo.

Muitas vezes o comportamento metrológico do SM é utilizado como estimador do comportamento do PM. Esta hipótese poderia ser utilizada somente quando as condições de medição são similares às condições para as quais o SM foi calibrado. Dessa forma, tanto a T_{dsm} como a U_{sm} poderiam permitir estimar a T_{dpm} e a U_{pm} respectivamente; mas, quando o processo de medição apresenta erros importantes, tanto o valor da T_{dpm} como da U_{pm} podem variar significativamente. Nesse caso tal simplificação pode levar a consideráveis erros.

2.1.4. Características do Processo de Fabricação (PF)

O processo de fabricação tem uma importância muitas vezes desconsiderada na tarefa de avaliar um PM. Na medida que forem disponíveis PFs mais capazes, diminui a probabilidade de se gerar peças fora ou próximas dos limites de especificação, minimizando a possibilidade de classificação errônea. Dessa forma, as duas características que determinam o desempenho do PF são:

a) Tendência do processo de fabricação

Desvio do valor médio da grandeza a medir, provocado pelo processo de fabricação. Os requisitos a serem atingidos pelo processo de medição devem ser mais exigentes numa situação de PF incapaz devido a tendência significativa, na medida que esse processo de fabricação produz mais peças nos limites de tolerância (fig. 2.2.b e fig. 2.2.d). Tal tendência provoca então um aumento na probabilidade de rejeição de peças.

b) Variabilidade do processo de fabricação

Dispersão de valores da grandeza a medir num mesmo processo de fabricação. Os requisitos a serem atingidos pelo PM devem ser mais exigentes numa situação de processo de fabricação incapaz devido à alta variabilidade, na medida que esse processo produz mais peças nos limites de tolerância (fig. 2.2.c e fig. 2.2.d). A variabilidade provoca então um aumento na probabilidade de rejeição de peças.

2.1.5. Características Operacionais e Econômicas

Para especificar um PM, existe uma série de características, tanto operacionais como econômicas que podem ser consideradas. Dessa forma, tem-se estabelecido três características importantes. Estas são:

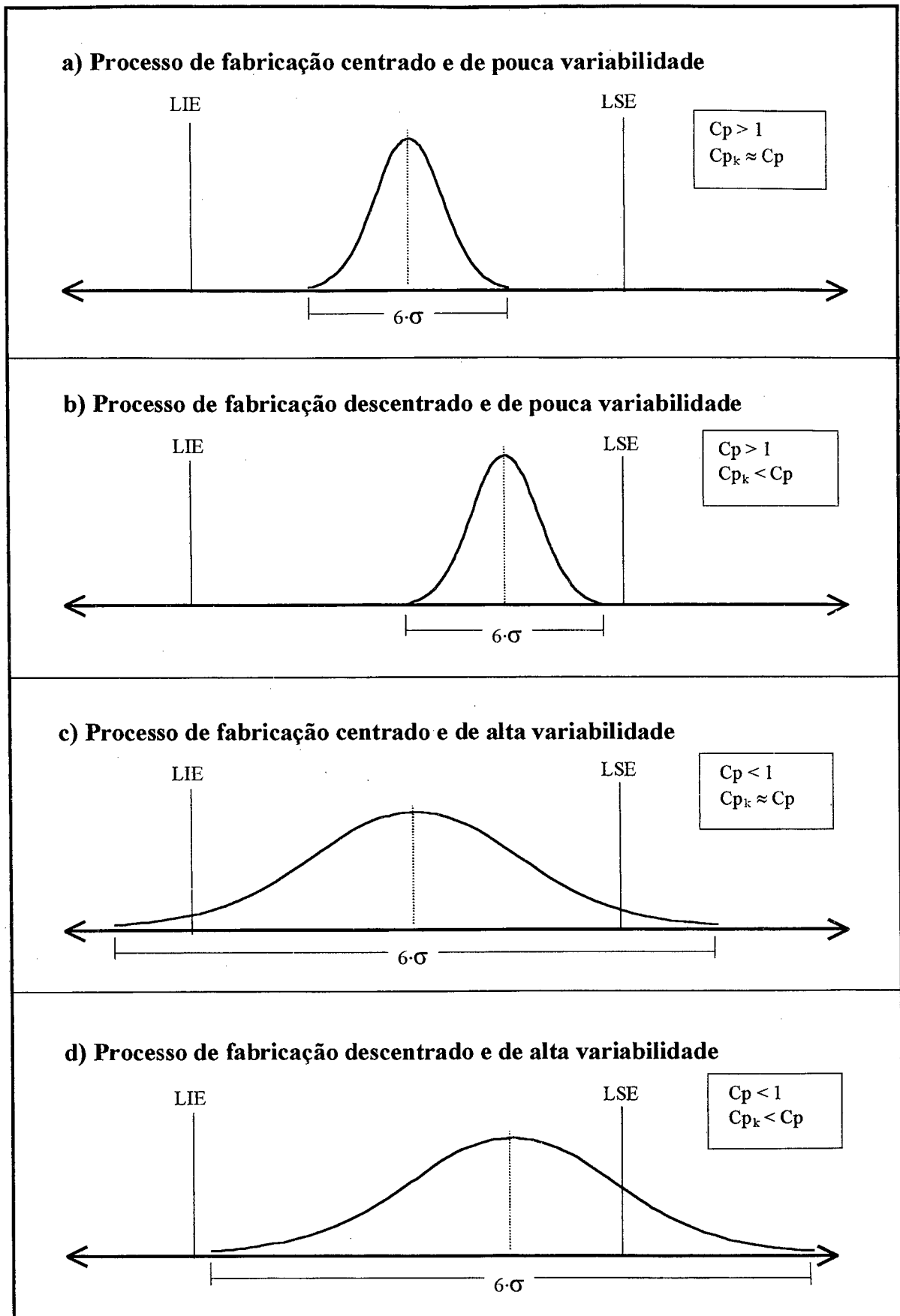


Figura 2.2: Diferentes processos de fabricação para uma mesma especificação de tolerância.

a) Simplicidade

Uma característica muito importante no nível industrial é a disponibilidade de ferramentas de avaliação que sejam simples, tanto na implementação como na manutenção. Isso se refere à facilidade para se achar uma solução, considerando tempos, custos, conhecimentos e cálculos envolvidos. Se estes forem muito complexos, a opção deixa de ser interessante para a empresa.

b) Intercambiabilidade dos sistemas de medição

Outra característica operacional muito importante, refere-se à possibilidade de poder utilizar indistintamente diferentes SMs de uma mesma família ou de diferentes famílias para uma mesma tarefa de medição. Este requisito é fundamental no âmbito industrial, onde os sistemas de medição não ficam sempre no mesmo lugar nem com a mesma pessoa e onde geralmente todos os SMs da mesma família são considerados metrologicamente “iguais” (permitem realizar as mesmas tarefas).

c) Custos da qualidade

Um processo de medição será adequado para uma tarefa de medição somente se permitir minimizar custos relativos à qualidade. Os custos envolvidos (prevenção, avaliação, falha interna, falha externa) dependem de cada empresa, cada processo e cada caso particular /08, 09, 17/. Na figura 2.3 é apresentada uma lista de algumas das principais fontes de custos associados à Conformidade Geométrica de peças. A identificação e quantificação das componentes dos custos da qualidade requerem um amplo conhecimento tanto dos processos como dos produtos.

QUADRO DE EXEMPLOS DE CUSTOS DA CONFORMIDADE GEOMÉTRICA	
<u>Prevenção</u>	<u>Avaliação</u>
<ul style="list-style-type: none"> • Treinamento do pessoal, • Compra ou manutenção de máquinas-ferramenta, • Conscientização e motivação para a qualidade, • Estudos estatísticos de capacidade de processo de fabricação, • Revisão de especificações de desenho. 	<ul style="list-style-type: none"> • Inspeção de peças, • Implementação e manutenção de metodologias de avaliação dos PMs, • Aquisição de sistemas de medição, • Calibração e verificação dos SMs, • Implementação e manutenção de condições ambientais, • Supervisão de inspetores.
<u>Falha Interna</u>	<u>Falha Externa</u>
<ul style="list-style-type: none"> • Matéria prima sucateada, • Valor agregado de produtos sucateados (processos prévios), • Reprocesso, • Reinspeção, • Problemas na montagem ou em etapas posteriores da fabricação, 	<ul style="list-style-type: none"> • Perda de imagem da empresa, • Perda de clientes, • Garantia, • Retrabalho de produtos retornados, • Análise de falha , • Transporte.

Figura 2.3: Exemplos de custos da qualidade que dependem do processo de medição implementado

Dado que os custos da qualidade estão formados tanto pelos custos de conformidade como pelos custos da não conformidade, a otimização dos custos da qualidade requer um conhecimento de todas as fontes de custos envolvidas. Não faz sentido diminuir os custos de avaliação (tipicamente de inspeção) se os custos de falha aumentam em maior escala. Por outro lado, também não é inteligente melhorar a prevenção ou a avaliação se os custos de falha não diminuem em maior proporção. Desta forma, o impacto da avaliação de um PM depende da composição dos custos da qualidade. Por exemplo, não é o mesmo rejeitar uma peça de aço, uma de alumínio ou titânio. Tampouco é o mesmo rejeitar uma peça inspecionada de alto valor, que já passou por uma grande quantidade de processos em relação à mesma peça que apenas está saindo da fundição, etc.

2.2. MÉTODOS EXISTENTES PARA A AVALIAÇÃO DOS PROCESSOS DE MEDIÇÃO

Hoje em dia, a tarefa de especificar e avaliar um PM é realizada de muitas formas distintas, não existindo um consenso em relação à melhor forma de realizá-la. O tema tem sido tratado largamente na literatura, especialmente com a implementação dos sistemas de gestão da qualidade como ISO 9000 /01, 07, 18, 19/. Estes estabelecem requisitos específicos em relação à necessidade de dispor de processos de medição adequados para o controle das GMs.

Em muitos casos a avaliação dos processos de medição é feita informalmente, sem existência de procedimentos adequados nem documentados. Paralelamente, por desconhecimento ou comodidade, muitas vezes não são consideradas todas as características que influenciam no desempenho metrológico do PM, chegando em muitos casos a considerar apenas a influência do SM. Esta simplificação, tal como foi exposta anteriormente, pode produzir erros importantes na avaliação do processo de medição, particularmente por superestimar seu desempenho.

Na figura 2.4 propõe-se um quadro comparativo do desempenho metrológico de cada método em relação às diferentes características previamente descritas. São identificadas, para cada método, as características que este considera ou às quais é sensível. Na sequência é detalhado o enquadramento de cada método em relação às diferentes características.

Para uma empresa, um método poderá ser considerado como “robusto”, caso o mesmo leve em conta as características que a própria empresa considera como importantes. Dessa forma, variações no comportamento das características, serão “identificadas” pelo PM e medidas poderão ser tomadas de modo a sempre se dispor de PM que permitam assegurar a conformidade geométrica das peças.

A seguir, far-se-á descrição dos métodos mais comuns, identificando vantagens e desvantagens.

2.2.1. Método: EMPÍRICO

Método sem sistemática, baseados no próprio critério, conhecimentos, experiência, etc.:

- Vantagens: Simples e rápido.

- Desvantagens: Exige pessoas com larga experiência prática. Isto é muito difícil e não pode ser considerado como uma opção válida.

Dada suas características peculiares, este método não será considerado no estudo.

CARACTERÍSTICAS		MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DOS PROCESSOS DE MEDIÇÃO					
Subgrupo	Características	Resolução	Erro Máximo	Incerteza do Sistema de Medição	Incerteza do Processo de Medição	ISO 14253	MSA
Projeto de Geometria	Faixa de medidas	●	●	●	●	●	●
	Tolerância	●	●	●	●	●	●
Sistema de Medição	Resolução	●	●	●	●	●	●
	Tendência	○	●	●	●	●	●
	Repetitividade	○	○	●	●	●	●
	Condições de calibração	○	○	●	●	●	◐
Processo de Medição	Reprodutibilidade	○	○	○	●	●	●
	Condições de medição	○	○	○	●	●	◐
	Estabilidade	○	○	○	◐	◐	●
Processo de Fabricação	Tendência	○	○	○	○	◐	●
	Variabilidade	○	○	○	○	◐	●
Econômicos Operacionais	Simplicidade	●	◐	◐	○	○	○
	Intercambiabilidade	●	◐	◐	○	○	○
	Custos da qualidade	○	○	○	○	○	○

●: O método considera a característica em questão.
 ◐: O método considera parcialmente a característica em questão.
 ○: O método não considera a característica em questão.

Figura 2.4: Abrangência dos métodos de avaliação dos processos de medição.

2.2.2. Método: RESOLUÇÃO

Este método postula a utilização da resolução (R) do sistema de medição como critério de verificação de adequabilidade /16/. Recomenda utilizar SM com resolução entre um terço e um décimo da tolerância de projeto, dependendo da importância da grandeza controlada e das consequências derivadas de erros de classificação:

$$R \leq \begin{cases} \frac{T}{3} & \text{Relação menos exigente} \\ \frac{T}{10} & \text{Relação mais exigente} \end{cases} \quad (2.1)$$

- Vantagens: Simples, característica fácil de conhecer, valor único e fixo para toda uma família de SM.
- Desvantagens: Método insuficiente dado que não é sensível a muitas características de interesse apenas considerando aspectos do SM. Além disso, em alguns sistemas, especialmente os digitais, a resolução não é necessariamente um bom indicador da sua qualidade metrológica. O SM pode apresentar erros dezenas e até centenas de vezes maiores que o valor da resolução. Método não válido para calibradores fixos.

Dadas os problemas apresentados por este método, sua aplicação não é recomendada. A equação 2.1 é um absurdo, e só teria alguma aplicabilidade se ao invés de utilizar um divisor três ou dez, utiliza-se um divisor dez vezes mais exigente ($T/30$ ou $T/100$). Ainda nesses casos a resolução não é um bom indicador do desempenho metrológico do PM considerado. Método inválido.

2.2.3. Método: ERRO MÁXIMO

Este método postula utilizar a tendência máxima do SM (sem considerar a incerteza associada) como critério de verificação da adequabilidade. Recomenda-se utilizar SM com erro máximo nominal de até a quarta parte da tolerância de projeto. Sua aplicação tem sido usada no desenvolvimento de software de determinação de adequabilidade baseados neste método /01, 20, 21, 22/:

$$\text{Erro máximo} \leq \frac{T}{4} \quad (2.2)$$

- Vantagens: Método relativamente simples. No caso de sistemas de medição novos, o erro máximo admissível (tolerado) é uma característica fácil de ser encontrada nos manuais do fabricante (tipicamente como “accuracy”) e dá uma idéia do máximo erro que pode apresentar tal sistema de medição. Este é um método mais completo na medida que o erro máximo varia de SM para SM e de calibração para calibração. Já considera o fato de que o desempenho metrológico do sistema de medição tem que ser avaliado (a diferença da resolução que é uma característica fixa para cada um) e que sua qualidade metrológica pode variar (entre SM da mesma família, em relação ao tempo).
- Desvantagens: Método insuficiente dado que não é sensível a muitas características de interesse, só considerando alguns aspectos relacionados com o SM. Muitas vezes é usado o erro máximo admissível declarado pelo fabricante como indicador do comportamento do SM, sem avaliar o real estado de funcionamento do mesmo.

2.2.4. Método: INCERTEZA DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

Este método postula a utilização da incerteza máxima do sistema de medição nas condições de calibração (U_{sm}), como critério para verificação da adequabilidade. Recomenda-se utilizar sistemas de medição com incerteza entre um terço e um décimo da tolerância de projeto, dependendo da importância da grandeza controlada e das conseqüências derivadas de erros de classificação. Sendo de um terço no caso de grandezas não críticas, um décimo se a grandeza é crítica e um valor intermediário se a grandeza tem

uma importância relativa. No caso de grandezas muito críticas, pode ser utilizada uma relação ainda mais exigente, por exemplo de trinta vezes.

A U_{sm} corresponde àquela incerteza própria do SM determinada no laboratório de calibração. Representa o melhor desempenho que poderia apresentar o PM desde que sejam respeitadas na medição, as mesmas condições presentes na calibração (condições ambientais, capacitação técnica, método de uso, limpeza, etc.) /23, 24/.

$$U_{sm} \leq \begin{cases} \frac{T}{3} & \text{Relação menos exigente} \\ \frac{T}{10} & \text{Relação mais exigente} \end{cases} \quad (2.3)$$

- Vantagens: Válido para qualquer SM, inclusive calibradores fixos. Considera mais características que os métodos anteriores (condições de calibração).
- Desvantagens: Um pouco complexo e cara uma vez que requer de calibração periódica e que varia de SM para SM, inclusive de calibração para calibração de um mesmo sistema de medição. Muitas vezes esta informação não está disponível no momento da compra dos mesmos. Não considera os custos da qualidade.

2.2.5. Método: INCERTEZA DO PROCESSO DE MEDIÇÃO

Este método postula a utilização da U_{pm} , como critério para verificação de adequabilidade. Recomenda-se utilizar um PM com incerteza entre um terço e um décimo da tolerância do projeto, dependendo da importância da grandeza controlada e das consequências derivadas de erros de classificação. Sendo de um terço no caso de grandezas não críticas, um décimo se a grandeza é crítica e um valor intermediário se a grandeza tem uma importância relativa.

A U_{pm} corresponde àquela incerteza obtida nas condições reais de medição e considera todas as fontes de incerteza presentes na medição /08, 25, 26/.

$$U_{pm} \leq \begin{cases} \frac{T}{3} & \text{Relação menos exigente} \\ \frac{T}{10} & \text{Relação mais exigente} \end{cases} \quad (2.4)$$

- Vantagens: Método robusto na medida que, em adição às vantagens do método anterior, considera todas as características presentes durante a medição, tais como reprodutibilidade entre operadores, condições de medição.
- Desvantagens: Método complexo na medida que requer um estudo particular para cada aplicação de cada SM, avaliando todas as fontes de incerteza presentes (reprodutibilidade, condições durante as medições, estabilidade). Cada processo de medição (sistema de medição, operador, ambiente, peça a medir, condições) tem sua

própria incerteza, o que dificulta a intercambiabilidade. Não considera aspectos do processo de fabricação nem dos custos da qualidade. Dada sua complexidade, são poucas as empresas que empregam este método /01/.

No processo de medição, existe uma infinidade de fontes de erro que podem afetar os resultados da medição, além do próprio SM (fig. 2.5). Muitas vezes, a incerteza herdada da calibração do sistema de medição é desprezível em relação a outras fontes como temperatura, operador, método de medição /27/. Dessa forma, persiste-se na afirmação de não considerar somente o SM como estimador do comportamento metrológico do PM. Da mesma forma que o método anterior, a incerteza deve ser determinada de acordo com as recomendações da ISO GUM /23, 24/. Este método satisfaz plenamente os requisitos de avaliação que impõem as normas ISO 9000, QS 9000 e outras.

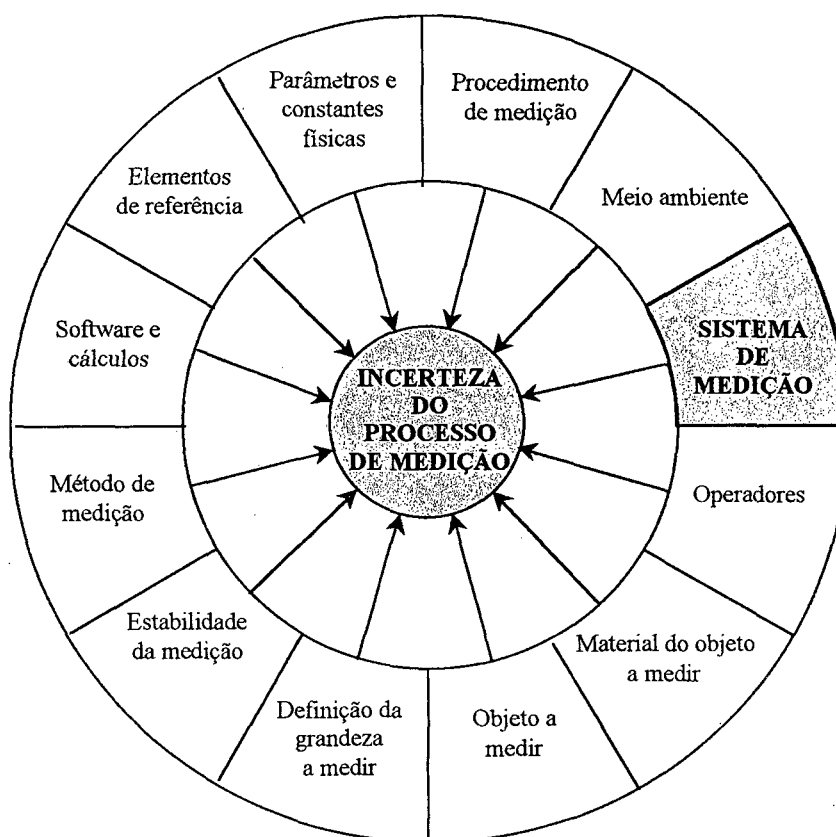


Figura 2.5: Fontes de incerteza que afetam o resultado de uma medição

Devido à complexidade de determinar a U_{pm} em relação à relativa simplicidade de determinar U_{sm} , e com o propósito de não subestimá-la e gerar resultados inexatos, recomenda-se considerar ao menos as seguintes fontes de incerteza de medição:

- Diferença de temperatura entre peça e sistema de medição, considerando a máxima diferença. Considerar distribuição retangular como medida de segurança (fig. 2.1.d).
- No caso de o SM e a peça serem de materiais com coeficientes de expansão térmica muito diferentes, por exemplo, aço e alumínio, tal condição deve ser avaliada.
- Consistência dos resultados dos operadores e relação entre os resultados obtidos por diferentes operadores para uma mesma tarefa de inspeção: uma possibilidade para avaliar esta fonte, é realizar um estudo de repetitividade e reprodutibilidade (R&R).

- Efeito da presença de impurezas ou de camadas de lubrificante na medição: este tipo de problema geralmente produz erros sistemáticos nos resultados. Dessa forma, uma análise de tendência permitiria avaliar o efeito deste tipo de erro sobre os resultados das medições (fig. 2.1.c).
- Outro tipo de erro sistemático de medição: Por exemplo, erro de cosseno (fig. 2.1.a), erro devido à dificuldade de se posicionar sobre o mensurando (fig. 2.1.b), erro de Abbe, influência da forma dos contatos, etc.

2.2.6. Método: NORMA ISO 14253-1

Esta norma estabelece limitações à aceitação ou rejeição de peças dependendo da tolerância da grandeza a medir e da incerteza do processo de medição (U_{pm}). Por exemplo, para o caso de inspeção com especificações geométricas bilaterais, aceita-se somente as peças cujas medidas (M) encontrem-se dentro da faixa indicada na equação 2.5, sendo LIA o limite inferior de aceitação (equação 2.6) e LSA o limite superior de aceitação (equação 2.7). Por sua vez, LIE e LSE representam respectivamente o limite inferior de especificação e limite superior de especificação /28, 29/.

$$LIA \leq M \leq LSA \quad (2.5)$$

Onde:

$$LIA = LIE + U_{pm} \quad (2.6)$$

$$LSA = LSE - U_{pm} \quad (2.7)$$

Dessa forma, gera-se uma zona de dúvida proporcional ao Deslocamento dos Limites de Especificação (DLE), neste caso com um valor de U_{pm} (fig. 2.6). O fornecedor deve provar conformidade e o cliente deve provar não-conformidade /27, 28/.

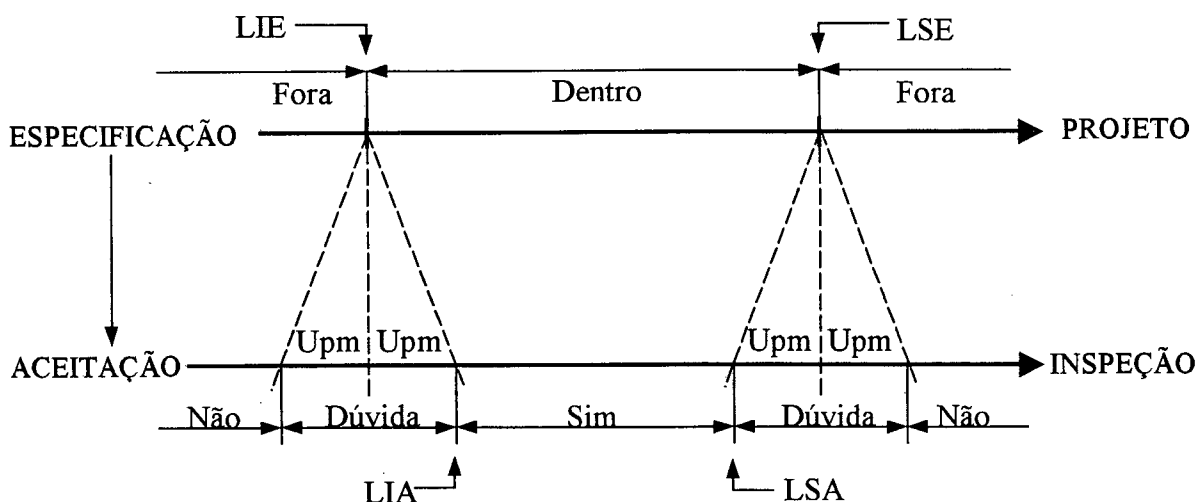


Figura 2.6: Efeito da incerteza de medição sobre os limites de aceitação da grandeza medida

Para o caso dos fornecedores, na medida que a Upm seja maior, aumenta a probabilidade de não se conseguir provar a conformidade das peças. Embora este método limite a probabilidade de aprovação de peças fora das especificações geométricas, aumenta a probabilidade de que peças boas possam ser rejeitadas. Assim, a especificação da Upm será um assunto relativo à política da empresa.

- **Vantagens:** Este método permite diminuir o custo de falha externa, na medida que teoricamente elimina o número de peças não conformes erroneamente aceitas na inspeção. Consiste num método a favor da segurança, na medida que são aceitas somente aquelas peças que se encontram dentro destes novos limites mais apertados (LIA, LSA). Além disso, considera indiretamente o processo de fabricação, na medida que processos incapazes produzem maior número de peças na região de dúvida. Nesses casos é mais importante diminuir a incerteza.
- **Desvantagens:** Tem praticamente as mesmas desvantagens do método da Upm, embora permitindo relacionar indiretamente o processo de medição com o processo de fabricação. Fora isso, é complexo na medida que gera uma nova classe de peças (dúvida) as quais teriam que ser rejeitadas ou reinspeccionadas com um PM melhor. Por outro lado, embora diminua o custo de falha externa, o custo de falha interna pode aumentar de forma mais significativa, fazendo com que o custo total da qualidade aumente.

2.2.7. Método: MSA – ANÁLISE DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO

Este método se baseia no documento MSA das normas QS 9000 /30/. Estabelece uma série de requisitos em relação ao PM e particularmente em relação ao SM. Limita tanto a resolução, tendência de medição, R&R, linearidade e estabilidade a valores não maiores que um décimo da tolerância numa primeira instância e posteriormente, a um décimo da variabilidade do processo de fabricação /31/.

$$\left. \begin{array}{l} \text{Resolução} \\ \text{Tdpm} \\ \text{R \& R} \\ \text{Linearidade} \\ \text{Estabilidade} \end{array} \right\} \leq \frac{T}{10} \quad (2.8)$$

- **Vantagens:** Método a favor da segurança, muito robusto, considera características do projeto, sistema de medição, processo de medição e do processo de fabricação.
- **Desvantagens:** Não considera de forma robusta aspectos como condições de calibração nem as condições de medição e tampouco considera os custos da qualidade. Exige uma série de requisitos que devem ser satisfeitos em paralelo, além de exigir que o processo de fabricação esteja sob controle estatístico e seja capaz (índice Cp e Cpk maior a 1,33). Dado os requisitos do método, a intercambiabilidade entre sistemas de medição fica limitada.
Além disso, a terminologia é complexa e não muito compatível com o Vocabulário Internacional -VIM /23, 32/.

2.3. COMPARAÇÃO ENTRE MÉTODOS

O método de avaliação utilizado pelas empresas depende basicamente do seu “nível tecnológico”, mercado alvo (especialmente exigindo certificação ISO 9000, QS 9000 e outras) e por último do porte da empresa. No caso das empresas com uma abordagem mais profunda da temática, os métodos mais utilizados são o método da Usm e o método MSA (no caso de empresas certificadas QS 9000). No caso de empresas que tratam a temática de forma mais simplificada, os métodos mais utilizados são resolução, erro máximo e em muitos casos apenas métodos empíricos. São poucas as empresas onde se constatou que as condições reais de medição são levadas em conta.

