

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial

**A INTERAÇÃO ENTRE O CONTROLE DE
PROCESSOS E A METROLOGIA EM
INDÚSTRIAS DE MANUFATURA**

**Dissertação submetida à Universidade Federal de Santa Catarina
para obtenção do grau de Mestre em Metrologia**

Autor: Crhistian Raffaelo Baldo, Eng.

Orientador: Prof. Gustavo Daniel Donatelli, Dr. Eng.

Florianópolis

Santa Catarina – BRASIL

Setembro 2003

A INTERAÇÃO ENTRE O CONTROLE DE PROCESSOS E A METROLOGIA EM INDÚSTRIAS DE MANUFATURA

Christian Raffaello Baldo

**Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título
de**

“MESTRE EM METROLOGIA”

e aprovada na sua forma final pelo

Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial

Prof. Gustavo Daniel Donatelli, Dr. Eng.

ORIENTADOR

Prof. Marco Antônio Martins Cavaco, Ph. D.

COORDENADOR DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

BANCA EXAMINADORA

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

Léa Contier de Freitas, Dra.

Prof. André Roberto de Sousa, Dr. Eng.

**Cacídio Girardi, Diretor Industrial
da Electro Aço Altona S/A**

AGRADECIMENTOS

A concretização deste trabalho apenas foi possível graças à contribuição de algumas instituições e pessoas, as quais expresso meus sinceros agradecimentos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, notadamente aos professores Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Carlos Alberto Flesch e Marco Antônio Martins Cavaco.

À Electro Aço Altona S/A, personificada na figura do Sr. Cacídio Girardi, e aos integrantes da Gestão Integrada da Qualidade: Marcos, Jane, Flávia, Luiz Fernando e Sérgio, por me acolherem durante a minha estada em Blumenau.

Ao Prof. André Roberto de Sousa, por abrir as portas para a realização do mestrado e pelo contínuo apoio nesses quase dez anos de vivência.

Ao Prof. Carlos Alberto Schneider, pelas oportunidades ímpares de trabalho conferidas a mim, que além de permitirem uma nova visão da madrugada, garantiram o crescimento profissional e o contato com várias pessoas.

Ao Prof. Gustavo Daniel Donatelli, pelas discussões, orientações, oportunidades e, principalmente, pela confiança depositada em mim e pela amizade resultante desses meses de convívio.

À minha família, Pai, Mãe, Mana, pelo sucessivo apoio a todos os desafios da minha vida pessoal e profissional.

RESUMO

A competitividade característica do mercado globalizado exige das empresas significativos esforços para produzir com qualidade crescente a custos compatíveis, tendo como objetivo final satisfazer as necessidades dos clientes. Para que essa condição seja satisfeita, é necessário que as ações sejam intensificadas nas fases de concepção e planejamento do produto, sem que se descuide do processo de fabricação como um todo.

Para tanto, métodos da garantia da qualidade têm sido aplicados com a finalidade de produzir certo na primeira vez, de melhorar continuamente os processos e de atingir a chamada qualidade classe mundial. Ferramentas estatísticas como o controle estatístico e a avaliação da capacidade de processos operam nessa direção e foram aplicadas numa indústria do ramo metalúrgico, com o intuito de melhorar a qualidade dos processos produtivos e, conseqüentemente, a qualidade dos produtos.

O emprego dessas ferramentas em um ambiente fabril caracteriza estudos de caso que demonstram o valor agregado através da aplicação dessas ferramentas. A obtenção de processos sob controle estatístico e a redução da variabilidade dos processos em até 60 % são alguns dos resultados alcançados, suportados não apenas pelas ferramentas estatísticas mas também por meio da melhoria dos processos de fabricação e da geradora de informações: a metrologia.

Neste íterim, é salientada a importância de ter-se uma metrologia técnica e economicamente adequada ao serviço da garantia da qualidade dos processos produtivos. Isso envolve tanto a calibração de instrumentos como o desenvolvimento de programas para a garantia da qualidade das medições, que possibilitam assegurar que informações corretas sejam geradas e obter o sucesso na aplicação das ferramentas estatísticas.

ABSTRACT

The concurrence associated to the today's market has required from the companies expressive efforts to provide products that meeting the customer quality levels at acceptable cost. This condition has led to more intensive actions on the product design and planning phases, and also on the manufacturing and measuring processes.

These actions consist of quality assurance methods that have been applied to make right the first time, to improve continuously the processes, and to reach the so-called world-class quality. Statistical tools such as statistical process control and process capability assessment through process capability indices work in this direction, and they were put into practice in a metallurgical company in order to improve the manufacturing processes (e.g. machining and heat treating) and, consequently, the final product.

The employment of these statistical tools in a manufacturing environment characterises case studies that illustrate what might be the added gain due to such statistical procedures. Processes in statistical control and the decreasing of process variation in up to 60 % are some of the obtained outcomes, thanks to the statistical tools and also by means of improvements in the manufacturing and measuring processes.

Furthermore, it is pointed out the importance of a metrology technically and economically suitable to the quality assurance of manufacturing processes. This concerns as much the gage calibration as the development of process measurement assurance programs, which make possible to assure reliable information and to get success in the application of statistical methods.

ÍNDICE ANALÍTICO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo da dissertação	7
1.2 Estrutura da dissertação	8
CAPÍTULO 2 OS MÉTODOS ESTATÍSTICOS PARA O CONTROLE E A MELHORIA DE PROCESSOS	9
2.1 O controle estatístico de processo	10
2.1.1 Os gráficos de valores individuais e amplitudes móveis	12
2.1.2 O gráfico de controle de três vias	16
2.1.3 O gráfico para múltiplas variáveis	20
2.2 A avaliação da capacidade de processo	23
2.3 A análise de médias	25
2.4 Sumário	28
CAPÍTULO 3 PRÁTICAS DA METROLOGIA INDUSTRIAL	29
3.1 O processo de medição	29
3.2 Avaliação da incerteza de medição	30
3.2.1 Considerações relativas ao GUM e à ISO/TS 14253-2	32
3.3 Critérios para avaliar o processo de medição	33
3.3.1 Avaliação do processo de medição	35
3.4 Garantia da qualidade do processo de medição	36
3.5 Sumário	37
CAPÍTULO 4 A INTERAÇÃO: ESTUDOS DE CASO	39
4.1 Estudo de caso 1: setor de usinagem	40
4.1.1 Estado inicial do processo produtivo e de inspeção	41
4.1.2 Sistemática aplicada	41
4.1.3 Implantação do controle estatístico de processo	42
4.1.4 Atividades paralelas	48
4.1.5 Resultados obtidos após a consolidação do trabalho	51
4.2 Estudo de caso 2: setor de tratamento térmico	54

4.2.1 Diagnóstico inicial do processo _____	55
4.2.2 Estudo do processo de medição _____	56
4.2.3 Avaliação do processo produtivo _____	58
4.2.4 Relacionamento da composição química com a dureza _____	63
4.2.5 Implantação do controle estatístico de processo _____	64
4.2.6 Considerações, recomendações e ações futuras _____	65
CAPÍTULO 5 DISCUSSÃO _____	67
5.1 Constatações dos estudos de caso _____	67
5.2 A metrologia na avaliação de capacidade _____	71
5.3 A metrologia no controle de processos _____	77
5.4 A metrologia na ISO 9000:2000 _____	78
5.5 O que fazer? _____	79
CAPÍTULO 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E OPORTUNIDADES FUTURAS __	85
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS _____	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – Gráfico ilustrando a quantidade de certificados ISO 9000 emitidos no mundo até dezembro de 2002 ^[5]	2
Figura 1.2 – Informações necessárias para o planejamento da qualidade, destacando a dependência entre os métodos <i>off-line</i> de garantia da qualidade e os dados que descrevam o comportamento dos processos e do produto em serviço (adaptado) ^[7]	4
Figura 2.1 – Conjunto de regras para detecção de possíveis padrões não aleatórios em gráficos de controle (adaptado) ^[24]	14
Figura 2.2 – Gráfico de controle de valores individuais e amplitudes móveis para o conjunto de dados da tabela 2.1	15
Figura 2.3 – Gráfico de controle de três vias para o monitoramento da dureza, com referência à informação contida na tabela 2.2	19
Figura 2.4 – Gráfico para múltiplas variáveis (d_3) da composição química da liga de aço	22
Figura 2.5 – Análise de médias e o correspondente gráfico de controle de médias para o conjunto de dados da tabela 2.5	27
Figura 3.1 – Modelo de gráfico de controle para o programa de garantia da qualidade do processo de medição	37
Figura 4.1 – Peça selecionada para o estudo de caso: alojador da ponta de eixo de motoniveladoras	40
Figura 4.2 – Estratégia adotada para a implantação do controle estatístico de processo e para a posterior avaliação da capacidade, visando a melhoria contínua	42
Figura 4.3 – Caso em que a resolução do instrumento de medição é inadequada para o propósito do controle estatístico de processo (cota D5, referente à tabela 4.1)	44
Figura 4.4 – Processo fora de controle e com baixa capacidade comumente encontrado nas primeiras avaliações dos processos produtivos (cota D1, referente à tabela 4.1)	45

Figura 4.5 – Planilha do estudo de repetitividade e reprodutibilidade do instrumento da cota D1 (referente à tabela 4.1) _____	47
Figura 4.6 – Gráficos de controle para o estudo básico do processo de medição da cota D1 (referente à tabela 4.1) _____	48
Figura 4.7 – Resultado do monitoramento via gráfico de controle do instrumento de medição da cota D1 (referente à tabela 4.1), onde cada ponto medido representa uma verificação contra o anel padrão _____	50
Figura 4.8 – Fluxograma descrevendo as etapas que devem ser seguidas para a avaliação da capacidade de processo (adaptado) ^[43] _____	51
Figura 4.9 – Comportamento do índice de capacidade Cpk em algumas das cotas monitoradas por gráficos de controle, sendo alcançando o requisito de capacidade exigido pelo cliente em todas elas _____	52
Figura 4.10 – Gráfico de valores individuais para o índice Cpk , lote a lote _____	53
Figura 4.11 – Exemplo de resultado alcançado após a implantação do controle de processos, sendo atingido o estado de controle e reduzida a variabilidade do processo (cota D1, referente à tabela 4.1) _____	54
Figura 4.12 – Peça selecionada para o estudo de caso: barra de ligação de motoniveladoras _____	55
Figura 4.13 – Planilha do estudo de repetitividade e reprodutibilidade do durômetro Brinell tipo King _____	57
Figura 4.14 – Gráficos de controle para o estudo básico do processo de medição de dureza _____	58
Figura 4.15 – Posicionamento das peças no forno de têmpera na primeira corrida, sendo cada peça identificada através de um carimbo que representa a ordem de colocação no forno (na segunda corrida, as seis peças foram colocadas na grelha à esquerda) _____	60
Figura 4.16 – Indicação de onde foram tomados os três pontos de dureza tanto após a têmpera como após o revenido _____	60
Figura 4.17 – Análise de médias e gráfico de amplitudes para a dureza das peças após a têmpera, indicando comportamentos distintos nas diferentes posições de medição (referente às figuras 4.15 e 4.16) _____	61

Figura 4.18 – Posicionamento das peças em ambos os fornos de revenido, sendo as peças numeradas de 1 a 15 colocadas no forno sem circulador de ar e as quinze peças restantes colocadas no forno com circulador de ar _____	62
Figura 4.19 – Análise de médias e gráfico de amplitudes para a dureza das peças após o revenido no forno com circulador (referente às figuras 4.16 e 4.18) _____	62
Figura 4.20 – Análise de médias e gráfico de amplitudes para a dureza das peças após o revenido no forno sem circulador (referente às figuras 4.16 e 4.18) _____	63
Figura 4.21 – Gráfico de três vias indicando a variação característica da dureza das peças após o processo de revenido _____	65
Figura 5.1 – Comportamento dos índices de capacidade para distintos tamanhos de amostra (25, 50, 100) e erros de medição (ver tabela 5.1) _____	75
Figura 5.2 – O efeito da incerteza de medição na avaliação da conformidade (adaptado) ^[45] _____	82
Figura 5.3 – A dependência entre a qualidade do produto/processo e a qualidade da medição _____	83

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 – Medições sucessivas, em milímetros, da ranhura de uma peça usinada _____	12
Tabela 2.2 – Conjunto de medições sucessivas de dureza em três pontos distintos de cada peça (unidade: HB) _____	17
Tabela 2.3 – Composição química de uma liga de aço para amostras sucessivas de uma liga de aço _____	21
Tabela 2.4 – Valores padronizados para a composição química da liga de aço_	22
Tabela 2.5 – Valores de dureza em três pontos distintos de um lote de peças _	26
Tabela 4.1 – Conjunto de cotas críticas/importantes, indicadas pelo cliente, que deveriam ser controladas por meio de gráficos de controle _____	40
Tabela 4.2 – Instrumentos de medição utilizados para a inspeção das características críticas/importantes, antes e depois da implantação do controle de processo _____	44
Tabela 5.1 – Diferentes combinações de erros de medição utilizadas _____	74

LISTA DE SIGLAS

ANOM	<i>Análise de Médias (Analysis of Means)</i>
APEX	<i>Agência de Promoção de Exportações</i>
CMM	<i>Máquina de Medir por Coordenadas (Coordinate Measuring Machine)</i>
DECAM	<i>Desenvolvimento de Soluções Baseadas em Conhecimentos Avançados de Metrologia para Processos e Produtos Industriais Inovadores</i>
DOE	<i>Delineamento de Experimentos (Design of Experiments)</i>
EMP	<i>Avaliação do Processo de Medição (Evaluating the Measurement Process)</i>
FMEA	<i>Análise dos Modos de Falhas e seus Efeitos (Failure Modes and Effects Analysis)</i>
FTA	<i>Análise de Árvore de Falhas (Failure Tree Analysis)</i>
GRR	<i>Repetitividade e Reprodutibilidade de Instrumentos (Gage Repeatability and Reproducibility)</i>
ndc	<i>Número de Categorias Distintas (Number of Distinct Categories)</i>
PMAP	<i>Programa para a Garantia da Qualidade do Processo de Medição (Process Measurement Assurance Program)</i>
PUMA	<i>Procedimento para Gerenciamento de Incerteza (Procedure for Uncertainty Management)</i>
SPC	<i>Controle Estatístico de Processo (Statistical Process Control)</i>
SWIPE	<i>Padrão, Peça, Instrumento, Operador, Procedimento, Ambiente (Standard, Workpiece, Instrument, Person, Procedure, Environment)</i>
QFD	<i>Desdobramento da Função Qualidade (Quality Function Deployment)</i>

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a crescente concorrência industrial tem direcionado novos desafios em todos os ramos da engenharia. As indústrias de manufatura devem cada vez mais exercer grandes esforços para garantir a sua competitividade e, conseqüentemente, a sua sobrevivência. Essa competitividade pode ser expressa como função da maior qualidade aliada a custos reduzidos, permitindo um ganho efetivo do mercado globalizado, na qual novos materiais, novos processos de manufatura, novas variações no projeto e outras características tendem a melhorar a posição de uma corporação frente às necessidades dos consumidores.

A certificação em conformidade com as normas da família ISO 9000:2000 tem-se tornado um requisito fundamental para as empresas atuarem nesse mercado. Esse conjunto de normas especifica requisitos para um sistema de gestão da qualidade, onde uma organização precisa demonstrar sua capacidade para fornecer produtos que atendam os requisitos do cliente e os requisitos regulamentares aplicáveis, e objetiva aumentar a satisfação do cliente ^[1]. Garante-se, com isso, que a empresa possui um sistema de gestão da qualidade implantado, com o objetivo de reduzir as não-conformidades. Em outras palavras, tem-se por objetivo direto a qualidade do funcionamento da administração da empresa e não necessariamente a qualidade do seu produto ^[2].