Comparando o desempenho dos métodos entre si (fig. 2.4), as principais conclusões são:

- a) Em geral, e particularmente no caso das empresas que tem requisitos metrológicos médios ou altos, não se recomenda a utilização do método da Resolução e do Erro Máximo. Embora sejam simples de aplicar e sua aplicação esteja amplamente difundida, desconsideram uma série de variáveis que podem ser críticas (altos custos da qualidade associados), inclusive no caso de medições aparentemente simples. Particularmente o método da Resolução como foi apresentado anteriormente, é um método impróprio.
- b) O método da Incerteza do Sistema de Medição, embora seja muito mais robusto que o método da resolução e do erro máximo (dado que considera características da calibração), não considera aspectos como as condições de medição nem fabricação. O comportamento do processo de fabricação influencia diretamente o número de peças que podem estar no limite de aceitação e porém podem ser erroneamente classificadas pelo processo de medição. Sua utilização poderia ser considerada no caso da inspeção não apresentar erros importantes além do efeito do próprio sistema de medição (tais como as apresentadas na figura 2.1).
- c) O método da Incerteza do Processo de Medição é mais completo que o método da Incerteza do Sistema de Medição dado que considera as condições reais presentes na medição. Entretanto, requer um alto nível de conhecimentos e de gestão da qualidade exigindo uma análise particular para cada aplicação (condições ambientais, operadores, mensurando, etc).
- d) O método da ISO 14253-1 é recomendável para empresas onde não é aceitável a existência de falhas externas (o cliente não pode receber peças fora da especificação), seja por importância econômica e estratégica do cliente, por assuntos de segurança, etc. Este método pode aumentar significativamente o custo de falhas internas e inclusive repercutir num aumento dos custos totais da qualidade.
- e) O método do MSA, embora seja bastante robusto, utiliza uma sistemática e terminologia muito particular, o que restringe em parte seu uso às empresas certificadas segundo a norma QS 9000.
- f) Nenhum método considera diretamente a variável custos da qualidade e, mais especificamente, os custos de falha. Dessa forma, não há distinção entre peças de diferentes preços, materiais, tamanhos, número e tipos de processos de fabricação pelos quais a peça é processada, etc. Dessa forma, não é possível quantificar o efeito de mudar de processo de medição em função dos custos ou benefícios econômicos obtidos.

Devido às exigências impostas pelos sistemas da qualidade, como ISO 9000, existe uma forte tendência a mudar para métodos mais robustos como o da Incerteza do Processo de Medição. Embora este método ainda não esteja muito difundido nem aceito devido a sua complexidade.

2.4. PARECER COM RESPEITO À PRÁTICA ATUAL

Segundo o modo de ver do autor, e em virtude do conteúdo apresentado neste capítulo, não existe um método de avaliação dos processos de medição que seja plenamente robusto, ou seja, que permita especificar sempre um processo de medição adequado para cada tarefa de medição. Particularmente, nenhum deles considera a variável custos de erros de classificação das peças inspecionadas, por exemplo de sucatear uma peça boa ou aceitar uma peça fora de especificação.

Na medida que fosse possível dispor de um método que considere a variável custo, ele não só permitiria avaliar diferentes opções de processos de medição, mas também diferentes alternativas de processo de fabricação e de projeto geométrico. Deste modo, seria possível determinar a melhor relação entre as diferentes variáveis envolvidas, de forma a minimizar os custos da qualidade relacionados à conformidade geométrica das peças.

Considerando a prática atual na avaliação de processos de medição e dada a necessidade de desenvolvimento de uma nova alternativa, a seguir é apresentada uma metodologia inovadora que permite determinar a melhor opção de processo de medição, baseada no impacto econômico da operação de controle geométrico.

capítulo 3

PROPOSTA DE METODOLOGIA INOVADORA

Com base na situação apresentada no Capítulo 2, é necessário definir uma metodologia para avaliação dos processos de medição a qual possa satisfazer, de uma forma inovadora, os requisitos não satisfeitos pelos métodos atualmente disponíveis.

3.1. ASPECTOS CONSIDERADOS NO MODELAMENTO

A metodologia deve considerar os custos da qualidade associados à conformidade e não conformidade geométrica das peças (prevenção, avaliação, falha interna e falha externa), na medida que estes custos são função direta de uma série de características do projeto geométrico (PG), do processo de fabricação (PF), do processo de medição (PM) e da aplicação dada pelo cliente externo ou cliente final onde são gerados os custos de falha externa (fig. 3.1).

Dessa forma, ao realizar-se o levantamento de custos da qualidade para diferentes alternativas de PM, será possível compará-las e escolher aquela que tenha os menores custos da qualidade associados. Dessa forma, na identificação do PM mais adequado, também será possível chegar a conclusões em relação ao comportamento dos diferentes aspectos que influenciam na medição, tais como calibração do SM, condições ambientais, método de medição e operadores (fig. 1.2).

3.1.1. Premissas

Embora a metodologia seja focada na adequabilidade dos PMs, ela também permitirá avaliar o efeito das variações das condições de PG e do PF sobre os custos da qualidade. Para quantificar os custos, será necessário identificar os tipos de erros de classificação possíveis, tanto de peças dentro, quanto de peças fora das especificações de tolerância. Os tipos de erros de classificação dependem do tipo de inspeção considerado (fig. 3.2).

Para quantificar a probabilidade de ocorrência dos diferentes tipos de erros de classificação, deve-se determinar o comportamento tanto da medida (M) quanto da grandeza a medir (GM). A primeira é conhecida e obtida através da aplicação de um PM e a segunda é desconhecida somente identificável pela utilização de um PM ideal (sem tendência nem incerteza de medição). Embora a metodologia seja aplicável a qualquer tipo de GM, este trabalho será focalizado no controle de dimensões geométricas, particularmente no controle de comprimentos.

Por exemplo, no caso de inspeções com especificações geométricas bilaterais (fig. 3.2.a) tem-se, segundo classificação efetiva: peças reprovadas com M fora das especificações (pequenas ou grandes) e peças aprovadas. Esta classificação depende do PM utilizado. No caso de uma peça aprovada, pode-se tratar na verdade de uma peça com GM dentro do intervalo de aceitação (classificação certa) quanto fora (classificação errada).

Dessa forma, a variedade de tipos de eventos possíveis dependerá do método de inspeção, sendo em número de nove no caso da figura 3.2.a. Neste caso específico, para cada um dos três tipos de eventos, segundo classificação ideal, o PM pode classificar de até três formas diferentes. Uma vez que o desempenho metrológico do PM se afasta do ideal (ou seja aumento da Upm e/ou da Tdpm), aumenta a probabilidade de errar na classificação.

ETAPA		CUSTOS DA QUALIDADE			
Projeto Geométrico		Custos de Prevenção			
Processo de Fabricação		Custo de Avaliação	Custo de Falha Interna		
Processo de Medição					
Aplicação (cliente externo)					Custo de Falha Externa

Figura 3.1: Origem dos custos da qualidade associados à conformidade geométrica.

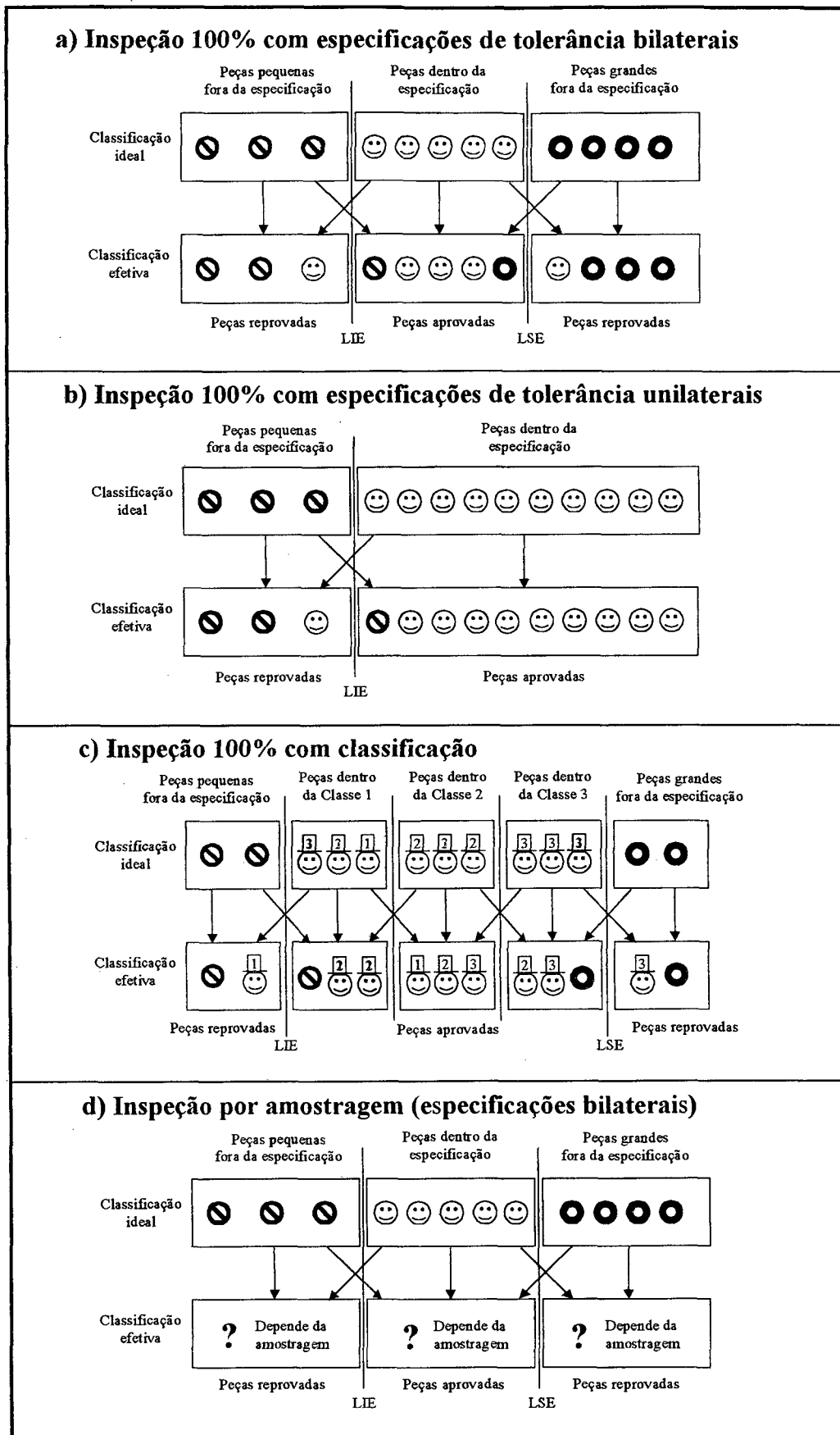


Figura 3.2: Erros na classificação por causa dos processos de medição.

3.1.2. Determinação dos custos da qualidade, relacionados à tarefa de inspeção

O interesse deste trabalho reside sobre a determinação do custo total da qualidade dos aspectos relacionados com a tarefa de inspeção. Como foi apresentado na figura 1.4, estes são classificados em Custos da Conformidade (custos de prevenção e avaliação) e Custos da Não Conformidade (custos de falha interna e falha externa), estes últimos são particularmente complexos de quantificar. Para determinar tais custos de falha, apresenta-se a seguir uma metodologia inovadora que depende da classificação geométrica das respectivas peças.

Na prática, na inspeção de peças, obtém-se uma classificação "efetiva" que difere da classificação "ideal" que poderia ser efetuada caso o PM fosse ideal. Nesse caso, não existe custo de falha, uma vez que o cliente externo não receberia peças fora das especificações geométricas, nem seriam rejeitadas peças boas, como ocorre na prática. Dessa forma seria possível determinar o Custo da Não Conformidade devido à utilização de um PM não ideal (fig. 3.3). Somando tais custos aos custos de prevenção e avaliação, é possível determinar os custos totais da qualidade.

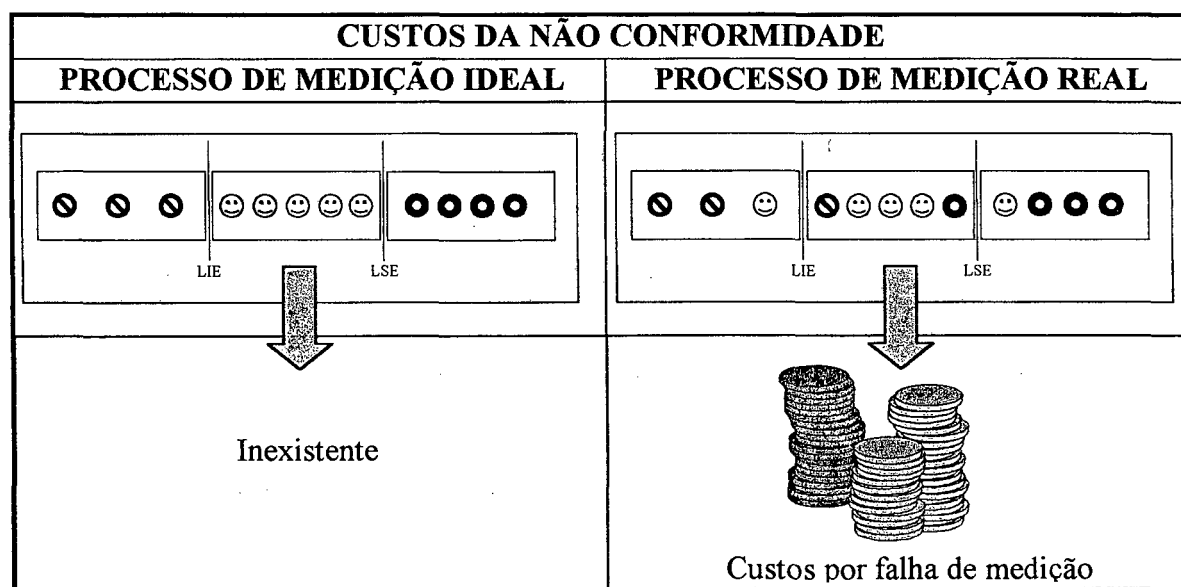


Figura 3.3: Custos da Não Conformidade devido à utilização de processos de medição não ideais.

Para determinar os custos totais, é necessário identificar tanto os custos fixos quanto os variáveis. Entendem-se como custos fixos aqueles relacionados à solução de inspeção implementada, independente do número de peças inspecionadas. Por sua vez, os custos variáveis são aqueles que dependem diretamente da classificação feita. Tipicamente, os custos fixos estão relacionados com as tarefas de prevenção e avaliação em quanto que os custos variáveis estão mais relacionados com as falhas internas e/ou externas.

Para a determinação dos custos de falha, é preciso determinar tanto o número de peças de cada tipo erroneamente classificadas, quanto o custo unitário associado a cada tipo de erro. Na equação 3.1, é esquematicamente apresentada a forma de calcular tal custo. Nesta equação, o número de tipos de eventos diferentes associados a erros de inspeção (f) depende de cada tipo de inspeção. Para a determinação do número de peças afetadas por

cada tipo de erro, é preciso conhecer a probabilidade de ocorrência do mesmo, assim como o número total de peças produzidas no período do estudo.

$$\text{Custo de Falha} = \sum_{i=1}^f p_i \cdot N \cdot C_i \quad (3.1)$$

Onde:

- i: Índice que representa os tipos de eventos diferentes que provocam erros
- f: Número total de tipos de eventos diferentes que provocam erros ($i = 1 \dots f$)
- p_i : Probabilidade de ocorrência do erro tipo "i"
- N: Número total de peças produzidas no período de estudo
- C_i : Custo unitário do erro na classificação de uma peça do tipo "i"

A determinação da probabilidade de ocorrência dos diferentes tipos de erro é o principal aporte inovador deste trabalho. Para a determinação da probabilidade de ocorrência de cada tipo de erro, será necessário desenvolver um modelo que leve em consideração as diversas variáveis relacionadas com PG, PF e PM (fig. 3.4).

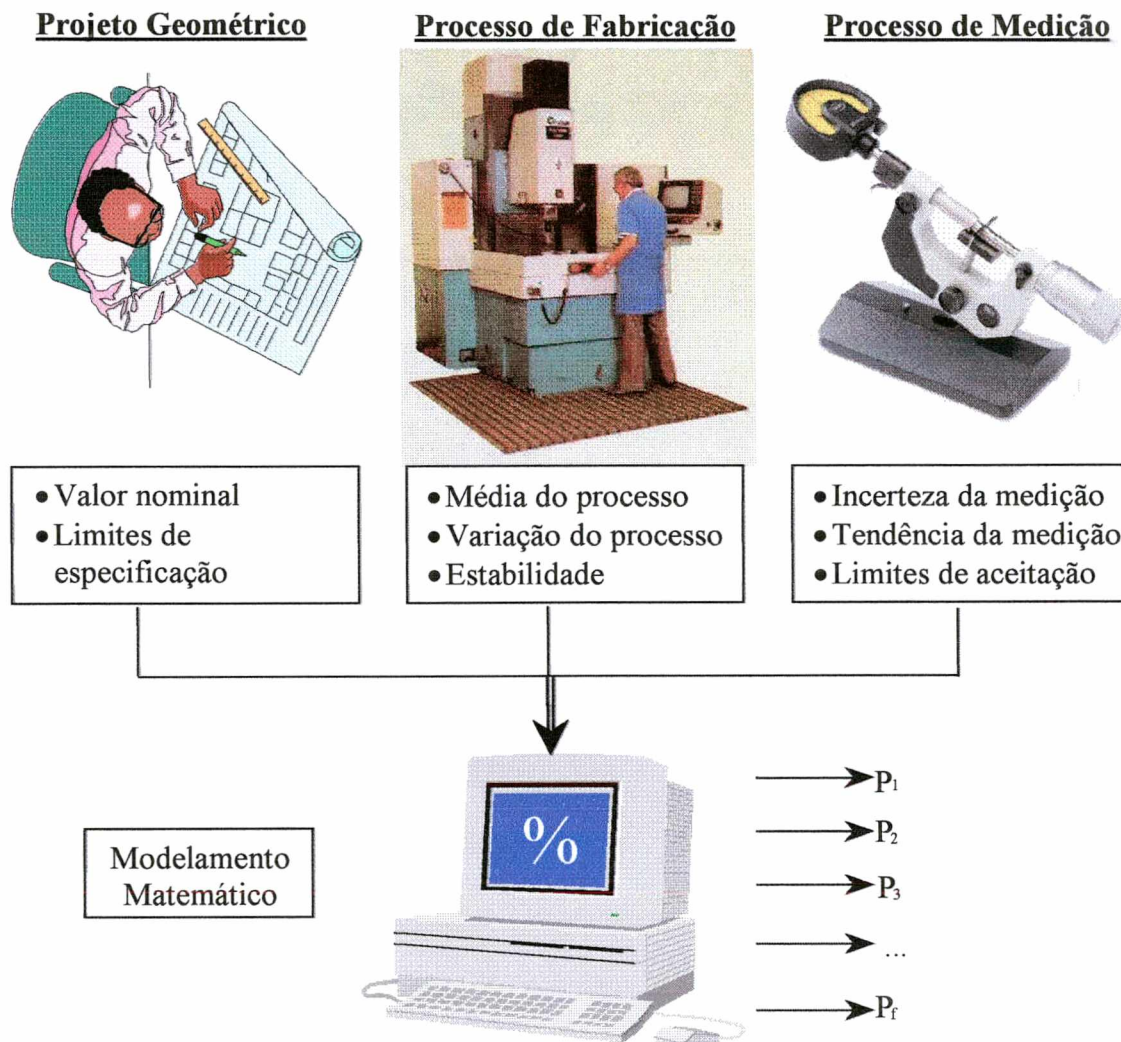


Figura 3.4: Determinação da probabilidade de ocorrência dos diferentes tipos de erros de classificação.

Na determinação do custo unitário de falha, é indispensável o conhecimento profundo do PF e das conseqüências de tal erro. Para cada tipo de erro, devem ser levantados os custos associados, cuja composição varia de empresa para empresa, de peça para peça e de processo para processo. Por exemplo, no caso de retrabalho desnecessário de uma peça, estar-se-á gerando um custo por reprocesso. No caso de refugo equivocado de uma peça, gerar-se-á custos devidos ao desperdício de material, do valor agregado pelos processos de fabricação envolvidos, custos de inspeção, entre outros (fig. 3.5).

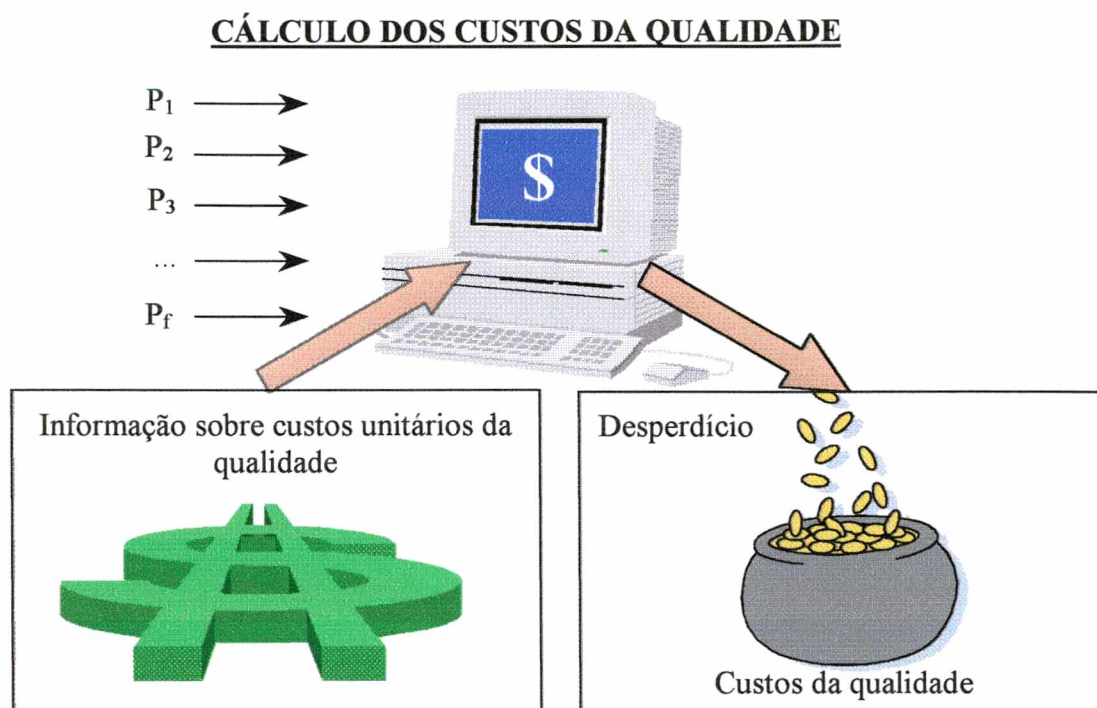


Figura 3.5: Custos da qualidade relacionados à confiabilidade geométrica de peças.

Na bibliografia pesquisada, foram encontrados poucos trabalhos na área de interesse dessa dissertação e nenhum que trate o problema do ponto de vista dos custos da qualidade. O mais próximo (relevante), é a Tese de Doutorado do Eng. Gustavo Donatelli, que desenvolveu um método utilizando simulação para determinar a perda da qualidade por efeito do PM, considerando a função perda de Taguchi (função de difícil aplicação no nível de chão de fábrica) /15/. Em tal trabalho, é apresentado um modelo de simulação estatística que se utiliza da distribuição beta /33, 34/. Embora o método não leve explicitamente em conta a variável custo (não quantifica), o mesmo gera uma “fração de perda de qualidade” dada pela utilização de um PM não ideal. O método requer um software especial que necessita de aproximadamente uma hora para completar uma simulação /15/.

Além desse trabalho, foi analisado um outro método proposto, que somente contempla o erro de classificação por rejeição de peças que estejam dentro das especificações. Este método assume um PM ideal, e, assim sendo, não leva em conta o efeito do PM /35/.

3.2. DELIMITAÇÕES

A seguir é apresentado o escopo do trabalho, identificando sua aplicabilidade e delimitando o campo onde a metodologia apresentada apresenta um melhor desempenho.

3.2.1. Delimitações do Projeto Geométrico (PG)

Embora a metodologia seja aplicável a qualquer tarefa de medição, o escopo do presente trabalho leva em conta apenas os casos de peças com requisitos geométricos que apresentem somente um item de controle (característico) ou quando for possível distinguir um item de controle como sendo o determinante/crítico. Este requisito se baseia na necessidade de correlacionar uma GM com uma condição de conformidade ou não conformidade da peça. Dessa forma, a partir do controle da respectiva GM, seria possível avaliar a conformidade geométrica da respectiva peça. Para focalizar o estudo, será analisado o caso de dimensões externas, sendo aplicável a mesma metodologia a dimensões internas após a execução das respectivas adequações.

3.2.2. Delimitações do Processo de Fabricação (PF)

Em relação ao processo de fabricação, é preciso limitar a distribuição em que a GM é gerada. Dessa forma, será considerado o caso de processos de fabricação com distribuição normal. Esta consideração se fundamenta no comportamento de uma grande parte dos PFs mecânicos, e pelo fato de que a maioria dos estudos de CEP (Controle Estatístico de Processo) contemplam este tipo de FDP (Função de Densidade de Probabilidades). Assim, a aplicabilidade da metodologia será maior /15/. No caso de FDP com comportamento não normal, a metodologia pode ser adaptada a tais condições.

Para que os resultados da metodologia tenham representatividade, é preciso que o comportamento das variáveis consideradas, em particular das relacionadas ao PF, sejam estáveis no tempo. Dessa forma, é desejável que o PF esteja sob controle estatístico, o que garante a diminuição da variabilidade do processo. A média do PF também deve ser estável pois, do contrário, devem ser disponibilizados mecanismos para ajustar seu valor de forma de mantê-lo estável. Na prática, a tentativa é sempre de tentar centrar o processo. Embora se tal ajuste é realizado mediante o auxílio de um PM inadequado (que presente tendência de medição significativa), o PF resultante apresentará uma tendência de fabricação não desejada.

Em função das condições de operação, tal média pode sofrer desvios. Nesses casos, recomenda-se analisar aquela situação que seja o mais representativa ou aquela que gere os maiores custos da qualidade (pior caso). Tanto o valor da média do PF quanto sua variabilidade são consideradas na metodologia proposta para a determinação dos respectivos custos da qualidade.

3.2.3. Delimitações do Processo de Medição (PM)

Em relação ao processo de medição, há algumas condições relacionadas tanto com o SM utilizado, quanto com as condições de medição. Em relação aos SMs, o estudo leva em conta somente a utilização de sistemas tradicionais no controle de variáveis (instrumentos convencionais, medidores diferenciais, calibradores medidores, etc.) e de dedicação exclusiva a uma tarefa de inspeção (paquímetros, medidores diferenciais, micrômetros). Apesar de a metodologia ser aplicável a qualquer SM, os mais modernos e complexos, como as máquinas de medição por coordenadas, não foram considerados neste trabalho. Calibradores fixos não são considerados neste trabalho, pelo fato destes somente controlarem atributos. (Passa- Não Passa).

Em relação às condições de medição, embora a metodologia leve em conta a possibilidade de intercambiabilidade entre diferentes SMs, é recomendável que esses tenham desempenhos metrológicos similares. Nessas condições, uma mesma análise poderia ser aplicável a vários SMs. Quando é empregado um PM que considera a utilização de SMs com diferentes desempenhos metrológicos, recomenda-se avaliar o pior caso. Da mesma forma, o PM deve considerar as possíveis instabilidades no tempo, de forma tal que os resultados obtidos sejam válidos para todo o período do tempo que leva em conta o estudo.

3.2.4. Delimitações de acordo com o tipo de inspeção

Em relação aos métodos de inspeção, existem diferentes tipos /15, 36/. No caso particular de inspeção por variáveis, os mais utilizados a nível industrial para peças com requisitos geométricos são:

- a) Inspeção 100% com especificações de tolerância bilaterais,
- b) Inspeção 100% com especificações de tolerância unilaterais,
- c) Inspeção 100% com classificação,
- d) Inspeção por amostragem.

Na fig. 3.2 são apresentados estes quatro tipos de inspeção, onde se identificam os possíveis erros de classificação devido ao fato de empregar um PM não ideal. A presente metodologia é aplicável a qualquer tipo de inspeção, apresentando um melhor comportamento no caso de inspeções 100%. Dessa forma, o presente trabalho será focado nesse tipo de inspeções, particularmente no primeiro caso (inspeção 100% com especificações geométricas de tolerância bilaterais).

Para o caso de inspeções por amostragem, devem ser tomadas em conta algumas considerações adicionais (dependendo das condições particulares de cada caso), não sendo possível estabelecer uma regra geral. O problema da inspeção por amostragem é que não existe uma relação direta entre peças boas/ruins e peças aceitas/rejeitadas. Dessa forma, peças muito fora das especificações geométricas podem ser aceitas e peças dentro das especificações podem ser rejeitadas. Isto não ocorre no caso das inspeções 100% onde, ainda na presença de PMs não ideais (com presença de Upm e Tdpm), estas peças seriam corretamente classificadas.

Além disso, ainda considerando a utilização de um PM ideal, não se assegura a aprovação de todas as peças boas, nem o reprocesso ou sucateamento de todas as peças fora de especificação. A inspeção por amostragem tende a diminuir o custo de avaliação (não é necessário medir todas as peças), mas pode aumentar o custo de falha. Este último, dado pela possível presença de peças boas dentro de lotes rejeitados e de peças ruins dentro de lotes aceitos.