A figura 1.1 ilustra a quantidade de certificados ISO 9000 emitidos no mundo até dezembro de 2002, onde se pode notar um crescimento aproximadamente exponencial. Da quantidade total de certificados emitidos, cerca de 30 % representam a edição revisada da norma em 2000. Uma pesquisa realizada pela ISO em 2002 ^[3] mostrou que os motivos que impulsionam esse crescimento estão principalmente relacionados à melhoria da qualidade, à imagem empresarial, à

vantagem de mercado e à pressão dos clientes. Por outro lado, as empresas estão, segundo a mesma pesquisa, aperfeiçoando a qualidade, satisfazendo os clientes e melhorando a imagem da empresa graças à implantação da norma. O Brasil não foi incluído na pesquisa acima, mas a evolução da quantidade de certificados ISO 9000 emitidos até 2003 é similar à verificada no mundo [3].

Para reforçar ainda mais essa tendência de operar-se sob normas internacionais, prevê-se que até o final de 2006, oito em cada dez carros ou caminhões produzidos no mundo conterão peças ou componentes projetados, manufaturados e vendidos sob um sistema de gestão da qualidade ISO 9000:2000. Isso graças à publicação da ISO/TS 16949:2002, que visa harmonizar os requisitos da gestão da qualidade para o setor automotivo, incorporando o texto da norma ISO 9000:2000 e adicionando requisitos específicos do setor [4].

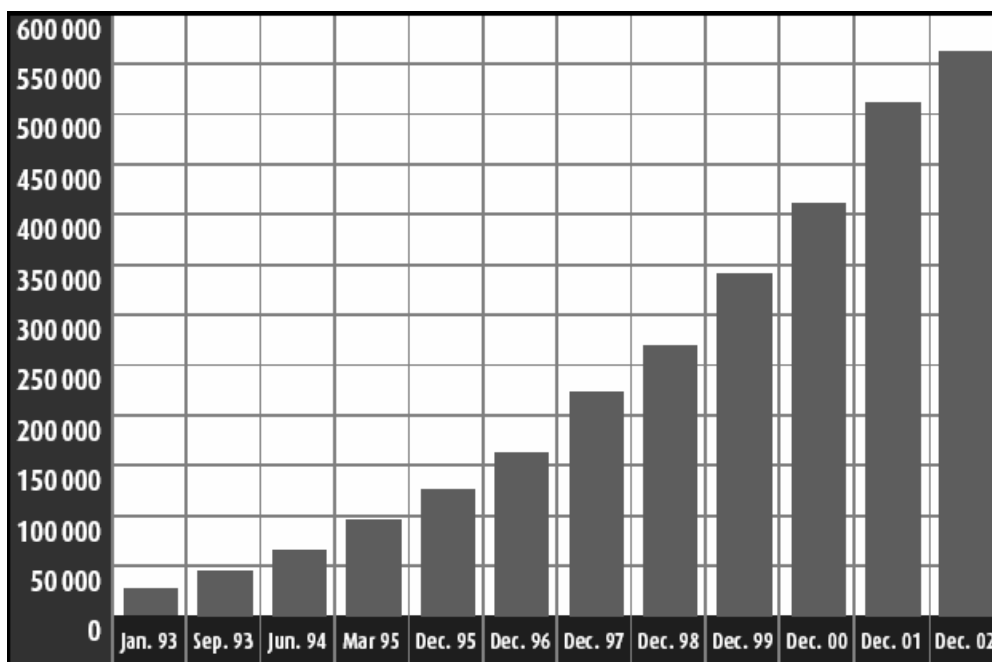


Figura 1.1 – Gráfico ilustrando a quantidade de certificados ISO 9000 emitidos no mundo até dezembro de 2002 [5]

Os benefícios esperados pela adoção de um sistema de gestão da qualidade apenas poderão atingir um nível ótimo quando se conseguir conciliar a máxima qualidade do produto com o mínimo custo da qualidade. Isto implicará redução nos índices de não-conformidade e é alcançado pela intensificação das ações de concepção e planejamento. Para tanto, métodos de garantia da qualidade devem ser aplicados durante todo o processo de desenvolvimento do produto, do estudo

de mercado até a entrega do produto ao cliente. Esses métodos podem ser divididos em métodos *on-line* e *off-line* [7]. Estes são preventivos, usados nas fases anteriores à produção, com ações para evitar erros e produzir qualidade desde o planejamento. Aqueles são métodos baseados na estatística, aplicados durante a produção para supervisionar a qualidade do produto e controlar os processos de fabricação. Cabe ressaltar que os dados obtidos pela aplicação de métodos *on-line* devem realimentar os métodos *off-line*, que compõem uma base viva de informações, que deve ser continuamente atualizada (figura 1.2).

Os métodos *off-line* mais difundidos são: análise dos modos de falhas e seus efeitos (FMEA), desdobramento da função qualidade (QFD), análise de árvore de falhas (FTA), delineamento de experimentos (DOE). A figura 1.2 mostra um cenário de atuação das principais técnicas de gestão preventiva da qualidade. Elas agem nas etapas de planejamento do produto, desenvolvimento do produto e processo e planejamento da produção, sendo realimentadas por uma base de informações provenientes do processo produtivo e dos clientes. Esses mesmos dados do processo produtivo podem ser utilizados para garantir a qualidade *on-line*, por meio de outras técnicas estatísticas, notadamente o controle estatístico de processo (SPC).

O controle estatístico de processo permite um conhecimento conciso do processo e a partir dele, mas não somente dele, é possível caracterizar o real nível de investimento necessário para que produtos com qualidade e produzidos a mínimo custo sejam entregues aos clientes. No entanto, em muitos casos, as informações geradas pelo controle estatístico de processo não são tratadas adequadamente, resultando em uma ineficiência que não é peculiar a essa ferramenta quando apropriadamente aplicada.

Embora o conhecimento do processo devesse ser uma iniciativa dos seus responsáveis, é bastante comum que o controle de processo seja exigência dos clientes que desejam saber se os produtos recebidos são provenientes de processos previsíveis e capazes ou se são obra do acaso, não garantindo a perpetuidade da qualidade. Isso porque para muitos gerentes de empresas, entre eles os brasileiros, o conceito binário de peça conforme e não-conforme ainda persiste e é usual vangloriar operadores pelo número de peças produzidas, descuidando-se da qualidade do produto. Não existe ainda uma cultura, na

maioria das empresas, que permita visualizar que a qualidade do produto e processo é obtida somente focando esforços na redução da variabilidade [6].

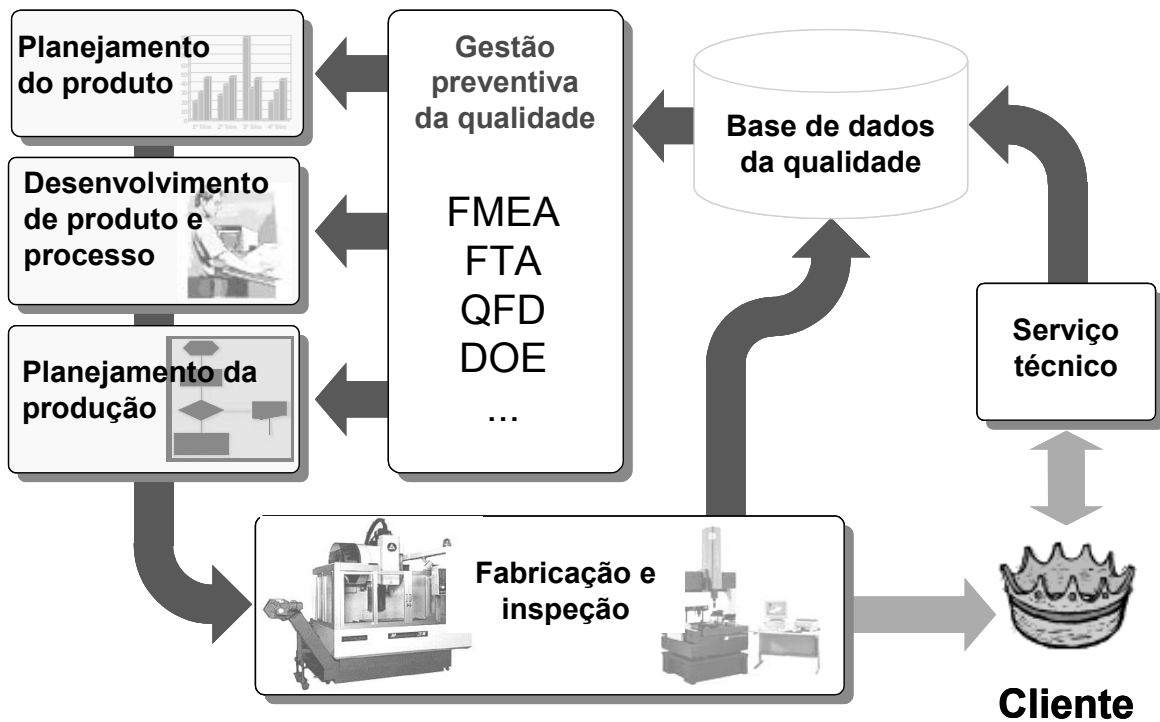


Figura 1.2 – Informações necessárias para o planejamento da qualidade, destacando a dependência entre os métodos *off-line* de garantia da qualidade e os dados que descrevam o comportamento dos processos e do produto em serviço (adaptado) [7]

Qualquer tarefa de controle ou melhoria da qualidade precisa de informação expressada em dados confiáveis. Se os dados estão contaminados por erros excessivos, poder-se-á provocar prejuízos importantes para a qualidade e a economia da produção [8]. Para conseguir esse ideal, o setor de metrologia, normalmente incipiente nas indústrias e tratado de forma *sui generis*, deve ser capaz de flanquear a produção com sistemas de medição condizentes com o processo a ser avaliado, possibilitando que o controle de processo seja aplicado de forma consciente e eficaz e que resulte em dividendos concretos para a empresa.

Em um de seus itens, a norma ISO 9000:2000 traz exigências no que tange o controle dos dispositivos de medição e monitoramento, salientando que a organização deve estabelecer processos para assegurar que a medição e monitoramento podem ser realizados e são executados de uma maneira coerente

com os requisitos de medição e monitoramento ^[9]. Esse enfoque, embora generalizado, é orientado através da referência às normas da família ISO 10012.

A norma ISO 10012 contém requisitos para um fornecedor garantir que as medições são feitas com a exatidão desejada e orientação para a implementação desses requisitos ^[10]. Nela, ressalta-se que o equipamento de medição deve ter características metrológicas adequadas para o uso e também que devem ser consideradas todas as incertezas no processo de medição, garantindo assim um reduzido risco de produzirem-se resultados com erros inaceitáveis.

Apesar dessas exigências normativas, constata-se na prática industrial que são raras as situações em que se pode afirmar que o resultado de uma medição realmente retrata a completa caracterização de um produto. As causas desse problema têm suas raízes na ineficácia do sistema de garantia da qualidade metrológica das empresas.

Em forma semelhante à garantia da qualidade de produto e processo, a garantia da qualidade da medição também pode ser caracterizada por um conjunto de métodos preventivos ou *off-line* e métodos *on-line*. Dentre estes últimos, a utilização de técnicas estatísticas para a garantia da qualidade de resultados de medição é recomendada pela ISO 10012 e pela ISO/IEC 17025 ^[11], apesar desta ser destinada a laboratórios de ensaio e calibração. Aquela orienta, embora não de forma substitutiva, que medições de verificação sejam realizadas para prevenir o uso de um instrumento que, apesar de estar dentro do intervalo de calibração, não esteja em conformidade com as especificações.

Everhart ^[12] tem recomendado a utilização de gráficos de controle para monitorar o processo de medição e controlar e melhorar a capacidade de medição. Através desse artifício, pode-se garantir que um processo de medição continua a medir dentro de limites confiáveis de incerteza. Outros métodos que podem ser aplicados para o conhecimento do processo de medição são o estudo de repetitividade e reprodutibilidade (GRR) ^[13] e a avaliação do processo de medição (EMP) ^[14]. Entretanto eles incluem apenas os erros que variam durante o experimento, são cegos para erros constantes, não possuem caráter presciente e não podem fornecer detalhes das causas de variação como base para mudanças e melhorias ^[15].

Os métodos estatísticos aplicados à medição não geram resultados que possam ser usados para estabelecer a rastreabilidade das medições. Para isso, é necessário incorporar o conceito de incerteza de medição. O Guia para a Expressão da Incerteza de Medição (GUM) ^[16] propõe um método amplamente aceito como referência para estimar e expressar a incerteza de medição, incluindo todas as contribuições possíveis e relevantes. Infelizmente, a maioria das medições feitas em chão-de-fábrica não é informada com sua incerteza. Isso equivale a afirmar que essas medições não são rastreáveis: a cadeia de rastreabilidade, tão cuidada em níveis mais altos da metrologia, quebra-se onde os maiores erros são possíveis.

Além do problema da rastreabilidade, o desconhecimento da incerteza resulta na impossibilidade de comparar os resultados obtidos com a aplicação de métodos “corretos” e “simplificados” de medição. Bennich ^[15] salienta o seguinte paradoxo na medição: geralmente o método correto é extremamente caro, lento e complexo, sendo portanto inviável como um candidato à medição em processo e pode ser usado apenas como método de referência; logo, os métodos de medição em fabricação devem ser simples, estáveis, rápidos com relação ao tempo de fabricação e com baixo custo, mas com desvios conhecidos do método correto e com incerteza adicional aceitável e controlada.

A seleção do método de medição, tanto para investigação de produto e processo como para controle de produto na linha de produção, deve fazer parte da denominada garantia da qualidade preventiva da medição. Esta se ocupa das decisões a serem tomadas durante a seleção, aquisição e aceitação de meios de medição e controle. Para dar suporte nestas atividades, Brinkmann ^[17] sugere o uso de matrizes de decisão, e.g. a matriz de Kepner e Tregoe, e a preparação de cadernos de encargos que contenham toda a informação disponível sobre a tarefa de medição e o ambiente.

Todos os requisitos relacionados à medição requererão, além de um adequado conhecimento de instrumentação e metrologia, conhecimentos de estatística e de tratamento de incertezas da medição ^[18]. Para tanto, a voz do processo também deve ser conhecida, pois a partir dela se pode identificar os reais requisitos metrológicos para o controle de processos, contribuindo para a contínua melhoria

e a satisfação do cliente, de maneira que o ciclo de negociações não seja interrompido.

1.1

OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO

As constatações supra-expostas visaram orientar o leitor para o objetivo desta dissertação de mestrado. De uma forma generalizada, caracterizar-se-á a importância de uma metrologia técnica e economicamente adequada ao serviço da garantia da qualidade dos processos produtivos e ressaltar-se-á a dependência existente entre a garantia da qualidade e a metrologia.

De uma forma mais específica, mostrar-se-á o valor agregado pela aplicação de ferramentas estatísticas e da melhoria das práticas metrológicas em uma empresa do ramo metalúrgico: a Electro Aço Altona S/A. Essas aplicações foram referenciadas como estudos de caso, que abrangeram ferramentas como o controle estatístico de processo, a análise de médias, o programa de garantia da qualidade das medições, entre outras. Esses estudos de caso foram realizados em dois setores da empresa: a usinagem e o tratamento térmico; e descrevem o estado inicial dos processos, fatos relevantes da implantação dos métodos e os resultados alcançados após a consolidação dos estudos.

Adicionalmente, em virtude da base de conhecimento formada, fazem-se reflexões sobre o quão significativa é a metrologia no escopo atual do sistema de gestão da qualidade e que ações devem ser preconizadas, atreladas ao contexto metrológico, para que o sistema possa operar de forma mais consistente e confiável. A necessidade de mão-de-obra qualificada também é salientada, visto que o ambiente atual, operado pelos “técnicos metrologistas”, precisa ser repensado, para que a metrologia torne-se uma efetiva aliada na disputa pelo mercado.