No caso de inspeções por amostragem que exijam um alto nível de qualidade para serem consideradas aceitáveis (onde o PF está sob controle estatístico e é altamente capaz), é possível utilizar o mesmo modelamento da inspeção 100%. Sabendo-se que lotes rejeitados exigem inspeção 100% e o PF é capaz e estável, a probabilidade de aceitar lotes com presença de peças fora de especificação é baixa.

3.3. VARIÁVEIS A CONSIDERAR NO ESTUDO

Para cada estudo de avaliação dos PMs, devem ser quantificadas as diferentes variáveis associadas às três bases do Templo da Conformidade Geométrica (fig. 1.1), de forma a se determinar a probabilidade de ocorrência de cada tipo de erro de classificação. A seguir as diferentes variáveis que devem ser consideradas são descritas em maiores detalhes.

3.3.1. Variáveis associadas ao Projeto Geométrico

Para caracterizar as especificações geométricas do projeto, devem ser estabelecidos tanto os valores nominais quanto as tolerâncias das GMs. De acordo com as delimitações estabelecidas no item anterior, deve ser selecionada a GM significativa da peça a ser controlada, que será considerada sob especificações bilaterais. Não pode ser esquecido que, para a aplicação da metodologia, é necessário a existência de uma relação direta entre os limites de tolerância e a capacidade da peça em desempenhar corretamente sua função. Será de particular interesse deste trabalho o estudo de grandezas do tipo dimensionais (metrologia dimensional), particularmente de comprimentos.

Dessa forma, uma peça cuja GM se encontre dentro da especificação geométrica, necessariamente deverá ser adequada para a função específica e poderá desempenhar sua função satisfatoriamente. Por sua vez, uma peça cuja GM se encontra fora das especificações será uma peça que muito provavelmente irá gerar algum problema posteriormente na montagem e/ou utilização.

Dessa forma, as tolerâncias devem ser determinadas da forma mais criteriosa possível e com base técnica sólida. Na prática, a relação entre especificação de tolerância e funcionalidade da peça, nem sempre existe. O autor constatou que muitas vezes, a determinação da tolerância é feita mediante um procedimento muito informal, o que coloca a correlação entre tolerância e funcionalidade da peça sob suspeita.

Da mesma forma pode-se verificar que, diante da falta de uma sistemática adequada por parte dos projetistas, muitas vezes as tolerâncias de geometria são especificadas de forma mais exigente que o necessário. Dessa forma, conclusões baseadas nessas especificações podem gerar conclusões inconsistentes e que não representam a realidade funcional dos produtos.

Quando se deseja diminuir a probabilidade de aceitar peças fora das especificações, dada a aplicação de um PM não ideal, é possível aplicar DLE (deslocamento dos limites de especificação). Dessa forma, gera-se uma zona de aceitação menor que a zona de especificação. Para ser tomada este tipo de decisão, é preciso adotar uma postura muito criteriosa, pois a aplicação do DLE provavelmente gera um aumento da quantidade de peças funcionalmente boas rejeitadas, por serem consideradas como fora dos limites de aceitação.

3.3.2. Variáveis associadas ao Processo de Fabricação

De acordo com as delimitações estabelecidas no item 3.2.2., o PF deve ter um comportamento normal. Dessa forma, o valor da média e do desvio padrão devem ser conhecidos. Neste contexto, deve ser esclarecida a terminologia a ser utilizada. Devem ser

assimilados os conceitos de Distribuição do Processo de Fabricação Medido e Distribuição do Processo de Fabricação Real. O primeiro consiste na distribuição do PF identificada, mediante a utilização de um PM real (aquele realmente utilizado e que pode não caracterizar perfeitamente o PF que está sendo analisado). O segundo é aquela caracterizada por um PM ideal (aquele que não influencia na caracterização do PF) (fig. 3.6).

Para cada caso a analisar, devem ser levantadas as variáveis que definem ambos os PFs. Devem ser quantificados o valor médio e desvio padrão para o caso da distribuição do PF medido (μ_{pfm} e σ_{pfm}) e as mesmas variáveis para o caso da distribuição do PF real (μ_{pfr} e σ_{pfr}). Tanto a μ_{pfm} quanto o σ_{pfm} podem ser obtidos a partir de ferramentas de CEP. Por sua vez, a μ_{pfr} e o σ_{pfr} devem ser estimados a partir das informações disponíveis ou determinados mediante a aplicação de CEP através de um PM próximo do ideal.

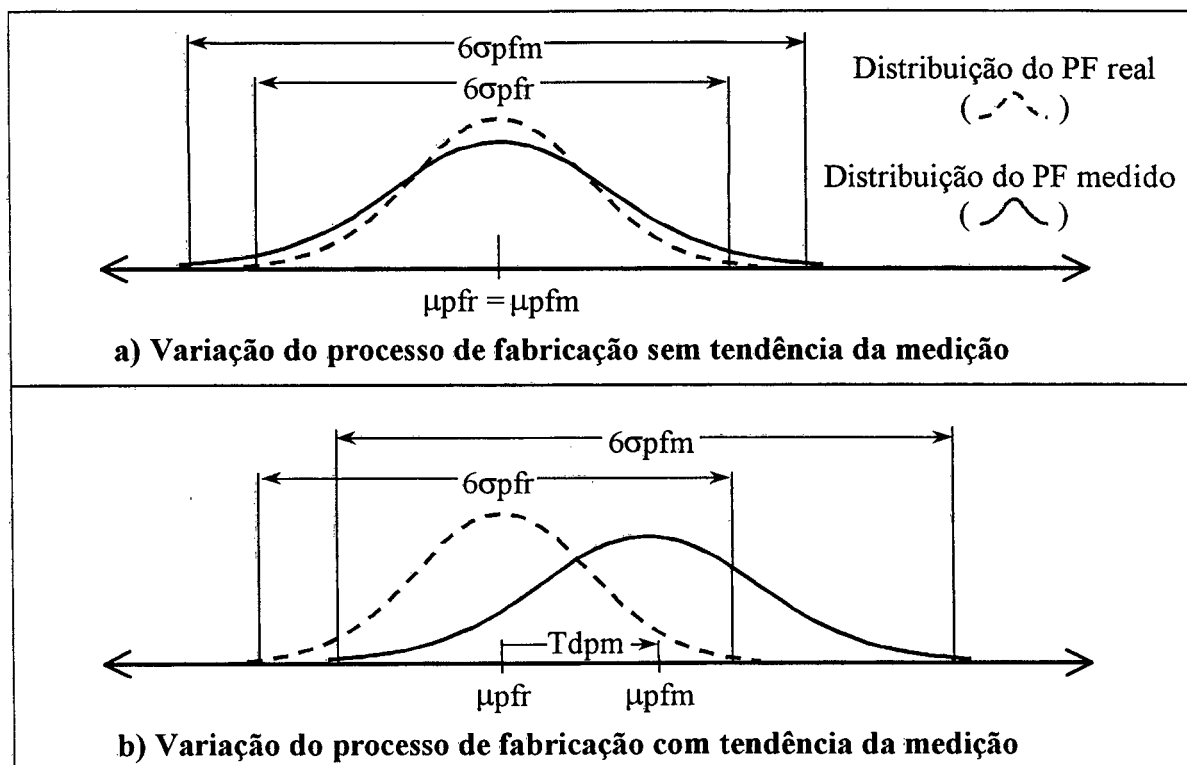


Figura 3.6: Efeito da utilização de um processo de medição na determinação do processo de fabricação real.

Dessa forma, a μ_{pfr} pode ser estimada a partir da μ_{pfm} , corrigindo a tendência do PM (T_{dpm}), ou seja:

$$\mu_{pfr} = \mu_{pfm} - T_{dpm} \quad (3.2)$$

Onde a T_{dpm} deve ser estimada a partir da utilização de peças padrão com Valor Verdadeiro Convencional (VVC) da GM de interesse conhecido. A validade desta equação ratifica o requisito de que o PM tenha um comportamento metrológico estável. A estimação do σ_{pfr} , pode ser realizada a partir do σ_{pfm} e do desvio padrão do PM (σ_{pm}). Tanto nesta como na equação anterior, fica evidente o efeito do PM sobre a estimação do comportamento do PF:

$$\sigma_{\text{pfr}} = \sqrt{\sigma_{\text{pfm}}^2 - \sigma_{\text{pm}}^2} \quad (3.3)$$

É possível determinar o σ_{pfr} a partir da equação 3.3. Tal equação exige que:

- O PF esteja sob controle estatístico (seja estável),
- O σ_{pfm} pode ser determinado a partir da variação do processo de fabricação medido, V_{pfm} (tipicamente $V_{\text{pfm}} = 6 \cdot \sigma_{\text{pfm}}$),
- O σ_{pm} deve ser determinado a partir da U_{pm} dividindo pelo fator de abrangência (k_{pm}) e prévia correção dos todos os efeitos sistemáticos,
- A determinação do σ_{pfr} apresentado na equação 3.3 tem melhor comportamento quando a U_{pm} é muito menor que a V_{pfm} .

O não cumprimento destes requisitos leva a uma má estimativa do σ_{pfr} . Se não é possível determinar o σ_{pfr} pelo método anterior, ou os valores obtidos não são consistentes. Por exemplo, quando o σ_{pm} é maior que o σ_{pfm} , deve-se estimar de alguma outra forma tal valor. Uma opção seria utilizar um PM padrão de menor incerteza para estimar de melhor forma o σ_{pfr} , outra opção seria estimar estes valores baseados no conhecimento ou na experiência. Como última alternativa, poder-se-ia estimar e utilizar o σ_{pfm} como indicador da σ_{pfr} .

3.3.3. Variáveis associadas ao Processo de Medição

A caracterização do PM deve ser, sem dúvida, a tarefa mais complexa a ser realizada, dado o número de variáveis envolvidas. Primeiramente, deverá ser definido o tipo de inspeção a ser realizada, a qual será do tipo 100%. Para caracterizar o comportamento metrológico do PM, requer-se a determinação tanto da T_{dpm} quanto da U_{pm} .

Para a determinação destas variáveis, devem ser considerados todos os aspectos e fontes de incertezas relevantes presentes durante a tarefa de inspeção (fig. 2.5). Entre os aspectos a considerar, não pode ser esquecido o SM utilizado, repetitividade das medições e reprodutibilidade entre operadores que realizam as tarefas de inspeção, condições ambientais presentes no momento da medição, tendência da medição, etc..

Em relação aos SMs que formam parte do PM, um requisito básico é que estes sejam calibrados e verificados periodicamente em relação a padrões rastreados. O cálculo de incerteza deve estar de acordo com as orientações da ISO-GUM /23/. Dessa forma, a U_{pm} poderá “*caracterizar a dispersão dos valores que podem ser fundamentadamente atribuídos à GM*”, da peça que está sendo inspecionada nas condições reais de medição /32/. A aplicação do modelamento requer que o PM tenha uma U_{pm} com distribuição normal. A T_{dpm} deve ser conhecida, independentemente se esta seja corrigida posteriormente ou não.

Dado que tanto a T_{dpm} quanto a U_{pm} são particulares para cada PM e por conseguinte para cada SM, a determinação da adequabilidade será específica para cada SM. A possibilidade de extrapolar outras condições, outros PMs ou inclusive PMs com outros SMs, depende da possibilidade de assegurar que tanto a T_{dpm} como a U_{pm} não variam significativamente. No caso de empresas que dispõem de uma série de SM da mesma família, que são utilizados indistintamente, recomenda-se considerar o pior caso para análise. Em caso de dúvida, analisar todas aquelas opções de interesse.

3.4. FORMULAÇÃO PROBABILÍSTICA

Na avaliação dos PMs, deve-se determinar a probabilidade de ocorrência dos erros de classificação (falhas), sendo necessário determinar uma função de distribuição de probabilidades (FDP) combinada, que leve em conta tanto o PG quanto o PF e o PM, e que represente a probabilidade de ocorrência dos diferentes tipos de erros de classificação /15/.

Para equacionar esta FDP combinada, faz-se necessário aplicar os conceitos de probabilidade condicional e, dessa forma, determinar a probabilidade combinada de que o PM forneça um valor M, dado que, na verdade, o PF gera uma peça com valor GM /40/. Assumindo que ambas FDP são não correlacionadas, a FDP combinada é definida como o produto entre ambas:

$$f(X \cap Y) = f_1(Y) \cdot f_2(X|Y) \quad (3.4)$$

Onde: X: Representa aos valores que podem ser assumidos pelo PM real,
 Y: Representa aos valores que podem ser assumidos pela distribuição do PF real,
 $f_1(Y)$: Função que representa a densidade de probabilidade normal de que a GM assumira um valor "Y",
 $f_2(X|Y)$: Representa a densidade de probabilidade normal de que um PM forneça "X", dado que a GM correspondente tem um valor "Y".

Dessa forma, integrando-se adequadamente a FDP combinada em relação aos limites de especificação e aceitação, será possível determinar a probabilidade de ocorrência de cada tipo de evento.

Considerando o esboçado na figura 3.2.a, é adotada a seguinte designação das peças:

- Quanto ao limite de tolerância = Fora (F), Dentro (D),
- Quanto à aceitação = Aprovada (A), Reprovada (R),
- Quanto ao tamanho = Pequena (P), Grande (G).

Nesse caso, as peças podem ser classificadas da seguinte forma:

- PFRP: Peças fora de especificação (pequenas) sendo reprovadas como pequenas na inspeção,
- PFRG: Peças fora da especificação (grandes) sendo reprovadas como grandes na inspeção,
- PDA: Peças dentro da especificação, sendo aprovadas na inspeção,
- **PDRP: Peças dentro da especificação reprovadas por serem consideradas pequenas na inspeção,**
- **PDRG: Peças dentro da especificação reprovadas por serem consideradas grandes na inspeção,**
- **PFAP: Peças fora da especificação (pequenas), embora aprovadas na inspeção,**
- **PFAG: Peças fora da especificação (grandes), embora aprovadas na inspeção,**
- PFPRG: Peças fora da especificação (pequenas), embora reprovadas por serem consideradas grandes na inspeção,
- PFGRP: Peças fora da especificação (grandes), embora reprovadas por serem consideradas pequenas na inspeção.

A soma dos nove tipos de eventos forma o universo de probabilidades. Os primeiros três não são de interesse deste trabalho dado que não geram custo de falha. Os dois últimos, que consistem em erros cruzados de classificação, só tem relevância em processos com erros de medição muito grandes, caso que foge da realidade e não será considerado. Dessa forma, os quatro tipos de eventos restantes serão considerados como relevantes para a determinação da adequabilidade (PDRP, PDRG, PFAP, PFAG) /15/.

Desta forma, PDRP representa a rejeição errada de peças consideradas pequenas. Produz sucateamento (aumento do custo de falha interna). Por sua vez, PDRG representa a rejeição errada de peças consideradas grandes produzindo retrabalho (aumento do custo de falha interna). Por último, PFAP mais PFAG representa a aceitação errada de peças pequenas ou grandes. Produz aumento dos custos em etapas posteriores da fabricação, montagem, diminuição da vida útil das peças, aumento de custo garantia, imagem (custo de falha externa).

Uma vez que seja possível associar custos a cada um dos tipos de erro de classificação, será possível estimar os custos associados a cada situação, viabilizando poder comparar diferentes opções ou avaliar uma alternativa.

3.5. FORMULAÇÃO MATEMÁTICA

Dado que tanto os PFs contemplados, quanto os PMs, podem ser representados por distribuições normais. A FDP $f(x)$, de cada um, pode ser representada pela equação:

$$f(x) = \frac{e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}}}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \quad (3.5)$$

A partir daí, é possível determinar a probabilidade de ocorrência de cada tipo de evento que gera falhas a partir da integração dupla da FDP, empregando limites de integração adequados. Dessa forma, os diferentes tipos de eventos podem ser representados por:

$$\text{Probabilidade} = \int_{A-\mu_{pfr}}^{B-\mu_{pfr}} \int_C^D \frac{e^{-\frac{(y)^2}{2 \cdot (\sigma_{pfr})^2}} \cdot e^{-\frac{[x-(\mu_{pfr}+y)]^2}{2 \cdot (\sigma_{pm})^2}}}{(2 \cdot \pi \cdot \sigma_{pfr} \cdot \sigma_{pm})} dx dy \quad (3.6)$$

A interpretação da integral é a seguinte: seja X a variável que representa o PM real e Y a variável que representa a distribuição do PF real. Ambas variáveis se relacionam pela equação 3.7.

$$Y = X - \mu_{pfr}. \quad (3.7)$$

Desta forma, a integração de X entre C e D, representa a probabilidade de que a indicação do PM se encontre entre tais valores, dado que, na realidade a GM tem um valor Y. Por sua vez, a integração de Y entre $(A - \mu_{pfr})$ e $(B - \mu_{pfr})$ representa a probabilidade de que a GM

da peça se encontre entre A e B. Dessa forma, cada tipo de evento é definido por uma combinação dos limites de integração como mostrado na figura 3.7.

LIMITES DE INTEGRAÇÃO					
Tipo de Evento		Processo de Fabricação (Y)		Sistema de Medição (X)	
		A	B	C	D
Não geram custo de falha	PFRP	0	LIE	0	LIA
	PFRG	LSE	$+\infty$	LSA	$+\infty$
	PDA	LIE	LSE	LIA	LSA
Geram custo de falha	PDRP	LIE	LSE	0	LIA
	PDRG	LIE	LSE	LSA	$+\infty$
	PFAP	0	LIE	LIA	LSA
	PFAG	LSE	$+\infty$	LIA	LSA

Figura 3.7: Limites de integração para a determinação de probabilidades.

O limite inferior aceitação (LIA) é definido pela equação 3.8, entanto o limite superior de aceitação (LSA) pela equação 3.9. Cabe destacar que os limites de aceitação devem considerar a resolução (R) do PM. Isto se deve a que, GM que estão apenas fora das especificações seriam aceitas dada a resolução ser finita. Por exemplo, se o LSE é de 10,34 mm e não é aplicado DLE, qualquer PM com resolução de 0,01 mm considerará como conforme peças com GM até quase 10,345 mm. Dessa forma, no equacionamento, deveria ser considerado este último valor como LSA, de forma a representar fielmente o comportamento real dos PMs.

$$LIA = (LIE - R/2) + DLE \quad (3.8)$$

$$LSA = (LSE + R/2) - DLE \quad (3.9)$$

Entretanto, os tipos de eventos PFRP, PFRG e PDA não geram custo de falha e sua probabilidade será determinada como medida de verificação. Assim, para situações reais (onde a probabilidade de ocorrência de PFRG e PFRP é depreciável/nula), a soma das probabilidades dos sete tipos de eventos deve ser igual a 100%. Caso isso não ocorra, alguma coisa deve estar incorreta, provavelmente em relação aos limites de integração.

Embora a aplicação dos limites de integração estabelecidos na figura 3.7, deva gerar resultados consistentes, na prática, tanto a variável X quanto a variável Y assumem valores situados dentro de uma faixa finita e nunca em toda a faixa que vai entre zero e infinito. Dessa forma, objetivando otimizar os cálculos e diminuir o tempo requerido para determinar as probabilidades de ocorrência dos diferentes tipos de eventos, será utilizado um valor como limite inferior de integração (LI) maior que zero, e um valor como limite superior de integração (LS) menor que infinito.

Tanto LI como LS devem ser determinados de forma que a soma das probabilidades dos sete tipos de eventos (probabilidade do universo), mantenha-se em 100%. Se isso não ocorrer, os valores devem ser modificados até atingir tais requisitos.

Na determinação de LI e de LS recomenda-se:

- Utilizar um valor de LI o maior possível e um valor de LS o menor possível,
- A diferença entre LS e LI não deve ser menor que a V_{pfm} ,
- Numa primeira iteração, pode-se utilizar um valor de LI igual a LIE e um valor de LS igual a LSE,
- Outra opção é utilizar LI e LS de acordo com as equações 3.10 e 3.11,
- Se a probabilidade do universo é diferente de 100%, aumentar os limites até atingir tal requisito.

$$LI = LIE - U_{pm} \quad (3.10)$$

$$LS = LSE + U_{pm} \quad (3.11)$$

Como exemplo, a probabilidade de rejeitar uma peça cuja GM esteja dentro das especificações por ser considerada pequena, PDRP, sendo esta dada pela combinação:

- A: LIE: Limite inferior de especificação (geométrica),
- B: LSE: Limite superior de especificação (geométrica),
- C: LI: Limite inferior de integração,
- D: LIA: Limite inferior de aceitação.

Assim sendo, a GM da peça está entre os limites de especificação geométrica de PG, embora o PM interprete (erroneamente) que as peças estão abaixo do LIA. Ou seja entre LI e LIA. Este exemplo é apresentado na equação 3.12.

$$PDRP = \int_{LIE - \mu_{pfr}}^{LSE - \mu_{pfr}} \int_{LI}^{LIA} \frac{e^{\frac{-(y)^2}{2 \cdot (\sigma_{pfr})^2}} \cdot e^{\frac{-[x - (\mu_{pfr} + y)]^2}{2 \cdot (\sigma_{pm})^2}}}{(2 \cdot \pi \cdot \sigma_{pfr} \cdot \sigma_{pm})} dx dy \quad (3.12)$$

Na figura 3.8, o exemplo anterior é representado esquematicamente. É possível verificar que, para cada valor de Y do PF (dentro dos limites de especificação), determina-se a probabilidade de que o PM forneça um valor inferior a LIA. Dessa forma, ao se integrar para todo Y dentro dos limites de especificação, é possível determinar a probabilidade de ocorrência de PDRP.

3.6. CONSIDERAÇÕES ECONÔMICAS

Uma vez quantificada a probabilidade de ocorrência de cada tipo de falha, o passo seguinte será quantificar, em termos econômicos, o custo total associado, considerando tanto os Custos da Conformidade como os Custos da Não Conformidade (fig.1.4). Dessa forma, será possível comparar as diferentes alternativas analisadas, e optar por aquela que permita minimizar os custos.

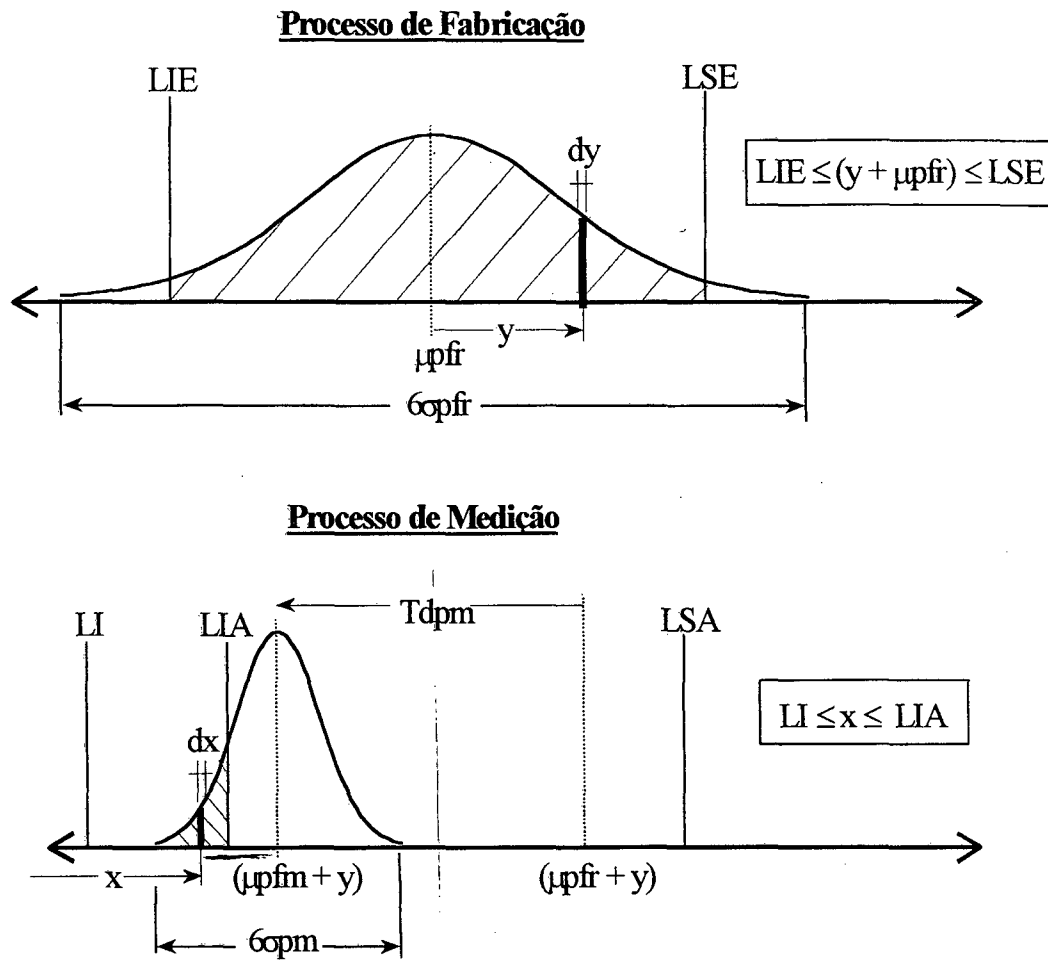


Figura 3.8: Interpretação do equacionamento, base do modelamento.

Para a determinação dos custos totais, deve-se estabelecer um período de tempo. Isto é necessário para conhecer o volume da produção do período, determinar a depreciação dos PMs, o número de calibrações, entre outras informações. Dependendo do problema a analisar, podem ser consideradas duas bases de tempo, tanto na base de um período (produção contínua) quanto no tempo requerido para completar um grande lote (produção seriada). No primeiro caso, um período de um ano pode ser considerado como valor típico, dado que algumas informações são mais facilmente disponíveis (por exemplo a depreciação). No segundo caso, será considerado o tempo requerido para completar um grande lote (por exemplo um projeto específico).

Ainda se os custos envolvidos não são quantificados, a metodologia permite comparar as diferentes alternativas de PM em função das probabilidades de falha. Esta opção não é tão consistente como usar os custos da qualidade como parâmetro de comparação, embora seja uma opção disponível.

Na composição dos custos da qualidade existe uma série de fontes a considerar tanto do PG quanto do PF e principalmente do PM, para cada uma das alternativas a analisar. No caso dos Custos da Conformidade (figura 3.9) estes podem ser compostos por custos de Investimentos, Manutenção e Operação. Dependendo de cada caso particular, estas fontes podem ou não estar presentes.

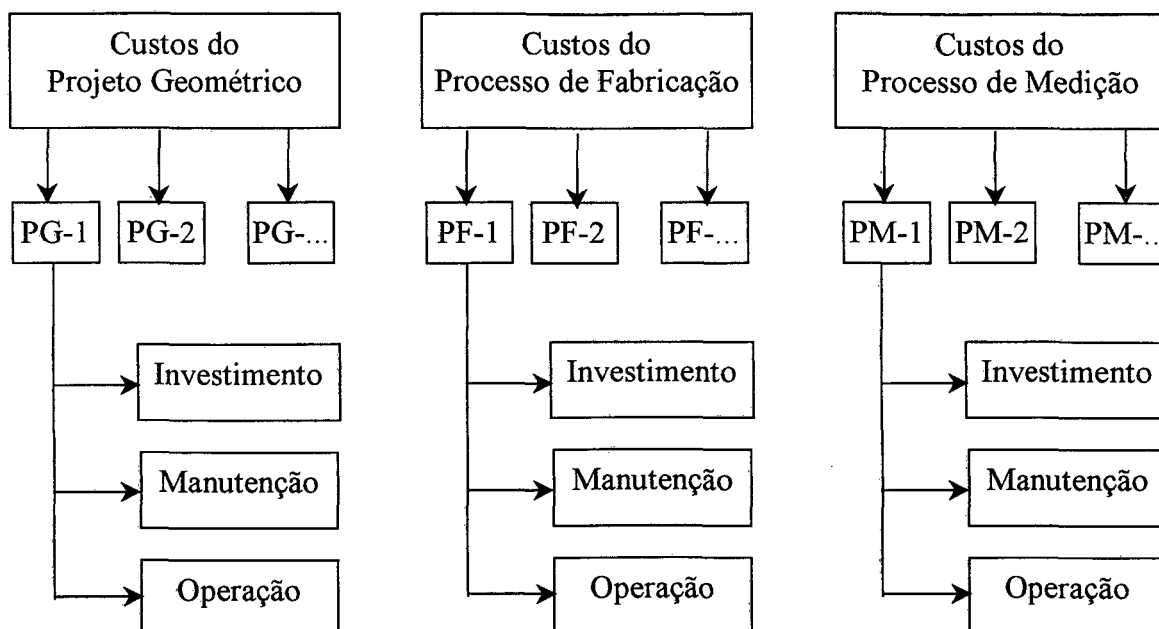


Figura 3.9: Composição dos Custos da Conformidade (prevenção e avaliação).