1.2

ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Com o intuito de criar um fluxo contínuo de informações, este documento foi dividido em quatro vertentes: estado da arte, estudos de caso, discussões e oportunidades futuras. No âmbito do estado da arte, os capítulos 2 e 3 descrevem, respectivamente, os métodos estatísticos para o controle e a melhoria de processos e as ferramentas da metrologia que estão sendo inseridas na prática industrial que, apesar da não totalidade de adesão, são referenciados pela norma ISO 9000:2000.

Os estudos de caso, realizados na empresa Electro Aço Altona S/A, são ilustrados no capítulo 4, nos quais o controle estatístico de processos, as ferramentas estatísticas e as práticas da metrologia foram difundidos. A sistemática de aplicação, os desafios enfrentados e os resultados alcançados após a consolidação das atividades são evidenciados, gerando uma base sólida de informações que culminam com a discussão do assunto no capítulo 5.

Alguns dos pontos salientados durante a discussão permitem caracterizar oportunidades futuras, capítulo 6, visando disseminar a cultura metrológica e promover a melhoria contínua e satisfação dos clientes na esfera dos processos produtivos.

CAPÍTULO 2

OS MÉTODOS ESTATÍSTICOS PARA O CONTROLE E A MELHORIA DE PROCESSOS

Os métodos estatísticos são amplamente usados para entender, monitorar e melhorar o desempenho de um processo. Este capítulo oferece informações sobre uma subárea do controle estatístico da qualidade, o controle estatístico de processo, sobre algumas ferramentas estatísticas e sobre o específico campo dos índices de capacidade de processo.

Para um melhor entendimento dos conceitos expostos, exemplos extraídos de processos reais serão inseridos nos itens de maior relevância para este trabalho. Esses conceitos estão sendo gradativamente embutidos no vocabulário das empresas que buscam manter-se competitivas no mercado mundial e indo de encontro a máximas como estas:

*Estatística é a ciência de torturar os
números até que eles confessem*
Aforismo atribuído a autores diversos

*É tudo muito simples: a estatística
é a obra de ficção da matemática*
Norbert Wiener (1894–1964), matemático americano

2.1

O CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSO

Shewhart ^[19] fraseou: “enquanto todo processo exhibe variação, alguns deles exibem variação controlada, e outros exibem variação não controlada”. Com base nesta passagem, que distingue os padrões consistentes de variação dos padrões imprevisíveis de variação, o conceito de controle estatístico de processo é inserido.

O controle estatístico de processo é, sem dúvida, uma poderosa ferramenta para a melhoria da qualidade, pois tem por meta principal reduzir a variabilidade das características que determinam o bom desempenho do produto através do monitoramento e aprimoramento dos processos ^[20].

O princípio básico do controle estatístico de processo está na seleção de uma variável a ser monitorada, a qual deve ser uma das características importantes de um produto ou processo. A partir disso, deve-se avaliar o sistema de medição, a fim de verificar se ele é capaz de detectar a variação do processo. Tendo-se um sistema de medição condizente com a voz do processo, pode-se iniciar o monitoramento do processo, o que se resume em medir a variável selecionada e registrar o resultado, comumente, em gráficos de controle. Desta maneira, pode-se estudar o processo e aprender o que o faz variar ^[21].

Através dos gráficos de controle, as variações casuais do processo podem ser diferenciadas daquelas denominadas especiais, ou seja, pode-se detectar quando um processo está fora de controle, não sendo ele previsível. Quando uma variação especial é encontrada, o processo deve ser então investigado para determinar a causa raiz que provocou a condição de fora de controle, e estratégias serem delineadas para minimizá-la ou, quiçá, eliminá-la. Uma vez que todas as causas especiais de variação tenham sido eliminadas, o processo passa a operar sob controle estatístico, ou seja, de maneira consistente e pode-se prever, mesmo que dentro de limites, como o processo se comportará no futuro. Um processo que tenha alcançado um estado de controle estatístico possui uma identidade e uma capacidade. Em outras palavras, o processo apresenta uma propagação previsível da variação e um nível de saída também previsível.

Os gráficos de controle são classificados em dois tipos: por atributo ou por

variável. Os gráficos de controle por variáveis visam trabalhar com dados mensuráveis de cunho quantitativo. Os gráficos que trabalham com atributos analisam características qualitativas e por esse motivo mostram pouca informação sobre o processo.

Os gráficos de controle de Shewhart mais utilizados são os gráficos de médias e amplitudes, de medianas e amplitudes e de médias e desvios padrões. Esses gráficos precisam da formação de subgrupos racionais, ou seja, conjuntos de dados obtidos num tempo suficientemente curto, para que neles seja expressa apenas a variação por causas comuns. Os parâmetros estatísticos de posição (média e mediana) e os de dispersão (amplitude e desvio padrão) são calculados dentro do subgrupo e são marcados em seqüência temporal no gráfico. Os valores medidos que estiverem além dos limites, são considerados fora de controle. Com essas peculiaridades, pode-se controlar estatisticamente cada característica individualmente e identificar causas especiais de variação para cada característica separadamente, indo ao encontro da citação de Shewhart no início deste item.

É muito importante distinguir entre o uso de gráficos de controle sobre um conjunto de dados históricos para determinar se um processo tem-se apresentado ou não sob controle estatístico – Fase 1 – e o uso na produção com amostras sendo tomadas seqüencialmente ao longo do tempo para detectar mudanças em um processo sob controle – Fase 2 ^[20].

O conceito em voga de Qualidade Classe Mundial requer que os processos sejam inerentemente estáveis ao longo do tempo e que os limites naturais estejam dentro dos limites de especificação, i.e. no alvo e com variação mínima. Isto exige um modo distinto de pensamento e um certo grau de controle estatístico; este foca os gráficos de controle ^[22].

Os subitens seguintes descrevem alguns tipos de gráficos de controle, os quais foram aplicados em uma planta industrial. A utilização de exemplos práticos visa o entendimento dos conceitos inerentes das ferramentas que foram efetivamente aplicadas para o controle de processos, como será descrito nos estudos de caso do capítulo 4.

2.1.1 OS GRÁFICOS DE VALORES INDIVIDUAIS E AMPLITUDES MÓVEIS

Os gráficos de valores individuais e amplitudes móveis são usados para monitorar o comportamento de um processo através de medições individuais de uma característica do produto. Eles são a forma mais simples e barata de realizar-se controle estatístico de processos. São aplicados quando não é possível formar subgrupos (e.g. razões técnicas, econômicas ou de conveniência). Assim como os gráficos de Shewhart, os gráficos de controle de valores individuais e amplitudes móveis não avaliam a influência de várias características conjuntamente.

Para melhor entender como operacionalizar e interpretar um gráfico de controle de valores individuais e amplitudes móveis, um exemplo prático será utilizado. Os dados da tabela 2.1 representam a profundidade de uma ranhura usinada de especificação $(7,56 \pm 0,12)$ mm e, a partir deles, ilustrar-se-á como são computados os limites de controle, também denominados limites naturais do processo.

Tabela 2.1 – Medições sucessivas, em milímetros, da ranhura de uma peça usinada

	Peça									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x	7,58	7,59	7,60	7,62	7,61	7,56	7,59	7,60	7,60	7,57
mR	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,05	0,03	0,01	0,00	0,03
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
x	7,59	7,59	7,58	7,58	7,58	7,57	7,57	7,57	7,59	7,57
mR	0,02	0,00	0,01	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00	0,02	0,02

A partir de vinte medições sucessivas, $k = 20$, calculam-se as amplitudes móveis através da equação abaixo, as quais representam uma medida da dispersão do processo.

$$mR_i = |x_i - x_{i-1}| \quad \forall i = 2 \dots k \quad (2.1)$$

Com esses valores, calculam-se:

- A média das medições individuais:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^k x_i}{k} = 7,586 \text{ mm} \quad (2.2)$$

- A média das amplitudes móveis:

$$\overline{mR} = \frac{\sum_{i=2}^k mR_i}{(k-1)} = 0,013 \text{ mm} \quad (2.3)$$

Conhecendo-se os parâmetros estatísticos de localização e de dispersão, podem ser estimados os limites de controle para os gráficos de valores individuais e de amplitudes móveis.