No caso do PG, pode-se considerar alguns custos, por exemplo, investimento de ferramentas para a determinação das tolerâncias de uma forma mais consistente, a operação de tal metodologia e sua manutenção, revisão de especificação de desenho, etc.. No caso do PF, deve-se considerar custos por estudos de CEP, ensaios geométricos, manutenção preventiva, limpeza, ajustes, treinamento dos operadores, etc..

No caso do PM, existe uma série de fontes a considerar. No investimento deve ser considerada a aquisição e/ou depreciação dos SMs, a geração dos planos de controle. Na manutenção devem-se considerar aspectos como a avaliação dos próprios PMs, a rastreabilidade dos SMs, a capacitação do pessoal responsável pela metrologia laboratorial, controle de condições ambientais, etc.. No caso da operação, devem ser considerados aspectos como os tempos e possíveis atrasos na produção devido a tarefa de inspeção, treinamento dos operadores responsáveis pela inspeção e outros aspectos relacionados com a adequada operação da metodologia proposta.

A nível geral, pode ser necessário um investimento na conscientização e motivação para a qualidade, e certamente na implementação e avaliação da própria metodologia apresentada neste trabalho.

No caso dos Custos da Não Conformidade (fig. 3.10), para cada processo a analisar e para cada possível tipo de erro de classificação, devem ser quantificadas as conseqüências de sua ocorrência. Tais custos devem ser expressados em termos unitários (custos por peça indevidamente classificada). Na figura 3.10 são descritos os possíveis custos de Não Conformidade que podem ser gerados no caso de uma inspeção 100% com especificações de tolerância bilaterais (fig 3.2.a) do tipo dimensão externa. Tipicamente, peças são refugadas se a M for menor que o LIA e retrabalhadas se a M for maior que o LSA.

Particularmente, no caso de falha externa (fig 3.10.b) devem ser consideradas todas as conseqüências da liberação de peças fora de especificação, incluindo aqueles. Pode-se gerar custos por multas, garantia, devoluções, transporte, análise de falha e o pior de tudo,

por perda de imagem da empresa. (custos intangíveis também devem ser estimados). Outro aspecto a considerar no caso de peças que são montadas pela própria empresa, são todos os possíveis problemas na montagem da peça erroneamente liberada. Nesse caso deve-se considerar o desperdício das peças danificada e do retrabalho de montagem, além de outras ações corretivas consideradas nessa situação.

a) FALHA INTERNA		
TIPOS DE FALHA	RETRABALHO	REFUGO
PDRP	Em alguns casos, especialmente quando as peças têm um alto valor, estas podem ser recuperadas, por exemplo, mediante a deposição de material. Neste caso tal processo seria fonte de custo de falha.	Tipicamente este tipo de peça seria erroneamente sucateada, gerando uma perda de todas as matérias primas consideradas, do valor agregado gerado e de outras ações erroneamente implementadas.
PDRG	Tipicamente este tipo de peça seria erroneamente retrabalhada, gerando um desperdício correspondente a todos aqueles retrabalhos desnecessários. Inclusive sendo possível que a peça depois do retrabalho perca sua condição e deva ser sucateada.	Em alguns casos, uma peça possível de ser retrabalhada, acaba sendo refugada, por exemplo, pelo alto valor de tal tarefa. Nesse caso também se gera uma perda de todas as matérias primas consideradas, do valor agregado gerado e de outras ações erroneamente implementadas.

b) FALHA EXTERNA	
TIPOS DE FALHA	CONSEQÜÊNCIA EXTERNA
PFAP	Uma peça deste tipo pode provocar problemas na montagem, ou na utilização. Particularmente diminuindo a vida útil do produto onde a peça faz parte. Por exemplo, um rolamento de diâmetro menor que as especificações.
PFAG	Este tipo de peças também pode provocar problemas na montagem e/ou na utilização. Particularmente dificultando a montagem e danificando outras peças. Por exemplo, um pistão de motor.

Figura 3.10: Composição dos Custos da Não Conformidade (falha interna e externa) no caso de inspeção 100% com especificações de tolerância bilaterais.

Dado que se dispõe da probabilidade de ocorrência de cada tipo de falha e do número de peças produzidas e consideradas no estudo, será possível determinar o custo total de falha (equação 3.1). O número de peças deve ser determinado tanto se a base de tempo corresponde a um período quanto ao tempo requerido para produzir um determinado lote.

Um aspecto que não pode ser esquecido é considerar os custos de gestão associados à aplicação da metodologia (prevenção e/ou avaliação). A aplicação da metodologia só faz sentido se o custo total diminui. Dessa forma, devem ser considerados aspectos como os recursos (humanos, financeiros e materiais) requeridos para o levantamento dos dados, processamento e implementação da metodologia.

Embora a metodologia seja aplicável numa gama ampla de casos, será mais útil/importante na medida de que os PFs sejam incapazes (geram mais peças nos limites de aceitação), e os PMs empregados tenham alta incerteza em relação à tolerância (induzem mais erros de classificação). Por outro lado, para uma mesma tarefa de inspeção, diferentes empresas podem encontrar soluções ótimas diferentes, dadas as condições particulares de cada uma delas.

3.7. APLICABILIDADE DA METODOLOGIA PARA DIFERENTES TIPOS DE INSPEÇÃO

A metodologia, embora tenha sido desenvolvida considerando o caso de inspeção 100% com especificações de tolerância bilaterais, pode ser aplicada em outros tipos de inspeção levando em conta algumas considerações:

a) Inspeção 100% com especificação unilateral

A aplicação da metodologia é ainda mais simples, dado que existe somente um limite de especificação (veja fig. 2.2.b). Por exemplo, no caso de peças com especificação que limita somente o valor máximo (GM menor ou igual a um valor limite) equivale a considerar um LIA com valor zero. No caso oposto (GM maior ou igual a um valor limite) equivale a considerar LSA com valor infinito (na prática utilizar um valor grande).

b) Inspeção com classificação

A aplicação da metodologia é um pouco mais complexa no sentido que o número de tipos de eventos possíveis de gerar falha aumenta de acordo com o número de classes consideradas (veja fig. 2.2.c.). No caso de uma inspeção com classificação múltipla, por exemplo, em três classes, ao invés de existirem nove tipos de eventos possíveis, o número sobe para vinte e cinco. Ou seja, existem cinco tipos de eventos possíveis para classificação ideal (abaixo das especificações, Classe 1, Classe 2, Classe 3 e acima das especificações) e para cada uma delas pode-se obter até cinco classificações efetivas diferentes segundo o PM considerado.

Naturalmente, da mesma forma que a inspeção com especificações bilaterais, existem alguns tipos de eventos que são altamente improváveis, como por exemplo, uma peça abaixo da Classe 1 (menor) que seja classificada erroneamente como acima da Classe 3 (maior). Dessa forma, na fase do modelamento, podem ser considerados apenas alguns tipos de eventos, tipicamente, aqueles onde cada peça possa ser erroneamente classificada na classe contígua. Dessa forma, para o caso de três classes de peças, o número de tipos de eventos relevantes pode ser de treze.

c) Inspeção por amostragem

Em muitos casos, dado o alto custo de inspeção ou quando o custo de falha externa não é muito relevante, faz-se uma inspeção por amostragem. Este tipo de inspeção também é utilizado quando não é viável inspecionar 100%, por exemplo, em máquinas de alta produtividade e/ou processos contínuos. A aplicação da metodologia neste caso requer algumas considerações adicionais, embora a determinação da probabilidade de ocorrência de cada um dos possíveis tipos de erro de classificação é realizada utilizando o mesmo modelamento matemático que se utiliza na inspeção 100% (tanto bilateral como unilateral). Dada a própria natureza deste tipo de inspeção, os custos da qualidade

associados a falhas podem aumentar em relação à aplicação de uma inspeção 100%. Isto se deve ao fato de que, como não são medidas todas as peças, aumenta o número de erros de classificação (veja fig. 2.2.d.).

No caso de um lote que é aceito, podem existir peças que estejam largamente acima ou abaixo das especificações geométricas, aumentando o custo de falha externa. No caso de lotes rejeitados em alguns casos recorre-se a uma inspeção 100% desse lote. Do contrário, podem ser erroneamente sucateadas peças conformes, aumentando o custo de falha interna. Além disso, podem ser sucateadas peças que poderiam ser retrabalhadas. Mas, por outro lado, o fato de inspecionar por amostragem faz com que se diminua o custo de avaliação, sendo que em alguns casos não é factível ou viável uma inspeção 100%.

No caso de inspeção por amostragem, os erros de classificação podem ser diminuídos na medida que as amostras sejam o mais representativas possíveis e desde que o PF seja muito estável de forma de que os erros de classificação sejam baixos. Da mesma forma, a aplicação da metodologia neste caso apresenta melhor desempenho quando os custos de falha externa e interna sejam baixos, ou seja, quando não seja muito crítico fornecer peças fora da especificação geométrica aos clientes e quando não seja muito crítico rejeitar lotes com peças boas ou retrabalhar peças que na verdade estejam dentro das especificações ou deveriam ter sido sucateadas.

No caso do levantamento dos custos da qualidade, especialmente os custos de falha eventualmente não serem representativos, sempre se tem a opção de utilizar a informação da probabilidade de ocorrência dos diferentes tipos de erro de classificação como parâmetro de avaliação e comparação. Dadas estas considerações, recomenda-se analisar o problema utilizando o modelamento da inspeção 100%, embora dispensando maior atenção aos resultados em termos relativos (percentuais) que em termos econômicos.

3.8. CONSOLIDAÇÃO DA METODOLOGIA

Uma vez que o modelo de solução tem sido definido e delimitado, o passo seguinte consiste em definir a forma de como utilizar esta ferramenta de forma sistemática (fig. 3.11). Esta sistemática permite, a partir de uma série de informações (inputs), determinar os custos da qualidade associados às diferentes configurações de PG, PF e PM analisadas. Dessa forma, é possível determinar aquela que represente uma melhor opção.

Para isto, tem-se definido cinco etapas principais a cumprir na avaliação de um PM:

- Caracterização do problema,
- Aquisição e preparação dos dados,
- Cálculo das probabilidades (de ocorrência dos diferentes tipos de erro de classificação),
- Cálculo dos custos da qualidade,
- Análise dos resultados e recomendações,

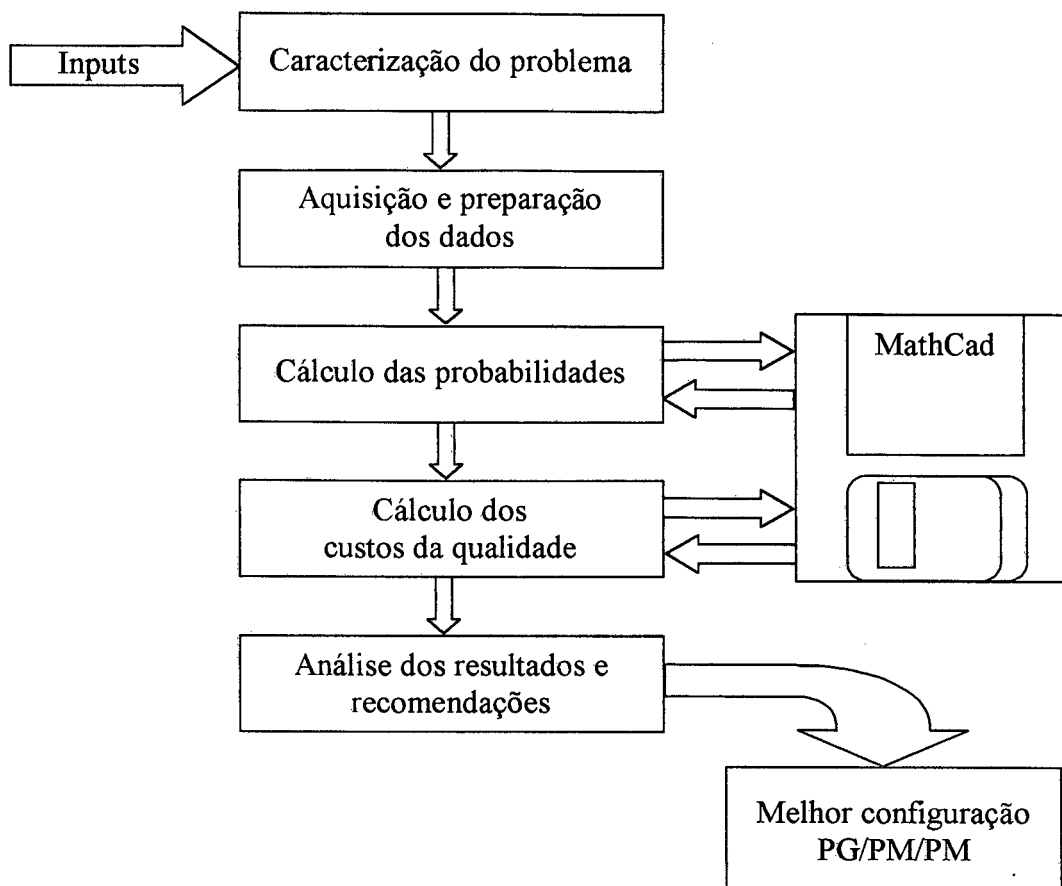


Figura 3.11: Descrição da consolidação da metodologia.

Dessa forma, na primeira etapa é caracterizado o problema a analisar e os objetivos deste. Nesta etapa devem ser identificadas as diferentes alternativas ou situações a avaliar, tanto de PG, PF e principalmente de PM. Na segunda etapa (provavelmente a mais complexa) são quantificadas todas as características e variáveis do problema, tanto de PG quanto de PF e quanto do PM. Na terceira etapa é aplicado o modelamento matemático (apresentado no item 3.5) de forma a determinar a probabilidade de ocorrência de cada configuração de projeto/fabricação/inspeção analisada. Na quarta etapa são quantificados os custos da qualidade associados a cada alternativa, classificando os quatro tipos de custos (prevenção, avaliação, falha interna e falha externa). Por último, os resultados são analisados, conclusões são determinadas e recomendações são geradas.

3.9. OPERACIONALIZAÇÃO DA METODOLOGIA

Uma vez definida a metodologia, identificando variáveis e delimitações, deve-se determinar a forma de operacionalizá-la e implementá-la, principalmente a determinação das probabilidades. Num primeiro momento, procurou-se encontrar uma equação de primeiro grau que representasse a probabilidade de ocorrência de cada um dos tipos de eventos diferentes. Dessa forma, seria possível implementar a solução numa planilha eletrônica de qualquer computador pessoal inserindo as variáveis requeridas. Entretanto, dado a complexidade matemática da integral, não foi possível avaliar a integral parametricamente, de forma a transformá-la numa equação mais simples. Assim, tal alternativa foi descartada.

Foi necessário encontrar uma alternativa que permitisse resolver numericamente tal integral, sendo necessário utilizar um software especial que pudesse avaliar numericamente uma integral dupla como a apresentada na equação 3.6. Dessa forma, foi empregado o software MathCad versão 2000, o qual dispõe de todos os recursos apropriados para realizar as tarefas requeridas, inclusive permitindo fazer gráficos de forma a permitir a posterior análise dos resultados. Na figura 3.12 apresenta-se um relatório completo, do aplicativo desenvolvido com o software.

A seguir, é apresentada uma descrição da forma como a metodologia foi implementada, descrevendo os cálculos envolvidos e as ferramentas empregadas. O relatório onde é apresentado cada caso, foi subdividido nas mesmas cinco etapas apresentadas anteriormente na figura 3.11.

3.9.1. Caracterização do problema

Primeiramente deve ser designado um nome ao estudo que permita identificar a etapa do PF a analisar e o/os PMs envolvidos. Posteriormente, deve ser caracterizado o problema a analisar, identificando os objetivos derivados que se procura atingir. Naturalmente o objetivo central será determinar o custo da qualidade associado a cada alternativa analisada (PG, PF e PM). Alguns dos possíveis objetivos de aplicação da metodologia podem ser a avaliação da variação da (figura 3.12.a, item 1):

- Tolerância da GM (do PG),
- Faixa de aceitação em relação à tolerância,
- Capabilidade de PF de diferentes máquinas,
- Variar as condições de fabricação,
- Sistema de Medição,
- Processo de Medição.

No exemplo apresentado, o problema consiste em avaliar três PMs os quais estão compostos por SMs da mesma família (micrômetros digitais), embora com diferentes U_{pm} e particularmente T_{dpm} muito diferentes.

3.9.2. Aquisição e preparação dos dados

Neste item são ingressados os dados (input) que posteriormente, permitem calcular os custos associados a cada alternativa. Este item tem sido subdividido em quatro subitens: variáveis do PG, variáveis do PF, variáveis do PM e parâmetros.

a) Variáveis de projeto geométrico (PG)

Primeiramente, deve ser informado o valor das variáveis relacionadas com as especificações do projeto geométrico (fig. 3.12.a, item 2.1):

- Identificação do mensurando,
- Valor nominal,
- Tolerância: Deve ser informado o valor dos limites de especificação (LIE, LSE) ou dos valores de afastamento, tanto do afastamento inferior (A_i) como do afastamento superior (A_s) /05/.

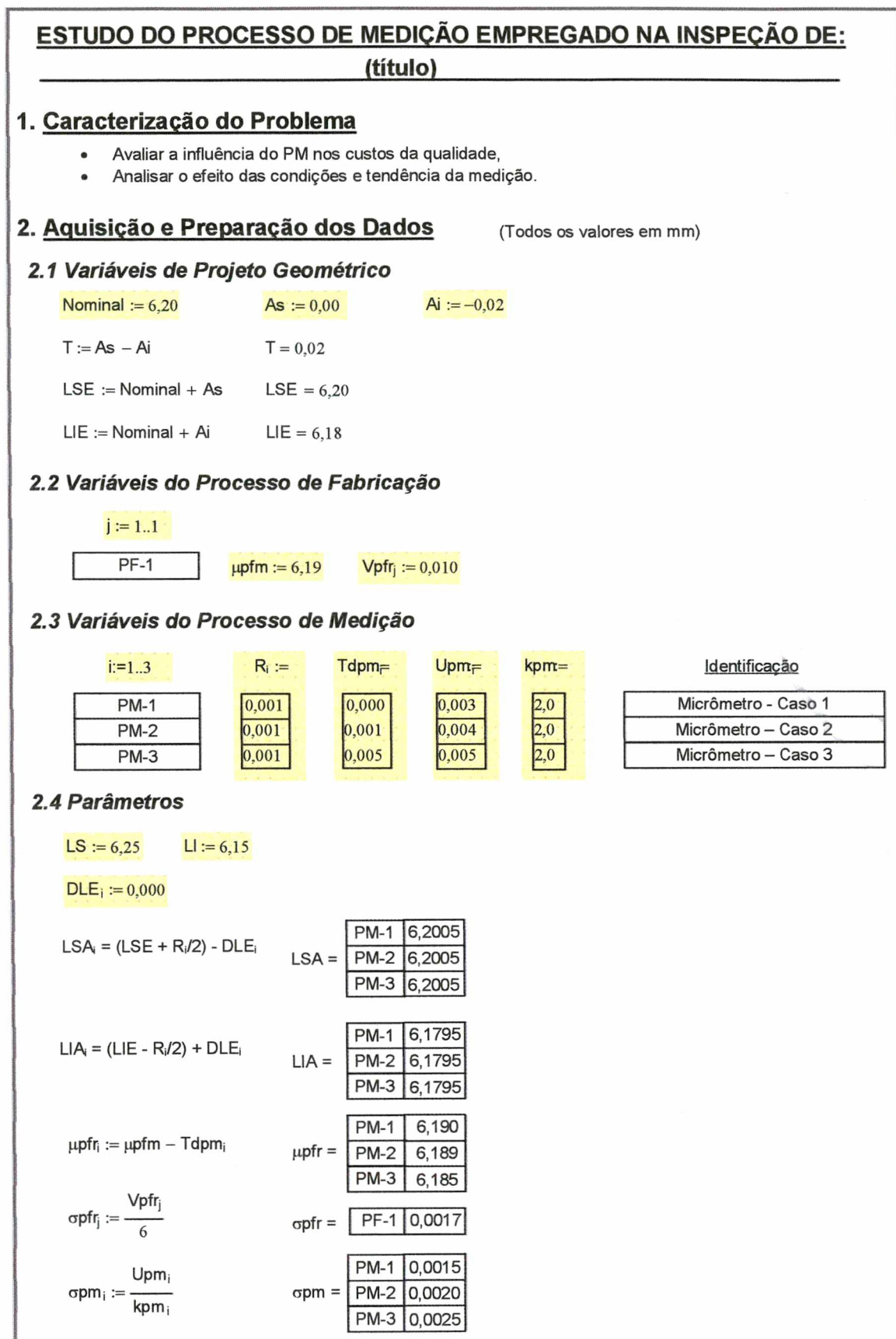


Figura 3.12.a: Exemplo de relatório do modelamento em MathCad (continua).

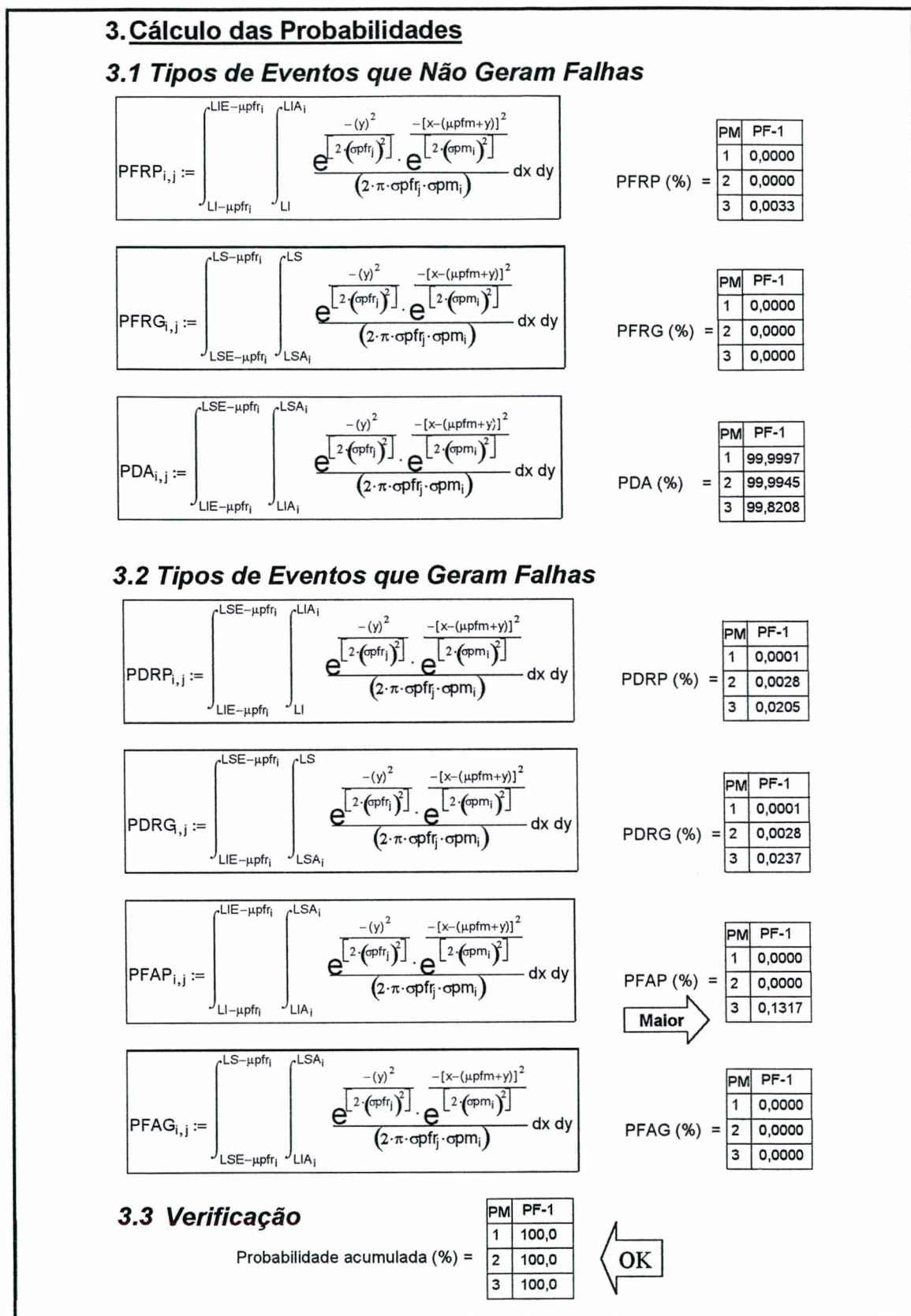


Figura 3.12.b: Exemplo de relatório do modelamento em MathCad (continua).

4. Cálculo dos Custos

4.1 Levantamento dos Custos de Falha (Todos os valores em R\$/peça)

Falha_Interna_Abaixo_j := 2,50 (Medida abaixo do especificado)

Falha_Interna_Acima_j := 0,10 (Medida acima do especificado)

Falha_Externa := 5,00 (Tanto para GM acima quanto abaixo das especificações)

Peças_Produzidas := 1 milhão (No período do estudo, neste caso de um ano)

4.2 Levantamento dos Custos de Prevenção/Avaliação (Todos os valores em kR\$/período)

PREVENÇÃO_j :=

PM	PF-1
1	1,50
2	1,50
3	1,50

AVALIAÇÃO_j :=

PM	PF-1
1	5,00
2	2,00
3	0,50

4.3 Cálculo dos Custos (Todos os valores em kR\$/período)

CUSTO_FALHA_INTERNA =

PM	(kR\$)
1	0,00
2	0,07
3	0,54

CUSTO_FALHA_EXTERNA =

PM	(kR\$)
1	0,00
2	0,00
3	6,59

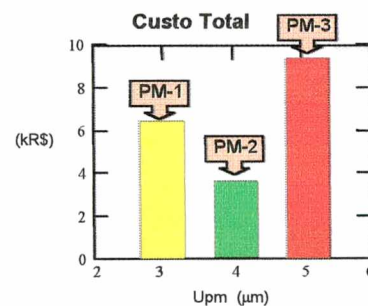
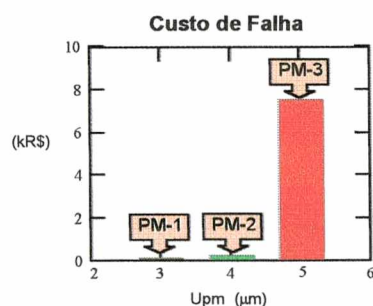
CUSTO_FALHA =

PM	(kR\$)
1	0,00
2	0,07
3	7,12

CUSTO_TOTAL =

PM	(kR\$)
1	6,50
2	3,57
3	9,12

4.4 Representação Gráfica dos Resultados



5. Análise dos Resultados e Recomendações

Para minimizar os custos deve-se considerar a alternativa PM-2, que representa um custo anual de kR\$ 3,57.

Figura 3.12.c: Exemplo de relatório do modelamento em MathCad (parte final).

No exemplo é considerado o diâmetro externo de um eixo com nominal de 6,20 mm podendo variar desde 6,18 mm até 6,20 mm. Tais valores são representativos da funcionalidade da peça.

b) Variáveis do processo de fabricação (PF)

Levantamento das características associadas ao PF (fig. 3.12.a, item 2.2). Neste ponto deve ser obtida, para cada alternativa a analisar:

- Identificação das máquinas que podem participar do PF.
- Caracterização da média do PF medido (μ_{pfm}).
- Caracterização da variabilidade do PF real (V_{pfr}). No item 3.3.2 foi esclarecida a relação entre distribuição do PF medido e do PF real. Sendo este último o processo de interesse a considerar no equacionamento.
- Identificação do PM empregado para a caracterização do PF. Esta informação permite ter uma idéia se os dados levantados no CEP têm relação com os resultados da inspeção das peças de interesse.
- Magnitudes de influência presentes no PF: dados de temperatura (tanto da peça como do SM), R&R dos operadores, T_{dpfm} , etc..
- Informações complementares que permitam conhecer seu comportamento no tempo, por exemplo, estabilidade e normalidade.

No exemplo é considerado uma só opção de PF onde a média observada é mantida em 6,19 mm (μ_{pfm}) e a variabilidade do processo de fabricação real é de 0,010 mm (V_{pfr}).

c) Variáveis do processo de medição (PM)

Levantamento das características associadas ao PM (fig. 3.12.a, item 2.3). Estas informações devem permitir a determinação da tendência e incerteza da medição associada a cada alternativa a analisar. Neste ponto deve ser obtida:

- Identificação dos SMs envolvidos (marca, modelo, resolução, etc.),
- Rastreabilidade: Caracterização da calibração do SM (padrões empregados, incertezas, método, temperatura durante a calibração, frequência de calibração),
- Resultados da calibração de cada SM considerado (T_{dsm} , U_{sm} , k_{sm}),
- Caracterização da inspeção: tipo, frequência de inspeção, número de peças inspecionadas por vez, método de medição, número de ciclos por peça, pontos inspecionados por peça, medidas a implementar para peças fora da especificação,
- Fontes de incerteza do PM (repetitividade, reprodutibilidade, temperatura durante a inspeção, presença de resíduos, poeira, lubrificante, etc.),
- Resultados da medição usando cada PM de interesse (T_{dpfm} , U_{pm} , k_{pm}).

No exemplo são considerados três micrômetros da mesma família, só que com diferentes comportamentos metrológicos dependendo das condições de medição, dessa forma os PMs, são:

- PM-1 não tem tendência (T_{dpm}) e apresenta uma U_{pm} de $\pm 0,003$ mm,
- PM-2 tem tendência de +0,001 mm e U_{pm} de $\pm 0,004$ mm,
- PM-3 tem tendência de +0,005 mm e U_{pm} de $\pm 0,005$ mm.

Nos três casos o fator de abrangência (k_{pm}) tem valor 2,0.

d) Parâmetros

Com as informações adquiridas deve-se calcular alguns parâmetros de interesse (fig. 3.12.a, item 2.4). Neste ponto deve-se:

- Definir o valor do LI e LS de integração a considerar,
- Determinar o LIA e LSA, de acordo com o valor da resolução, DLE, LIE e LSE,
- Determinar a μ_{pfr} e o σ_{pfr} para cada alternativa de PF a analisar,
- Determinar o σ_{pm} a partir da U_{pm} e do k_{pm} /41/.

No caso de dispor de várias máquinas-ferramenta que realizam o mesmo PF e vários SMs que podem ser considerados num mesmo PM, recomenda-se analisar o pior caso. Extrapolando tais resultados a outras combinações entre máquina-ferramenta e SM. Do contrário, deve-se analisar cada caso particularmente.

No exemplo são considerados LS com valor de 6,25 mm e LI com valor de 6,15 mm. Paralelamente não foi considerado DLE, ou seja, dada a resolução de 0,001 mm, uma peça com M menor ou igual a 6,189 mm é sucateada. Da mesma forma, uma peça com diâmetro igual ou superior a 6,201 mm é retrabalhada. As outras peças são aceitas. Dessa forma os limites de aceitação são (LIA = 6,1795 mm) e (LSA = 6,2005 mm).

Tal como é apresentado no exemplo, tanto μ_{pfr} quanto σ_{pm} são calculados para cada um dos três PMs analisados e σ_{pfr} é determinado. Esta última apresenta um só valor, dado que foi considerado só um PF (não sendo afetado pelo desempenho dos PMs).

3.9.3. Cálculo das probabilidades

Uma vez inseridos os dados, procede-se à determinação da probabilidade de ocorrência dos diferentes tipos de eventos, tanto dos que geram erros de classificação (fig. 3.12.b, item 3.1) quanto dos que não geram erros de classificação (fig. 3.12.b, item 3.2). Esta tarefa é realizada para cada alternativa a analisar. Os resultados serão expressos em porcentagem (%), utilizando uma resolução de quatro casas decimais. Dessa forma, é possível também determinar cada probabilidade em termos de partes por milhão (1,2345% equivale a 12345 partes por milhão).

Para cada possível alternativa analisada, soma-se a probabilidade de ocorrência dos sete tipos de eventos calculados. Deve-se verificar que a probabilidade do universo (do espaço amostral) seja igual a 100%. Do contrário, há de se modificar os valores de LI e LS até atingir o 100%. Se não for possível atingir tal valor, significa que algo está errado. Não é aconselhável continuar se este requisito não é satisfeito (fig. 3.12.b, item 3.3).

Nesta etapa, uma vez determinada a probabilidade de ocorrência de cada tipo de falha, é possível obter algumas conclusões. Por exemplo, uma empresa poderia determinar um critério de avaliação dos PMs que limite por exemplo, a porcentagem máxima de falha interna ou externa. Dessa forma, analisando as probabilidades de ocorrência das falhas para cada alternativa, seria possível selecionar o PM mais adequado. Esta solução não é tão robusta quanto determinar os custos totais, embora seja uma alternativa disponível.

No exemplo, para os três casos analisados, foi atingido o requisito de que a probabilidade do universo seja 100% (fig. 3.12.b, item 3.3). Analisando os dados, pode-se verificar que as probabilidades de erro de classificação de PM-1 são menores que as de PM-2 e ainda

menores que as de PM-3. Isto é esperado dado que PM-1 apresenta um melhor desempenho metrológico que PM-2 e ainda melhor que PM-3.

Paralelamente, pode-se verificar que existe uma probabilidade muito baixa de erro de classificação. Particularmente a PDA é superior a 99,78%, sendo que o pior erro de classificação corresponderia a PFAP do PM-3 com 0,13%. Este último pode ser explicado pela presença de uma tendência positiva que induz a aceitar algumas peças com diâmetro (GM) menor que 6,18 mm. Por outro lado, a probabilidade de aceitar erroneamente peças com GM acima de 6,20 mm é nula. Isto se dá porque peças com GM acima do LSE, são medidas como sendo ainda maiores devido à tendência positiva de PM-2 e PM-3.

3.9.4. Cálculo dos custos da qualidade

Nessa fase, são determinados os custos da qualidade associados a cada PM analisado. Este item tem sido subdividido em quatro subitens: levantamento dos custos de falha, levantamento dos custos de prevenção/avaliação, cálculo dos custos e representação gráfica dos resultados.

a) Levantamento dos custos de falha

Neste subitem, devem ser levantadas as informações de custos unitários de falha que permitam posteriormente determinar o custo de falha associado a cada alternativa. No caso de falha interna (fig. 3.10.a), devem ser especificados os custos associados a cada tipo (PDRP e PDRG). No caso de falha externa (fig. 3.10.b), também devem ser especificados os custos associados a cada tipo (PFAP e PFAG).

Em algumas situações, não é possível discriminar entre as conseqüências de aceitar erroneamente peças abaixo ou acima das especificações (PFAP e PFAG). Nesse caso, considera-se um mesmo custo unitário para ambas, como no caso do exemplo apresentado na figura 3.12.c, item 4.1 (falha externa). Além da determinação dos custos unitários, deve ser quantificado o volume de peças produzidas no estudo de forma de permitir calcular o custo total.

No exemplo, sendo que as condições são as mesmas (PG e PF), os custos de falha (interna ou externa) são os mesmos para os três PMs. Sendo que peças abaixo das especificações são sucateadas (R\$ 2,50 por peça), as peças acima das especificações são retrabalhadas (R\$ 0,01 por peça). O custo de falha externa é de (R\$ 5,00 por peça erroneamente aceita), independentemente se a GM da peça é menor que o LIE ou maior que o LSE. O período considerado do estudo é de um ano, quando são produzidas um milhão de peças.

b) Levantamento dos custos de prevenção/avaliação

Neste ponto devem ser levantadas as informações de custos de prevenção e avaliação em função do período do estudo. Também é possível determinar tais custos em função, por exemplo, da produção do período, e inclusive do número de peças de cada tipo (fig. 3.12.c, item 4.2).

No exemplo, sendo que as condições são as mesmas (PG e PF), os custos de prevenção não variam, sendo de (kR\$ 1,50 por ano). No caso dos custos de avaliação, para que o PM-1 apresente esse melhor desempenho que PM-2, devem-se executar algumas tarefas

a mais. O mesmo ocorre ao comparar PM-2 com PM-3. Dessa forma, os custos de avaliação anual são de kR\$ 5,00 no PM-1, kR\$ 2,00 no PM-2 e kR\$ 0,50 no PM-3. Estas diferenças podem ser explicadas em razão ao tempo que o operador deve investir na tarefa de inspeção (método de medição, número de medições por peça), requisitos ambientais, na freqüências de calibração e vida útil dos SMs, etc..

c) Cálculo dos custos

Dadas as informações de custos unitários, probabilidade de falha e volume produzido, procede-se à determinação dos custos de falha interna e custo de falha externa. A soma de ambas gera o custo total de falha. Somando para cada alternativa, os custos de falha, prevenção e avaliação, obtém-se o custo total da qualidade que tem relação com a operação de controle geométrico (fig. 3.12.c, item 4.3).

No exemplo são apresentados os diferentes custos anuais de falha interna, falha externa, falha total e do custo total da qualidade. A melhor alternativa é PM-2 que apresenta um custo total de kR\$3,57 (PM-1 tem kR\$ 6,50 e PM-3 tem kR\$9,12).

d) Representação gráfica dos resultados

Neste ponto são apresentados os gráficos, tanto do custo de falha quanto de custo total para cada alternativa analisada. Esta representação pode ajudar na interpretação dos resultados e auxiliar na tomada de decisões (fig. 3.12.c, item 4.4).

Também pode ser interessante criar outros gráficos como o apresentado na figura 3.13 apresentando a decomposição do custo total em suas quatro fontes (prevenção, avaliação, falha interna e falha externa), permitindo analisar em maior profundidade as causas que geram os custos e as possibilidades de melhorias.

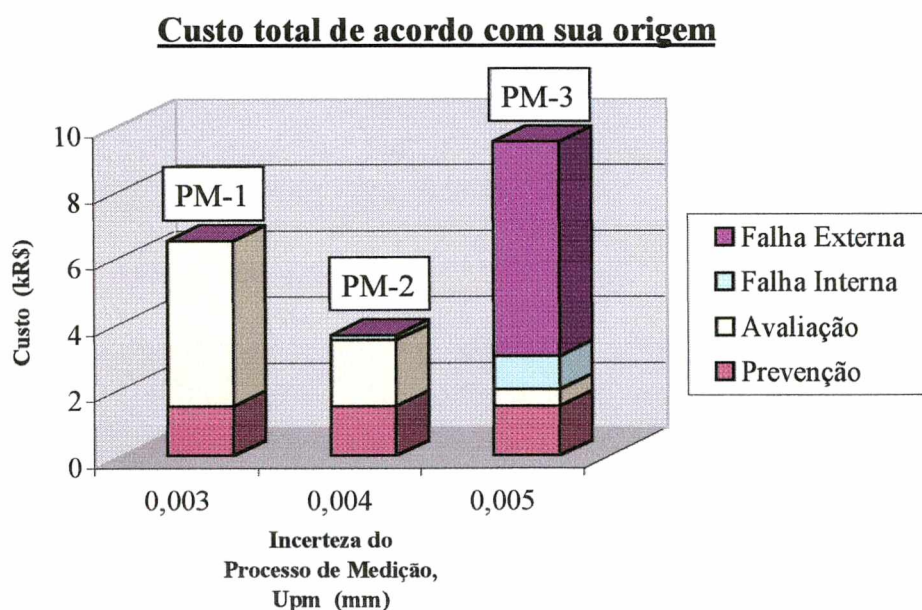


Figura 3.13: Exemplo de decomposição dos custos da qualidade.

No exemplo apresentado, os gráficos podem não ser suficientemente úteis, dado que foram consideradas apenas três alternativas. Num caso prático, onde podem ser consideradas dezenas de alternativas, esta ferramenta pode ser muito útil. Em todo caso,

a figura 3.13 permite identificar claramente que a alternativa PM-1 tem um alto custo de avaliação e PM-3 um alto custo de falha externa. Na soma, PM-2 apresenta o melhor desempenho.

3.9.5. Análise dos resultados e recomendações

De acordo com os custos totais calculados e os objetivos desejados, procede-se à avaliação das diferentes opções. Cada empresa deverá determinar suas próprias conclusões (fig. 3.12.c, item 5). Dessa forma, algumas possíveis conclusões são:

- A solução atualmente considerada na empresa gera altos custos da qualidade, recomenda-se mudar as condições críticas (SM, condições de medição, temperatura de medição, repetitividade, limpeza, máquina-ferramenta, método de medição, etc.),
- O PM atualmente considerado gera baixos custos, recomenda-se manter as condições,
- O PM atualmente empregado é muito bom para a aplicação, provavelmente poderiam ser relaxadas algumas condições ou mudar para um PM mais econômico,
- Depois da análise de vários PMs possíveis, poder-se-ia concluir que o método de avaliação dos PMs empregado tradicionalmente pela empresa é inadequado. Existem algumas características (fontes de incerteza) que não são consideradas no momento da avaliação dos PMs que afetam de forma considerável os custos da qualidade (aumentando consideravelmente os erros de classificação),
- Depois da análise de vários PMs possíveis, poder-se-ia concluir que o método de avaliação dos PMs empregado pela empresa é adequado. Apesar de não considerar todas as características, a metodologia empregada não produz custos significativos de qualidade. Recomenda-se manter as condições,
- O custo de falha interna por peças dentro de especificação erroneamente rejeitadas é muito maior o custo de falha externa por peças fora de especificação erroneamente aceitas. Nesse caso, devem ser centrados os esforços na diminuição dos custos de falha interna mais que de falha externa,
- Existe uma Tdpfm significativa que produz um deslocamento do processo, aumentando o número de peças erroneamente classificadas tanto no limite superior quanto no limite inferior. Neste caso, recomenda-se aplicar correção a tal tendência.

Do exemplo analisado, pode-se concluir que, a melhor alternativa não é nem aquela que apresenta o melhor desempenho metrológico (PM-1) nem aquela mais simples e de menor custo de avaliação (PM-3). Outros métodos de avaliação não permitem obter resultados tão expressivos e conclusivos. Por exemplo, os três SMs têm a mesma resolução, dessa forma o método da Resolução (equação 2.1) não permite determinar qual é o mais adequado. Se for considerado o método da U_{pm}, (equação 2.3) sem correção da tendência (deve ser considerada como fonte de incerteza) os três PMs (PM-1, PM-2 e PM-3) apresentam uma relação entre U_{pm} e T de 1/7, 1/4 e 1/2 respectivamente. Dessa forma, embora PM-3 seria descartado, não fica claro se é melhor considerar PM-1 (1/7) ou PM-2 (1/4).

Concluindo, pode-se demonstrar a potencialidade da metodologia apresentada. Dado que permite responder uma série de perguntas, não só relacionadas com o processo de medição mas também com o processo de fabricação e as especificações do projeto geométrico.

capítulo 4

APLICAÇÕES DA METODOLOGIA E VALIDAÇÃO

Neste capítulo serão apresentadas algumas das possíveis aplicações da metodologia proposta através da análise de três casos e simultaneamente avaliar o desempenho da metodologia proposta.

4.1. CARACTERIZAÇÃO DO ESTUDO PRÁTICO DA METODOLOGIA

Para validar a metodologia considera-se necessário realizar estudos práticos de casos. Os objetivos são:

- Verificar a praticidade da metodologia apresentada, especialmente do modelamento matemático em condições reais de chão de fábrica,
- Avaliar o comportamento dos custos da qualidade ao variar as condições de Projeto Geométrico (PG), Processo de Fabricação (PF) e Processo de Medição (PM),
- Analisar as influências dos custos unitários dos diferentes componentes que formam parte do custo da qualidade (custo de prevenção, avaliação, falha interna e falha externa). No caso dos custos de falha interna, avaliar a relação e influência dos custos de rejeição de peças pequenas em relação aos custos de rejeição de peças grandes,
- Conhecer, na prática, o grau de dificuldade associado ao levantamento e determinação das variáveis requeridas para o cálculo dos custos da qualidade. Tais como custos unitários, variáveis do PF (como a variabilidade) e do PM (como a incerteza),
- Identificar aspectos e problemas não detectados no modelamento teórico, particularmente, quanto as restrições de uso e condições de aplicabilidade,
- Avaliar os métodos atualmente empregados pelas empresas. Verificar principais diferenças em relação aos resultados obtidos ao aplicar a metodologia.

Foram estabelecidos três estudos de caso, sendo o primeiro simulado e os outros dois da prática industrial junto à empresa Irmãos ZEN da cidade de Brusque/SC, empresa que produz impulsores para motores de partida de carros e tem um nível de gestão da qualidade que viabiliza a implementação da metodologia. A empresa possui certificação ISO 9000 e QS 9000.

4.2. ESTUDO DE CASO 1: SIMULADO

O primeiro caso tem como objetivo principal, determinar a influência do método de avaliação dos PMs nos custos da qualidade, para isto, três diferentes opções serão consideradas. O PF a analisar corresponde ao acabamento por fresamento da espessura de um disco metálico. O disco tem forma similar a um disco compacto, CD (fig 4.1).

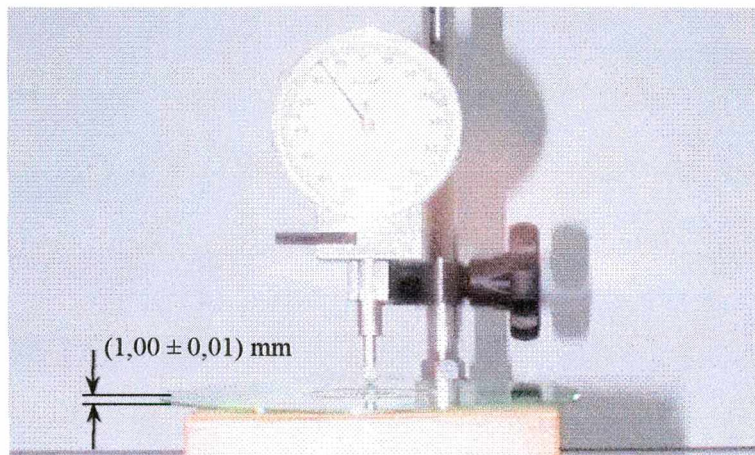


Figura 4.1: Especificação de projeto geométrico da grandeza a medir.
Caso 1: Simulado - Espessura do Disco.

4.2.1. Métodos de avaliação de processos de medição a considerar

A empresa fictícia quer quantificar os custos da qualidade associados, considerando as conseqüências da aplicação de três métodos diferentes na especificação do PM. Estes são: Método da Resolução (item 2.2.2), Método do Erro Máximo (item 2.2.3) e o Método da Incerteza do Sistema de Medição (item 2.2.4).

4.2.2. Caracterização do problema

Além de determinar o impacto do método de avaliação dos PMs, a empresa dispõe de três opções de fresamento, e quer saber qual das três máquinas é mais recomendável para fazer o trabalho.

4.2.3. Aquisição e preparação dos dados

Todas as variáveis do caso, tanto de PG, quanto de PF e quanto de PM foram arbitradas, porém com melhor aproximação da realidade:

a) Variáveis associadas ao projeto geométrico (PG)

De acordo com as especificações geométricas, o disco deve ter $(1,00 \pm 0,01)$ mm de espessura para cumprir sua função adequadamente, do contrário, a peça em questão muito provavelmente irá gerar problemas.

b) Variáveis associadas ao processo de fabricação (PF)

Analisaram-se três opções diferentes de fresamento, cada uma com diferente variabilidade real (V_{pfr}). Na figura 4.2 é apresentado um quadro com os valores das características de interesse do PF. Na operação de qualquer dos três PFs, a média medida (μ_{pfm}) é ajustada para mantê-la no nominal quando necessário, pelo ajuste das máquinas. Para todos os casos analisadas, deve-se levar em conta que, embora o valor médio medido do PF (μ_{pfm}) se encontre centrado, a média real do PF (μ_{pfr}) pode estar descentrada se os PMs apresentam T_{dpm} (veja equação 3.2).

CARACTERÍSTICAS DOS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO		
IDENTIFICAÇÃO	VALOR MÉDIO MEDIDO, μpfm (mm)	VARIABILIDADE REAL, V_{pfr} (mm)
PF-1	1,000	0,013
PF-2	1,000	0,020
PF-3	1,000	0,040

Figura 4.2: Valores atribuídos aos processos de fabricação da dimensão (GM) crítica.
Caso 1: Simulado - Espessura do Disco.

c) Variáveis associadas ao processo de medição (PM)

É feita uma inspeção 100% utilizando um relógio comparador mecânico. As cinco alternativas a analisar foram escolhidas do catálogo de um determinado fabricante, de acordo com os três critérios de avaliação a considerar (fig 4.3). Será considerada uma resolução equivalente à divisão de escala (leitura sem interpolação).

CARACTERÍSTICAS DOS PROCESSOS DE MEDIÇÃO				
IDENTIFICAÇÃO	RESOLUÇÃO (mm)	ERRO MÁXIMO (mm)	INCERTEZA, U_{sm} (mm)	TENDÊNCIA, T_{dpm} (mm)
PM-1	0,001	0,002	$\pm 0,004$	0,000
PM-2	0,001	0,004	$\pm 0,006$	0,000
PM-3	0,001	0,005	$\pm 0,007$	0,000
PM-4	0,001	0,008	$\pm 0,010$	0,000
PM-5	0,002	0,008	$\pm 0,012$	0,000

- PM-1: Alternativa muito adequada segundo o Método da U_{sm} ($U_{sm} = T/5$),
- PM-2: Alternativa adequada segundo o Método da U_{sm} ($U_{sm} = T/3,3$),
- PM-3: Alternativa adequada segundo o Método do Erro Máximo (Erro Máximo = $T/4$),
- PM-4: Alternativa muito adequada segundo o Método da Resolução ($R = T/20$),
- PM-5: Alternativa adequada segundo o Método da Resolução ($R = T/10$).

Figura 4.3: Valores atribuídos ao processo de medição da dimensão crítica (GM).
Caso 1: Simulado - Espessura do Disco.

Dessa forma, a resolução foi obtida a partir da informação de divisão de escala fornecida pelo fabricante. Em relação ao erro máximo, dado que trata-se de um caso fictício (não se conhece o valor real que teria um determinado instrumento), foi utilizada a informação fornecida pelo fabricante. Em relação à U_{sm} , pode-se estimar seu limite máximo (para um relógio dentro das normas consideradas pelo próprio fabricante) como sendo aproximadamente igual ao erro máximo mais uma a duas vezes a resolução. Neste caso, por segurança foi considerada esta última opção.

Em relação à U_{pm} , estima-se que esta pode ser muito similar à U_{sm} dado que as variações das condições de medição podem ser desprezíveis (temperatura, alinhamento, variação entre operadores, etc.). A empresa quer analisar, com qual das quinze possíveis combinações (cinco opções de PM em cada uma três opções de PF) consegue minimizar os custos da qualidade. Particularmente, deseja-se comparar o desempenho dos três métodos escolhidos: U_{sm} (PM-1 e PM-2), Erro Máximo (PM-3) e Resolução (PM-4 e PM-5).

4.2.4. Cálculo das probabilidades

Aplicando a metodologia proposta, foram determinadas as probabilidades de ocorrência dos eventos. Na figura 4.4 são apresentadas, para cada uma das quinze alternativas, as probabilidades de ocorrência dos eventos que geram falhas.

a) PEÇAS DENTRO DAS ESPECIFICAÇÕES E REPROVADAS (PEQUENAS)			
PDRP (%)			
Processo de Medição	Processo de Fabricação		
	PF-1	PF-2	PF-3
PM-1	0,0184	0,2680	1,4298
PM-2	0,2273	0,8858	2,7133
PM-3	0,5373	1,4173	3,4501
PM-4	2,6997	3,9571	5,9622
PM-5	4,2322	5,3839	6,9151

b) PEÇAS DENTRO DAS ESPECIFICAÇÕES E REPROVADAS (GRANDES)			
PDRG (%)			
Processo de Medição	Processo de Fabricação		
	PF-1	PF-2	PF-3
PM-1	0,0184	0,2680	1,4298
PM-2	0,2273	0,8858	2,7133
PM-3	0,5373	1,4173	3,4501
PM-4	2,6997	3,9571	5,9622
PM-5	4,2322	5,3839	6,9151

c) PEÇAS FORA DAS ESPECIFICAÇÕES (PEQUENAS) E APROVADAS			
PFAP (%)			
Processo de Medição	Processo de Fabricação		
	PF-1	PF-2	PF-3
PM-1	0,0001	0,0574	1,5401
PM-2	0,0001	0,0602	1,5479
PM-3	0,0001	0,0611	1,9725
PM-4	0,0001	0,0629	2,2594
PM-5	0,0001	0,0680	2,5940

d) PEÇAS FORA DAS ESPECIFICAÇÕES (GRANDES) E APROVADAS			
PFAG (%)			
Processo de Medição	Processo de Fabricação		
	PF-1	PF-2	PF-3
PM-1	0,0001	0,0574	1,5401
PM-2	0,0001	0,0602	1,5479
PM-3	0,0001	0,0611	1,9725
PM-4	0,0001	0,0629	2,2594
PM-5	0,0001	0,0680	2,5940

Figura 4.4: Probabilidade de ocorrência dos diferentes tipos de falha.
Caso 1: Simulado - Espessura do Disco.

Para atingir uma probabilidade do universo de 100%, utilizou-se LI e LS com valores de 0,7 mm e 1,3 mm respectivamente. Um interessante resultado da aplicação da metodologia, foi determinar a probabilidade de ocorrência de PDA (peças dentro das especificações e corretamente classificadas), ou seja das peças cuja grandeza a medir se encontra dentro dos limites de especificação. Este valor varia fortemente entre 72,8% até mais de 99,9%, dependendo da capacidade do processo de fabricação e do PM, sendo maior nos casos de baixa variabilidade do processo de fabricação e de baixa incerteza do PM, como esperado.

4.2.5. Cálculo dos custos da qualidade

Estes foram simulados considerando um período de produção de um ano, onde são fresados um milhão de peças. Sendo que cada um dos custos representa (fig. 4.5):

a) Custos de prevenção

Compreende custos de manutenção preventiva, avaliação mais freqüente da capacidade, treinamento do pessoal (a menor variabilidade, maior custo de prevenção).

b) Custos de avaliação

Este custo tende a ser proporcional à qualidade metrológica dos PMs, particularmente dos SMs considerados. Isto explica-se pelo maior valor dos SMs envolvidos (maior custo de depreciação) e pela maior complexidade da calibração. Considera o tempo que o operador utiliza na medição das peças, custo de depreciação e calibração dos SMs.

c) Custo de falha interna

Tanto peças com espessura maior quanto com espessura menor são sucateadas, não sendo rentável retrabalhar-as. A diferença entre o custo de falha interna dos diferentes PFs se explica pelo custo diferenciado de fabricação nas diferentes máquinas fresadoras. Considera custo de matéria prima e valor agregado desperdiçado.

d) Custo de falha externa

Conseqüências do fornecimento de discos fora das especificações, independentemente do PF considerado. Considera custos por perda de imagem, garantias e devoluções.

CARACTERÍSTICAS DE CUSTOS UNITÁRIOS DA QUALIDADE			
Identificação	Prevenção (kR\$/ano)	Falha interna (R\$/peça)	Falha externa (R\$/peça)
PF-1	2,00	0,60	5,00
PF-2	1,00	0,50	5,00
PF-3	0,50	0,40	5,00
Identificação	Avaliação (kR\$/ano)		
PM-1	1,60		
PM-2	1,50		
PM-3	1,45		
PM-4	1,40		
PM-5	1,25		

Figura 4.5: Valores unitários atribuídos para determinar os custos da qualidade.
Caso 1: Simulado - Espessura do Disco.

4.2.6. Análise dos resultados e recomendações

Com a determinação das probabilidades de falha e a informação dos custos, gera-se o relatório onde se determinam os custos da qualidade (fig. 4.6). Graças à metodologia apresentada, agora é possível comparar diferentes opções tanto de PM quanto de PF.

Em termos quantitativos, neste caso a melhor condição se consegue quando é utilizado o PF-1 com PM-1, alcançando um custo da qualidade total mínimo de kR\$ 3,83 por ano. No outro extremo, a pior das quinze opções seria utilizar o PF-3 com PM-5, alcançando um custo total quase cem vezes superior. O comportamento dos resultados, pode ser explicado pelo alto custo de falha, tanto quanto interna como externa, sendo a primeira determinante no caso de PF-1 e PF-2 e a segunda no caso de PF-3. No caso da melhor opção, dado a baixíssima probabilidade de falha de medição, são determinantes os custos de prevenção e avaliação.

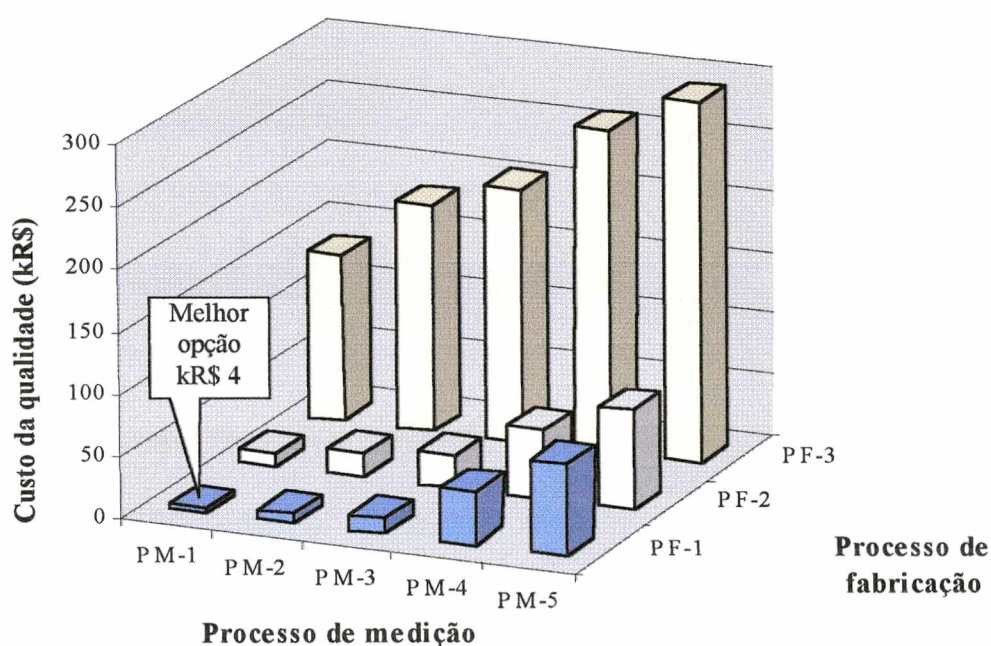


Figura 4.6: Custo total da qualidade associado às alternativas analisadas.
Caso 1: Simulado - Espessura do Disco.