O gráfico de valores individuais apresenta as seguintes características (onde E_2 é uma constante tabelada usada no cálculo dos limites de controle. Para o caso dos gráficos de valores individuais, $E_2 = 2,66$):

- Limite superior de controle:

$$UCL_x = \bar{x} + (E_2 \cdot \overline{mR}) = 7,586 + (2,66 \cdot 0,013) = 7,621 \text{ mm} \quad (2.4)$$

- Linha central:

$$CL_x = \bar{x} = 7,586 \text{ mm} \quad (2.5)$$

- Limite inferior de controle:

$$LCL_x = \bar{x} - (E_2 \cdot \overline{mR}) = 7,586 - (2,66 \cdot 0,013) = 7,551 \text{ mm} \quad (2.6)$$

O gráfico de amplitudes móveis apresenta as seguintes características (onde D_4 é uma constante tabelada usada no cálculo dos limites de controle. Para o caso dos gráficos de amplitudes móveis, $D_4 = 3,27$):

- Limite superior de controle:

$$UCL_{mR} = D_4 \cdot \overline{mR} = 3,27 \cdot 0,013 = 0,043 \text{ mm} \quad (2.7)$$

- Linha central:

$$CL_{mR} = \overline{mR} = 0,013 \text{ mm} \quad (2.8)$$

- Limite inferior de controle:

$$LCL_{mR} = 0 \quad (2.9)$$

Para a interpretação de gráficos de controle na maioria das aplicações práticas, a utilização da regra do “ponto fora dos limites de controle”, também conhecida como “regra de Shewhart”, é suficiente [23].

Em alguns casos, é necessária uma maior sensibilidade para detectar sinais de instabilidade do processo. Nestes casos, recomenda-se adotar as quatro regras de detecção da “Western Electric” (figura 2.1), dando preferência, devido à simplicidade, às regras 1 e 4. Para aplicar essas regras, a região entre os limites deve ser dividida em três zonas igualmente espaçadas em cada lado da linha central.

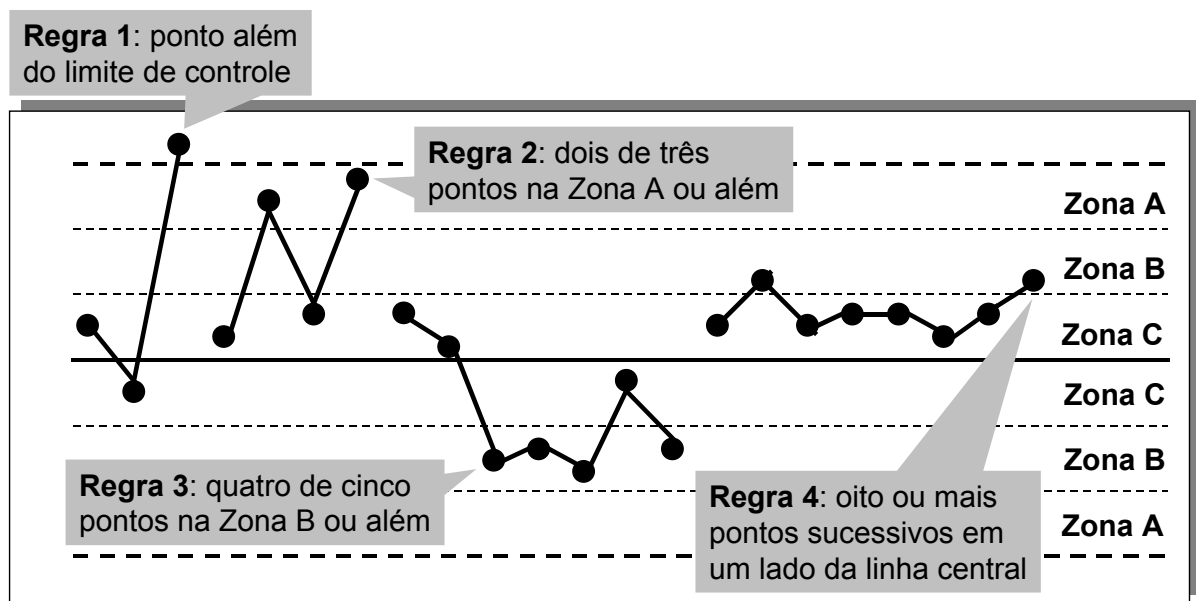


Figura 2.1 – Conjunto de regras para detecção de possíveis padrões não aleatórios em gráficos de controle (adaptado) [24]

A figura 2.2 mostra, para o exemplo em questão, na parte superior o gráfico de valores individuais e na parte inferior o gráfico de amplitudes móveis. Este fornece informações adicionais e úteis àquele [23] e serve como um “lembrete” da maneira correta de computar-se os limites do gráfico de valores individuais.

Nenhum valor individual caiu fora dos limites de controle correspondentes. Em primeira instância, pode-se afirmar que não houve mudança na posição do processo, embora esses limites estejam levemente inflados, pois uma amplitude móvel excedeu o limite superior de controle, a qual identifica uma quebra potencial na seqüência temporal. Adicionalmente, aplicando-se as outras três

regras da “Western Electric”, detecta-se um sinal de advertência pela regra 2 (indivíduos 4 e 5), o qual ratifica um comportamento suspeito do processo.

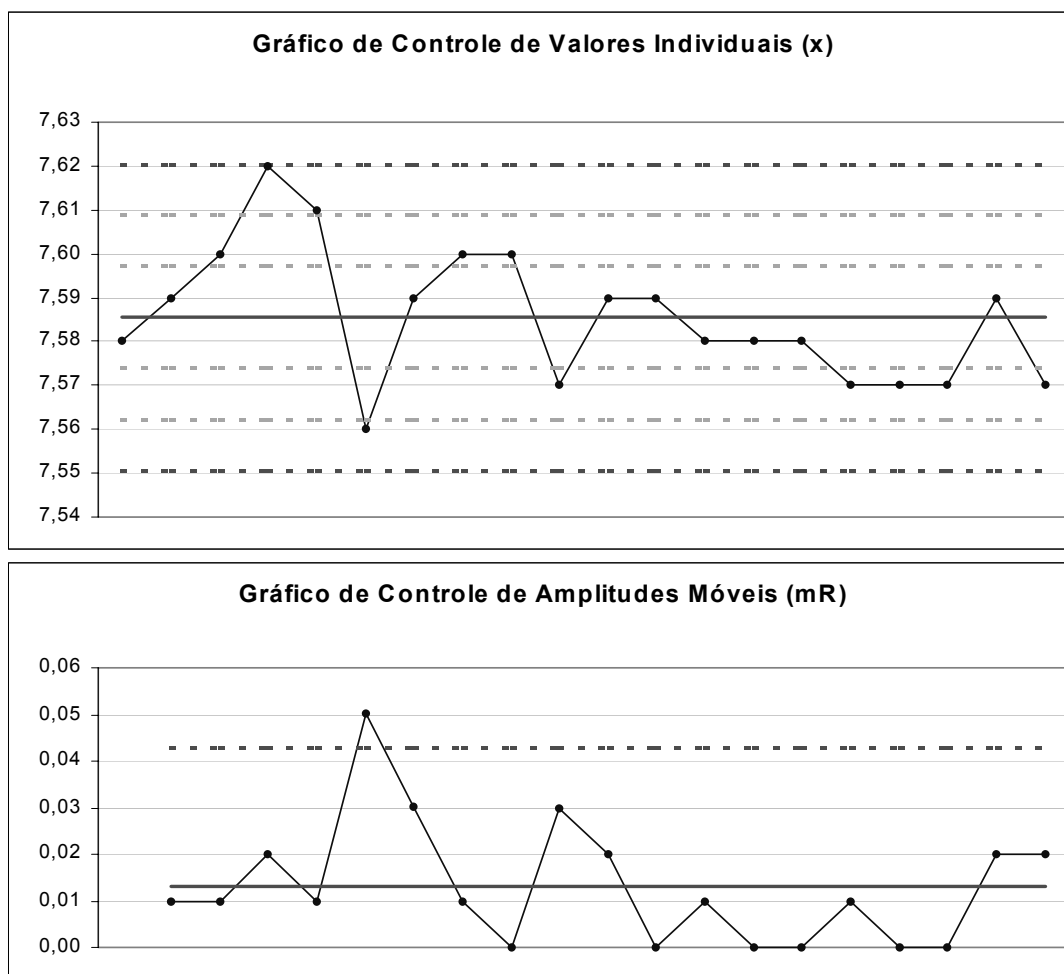


Figura 2.2 – Gráfico de controle de valores individuais e amplitudes móveis para o conjunto de dados da tabela 2.1