Concluindo, de acordo com as condições do problema analisado, o PF que gera menores custos da qualidade é aquele de menor variabilidade (PF-1). Em relação aos métodos de avaliação dos PMs, também fica evidente a diferença dos resultados obtidos pelos diferentes métodos, demonstrando a conveniência de considerar o Método da Usm (em relação aos outros dois analisadas). Assim, para o caso de PF-1, este método (Usm) gera um custo total mínimo de kR\$ 3,83 (PM-1), aumentando quase ao dobro quando considera-se PM-2. No caso do Método do Erro Máximo (PM-3), o custo total aumenta quase três vezes. No caso do Método da Resolução, no melhor dos casos (PM-4) geraria um custo da qualidade de quase dez vezes maior, chegando até quatorze vezes maior no caso de PM-5. Dessa forma, fica evidente que o método da Resolução é inadequado como critério de seleção.

4.2.7. Efeito do deslocamento dos limites de especificação (DLE)

Aproveitando os dados deste caso, considerando a melhor opção de PM (PM-1), deseja-se quantificar o impacto do DLE sobre os custos da qualidade. Para isso, serão analisadas cinco alternativas, sendo a primeira opção sem deslocamento (situação usual), nas demais com DLE gradativamente maior, chegando à quinta com a proposição integral da Norma ISO 14253-1 (fig. 4.7) /28/.

IDENTIFICAÇÃO DAS DIFERENTES FAIXAS DE ACEITAÇÃO		
IDENTIFICAÇÃO	DLE (mm)	FAIXA DE ACEITAÇÃO, FA (mm)
FA-1	0	T
FA-2	$0,25 \cdot U_{pm}$	$T - 0,5 \cdot U_{pm}$
FA-3	$0,5 \cdot U_{pm}$	$T - U_{pm}$
FA-4	$0,75 \cdot U_{pm}$	$T - 1,5 \cdot U_{pm}$
FA-5	U_{pm}	$T - 2 \cdot U_{pm}$

Figura 4.7: Alternativas de faixas de aceitação a analisar, de acordo a diferentes DLE das tolerâncias do PG.

Caso 1: Simulado - Espessura do Disco.

Dada a sistemática de operação da metodologia, foi gerado um relatório para cada um das cinco faixas de aceitação. Os resultados dessa análise são apresentados na figura 4.8.

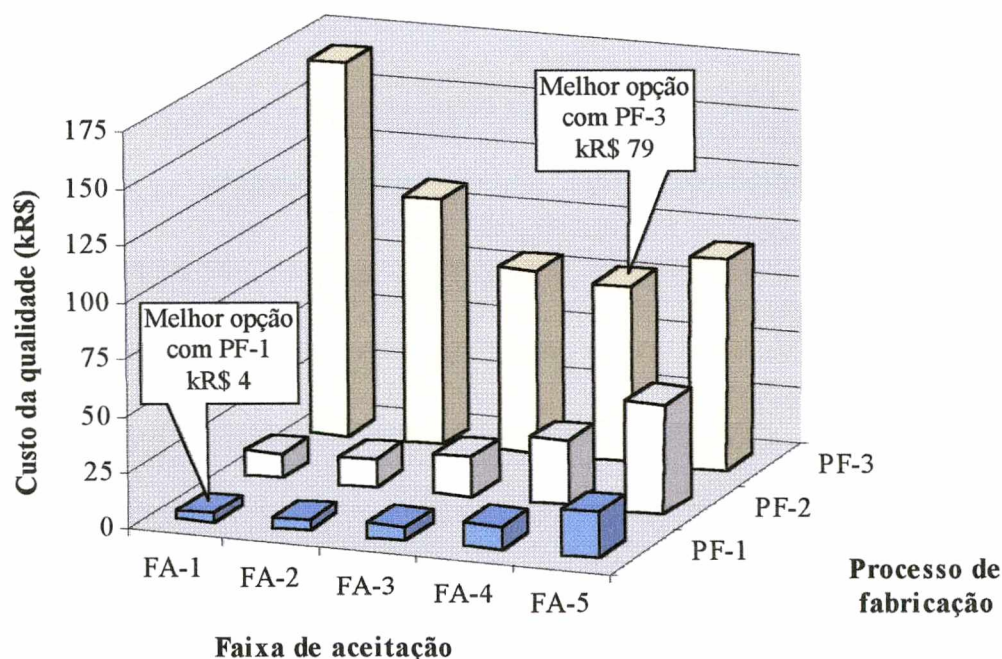


Figura 4.8: Custo total da qualidade em função do DLE aplicado ao PM-1.
Caso 1: Simulado - Espessura do Disco.

De tais resultados, pode-se verificar que novamente, a melhor opção é aquela com PF-1, PM-1 e FA-1 (sem DLE). Tanto para PF-1 como para PF-2, o comportamento dos custos pode ser explicado pelo grande aumento dos custos de falha interna, sendo este muito maior que a diminuição dos custos de falha externa. Ou seja, o DLE produz um aumento

no número de peças rejeitadas (dentro como fora das especificações), onde o aumento no custo de sucatear peças boas é muito superior à redução de custos associado à rejeição de peças fora das especificações (diminuição do custo de falha externa).

No caso do PF-3, o custo mínimo é atingido quando considera-se FA-4. Para compreender o comportamento dos custos nesse caso, recorre-se à figura 4.9. Os custos da prevenção e avaliação são desprezíveis, dessa forma, e dado o comportamento dos custos de falha, para o caso de PF-3, o mínimo se produz numa situação intermediária (FA-4). Embora o custo de falha interna aumente, o custo de falha externa diminui numa proporção muito maior (em relação à opção sem DLE), de forma tal que o custo total cai em mais de 50%. Dessa forma, o DLE faz sentido, sendo que o melhor deslocamento é de $0,75 \cdot \text{Upm}$.

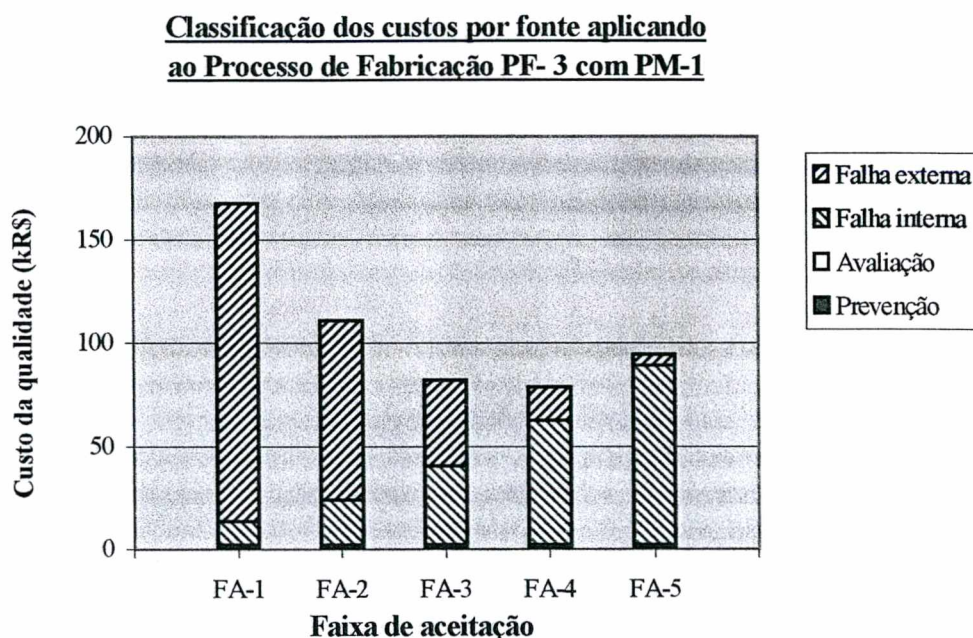


Figura 4.9: Contribuição de cada fonte de custo da qualidade considerando PF-3 e PM-1. Caso 1: Simulado - Espessura do Disco.

4.3. ESTUDO DE CASO 2: ZEN - ROLETE

A peça a analisar é um rolete, que forma parte do impulsor de motor de partida produzido pela empresa ZEN. Existe uma grande gama de impulsores os quais requerem de entre cinco a sete roletes. O diâmetro e acabamento superficial dos roletes é fundamental para uma boa função dos mesmos (fig. 4.10). Roletes fora das especificações produzem um aumento do nível de ruído e conseqüentemente uma diminuição da vida útil do impulsor.

A peça passa por uma série de PFs, sendo o último o processo de retificação Centerless, o qual determina o diâmetro final de cada rolete. Para o presente estudo de caso, será considerado o tipo Nº 728.012.0 com diâmetro nominal de 6,20 mm e limites de 6,18 mm (inferior) e 6,20 mm (superior). Deste modelo são produzidos 12,36 milhões de unidades anualmente numa só máquina.

Em relação ao PM, devido ao grande número de peças produzidas (3600 roletes por hora) e a estabilidade do PF, utiliza-se inspeção por amostragem mediante um micrômetro digital.

O próprio operador da máquina a cada 20 minutos mede dois roletes. Cada um é medido umas seis vezes, tipicamente a três alturas e em duas direções perpendiculares. Se alguma das peças estiver fora dos limites, procede-se a uma re-inspeção 100% de todas as peças produzidas desde a inspeção anterior, ou seja, umas 1200 peças. Dessa forma são refugados os roletes com diâmetro menor que 6,180 mm, retrabalhados se o diâmetro é maior a 6,200 mm e aprovados se estão dentro de tais limites. Se é necessário, o próprio operador ajusta a máquina para eliminar possíveis tendências.

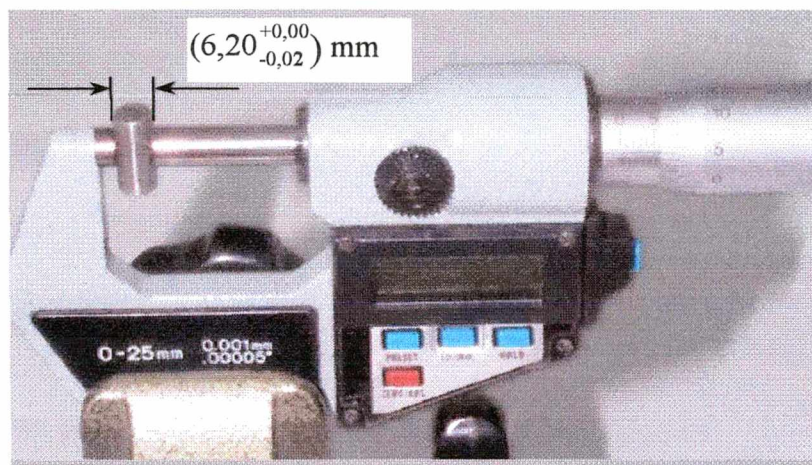


Figura 4.10: Especificação de projeto geométrico da grandeza a medir.
Caso 2: ZEN – Diâmetro do Rolete.

Especial cuidado se deve ter na limpeza tanto do micrômetro quanto das peças a medir, dada a contaminação do ambiente de trabalho por lubrificante. Dessa forma o micrômetro deve ser limpo antes de realizar cada ajuste de zero. Na medição, tanto o micrômetro quanto as peças amostradas, devem ser limpos adequadamente.

4.3.1. Metodologia empregada pela empresa

O procedimento habitual de avaliação/especificação dos PMs empregados pela empresa, não considera os processos de medição, só estabelece requisitos para a seleção dos SMs que devem ser utilizados. Dessa forma, o requisito a cumprir é expresso na equação 4.1 onde se limita o valor máximo da Incerteza de Medição do SM em condições de laboratório:

$$U_{sm} \leq \frac{T}{3} \quad (4.1)$$

Sendo o diâmetro do rolete considerado uma característica crítica, dado seu impacto na vida útil do impulsor, estabeleceu-se um requisito mais exigente:

$$U_{sm} \leq \frac{T}{7} \quad (4.2)$$

No caso da equação 4.1, o divisor três provém de um estudo promovido pela empresa onde a mesma constatou, que a regra empírica historicamente empregada, atingia tal condição

para a maioria dos SMs utilizados pela empresa. No caso do valor sete da equação 4.2, este foi estabelecido empiricamente como sendo um requisito mais exigente, intermediário entre três e dez. Dessa forma, o critério estabelece requisitos só para o sistema de medição. A equação empregada para determinar sua incerteza (U_{sm}) é:

$$U_{sm} = \pm \left(|T_{dsm}| + \sqrt{U_h^2 + \left(t \cdot \frac{s}{\sqrt{n}} \right)^2} \right) \quad (4.3)$$

Onde: U_h : Incerteza herdada do padrão,
 t : Fator de t-student para (n-1) graus de liberdade,
 s : Desvio padrão das indicações,
 n : Número de leituras para um mesmo ponto a calibrar,

No caso de SMs calibrados em diferentes pontos da faixa de medição, considera-se o valor máximo da incerteza como representativa de toda a faixa. Claramente esta metodologia para cálculo de U_{sm} não está de acordo com ISO-GUM além de desconsiderar as condições reais de medição, não leva em conta uma série de fontes de incerteza, como por exemplo a resolução do próprio SM.

O processo de retificação do diâmetro do rolete tem uma tolerância de 0,020 mm. Dessa forma, o requisito (equação 4.3) seria de usar um sistema de medição com incerteza menor que $\pm 0,003$ mm (0,020/7 mm). Por isso, na empresa se emprega um micrômetro eletrônico de incremento digital 0,001 mm, dado que a U_{sm} determinada por seu método, atinge esta meta para a maioria destes micrômetros. De um certificado de calibração típico analisado, (calibração feita internamente no laboratório de metrologia da empresa), constatou-se uma U_{sm} de apenas $\pm 0,001$ mm utilizando a equação 4.3 /10/.

Paralelamente, a empresa é certificada QS 9000, pelo qual devem empregar também o método do MSA para verificar a adequabilidade dos PMs. É aqui onde a empresa evidencia um questionamento, dado que o PF é aparentemente muito capaz, pergunta se a resolução de 0,001 mm não seria insuficiente para tal inspeção /10/. Esta questão também pode ser respondida pelo método em teste.

4.3.2. Caracterização do problema

A empresa deseja avaliar se o PM atualmente considerado é o mais adequado para a medição do diâmetro do rolete após o processo de retificação. Em particular, deseja analisar a influência do próprio SM e das condições de medição, particularmente da presença de uma camada de lubrificante entre o micrômetro e o rolete, consequência de um eventual descuido na limpeza, e particularmente do problema de ajuste de zero do instrumento quando as faces de contato não estão perfeitamente limpas. O ajuste de zero é feito fechando o instrumento e zerando nessa condição.

4.3.3. Aquisição e preparação dos dados

Todas as variáveis de interesse no caso, tanto de PG, quanto PF e quanto PM foram levantadas na própria empresa ou fornecidas por seus colaboradores.

a) Variáveis associadas ao projeto geométrico (PG)

De acordo as especificações, o rolete deve ter um diâmetro nominal de 6,20 mm podendo variar desde 6,18 mm até 6,20 mm. Não foi possível obter razões que fundamentaram tais valores, sendo considerados como limites funcionais. Ou seja, peças dentro de tais especificações não devem produzir problemas e peças fora das especificações geram problemas.

b) Variáveis associadas ao processo de fabricação (PF)

De estudos de capacidade do PF analisado, pode-se concluir que este não se encontra sob controle estatístico, apresentando algumas causas especiais de variabilidade, de forma tal que seu comportamento não é plenamente estável. O PF é permanentemente centrado de acordo com os valores obtidos nas amostras inspecionadas, de forma tal que pode-se considerar como um processo centrado. Em todo caso, o modelamento também permite avaliar PF descentrados, desde que tal desvio seja estável e conhecido. Se tal descentragem não for estável, pode-se considerar para efeitos de cálculo o caso mais desfavorável (média acima ou embaixo do nominal).

De informes estatísticos, a V_{pfm} assume valores numa faixa de 0,011 mm até 0,015 mm. Paralelamente, o PM que foi utilizado para os estudos estatísticos tem uma alta incerteza relativa, pelo qual não é possível utilizar a equação 3.3 para determinar a V_{pfr} , sendo necessário estimar tais valores. Dessa forma serão considerados três opções de PF (fig. 4.11).

CARACTERÍSTICAS DOS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO		
IDENTIFICAÇÃO	VALOR MÉDIO MEDIDO, μ_{pfm} (mm)	VARIABILIDADE REAL, V_{pfr} (mm)
PF-1	6,190	0,005
PF-2	6,190	0,010
PF-3	6,190	0,015

- PF-1: Melhor capacidade do processo a considerar, desde que sejam tomadas algumas medidas preventivas tendentes a diminuir a variabilidade. Particularmente, fazendo ensaios e verificações do seu desempenho com maior frequência, maior investimento em manutenções preventivas e maior controle de CEP.
- PF-2: Opção intermediária que considera um investimento médio de prevenção. Dada a prática atual, esta é a opção que representa de melhor forma a realidade do processo em uso na empresa.
- PF-3: Pior opção de PF, considerando baixos custos de prevenção. Opção possível se não são mantidas ações de prevenção.

Figura 4.11: Valores atribuídos aos processos de fabricação da dimensão crítica.
Caso 2: ZEN – Diâmetro do Rolete.

c) Variáveis associadas ao processo de medição (PM)

Neste caso serão analisadas cinco alternativas. Na figura 4.12 é apresentado um quadro com os valores das características de interesse /10, 16, 25, 42/. Dado que a inspeção é feita por amostragem, o modelo deve ser adaptado de forma a considerar suas

particularidades. Para isto, são calculadas as probabilidades de ocorrência dos diferentes tipos de eventos da forma como foi apresentado no capítulo anterior. A diferença aparece no cálculo dos custos da qualidade.

Se, na amostragem, for obtida ao menos uma peça fora das especificações, devem ser inspecionadas todas as peças retificadas desde a inspeção anterior (inspeção 100%). Caso contrário, todo o lote respectivo é aprovado e os custos da qualidade têm um comportamento diferente.

Dessa forma, deve-se determinar a probabilidade de que um lote seja inspecionado 100% (probabilidade de obter ao menos uma peça fora das especificações numa amostra de duas peças no lote), sendo que, a probabilidade de achar exatamente uma peça fora das especificações está determinada pela soma das probabilidades de PFRP + PFRG + PDRP + PDRG. Dessa forma, os custos podem ser expressados como um valor ponderado entre a alternativa de inspeção 100% e a alternativa de aprovação 100% (apenas pela inspeção da amostra):

$$CP_t = P_1 \cdot CP_1 + P_0 \cdot CP_0 \quad (4.4)$$

$$CA_t = P_1 \cdot CA_1 + P_0 \cdot CA_0 \quad (4.5)$$

$$CFI_t = P_1 \cdot CFI_1 + P_0 \cdot CFI_0 \quad (4.6)$$

$$CFE_t = P_1 \cdot CFE_1 + P_0 \cdot CFE_0 \quad (4.7)$$

$$CTQ = CP_t + CA_t + CFI_t + CFE_t \quad (4.8)$$

- Onde: t: Índice que representa o custo ponderado por período do estudo,
 1: Índice que representa os custos por período, no caso de inspeção 100%,
 0: Índice que representa os custos por período no caso de aprovação do lote todo apenas pela inspeção da amostra,
 CP: Custo de prevenção no período do estudo (um ano no caso do rolete),
 CA: Custo de avaliação no período do estudo (um ano no caso do rolete),
 CFI: Custo de falha interna no período do estudo (um ano no caso do rolete),
 CFE: Custo de falha externa no período do estudo (um ano no caso do rolete),
 CTQ: Custo total da qualidade no período do estudo (um ano no caso do rolete),
 P₁: Probabilidade de ser encontrada ao menos uma peça fora das especificações, dentro da amostra inspecionada (gera inspeção 100%),
 P₀: Probabilidade de não encontrar peças fora das especificações, dentro da amostra inspecionada. Na prática P₀ = (1 - P₁),

No caso de aprovar o lote todo (em relação ao caso de inspeção 100%), os custos de prevenção não variam, têm-se uma diminuição dos custos de avaliação, pelo fato de medir apenas duas peças por lote. Em relação aos custos de falha interna, estes diminuem, dado que nenhuma peça é erradamente reprocessada ou refugada. Por sua vez, os custos de falha externa aumentam, dada a errada aprovação de todas as peças fora de especificação (inclusive de PFRP e PFRG), que pudessem existir no lote.

Levando em conta estas considerações, pode-se analisar, com qual das quinze possíveis combinações (três opções de PF por cada cinco opções de PM), a empresa consegue minimizar os custos da qualidade envolvidos. A alternativa que representa de melhor forma a realidade atual da empresa é aquela formada pelo PF-2 e PM-4.

CARACTERÍSTICAS DOS PROCESSOS DE MEDIÇÃO		
IDENTIFICAÇÃO	INCERTEZA, U_{pm} (mm)	TENDÊNCIA, T_{dpm} (mm)
PM-1	±0,003	0,000
PM-2	±0,004	+0,001
PM-3	±0,005	0,000
PM-4	±0,005	+0,005
PM-5	±0,007	+0,005

- PM-1: Melhor incerteza que poderia conseguir-se com um micrômetro. Para isso, as principais fontes de incerteza devem ser controladas e limitadas. Especial ênfase no controle do paralelismo entre faces de contato do micrometro, na correção da T_{dpm}, na eliminação do erro de zeragem e na limpeza das peças a medir (eliminar camada de lubrificante). Além de dispor de operadores capacitados.
- PM-2: Alternativa que leva em conta a presença de uma parcela de T_{dpm} estável de acordo com as características reais dos SMs disponíveis pela empresa. A medição é feita sem presença de camada lubrificante. Opção possível desde que seja eliminado o erro de medição na presença de uma camada de lubrificante e do erro da zeragem.
- PM-3: Similar ao PM-2, embora a T_{dpm} não seja estável. Dessa forma, tal tendência é considerada como uma parcela a mais dentro da incerteza de medição. Não considera erros por presença de camada lubrificante.
- PM-4: Opção que melhor representa a realidade atual da empresa. Considera-se um erro sistemático permanente (não corrigido) por presença de camada lubrificante, especialmente no ato de zeragem, que produz uma T_{dpm} de até +0,005 mm. Este erro foi constatado comparando medidas feitas pelo operador nas condições reais de inspeção em relação a valores obtidos no laboratório de metrologia da própria empresa.
- PM-5: Incerteza máxima de um PM na base de um micrômetro que apenas satisfaz os requisitos da norma internacional (ISO 3611). Qualquer micrômetro que esteja dentro da norma, utilizado nas condições de medição da empresa, permitiria assegurar uma U_{pm} menor que ±0,007 mm. Considera a presença de uma T_{dpm} de +0,005 mm da mesma forma que no caso PM-4.

Figura 4.12: Valores atribuídos aos processos de medição.
Caso 2: ZEN – Diâmetro do Rolete.

4.3.4. Cálculo das probabilidades

Aplicando a metodologia proposta, foi determinada a probabilidade de ocorrência dos diferentes eventos. Para atingir uma probabilidade do universo de eventos de 100%,

utilizou-se LI e LS com valores de 6,15 mm e 6,25 mm respectivamente. Paralelamente, não foi aplicado DLE. Na figura 4.13 são apresentadas, para cada uma das quinze alternativas, as probabilidades de ocorrência dos eventos que geram falhas.

a) PEÇAS DENTRO DAS ESPECIFICAÇÕES E REPROVADAS (PEQUENAS)			
PDRP (%)			
Processo de Medição	Processo de Fabricação		
	PF-1	PF-2	PF-3
PM-1	0,0000	0,0001	0,0142
PM-2	0,0001	0,0028	0,0467
PM-3	0,0034	0,0237	0,1474
PM-4	0,0034	0,0205	0,0508
PM-5	0,1759	0,3274	0,4986

b) PEÇAS DENTRO DAS ESPECIFICAÇÕES E REPROVADAS (GRANDES)			
PDRG (%)			
Processo de Medição	Processo de Fabricação		
	PF-1	PF-2	PF-3
PM-1	0,0000	0,0001	0,0142
PM-2	0,0001	0,0028	0,0516
PM-3	0,0034	0,0237	0,1474
PM-4	0,0034	0,0237	0,1490
PM-5	0,1759	0,3379	0,7319

c) PEÇAS FORA DAS ESPECIFICAÇÕES (PEQUENAS) E REPROVADAS			
PFAP (%)			
Processo de Medição	Processo de Fabricação		
	PF-1	PF-2	PF-3
PM-1	0,0000	0,0000	0,0015
PM-2	0,0000	0,0000	0,0106
PM-3	0,0000	0,0000	0,0016
PM-4	0,0000	0,1317	2,1769
PM-5	0,0000	0,1246	2,0417

d) PEÇAS FORA DAS ESPECIFICAÇÕES (GRANDES) E REPROVADAS			
PFAG (%)			
Processo de Medição	Processo de Fabricação		
	PF-1	PF-2	PF-3
PM-1	0,0000	0,0000	0,0015
PM-2	0,0000	0,0000	0,0002
PM-3	0,0000	0,0000	0,0016
PM-4	0,0000	0,0000	0,0000
PM-5	0,0000	0,0000	0,0000

Figura 4.13: Probabilidade de ocorrência dos diferentes tipos de falha.
Caso 2: ZEN – Diâmetro do Rolete.

Um resultado interessante da aplicação da metodologia foi comprovar que o PF utilizado pela empresa, em termos gerais, é muito capaz. A probabilidade de ocorrência de PDA, ou seja das peças cuja grandeza a medir se encontra dentro dos limites de especificação não é menor que 96,5%, e na maioria dos casos supera 99,9%. Particularmente, a situação que melhor representa a realidade atual da empresa (PF-2 com PM-4) apresenta uma probabilidade de PDA de 99,82%. Estes resultados são muito consistentes com a realidade da empresa onde praticamente 100% das peças são aproveitadas, sendo escasso o número de peças reprocessadas e quase nulo o número de peças refugadas.

Mediante os resultados apresentados na figura 4.13, é possível determinar a probabilidade de que um lote deva ser inspecionado 100% (P_1), ou seja, a probabilidade de que ao menos uma das duas peças amostradas no lote, apresente diâmetro fora das especificações. A probabilidade de não inspecionar o lote todo (P_0), será o complemento de tais valores (fig. 4.14). Dessa figura pode-se observar a baixa probabilidade de inspeção 100%, o qual é consistente com a realidade da empresa. Esta constatação evidencia que a presença de peças fora das especificações nos lotes não inspecionados, pode ser crítico na avaliação dos custos da qualidade.

PROBABILIDADE DE INSPEÇÃO 100% DE UM LOTE (%)			
Processo de Medição	Processo de Fabricação		
	PF-1	PF-2	PF-3
PM-1	0,0000	0,0004	0,0632
PM-2	0,0004	0,0112	0,2080
PM-3	0,0136	0,0948	0,5954
PM-4	0,0136	0,0950	0,5952
PM-5	0,7027	1,3474	2,9074

Figura 4.14: Probabilidade de inspeção 100% de um lote de peças.
Caso 2: ZEN – Diâmetro do Rolete.

4.3.5. Cálculo dos custos da qualidade

O estudo será feito considerando um período de um ano, onde são produzidas 12,36 milhões de roletes na retificadora, em 10,3 mil lotes, utilizando 60% do tempo produtivo da máquina (156 dias no ano e 22 horas por dia). Na figura 4.15 é apresentado um quadro resumo com os custos unitários, disponibilizados pela empresa /10/. Sendo que:

a) Custos de prevenção

Na quantificação deste tipo de custos, foram considerados principalmente os estudos de capacidade da máquina, ajustes, ensaios e verificação do seu desempenho, manutenção preventivo e materiais de limpeza. Sendo que a máquina é destinada 60% de seu tempo de produção a esta tarefa, tal fração dos custos de prevenção foram atribuídos à produção do rolete de interesse. Para poder diminuir a variabilidade do PF, é necessário um maior número de ensaios, maior dedicação ao CEP e maiores custos de manutenção preventiva. Este custo não é influenciado pelo tipo de inspeção considerada.

b) Custos de avaliação

No caso dos custos de avaliação, foram considerados principalmente os custos associados à inspeção das peças (proporcional ao número de peça), calibração, e

depreciação dos SMs e manutenção das condições ambientais requeridas para uma correta medição. Da mesma forma que no caso dos custos de prevenção, 60% dos custos foram atribuídos ao rolete em questão. Para diminuir a incerteza e/ou Tdpm, é necessário dispor de operadores melhor capacitados, maior tempo de dedicação à tarefa de inspeção, maior número de calibrações e menor vida útil dos SMs. No caso de inspeção 100% do lote, o custo associado à tarefa de medição aumenta fortemente em relação à alternativa de não inspecionar o lote (aprovação 100%).

c) Custos de falha interna

Peças erroneamente reprocessadas (por considerar-se que o diâmetro é maior que o especificado) geram um custo por operação de retificação desnecessária. No caso de peças erroneamente sucateadas, gera-se um custo por desperdício de material e do valor agregado gerado tanto na operação de retificação como nas operações previas. Estes custos são considerados só para os lotes inspecionados 100%.

d) Custos de falha externa

No caso de falha externa, foram considerados basicamente os custos por conceito de devoluções e garantias, além do desperdício do valor agregado em todos os PFs, desde a recepção da matéria prima até a montagem. No caso dos lotes que não são inspecionados 100%, a todas as peças fora de especificação que pode-se encontrar, associa-se um custo de falha externa.