Para o exemplo apresentado, que corresponde à Fase 1 do controle estatístico, os limites de controle foram estimados com base numa pequena amostra. Essa não é uma situação confortável, pois para que se tenham limites de controle que expressem com maior rigor o comportamento do processo, é importante que o tamanho da amostra seja consideravelmente maior, embora em algumas situações práticas isso não seja possível. Mas isso não impede que outros pontos sejam levantados.

O primeiro abrange qual atitude deveria ser tomada pelo operador da máquina-ferramenta ao se deparar com os pontos 4 e 5 do gráfico de valores individuais. Nesta situação, o operador deveria correr atrás da causa dessa variação especial,

buscando solucionar o problema para que ele não mais ocorra. O segundo ponto tange os cuidados que se deve ter na interpretação do gráfico de amplitudes móveis, que não necessariamente representa uma mudança na dispersão do processo, mas pode indicar um deslocamento da média do processo.

Cabe ressaltar que os valores medidos para a ranhura correspondem a apenas uma posição dentro da característica, uma vez que os gráficos de valores individuais e amplitudes móveis não são sensíveis à variação dentro da unidade, misturando-a com a variação entre unidades. Quando é desejável o conhecimento da variação dentro da unidade, os gráficos de controle de três vias aparecem como uma ferramenta adequada para tal processamento.

2.1.2

O GRÁFICO DE CONTROLE DE TRÊS VIAS

O gráfico de controle de três vias é um conjunto de três gráficos de controle usado para monitorar simultaneamente a variação dentro da peça e entre peças de um produto específico. Os três gráficos são estes:

- Gráfico de valores individuais, onde cada ponto representa a média das características medidas, efetuadas numa mesma unidade de produto, i.e. trata essas médias como medições individuais da peça.
- Gráfico de amplitudes móveis para o gráfico de valores individuais, que é utilizado para auxiliar o entendimento da variação de peça para peça e para computar os limites de controle do gráfico de valores individuais.
- Gráfico de amplitudes, onde os pontos representam as amplitudes das medições de uma dada peça, que é usado para melhor entender a variação dentro da unidade.

Um caso típico para a sua aplicação é quando uma característica da qualidade é medida em várias posições em uma mesma peça. Esta situação ocorre no exemplo descrito na tabela 2.2, que retrata a medição de dureza em três pontos distintos de uma peça (x_1 , x_2 , x_3). O intervalo de tolerância para essa característica é (269 a 321) HB.

Tabela 2.2 – Conjunto de medições sucessivas de dureza em três pontos distintos de cada peça (unidade: HB)

	Peça									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
x_1	293	286	302	302	321	311	302	321	293	311
x_2	286	277	293	277	311	286	293	302	286	302
x_3	277	286	286	293	321	277	293	293	277	302
\bar{x}	285,3	283,0	293,7	290,7	317,7	291,3	296,0	305,3	285,3	305,0
mR	2,3	2,3	10,7	30,0	27,0	26,3	4,7	9,3	20,0	19,7
R	16,0	9,0	16,0	25,0	10,0	34,0	9,0	28,0	16,0	9,0

Após a medição nos três pontos predeterminados, a média de cada subgrupo (equação 2.10), a amplitude móvel de duas médias sucessivas (equação 2.11) e a amplitude de cada subgrupo (equações 2.12) são calculadas, sendo $n = 3$ o tamanho do subgrupo e $k = 10$ o número de subgrupos (peças analisadas).

$$\bar{x}_i = \frac{\sum_{j=1}^n x_{ij}}{n} \quad \forall i = 1 \dots k \quad (2.10)$$

$$mR_i = |\bar{x}_i - \bar{x}_{i-1}| \quad \forall i = 2 \dots k \quad (2.11)$$

$$R_j = \text{máximo}(x_{ij}) - \text{mínimo}(x_{ij}) \quad \forall j = 1 \dots n \quad (2.12)$$

A grande média, a média das amplitudes móveis e a amplitude média são calculadas, respectivamente, pelas equações 2.13, 2.14 e 2.15:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^k \bar{x}_i}{k} = 295,3 \text{ HB} \quad (2.13)$$

$$\overline{mR} = \frac{\sum_{i=2}^k mR_i}{(k-1)} = 13,7 \text{ HB} \quad (2.14)$$

$$\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^k R_i}{k} = 17,2 \text{ HB} \quad (2.15)$$

Conhecidos os parâmetros estatísticos de localização e de dispersão entre unidades e dentro da unidade, podem ser estimados os limites de controle para o conjunto de gráficos de controle supracitado.

O gráfico de valores individuais apresenta as seguintes características (onde E_2 é uma constante tabelada usada no cálculo dos limites de controle. Para o caso dos gráficos de valores individuais, $E_2 = 2,66$):

- Limite superior de controle:

$$UCL_x = \bar{\bar{x}} + (E_2 \cdot \overline{mR}) = 295,3 + (2,66 \cdot 13,7) = 331,7 \text{ HB} \quad (2.16)$$

- Linha central:

$$CL_x = \bar{\bar{x}} = 295,3 \text{ HB} \quad (2.17)$$

- Limite inferior de controle:

$$LCL_x = \bar{\bar{x}} - (E_2 \cdot \overline{mR}) = 295,3 - (2,66 \cdot 13,7) = 258,9 \text{ HB} \quad (2.18)$$

O gráfico de amplitudes móveis apresenta as seguintes características (onde D_4 é uma constante tabelada usada no cálculo dos limites de controle. Para o caso dos gráficos de amplitudes móveis, $D_4 = 3,27$):

- Limite superior de controle:

$$UCL_{mR} = D_4 \cdot \overline{mR} = 3,27 \cdot 13,7 = 44,8 \text{ HB} \quad (2.19)$$