CARACTERÍSTICAS DE CUSTOS UNITÁRIOS DA QUALIDADE				
Identificação	Prevenção (kR\$/ano)	Falha interna Refugo (R\$/peça)	Falha interna Retrabalho (R\$/peça)	Falha externa (R\$/peça)
PF-1	9,92	0,07	0,003	0,48
PF-2	3,49	0,07	0,003	0,48
PF-3	1,58	0,07	0,003	0,48
Identificação	Avaliação – Inspeção 100% (kR\$/ano)		Avaliação – Inspeção só das amostras (kR\$/ano)	
PM-1	77,05		11,24	
PM-2	48,28		4,60	
PM-3	41,45		2,55	
PM-4	35,42		1,49	
PM-5	19,65		0,63	

Figura 4.15: Valores unitários atribuídos para determinar os custos da qualidade. Caso 2: ZEN – Diâmetro do Rolete.

4.3.6. Análise dos resultados e recomendações

Os resultados deste caso são apresentados graficamente na figura 4.16 onde, dadas as condições e suposições, é possível verificar o comportamento dos custos da qualidade para as diferentes alternativas analisadas. Em particular, avaliar o custo da solução atual implementada pela empresa ZEN e das possíveis alternativas.

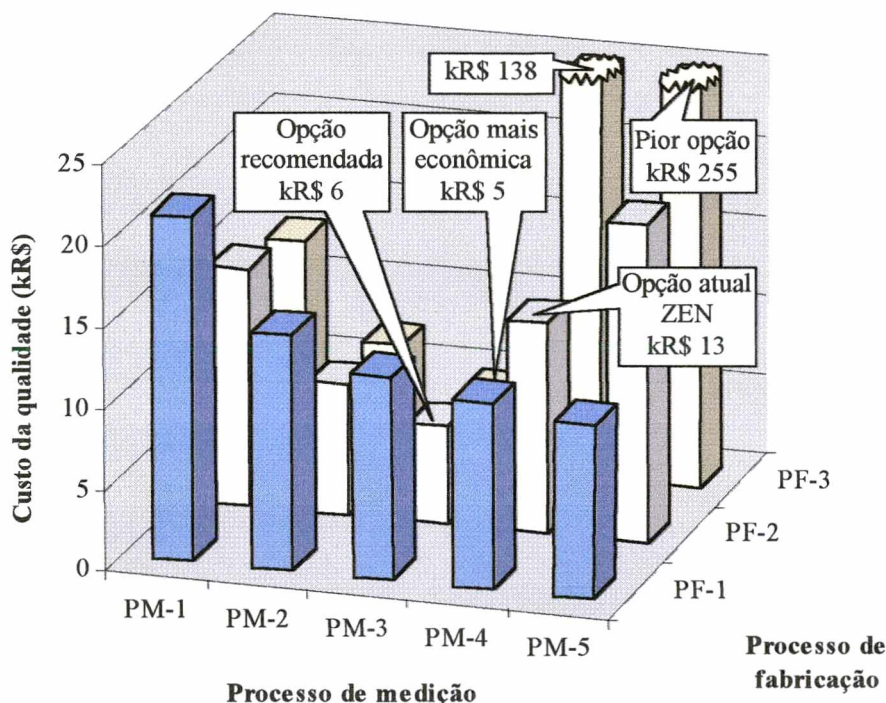


Figura 4.16: Custo total da qualidade associado às alternativas analisadas.
Caso 2: ZEN – Diâmetro do Rolete.

Dos resultados obtidos, embora a alternativa PF-3 com PM-3 possa aparecer como a mais econômica, não parece inteligente mudar de PF-2 para PF-3 (maior variabilidade), dado que, qualquer instabilidade ou descontrole do PF ou do PM levariam a um aumento significativo dos custos. Além disso, o PF parece suficientemente capaz para manter a capacidade sem um grande investimento em prevenção. Dessa forma, a opção PF-2 com PM-3 (e inclusive PM-2) aparece como uma alternativa mais recomendável, ou seja mantendo as características do PF e melhorando o PM, através de ações tendentes a diminuir a T_{dpm} , especificamente mudando o método de zeragem e cuidando a limpeza tanto do micrômetro quanto das peças.

Fica evidente o impacto nos custos da tendência produzida pela presença de uma camada de lubrificante na zeragem do micrometro (especialmente no caso de PF-2 e PF-3 com PM-4 e PM-5). Além disso, os altos custos de avaliação tanto do PM-1 quanto do PM-2 fazem com que não seja rentável a utilização de tais PMs.

No caso da alternativa atual considerada pela empresa, a U_{pm} é de $\pm 0,005$ mm, dessa forma, a resolução de 0,001 mm representa uma fonte desprezível de incerteza em relação ao valor da U_{pm} total. Nestas condições, não faz sentido mudar o SM por outro de melhor resolução.

Para entender de melhor forma os comportamentos dos custos da qualidade, na figura 4.17 são apresentados tais custos divididos em suas quatro fontes, tanto para PF-2 (fig. 4.17.a) quanto para PM-3 (fig. 4.17.b). Da primeira figura pode-se evidenciar que nas alternativas de PM-1 e PM-2 o custo de avaliação é predominante, já no caso de PM-4 e PM-5, o problema principal é a T_{dpm} , que provoca uma aceitação de roletes com diâmetro menor que as especificações (falha externa) e o reprocesso de peças por achar que são maiores (falha interna). Já no caso da opção PM-3, a prevenção é a principal fonte de custos.

No caso da figura 4.17.b, constata-se um alto custo de prevenção para chegar à opção PF-1. Por outra parte, verifica-se que, embora a opção PF-3 aparece como mais econômica, apresenta uma parcela maior de falha que a alternativa PF-2, sendo que um aumento na variabilidade do processo ou na Tdpm, podem afetar significativamente o desempenho da PF-3. Dessa forma, recomenda-se a opção PF-2 em vez da opção PF-3.

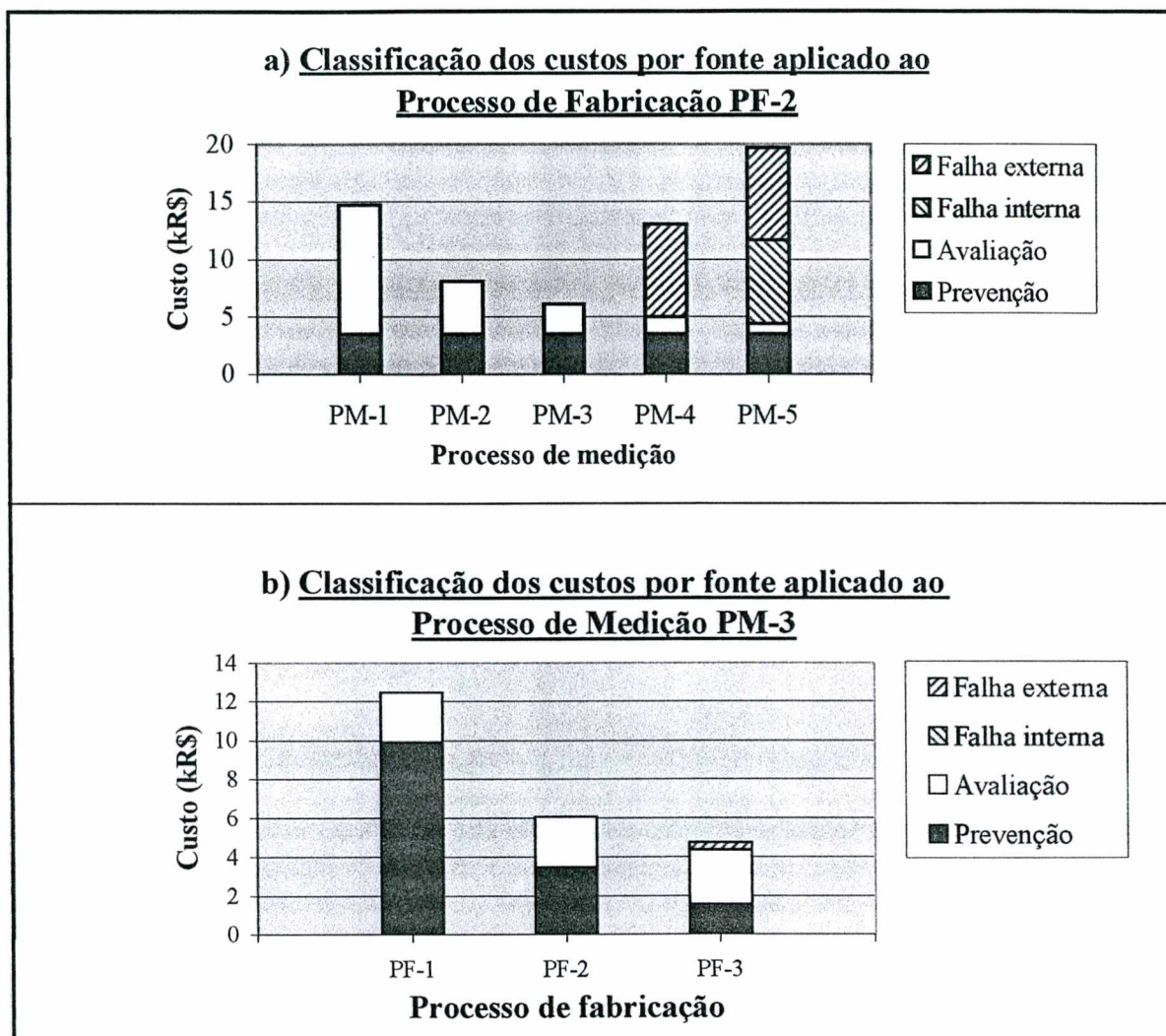


Figura 4.17: Contribuição de cada fonte de custo da qualidade sobre o total.
Caso 2: ZEN – Diâmetro do Rolete.

A sensibilidade dos custos da qualidade ao PF, confirma a necessidade de que a variabilidade do processo de fabricação seja determinada da forma o mais confiável possível e que seu comportamento seja estável, de forma que os resultados sejam realmente representativos. Isto irá ocorrer quando a fabricação se encontra sob controle estatístico, e com índices de capacidade estáveis no tempo.

Concluindo, recomenda-se mudar de PM, tomando medidas para evitar a presença de Tdpm significativa, pela presença da camada lubrificante, especialmente na zeragem do instrumento. Para isto, recomenda-se fazer tal regulagem utilizando um pino padrão de diâmetro similar ao do rolete a medir. Dessa forma, a zeragem será mais representativa das condições reais de medição (medição sobre um cilindro), diminuindo o problema da força de medição, especialmente no caso de peças cilíndricas.

Por outro lado, dado que o erro de forma do cilindro é desprezível (em torno de 2 μm) e que o PF tem boa capacidade, recomenda-se diminuir o número de leituras por peça, bastando uma só medida por rolete. Outra recomendação seria, aumentar a frequência de amostragem, dessa forma, o PF seria melhor controlado e não se precisaria completar uma caixa de 1200 peças para só nesse momento fazer a inspeção. Uma opção simples é, medir uma peça a cada 10 minutos (lote de 600 peças), neste caso mantém-se o número de peças medidas, embora o tamanho do lote diminua.

Em relação ao método de avaliação dos PMs empregado pela empresa, este demonstrou ser incompleto, já que a U_{sm} considerada não é sensível à T_{dpm} . Dessa forma, a U_{sm} acaba sendo subestimada se é comparada com a incerteza determinada corretamente pelo método recomendado por ISO-GUM.

O método de avaliação dos PMs considerado pela empresa, embora simples e com alguns erros, leva à escolha de uma alternativa de PM relativamente adequada. Este fato, deve-se a que, o divisor sete, considerado na equação 4.2 é suficientemente grande para anular o efeito de desconsideração de algumas fontes de incerteza presentes no momento da inspeção. Além disso, empregou-se um SM (micrômetro digital) em condições tais que, a U_{pm} não é muito diferente (maior) à U_{sm} .

Por último, o processo de fabricação demonstrou ter alta capacidade, de forma que uma quantidade muito baixa de peças são propensas a erro de classificação. Isto é possível já que uma tolerância de 0,020 mm é fácil de obter com o tipo de máquina retificadora disponível, desde que seja mantida em bom estado.

4.4. ESTUDO DE CASO 3: ZEN – QUEBRA CANTO

O controle a analisar é o de uma roda dentada, que forma parte do impulsor de motor de partida produzido pela empresa ZEN. Para facilitar o acoplamento da peça no momento que o motor de partida é ligado, esta é dotada de chanfros nos cantos dos dentes. O ângulo e particularmente a largura dos “quebra cantos” são fundamentais para uma boa função dos mesmos (fig. 4.18). Quebra cantos fora das especificações geométricas produzem um aumento do nível de ruído e conseqüentemente uma diminuição da vida útil do impulsor.

A peça passa por uma série de PFs, sendo o último processo mecânico a geração do quebra canto. Para o presente estudo de caso, será considerada a roda dentada modelo Nº 639.585.0 com largura nominal de 1,4 mm e limites de 1,1 mm (inferior) e 1,7 mm (superior). Deste modelo são produzidos 1,14 milhões de unidades anualmente numa só máquina.

Em relação ao PM, devido ao grande número de peças produzidas (200 a 300 por hora), utiliza-se inspeção por amostragem mediante um paquímetro digital. O próprio operador da máquina a cada 100 peças toma uma amostra de três peças. Cada uma é medida em três dentes diferentes. Se alguma das peças estiver fora dos limites, procede-se a uma reinspeção 100% de todas as peças produzidas desde a inspeção anterior, ou seja, 100 peças. Dessa forma, são refugadas as peças com largura menor a 1,10 mm, retrabalhadas se a largura é maior a 1,70 mm e aprovados se estão dentro de tais limites. Se é necessário, o próprio operador ajusta a máquina para eliminar possíveis tendências não desejadas.

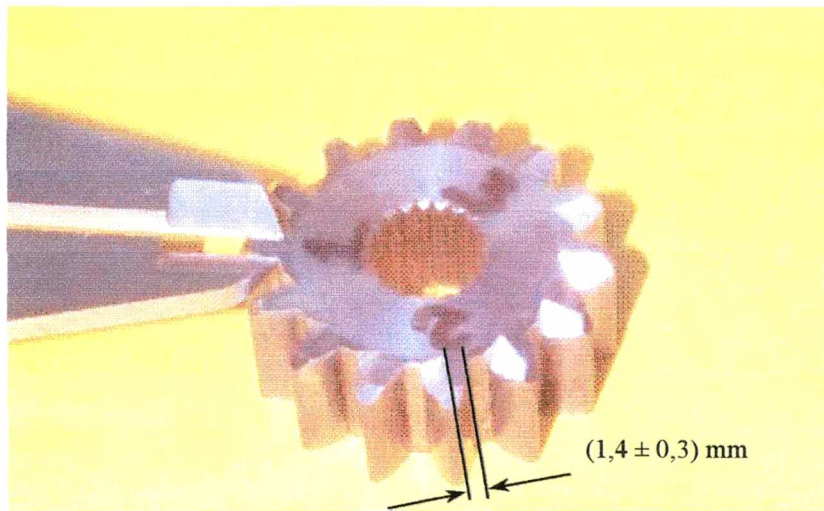


Figura 4.18: Especificação de projeto geométrico da grandeza a medir.
Caso 3: ZEN – Largura do Quebra Canto da Roda Dentada.

Especial cuidado se deve ter na medição dessa dimensão, dada a complexidade para captar a grandeza de interesse. Dessa forma requer-se de uma técnica especial para tentar medir tal dimensão com um paquímetro (instrumento aparentemente inadequado para esta tarefa de medição). Sendo o efeito da Tdpm, a repetitividade e reprodutibilidade entre operadores as principais fontes de incerteza, e cujo efeito sobre os custos da qualidade deseja-se quantificar.

4.4.1. Metodologia empregada pela empresa

A metodologia empregada pela empresa para seleção de seus SMs foi apresentada no item 4.3.1. A largura do quebra canto tem uma especificação de tolerância de 0,6 mm. Embora, por ser considerado como uma grandeza crítica, e a medição apresentar alguns problemas, a empresa decidiu utilizar um paquímetro digital de resolução 0,01 mm. Tipicamente, a U_{sm} determinada no laboratório de metrologia da empresa, pelo método da equação 4.3 gera incertezas próximas a $\pm 0,02 \text{ mm}$ /11/. Conseqüentemente, o requisito de adequabilidade, neste caso, corresponde a especificar uma incerteza dez vezes mais exigente que a determinada se considerasse a equação 4.1.

$$U_{sm} \leq \frac{T}{30} \quad (4.9)$$

Vale a pena destacar que, o requisito imposto não é atingido por todos os paquímetros que estão de acordo com a norma ISO 6906 de 1994. Dessa forma, o paquímetro deve estar em muito boas condições para ser utilizado na medição da largura do quebra canto. Este requisito não faz sentido, já que o problema não é a U_{sm} e sim a U_{pm} , sendo o método de medição a principal fonte de erro.

4.4.2. Caracterização do problema

A empresa deseja avaliar se o PM atualmente considerado é o mais adequado para a medição da largura do quebra canto. Em particular, analisar a influência da repetitividade e reprodutibilidade entre os operadores, dada a dificuldade para a captação da grandeza de interesse. Nas figs. 2.1.b e 4.18 foi apresentado um tipo de erro típico que pode apresentar-se na medição da largura do quebra canto, sendo que o valor obtido acaba sendo maior que a GM que deseja-se medir. Paralelamente, deseja-se estudar a possibilidade de utilizar algum SM alternativo ao paquímetro, de forma de minimizar os erros na captação da GM.

4.4.3. Aquisição e preparação dos dados

Todas as variáveis de interesse, tanto de PG, quanto de PF e quanto de PM foram levantadas da mesma forma que no Caso 2: ZEN – Diâmetro do Rolete.

a) Variáveis associadas ao projeto geométrico (PG)

De acordo com as especificações geométricas, o quebra canto deve ter uma largura de $(1,4 \pm 0,3)$ mm. Também não foi possível obter razões que fundamentassem tais valores, dessa forma, estes serão considerados como representativos dos limites funcionais.

b) Variáveis associadas ao processo de fabricação (PF)

Dos estudos de capacidade do PF analisados, pode-se concluir que este não se encontra sob controle estatístico, apresentando-se algumas causas especiais de variabilidade. O PF de geração do quebra canto também é ajustado de forma de que a média mantenha-se centrada (fig. 4.19).

CARACTERÍSTICAS DOS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO		
IDENTIFICAÇÃO	VALOR MÉDIO MEDIDO, μ_{pfm} (mm)	VARIABILIDADE REAL, V_{pfr} (mm)
PF-1	1,40	0,20
PF-2	1,40	0,40
PF-3	1,40	0,60

- PF-1: Melhor capacidade do processo a considerar, desde que sejam tomadas algumas medidas preventivas tendentes a diminuir a variabilidade. Particularmente, fazendo ensaios e verificações do seu desempenho com maior frequência, maior investimento em manutenções preventivas e maior controle de CEP.
- PF-2: Opção intermediária que considera um investimento médio de prevenção. Dada a prática atual, esta é a opção que representa de melhor forma a realidade da empresa.
- PF-3: Pior opção de PF, considerando baixos custos de prevenção. Opção possível se não são mantidas ações de prevenção.

Figura 4.19: Valores atribuídos aos processos de fabricação.
Caso 3: ZEN – Largura do Quebra Canto da Roda Dentada.

De informes estatísticos, a V_{pfm} assume valores numa faixa de 0,3 mm até 0,7 mm. Paralelamente, o PM que foi utilizado para os estudos estatísticos têm uma alta incerteza relativa, dessa forma, também não pode ser utilizada a equação 3.3 para determinar a V_{pfr} , sendo necessário estimar tais valores. Dessa forma serão considerados três opções de PF (fig. 4.19).

c) Variáveis associadas ao processo de medição (PM)

Neste caso serão analisadas quatro alternativas. Na figura 4.20 é apresentado um quadro com os valores das características de interesse dos PMs considerados /11, 16, 25, 42/. Dado que a inspeção também é feita por amostragem, o modelo a utilizar será o mesmo do Caso 2: ZEN – Diâmetro do Rolete, com as correspondentes considerações, particularmente em relação aos custos unitários da qualidade e amostragem (3 peças a cada 100).

Concluindo, a empresa quer analisar, com qual das doze possíveis combinações (três opções de PF por cada quatro opções de PM), a empresa consegue minimizar os custos da qualidade envolvidos. A alternativa que representa de melhor forma a realidade atual da empresa é aquela formada pelo PF-2 e PM-3.

CARACTERÍSTICAS DOS PROCESSOS DE MEDIÇÃO		
IDENTIFICAÇÃO	INCERTEZA, U_{pm} (mm)	TENDÊNCIA, T_{dpm} (mm)
PM-1	$\pm 0,01$	0,00
PM-2	$\pm 0,03$	0,00
PM-3	$\pm 0,04$	+0,07
PM-4	$\pm 0,04$	+0,11

- PM-1: Inspeção que considera um SM por imagens, particularmente um projetor de perfil com resolução de 0,001 mm. O PM não deve apresentar T_{dpm} , como nos casos onde considera-se a utilização do paquímetro.
- PM-2: Inspeção que considera um SM ótico, particularmente uma lupa de medição que permita uma resolução de 0,01 mm. Este sistema também não apresenta T_{dpm} , como no da medição com paquímetro.
- PM-3: Opção que melhor representa a realidade atual da empresa. Considera a utilização de um paquímetro digital, com presença de erro devido à dificuldade da captação da GM. Leva em conta as características típicas dos paquímetros empregados (com relação a incerteza e condições de medição).
- PM-4: Incerteza máxima de um processo de medição usando de um paquímetro como o considerado na opção PM-3, apenas satisfaz os requisitos metrológicos da norma internacional (ISO 6906). Não aplica-se correção da tendência do processo de medição.

Figura 4.20: Valores atribuídos ao processo de medição.

Caso 3: ZEN – Largura do Quebra Canto da Roda Dentada.

4.4.4. Cálculo das probabilidades

Aplicando a metodologia proposta, foi determinada a probabilidade de ocorrência dos diferentes eventos (fig 4.21). Para conseguir uma probabilidade do universo de 100%, utilizou-se LI e LS com valores de 0,8 mm e 2,0 mm respectivamente, não sendo aplicado DLE. Na figura 4.21 são apresentadas, para cada uma das quinze alternativas, as probabilidades de ocorrência dos eventos que geram falhas. Estes resultados são muito consistentes com a realidade da empresa (praticamente 100% das peças são aproveitadas).

a) PEÇAS DENTRO DAS ESPECIFICAÇÕES E REPROVADAS (PEQUENAS)			
PDRP (%)			
Processo de Medição	Processo de Fabricação		
	PF-1	PF-2	PF-3
PM-1	0,0000	0,0001	0,0085
PM-2	0,0000	0,0002	0,0221
PM-3	0,0000	0,0000	0,0000
PM-4	0,0000	0,0000	0,0000

b) PEÇAS DENTRO DAS ESPECIFICAÇÕES E REPROVADAS (GRANDES)			
PDRG (%)			
Processo de Medição	Processo de Fabricação		
	PF-1	PF-2	PF-3
PM-1	0,0000	0,0001	0,0085
PM-2	0,0000	0,0002	0,0221
PM-3	0,0000	0,0006	0,1284
PM-4	0,0000	0,0006	0,1371

c) PEÇAS FORA DAS ESPECIFICAÇÕES (PEQUENAS) E REPROVADAS			
PFAP (%)			
Processo de Medição	Processo de Fabricação		
	PF-1	PF-2	PF-3
PM-1	0,0000	0,0000	0,0091
PM-2	0,0000	0,0001	0,0291
PM-3	0,0000	0,0274	0,9333
PM-4	0,0000	0,2180	2,7325

d) PEÇAS FORA DAS ESPECIFICAÇÕES (GRANDES) E REPROVADAS			
PFAG (%)			
Processo de Medição	Processo de Fabricação		
	PF-1	PF-2	PF-3
PM-1	0,0000	0,0000	0,0091
PM-2	0,0000	0,0001	0,0291
PM-3	0,0000	0,0000	0,0000
PM-4	0,0000	0,0000	0,0000

Figura 4.21: Probabilidade de ocorrência dos diferentes tipos de falha.
Caso 3: ZEN – Largura do Quebra Canto da Roda Dentada.

Da mesma forma que no Caso 2: ZEN – Diâmetro do Rolete, pode-se comprovar que o PF utilizado pela empresa, em termos gerais, é muito capaz. A probabilidade de ocorrência de PDA, ou seja, das peças cuja grandeza a medir se encontra dentro dos limites de especificação não é menor que 97%, e na maioria dos casos supera 99,9%. Particularmente, a situação que melhor representa a realidade atual da empresa (PF-2 com PM-3) apresenta uma probabilidade de PDA de 99,97%. Estes resultados também são muito consistentes com a realidade da empresa onde praticamente 100% das peças são aproveitadas, sendo escasso o número de peças reprocessadas e quase nulo o número de peças refugadas.

Mediante os resultados apresentados na figura 4.21, é possível determinar a probabilidade de que um lote deva ser inspecionado 100% (P_1). Ou seja a probabilidade de que ao menos uma das três peças amostradas do lote de 100, apresente largura aparente (medida) fora das especificações. A probabilidade de não inspecionar o lote todo (P_0), será o complemento de tais valores (fig. 4.22). Dessa figura também pode-se observar a baixa probabilidade de inspeção 100%, que é consistente com a realidade da empresa. Esta constatação evidencia que a presença de peças fora das especificações nos lotes não inspecionados, pode ser crítico na avaliação dos custos da qualidade da mesma forma que no Caso 2.

PROBABILIDADE DE INSPEÇÃO 100% DE UM LOTE (%)			
Processo de Medição	Processo de Fabricação		
	PF-1	PF-2	PF-3
PM-1	0,0000	0,0024	0,8184
PM-2	0,0000	0,0024	0,7790
PM-3	0,0000	0,0037	0,8472
PM-4	0,0000	0,0037	0,8472

Figura 4.22: Probabilidade de inspeção 100% de um lote de peças.
Caso 3: ZEN – Largura do Quebra Canto da Roda Dentada.

4.4.5. Cálculo dos custos da qualidade

O estudo será feito considerando um período de uma ano, onde são produzidas 1,14 milhões de peças, em 11,44 mil lotes, utilizando 100% do tempo produtivo da máquina (260 dias no ano e 22 horas por dia). Na figura 4.23 é apresentado um quadro resumo com os custos unitários, disponibilizados pela empresa /11/.

a) Custos de prevenção

Na quantificação deste tipo de custos, foram considerados principalmente os estudos de capacidade da máquina, ajustes, ensaios e verificação do seu desempenho, manutenção preventivo e materiais de limpeza. Sendo que a máquina é destinada 100% de seu tempo de produção a esta tarefa, todos custos de prevenção da máquina em questão foram atribuídos à geração do quebra canto da peça de interesse. Para poder diminuir a variabilidade do PF, é necessário um maior número de ensaios, maior dedicação ao CEP, maiores custos de manutenção preventiva e especial cuidado no ajuste periódico da máquina. Da mesma forma que no Caso 2, considera-se que este custo não depende do número de lotes inspecionados 100%.

b) Custos de avaliação

No caso dos custos de avaliação, também foram considerados principalmente os custos associados à inspeção das peças, calibração, e depreciação dos SMs e manutenção das condições ambientais requeridas para uma correta medição. Da mesma forma que no caso dos custos de prevenção, 100% dos custos de avaliação foram atribuídos à geração do quebra canto da peça em questão. Para diminuir a incerteza e/ou tendência do PM, é necessário principalmente dispor de SMs mais adequados (lupa de medição e projetor de perfil), operadores melhor capacitados e maior tempo de dedicação no caso da medição com projetor de perfil. Da mesma forma que no Caso 2, os custos de avaliação aumentam consideravelmente no caso de inspeção 100% em relação aos custos associados no caso em que os lotes são liberados apenas pela aceitação das três amostras de cada lote.

c) Custos de falha interna

Peças erroneamente reprocessadas (por considerar-se que a largura do quebra canto é maior que o especificado), provocam um custo por operação de geração de quebra canto desnecessária. No caso de peças erroneamente sucateadas, gera-se um custo por desperdício de material e do valor agregado neste e em todos os PFs prévios (corte, conformação, usinagem, etc.). Considerou-se que estes custos são levados em conta só no caso dos lotes inspecionados 100%.

d) Custos de falha externa

No caso de falha externa, também foram considerados basicamente os custos por conceito de devoluções e garantias, desperdício do valor agregado em todos os PFs, desde a recepção da matéria prima até a montagem final. No caso de lotes inspecionados 100%, este custo associa-se às peças erroneamente aceitas, caso contrário (lotes não inspecionados), todas as peças fora de especificação geram um custo de falha externa.

CARACTERÍSTICAS DE CUSTOS UNITÁRIOS DA QUALIDADE				
Identificação	Prevenção (kR\$/ano)	Falha interna Refugo (R\$/peça)	Falha interna Retrabalho (R\$/peça)	Falha externa (R\$/peça)
PF-1	15,85	0,69	0,11	11,31
PF-2	6,14	0,69	0,11	11,31
PF-3	2,83	0,69	0,11	11,31
Identificação	Avaliação – Inspeção 100% (kR\$/ano)		Avaliação – Inspeção só das amostras (kR\$/ano)	
PM-1	59,82		13,99	
PM-2	21,03		3,59	
PM-3	11,20		1,02	
PM-4	6,94		0,44	

Figura 4.23: Valores unitários atribuídos para determinar os custos da qualidade.
Caso 3: ZEN – Largura do Quebra Canto da Roda Dentada.

4.4.6. Análise dos resultados e recomendações

Os resultados deste caso são apresentados graficamente na figura 4.24, onde, dadas as condições e supostos, é possível verificar o comportamento dos custos da qualidade para as diferentes alternativas analisadas. Em particular, avaliar o custo da solução atual implementada pela empresa ZEN e das possíveis alternativas.

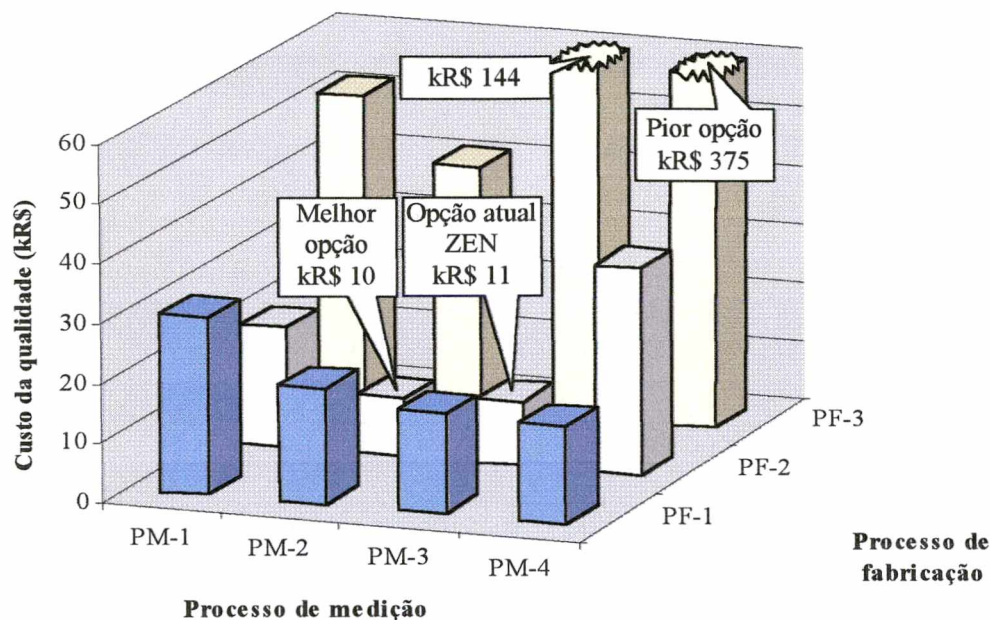


Figura 4.24: Custo total da qualidade associado às alternativas analisadas.
Caso 3: ZEN – Largura do Quebra Canto da Roda Dentada.

Com relação aos PMs verifica-se que a melhor opção corresponde à alternativa de PM-2 (lupa de medição), dado seu baixo custo de erro de medição e seu baixo custo de avaliação. Em relação aos PFs, recomenda-se manter no PF-2 dado que apresenta, para quase todas as alternativas de PM, o menor custo total. As outras alternativas de fabricação não são recomendadas, dados os altos custos de prevenção da opção PF-1 e aos altos custos de falha (especialmente de falha externa) devido à alta variabilidade do PF-3. Além disso, fica evidente o impacto nos custos da Tdpm, no caso dos PM-3 e PM-4, especialmente quando considera-se PF-3.

Para entender de melhor forma o comportamento dos custos da qualidade, na figura 4.25 são apresentados tais custos divididos em suas quatro fontes, tanto para PF-2 (fig. 4.25.a) quanto para PM-2 (fig. 4.25.b). Na primeira figura pode-se evidenciar o efeito da Tdpm no aumento dos custos de falha externa, no caso de PM-3 e especialmente no PM-4. Na opção de PM-2, a prevenção representa a principal parcela de custos. Já no PM-1 o alto custo de avaliação faz com que tal alternativa não seja rentável.

No caso da figura 4.25.b, a melhor opção (PF-2) apresenta um custo depreciável por falha de medição em combinação com um custo médio de prevenção e avaliação. No caso do PF-3, a alta variabilidade gera um aumento no número de peças erroneamente aceitas de largura menor que 1,10 mm, provocando um aumento nos custos de falha externa. No caso do PF-1, o investimento em prevenção é maior que a diminuição nos custos por falha de medição, de forma que tal opção não é a mais conveniente.

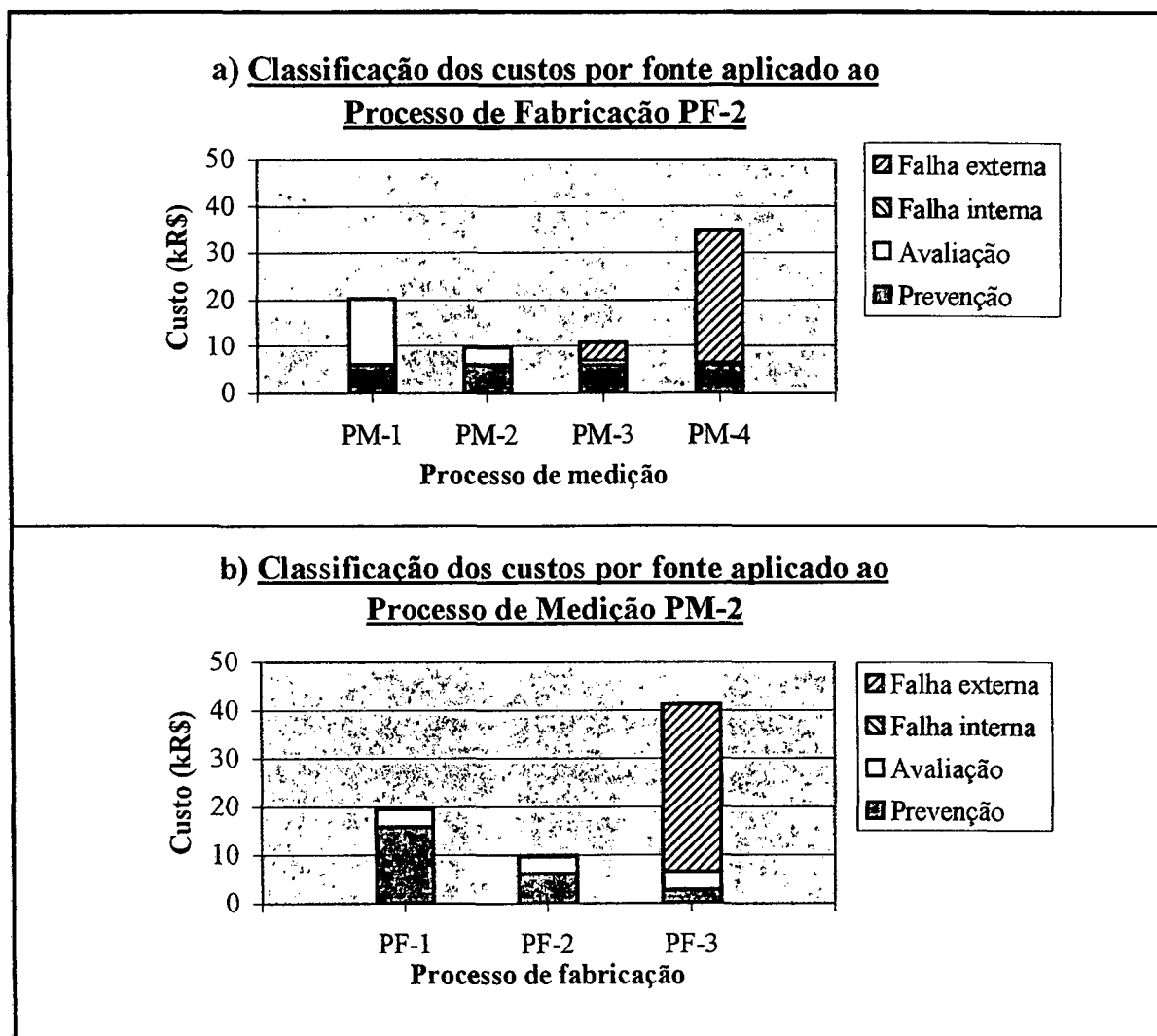


Figura 4.25: Contribuição de cada fonte de custo da qualidade sobre o total.
Caso 3: ZEN – Largura do Quebra Canto da Roda Dentada.

Como conclusão, embora a empresa encontra-se numa situação na qual a probabilidade de erros de classificação é relativamente pequena, recomenda-se mudar de PM para um mais adequado a este tipo e tarefa de medição, que não apresente uma Tdpm nem uma variação tão significativa como no caso de utilizar um paquímetro.

Com relação ao método de avaliação dos PMs empregados pela empresa, demonstrou-se que o método considerado não gera soluções eficientes. Além disso, a Usm determinada pelo método da equação 4.3 é menor que a incerteza corretamente calculada (pelo método da ISO-GUM), o que aumenta a possibilidade de tomada de decisões erradas.

4.5. DESEMPENHO DA METODOLOGIA PROPOSTA

A metodologia proposta demonstrou que é possível analisar o problema da avaliação dos processos de medição de uma forma integral, considerando todas as variáveis envolvidas, de forma de minimizar o custo total da qualidade relacionado a tal processo. Nos estudos de casos práticos, a metodologia forneceu resultados consistentes, que não poderiam ser

determinados por outros métodos. A metodologia apresenta os seguintes aspectos positivos:

- Permite comparar entre si, diferentes alternativas, alterando vários parâmetros ao mesmo tempo, por exemplo, é possível comparar PMs com diferentes incertezas, tendências, custo de manutenção, inclusive variando as condições de PG como limites de tolerância, limites de aceitação, e as condições do PF como a variabilidade.
- Permite identificar as causas principais dos custos, e assim focalizar as ações futuras. Por exemplo, identificar se o problema é o próprio SM, a máquina-ferramenta que faz a operação, o operador, a temperatura, a presença de impurezas (como no caso do rolete), o método de medição e a tendência da medição (como no caso da largura do quebra canto).
- Permite avaliar os processos de medição utilizados em diferentes métodos de inspeção. Inspeções para especificações geométricas bilaterais, unilaterais, classificação segundo o nominal (em classes), tanto para amostragem e especialmente para inspeção 100%.
- Leva em consideração a U_{pm} , que representa a verdadeira incerteza presente durante a medição e não só a U_{sm} que representa apenas ao sistema de medição, que em muitos casos pode representar uma fração desprezível da incerteza total. Outros métodos de seleção como a Resolução e o Erro Máximo, demonstraram ser ainda mais simplistas.
- Permite avaliar o efeito de outras variáveis como do deslocamento dos limites de especificação, custo unitário de falha interna e falha externa, frequência de calibração (custo de avaliação), padrões envolvidos na calibração, treinamento dos operadores, frequência de amostragem, número de peças amostradas, etc.
- Dada sua robustez, a metodologia poderia ser inclusive utilizada para avaliar o desempenho de outros métodos de seleção dos sistemas de medição, ou para avaliar possíveis simplificações desta própria metodologia
- Fornece subsídios objetivos para a estimação de parâmetros de (PG, PF).

A metodologia apresenta melhor desempenho quando alguns requisitos são cumpridos e algumas restrições respeitadas. Dessa forma, na prática as principais restrições para uma correta aplicação da metodologia são:

- Necessidade de dispor de um grande número de informações e de conhecimentos.
- A metodologia requer de uma análise particular para cada caso de interesse. Dada a especificidade de cada caso, os resultados não são extrapoláveis a outras situações.
- A metodologia requer da determinação da incerteza do processo de medição, sendo poucas as empresas que fazem isto.
- Dificuldade para quantificar a variabilidade real do processo de fabricação, sem a influência do processo de medição, além de assegurar sua estabilidade no tempo.
- Se o problema a analisar exige a intercambiabilidade entre sistemas de medição com diferentes comportamentos metrológicos e/ou de diferentes operadores, os resultados obtidos podem não ser muito representativos da realidade. Isto deve-se ao alto nível de variabilidade do processo de medição.

- Dificuldade para acessar a informações de custos que sejam representativas da realidade. Particularmente é difícil quantificar o custo de falha externa e determinar as fontes de custos presentes em cada tipo de erro de classificação.
- No caso de inspeções feitas por amostragem, a probabilidade de ocorrência de cada tipo de evento não necessariamente representa a classificação real feita na inspeção. Isto se dá, pois não é possível identificar todas as peças aparentemente com falha, ou de rejeitar todas as peças aparentemente boas, dentro de lotes de inspeção.
- A metodologia requer de condições estáveis no tempo, dessa forma, não é recomendável sua aplicação quando os processos de fabricação considerados não estejam sob controle estatístico, ou quando o comportamento do processo de medição varie muito no tempo.
- A metodologia supõe que peças dentro das especificações geométricas são peças conformes (que não geram problemas), e peças fora das especificações sim geram problemas. Muitas vezes esses pressupostos não são cumpridos, por exemplo, se as tolerâncias são muito grandes, nesse caso, peças que estão dentro dos limites, produzem problemas (funcionais, aparência, durabilidade, etc.). Por outra parte, peças fora da especificação não geram problemas, dado por uma especificação errada de tolerâncias ou porque a grandeza de interesse na verdade não seja tão crítica.

Naturalmente a aplicação da metodologia faz sentido para casos críticos, ou seja para PF incapazes, onde estejam envolvidos custos da qualidade importantes e onde se disponha de diferentes alternativas de PMs que possam influenciar na classificação das peças.

capítulo 5

CONCLUSÕES

Do trabalho realizado, pode-se concluir que este atingiu plenamente os objetivos propostos no seu início. Particularmente apresentando as seguintes contribuições:

- Apresenta-se uma metodologia integral/abrangente que permite especificar o processo de medição, considerando o impacto econômico da operação de controle geométrico.
- Faz-se uma análise comparativa dos métodos de avaliação de processos de medição e de seleção de sistemas de medição atualmente praticados. Foram ressaltadas as virtudes e particularmente as falhas destes. A necessidade de solução de tais falhas fortalece a necessidade de realização deste trabalho.
- A metodologia proposta foi testada na prática, considerando casos reais, determinando resultados relevantes que não são possíveis de obter por outros métodos.
- Da mesma avaliação prática pode-se comprovar que a metodologia proposta é realmente aplicável na indústria. Embora exija uma série de informações para sua implementação, a metodologia se aplica facilmente em empresas que dispõem de um sistema de gestão da qualidade de bom nível. Isto é, pratiquem técnicas e tecnologia de: determinação de tolerâncias, CEP, calibração e cálculo de incerteza, medição (inspeção) e custos da qualidade.
- Na prática atual, pode-se verificar nas empresas um tratamento muito superficial da temática de avaliação dos processos de medição. A utilização da metodologia permitiria melhorar a especificação do processo de medição, diminuindo os custos da qualidade envolvidos.
- As metodologias atualmente empregadas na indústria, embora simples, não consideram uma série de aspectos que podem induzir a implementação de uma solução inadequada e ineficiente. Dos casos analisados, mediante a aplicação da metodologia proposta, pode-se evidenciar o grau de ineficiência dos métodos tradicionalmente considerados para a avaliação dos processos de medição.
- Do trabalho apresentado, pode-se concluir que a metodologia proposta é realmente inovadora, tratando a problemática da avaliação dos processos de medição de uma forma integral. Dessa forma, é possível relacionar todas as variáveis envolvidas na tarefa de medição de forma de determinar aquela que seja tecnicamente viável e economicamente mais eficiente.

A aplicação da metodologia tem maior sentido numa situação de processo de fabricação estatisticamente incapaz e/ou para produção de peças em grandes lotes, e onde tenha-se inspeção 100%. Em termos econômicos, a aplicação da metodologia apresenta resultados mais expressivos quando se apresentam altos custos da qualidade, ou seja, alto custo de prevenção, avaliação, reprocesso, sucateamento ou falha externa como garantias, devoluções e inclusive perda de imagem.

Na determinação da incerteza do processo de medição, necessária para o modelamento, devem ser consideradas todas as fontes relevantes presentes e a tendência da medição deve ser corrigida ou considerada no modelo. As variações do comportamento dessas variáveis no tempo devem ser controladas e limitadas, de forma que os resultados encontrados sejam válidos durante o período de aplicação do sistema. Constatou-se que uma minoria das empresas considera realmente a incerteza do processo de medição, sendo que, em geral a incerteza, apenas considera a do sistema de medição nas condições de calibração.

A realização de estudos de casos, permitiu avaliar a metodologia com êxito. Tal trabalho prático permitiu identificar possíveis melhorias dos processos de medição empregados além de avaliar os métodos atualmente utilizados pela empresa nas condições reais. Confirmou-se a aplicabilidade da metodologia e as condições que deve ter a empresa para que a aplicação da metodologia seja viável.

Da empresa usuária requer-se um certo nível de gestão da qualidade para que a metodologia possa ser aplicada facilmente. Por exemplo, deve aplicar CEP, calibrar seus sistemas de medição, dispor de informação sobre custos da qualidade, e de processos de fabricação sob controle estatístico. Uma das condições exigidas que sempre provocou dificuldade para a avaliação é a dúvida em relação a se a tolerância especificada representa fielmente à funcionalidade das peças. Todos os cálculos partem da base que peças fora de especificação são peças ruins. Embora, a informalidade na determinação das tolerâncias em alguns casos, deixa um grau de dúvida em relação à possibilidade de determinar o custo de falha externa de forma certa.

Outra informação que na prática tem sua dificuldade de obtenção é a variabilidade do processo de fabricação real (sem influência do processo de medição). Nos casos onde se dispunha da informação, esta apresentava um comportamento não estável. Por outro lado não há prática de quantificar, de forma representativa, os custos unitários da qualidade. Ou seja, dar valor monetário às possíveis fontes de custos, tanto de prevenção, avaliação como de falha (interna e externa), de forma realista.

Na medida do possível, no caso de processos de fabricação estatisticamente fora de controle ou incapazes, recomenda-se a inspeção 100%, passando-se a identificar todas as peças fora de especificação, para serem rejeitadas ou retrabalhadas adequadamente. Além disso, a inspeção periódica permitiria o ajuste do respectivo processo de fabricação de modo de evitar tendências que diminuem fortemente a capacidade do processo.

Concluindo, o presente trabalho logrou seu propósito de viabilizar uma avaliação integral dos processos de medição na indústria, particularmente daquelas que produzem peças com especificações geométricas críticas, mediante a determinação quantitativa do impacto econômico da operação de inspeção. Atingiu-se a meta de gerar uma metodologia que apresentasse esta problemática de forma integral e inovadora. Espera-se que o presente possa ser útil, especialmente para todas as pessoas que desenvolvem seu trabalho na interface entre projeto geométrico, processo de fabricação e processo de medição.

Como ações de continuidade, pode ser recomendado o seguinte:

- Determinar a incerteza associada aos custos da qualidade calculados, em função do desconhecimento ou instabilidade do comportamento das diferentes variáveis a envolvidas,
- Aprofundar o estudo do desempenho da metodologia para diferentes tipos de inspeção, especialmente inspeção com classificação e inspeção por amostragem,
- Considerar a função de perda de Taguchi na determinação dos custos da qualidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- /01/ SOARES J., L. **Confiabilidade Metrológica no Contexto da Garantia da Qualidade Industrial: Diagnóstico e Sistematização de Procedimentos**, Dissertação de Mestrado da UFSC do Programa de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial, Florianópolis, 113 pág., 1999.
- /02/ PEREIRA, E. **Gerenciando a Qualidade Metrológica**, Editora Imagem, Rio de Janeiro, 194 pág., 1993.
- /03/ ISO 10012-1 **NBR ISO 10012-1. Requisitos de Garantia da Qualidade para equipamento de Medição – Parte 1: Sistema de Comprovação Metrológica para Equipamento de Medição**, ABNT, Rio de Janeiro, 14 pág., 1993.
- /04/ THEISEN, A. M. **Fundamentos da Metrologia Industrial: Aplicação no Processo de Certificação ISO 9000**, Gráfica EPECÊ Porto Alegre, 204 pág., 1997.
- /05/ ISO 17025 **Norma ISO/IEC 17025. General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories**, ISO/CASCO, 26 pág., 1999.
- /06/ PFEIFFER, G. **Uma Metodologia para Determinação da Necessidade de Inspeção**, Dissertação de Mestrado da UFSC do Programa de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial, Florianópolis, 66 pág., 1999.
- /07/ GOMES, L. R. **Sistema de Gerenciamento de Instrumentos de Controle Geométrico: Caracterização e Desenvolvimento de um Protótipo**, Dissertação de Mestrado da UFSC do Departamento de Engenharia Mecânica, Florianópolis, 117 pág., 1994.
- /08/ PFEIFER T.
TORRES, F. **Manual de Gestión e Ingeniería a Calidad**, Mira Editora, Zaragoza, España, 589 pág., 1999.
- /09/ COSTA SILVA, A. **Desenvolvimento de uma Metodologia de Avaliação dos Custos das Atividades Metrológicas de uma Unidade Fabril que Atende QS 9000**. Trabalho de Mestrado em andamento da UFSC, do Programa de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial, Florianópolis, 2000.

- /10/ DONOSO, J. **Estudo de Caso: Avaliação dos Processos de Medição – Diâmetro do Rolete**, Labmetro, UFSC, 24 pág., 2000.
- /11/ DONOSO, J. **Estudo de Caso: Avaliação dos Processos de Medição – Largura do Quebra Canto de Roda Dentada**, Labmetro, UFSC, 25 pág., 2000.
- /12/ NOVASKI, O. **Introdução à Engenharia de Fabricação Mecânica**, Editora Edgard Blücher, São Paulo, 119 pág., 1994.
- /13/ AGOSTINHO, O. L.
RODRIGUES, A. C.
LIRINI, J. **Tolerâncias, Ajustes, Desvios e Análise de Dimensões**, Editora Edgard Blücher, São Paulo, 295 pág., 1977.
- /14/ VOELCKER, H. B. **A Current Perspective on Tolerancing and Metrology**, CRTD- Vol. 27, Proceedings of the 1993 International Forum on: Dimensional Tolerancing and Metrology, 21 pág., 1993.
- /15/ DONATELLI, G. D. **Capability of Measurement systems for 100% inspection tasks**, Tese de doutorado da UFSC do Departamento de Engenharia Mecânica, Florianópolis, 125 pág., 1999.
- /16/ MITUTOYO **Instrumentos para Metrologia Dimensional, Utilização, manutenção e cuidados**, Mitutoyo do Brasil Indústria e Comércio, 55 pág., 1990.
- /17/ CERTI **Gerenciamento de Instrumentos de Medição Segundo a ISO 9000 e QS 9000**, Apostila do curso CM-113, 185 pág., 1999.
- /18/ HEWLETT PACKARD **Uncertainty and Confidence in Measurement**, Hewlett Packard, Test & Measurement Metrology Forum, metrologyforum.tm.agilent.com, 5 pág., 1998.
- /19/ DONATELLI, G. D.
SCHNEIDER, C. A. **Optimization of Dimensional Quality Control: a Simulation Approach**, Universidad Nacional del Comahue, Neuquén, Argentina, 14 pág., 1997.
- /20/ CASTRUP, H. **AccuracyRatio**, ISGMAX, www.isgmax.com/ar_broc.htm, 4 pág. 1999.
- /21/ HEWLETT PACKARD **The Historical Development of Test Accuracy Ratios and their Use in Reporting Uncertainty at HP**, Hewlett Packard, Test & Measurement Metrology Forum, metrologyforum.tm.agilent.com/worldwide/tar.html, 4 pág., 1999.

- /22/ SURECAL **Reporting Measurement Uncertainty and TAR**, SURECAL Technical Notes, 2 pág., 1998.
- /23/ INMETRO **Guia para a Expressão da Incerteza de Medição**, BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML, ABNT, SBM e Programa RH Metrologia, 2ª Edição, Rio de Janeiro, 120 pág., 1998.
- /24/ NAMAS **NIS 3003 – The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement for Calibration**, NAMAS, 8ª edição, 45 pág., 1995.
- /25/ ISO 14253-2 **Norma ISO/DTR 14253-2 – Geometrical Product Specifications (GPS) – Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment – Part 2: Guide to the estimation in GPS measurements, in calibration of measuring equipment and in product verification**, ISO/TC 213/WG 4 N 65, Genebra, Suíça, 73 pág., 1997.
- /26/ ALBERTAZZI, A. G. **Metrologia**, Universidade Federal de Santa Catarina, LABMETRO, Florianópolis, 1998.
- /27/ BENNICH, P. **Dimensional Quality Control and Quality Management in manufacturing Companies**, Fundação CERTI, Semana da Qualidade, Florianópolis, 23 pág., 1997.
- /28/ ISO 14253-1 **Norma ISO/FDIS 14253-1 – Geometrical Product Specifications (GPS) – Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment – Part 1: Decision rules for proving conformance or non-conformance with specification**, ISO/TC 213, Genebra, Suíça, 14 pág., 1997.
- /29/ ISG **ISO 14253-1 Decision Rules – Good or Bad?**, Workshop & Symposium of National Conference of Standards Laboratories, [www.HN-Metrology.com /decrules.htm](http://www.HN-Metrology.com/decrules.htm), 8 pág., 1999.
- /30/ ASQC
AIAG
IQA **Análise dos Sistemas de Medição**, American Society for Quality Control e Automotive Industries Action Group. Versão em português do Instituto da Qualidade Automotiva, São Paulo, 126 pág., 1997.
- /31/ DIETRICH, E. **Measurement System Capability Study State of the Art**, 6º IMEKO SYMPOSIUM, 8 pág., 1998.

- /32/ INMETRO **Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia**, BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, Rio de Janeiro, 52 pág., 1995.
- /33/ DONATELLI, G. D.
GIESEL, E. A.
SCHNEIDER, C. A. **Un Software para la Evaluación Metrológica de Sistemas de Inspección**, 6 pág., 1998.
- /34/ DONATELLI, G. D.
SCHNEIDER, C. A. **Aptitud de Sistemas de Medición para la Verificación de Tolerancias Dimensionales**, COBEM-CIDIM/95, 4 pág., 1995.
- /35/ LAZOS-MARTÍNEZ, R. J. **A Method to Determine the Required Measurements Uncertainty in Industry**, CENAM, XIV Congresso do IMEKO , 6 pág., 1997.
- /36/ CARDOSO, U. S. **Controle de Qualidade na Indústria Mecânica**, Manuais CNI, Departamento de Assistência à Media e Pequena Indústria, 123 pág., 1984
- /37/ WECKENMANN, A.
KNAUER, M. **Causes and Consequences of Measurement Uncertainty in Production Metrology**, 6° IMEKO SYMPOSIUM, 6 pág., 1998.
- /38/ GAWLIK, J.
REWILAK, J. **Assessment of Measurement System Capability for Statistical Process Control (SPC) Using Repeatability and Reproducibility (R&R) Studies**, 6° IMEKO SYMPOSIUM, 5 pág., 1998.
- /39/ DONATELLI, G. D.
BARP, A. M.
SCHNEIDER, C. A. **The Influence of Measurement Errors on the Values of Process Capability Indices** 6° IMEKO SYMPOSIUM, 9 pág., 1998.
- /40/ JOHNSON, R. A. **Miller and Freud's Probability and Statistics for Engineers**, Prentice Hall United States, 630 pág., 1994.
- /41/ NIELSEN, H. S. **Using the ISO "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements" to determine calibration requirements**, Workshop & Symposium of National Conference of Standards Laboratories, www.HN-Metrology.com/isogum.htm , 6 pág., 1997.
- /42/ CERTI **Calibração e Certificação de Instrumentos da Metrologia Dimensional**, Apostila do curso CM-072, Florianópolis, 170 pág., 1998.