- Linha central:

$$CL_{mR} = \overline{mR} = 13,7 \text{ HB} \quad (2.20)$$

- Limite inferior de controle:

$$LCL_{mR} = 0 \quad (2.21)$$

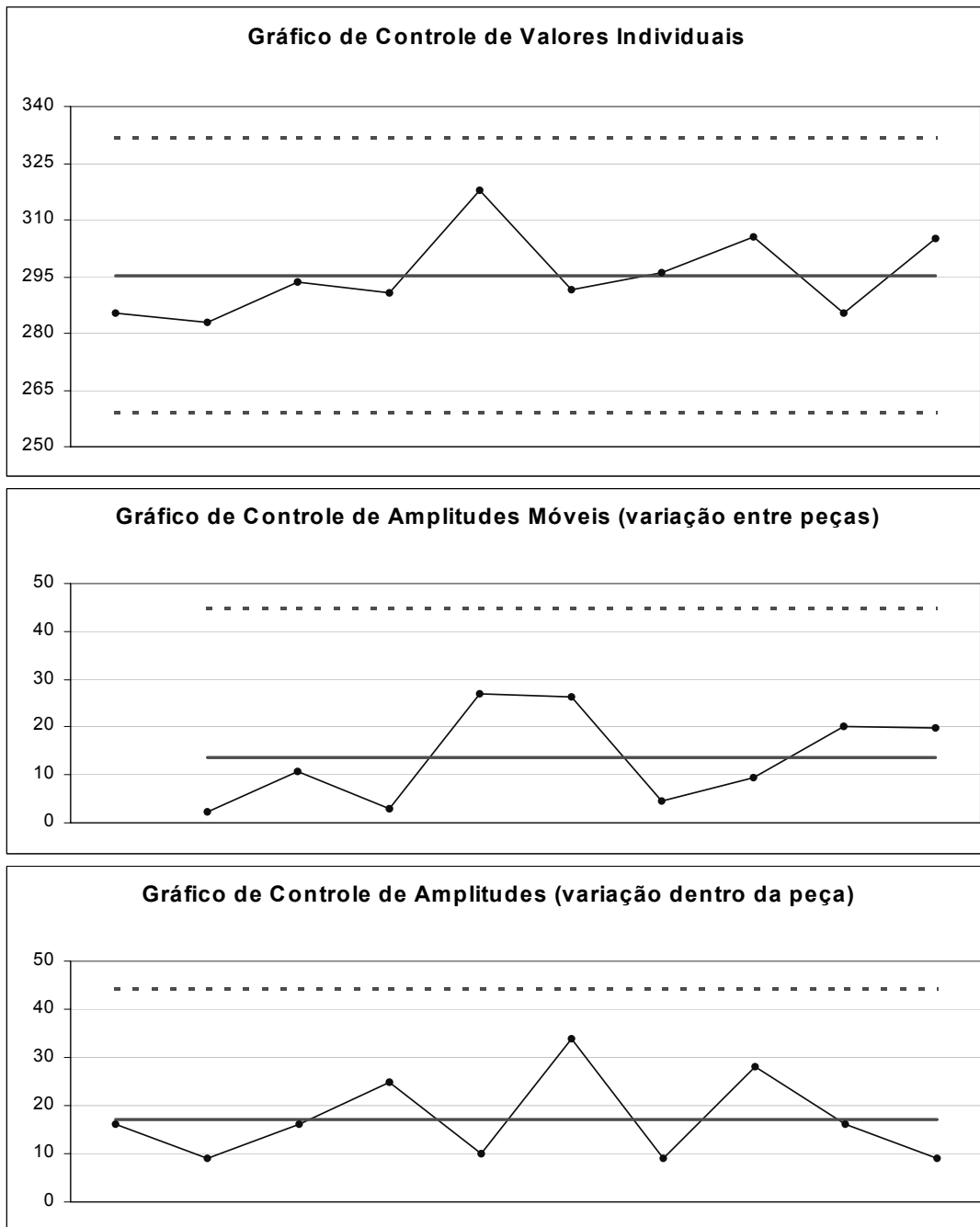


Figura 2.3 – Gráfico de controle de três vias para o monitoramento da dureza, com referência à informação contida na tabela 2.2

O gráfico de amplitudes apresenta as seguintes características (onde D_4 é uma constante tabelada usada no cálculo dos limites de controle. Para o caso de subgrupos de tamanho três, $D_4 = 2,57$):

- Limite superior de controle:

$$UCL_R = D_4 \cdot \bar{R} = 2,57 \cdot 17,2 = 44,3 \text{ HB} \quad (2.22)$$

- Linha central:

$$CL_R = \bar{R} = 17,2 \text{ HB} \quad (2.23)$$

- Limite inferior de controle:

$$LCL_R = 0 \quad (2.24)$$

A figura 2.3 mostra, para o exemplo em questão, na parte superior o gráfico de valores individuais, na parte central o gráfico de amplitudes móveis e na parte inferior o gráfico de amplitudes. Os três gráficos indicam um processo sob controle (usando apenas a regra de Shewhart). Um comportamento peculiar é que a variação média da dureza dentro da peça é maior que a apresentada entre peças, indicando um campo potencial para melhorias.

Apesar desse tipo de gráfico possibilitar o monitoramento da variação entre peças e dentro da peça, a utilização da média dos pontos tomados para uma determinada peça pode ocultar informações. Em alguns casos, pode ser mais conveniente utilizar um conjunto de gráficos de controle individuais para cada um dos pontos tomados. Em outras palavras, não se deve usar indiscriminadamente as cartas de três vias, mas apenas quando a situação garante sua utilização ^[23].

2.1.3

O GRÁFICO PARA MÚLTIPLAS VARIÁVEIS

O gráfico de múltiplas variáveis possibilita monitorar diversas características de um processo simultaneamente, sendo similar na aparência e no uso aos gráficos de Shewhart, pois ajudam a identificar causas especiais de variação resultante do comportamento conjunto de todas as características.

Não é incomum deparar-se com ocasiões em que um produto possua diversas características especificadas. Gráficos de controle distintos para as características individuais fornecerão, é claro, a maior compreensão para cada variável, mas não fornecerão individualmente uma caracterização do quão próximo um lote pode estar do valor alvo coletivo.

De acordo com Wheeler, uma maneira de responder essa questão é combinar as diferentes características em um único gráfico ^[23]. Para elucidar os conceitos envolvidos nesta técnica, a seguinte situação é exposta. Em um processo de

aciaria, a composição química do aço é de extrema importância para que as propriedades mecânicas possam ser atingidas. Elementos químicos como carbono, manganês e silício devem ser rigorosamente controlados, sendo os gráficos de controle de múltiplas variáveis uma alternativa de grande relevância para tanto.

A tabela 2.3 mostra a composição química de uma liga de aço em dez lotes consecutivos. Para combinar as características, cada variável deve primeiramente ser padronizada.

Tabela 2.3 – Composição química de uma liga de aço para amostras sucessivas de uma liga de aço

	Lote									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
C (%)	0,20	0,18	0,20	0,22	0,21	0,22	0,22	0,22	0,26	0,22
Mn (%)	1,43	1,38	1,38	1,48	1,44	1,50	1,49	1,44	1,23	1,45
Si (%)	0,49	0,47	0,40	0,46	0,57	0,51	0,42	0,42	0,33	0,44

A padronização simplesmente expressa o afastamento do valor alvo em unidades de desvio padrão. Considerando que t_i denota o valor alvo da variável x_{ij} e $\sigma(x_i)$ o desvio padrão dela, a padronização possui a forma:

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - t_i}{\sigma(x_i)} \quad \forall i = 1 \dots p \text{ e } \forall j = 1 \dots k \quad (2.25)$$

Para o exemplo em questão, $p = 3$ (variáveis a serem padronizadas, onde 1 representa o carbono, 2 o manganês, 3 o silício) e $k = 10$ (número de lotes). Os valores alvos são: $t_1 = 0,20 \%$, $t_2 = 1,30 \%$, $t_3 = 0,45 \%$; e os desvios padrões são: $\sigma(x_1) = 0,19 \%$, $\sigma(x_2) = 0,07 \%$, $\sigma(x_3) = 0,38 \%$.

Com base nesses dados, os valores padronizados são calculados e combinados em uma Distância Euclidiana Padronizada (tabela 2.4):

$$d_{pj} = \sqrt{z_{1j}^2 + z_{2j}^2 + \dots + z_{pj}^2} \quad \forall j = 1 \dots k \quad (2.26)$$

A Distância Euclidiana Padronizada é interpretada como um conjunto de características medidas que pode ser imaginado como um ponto no espaço de dimensão p . Esse ponto denota a localização de um lote sendo medido no espaço de dimensão p . O conjunto de valores alvo também definirá um ponto nesse mesmo espaço. A Distância Euclidiana Padronizada é a distância do ponto alvo

ao ponto para esse lote. A padronização faz com que todas as p características afetem essa distância igualmente.

Tabela 2.4 – Valores padronizados para a composição química da liga de aço

	Lote									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Z_1	0,00	-1,27	0,00	1,27	0,63	1,27	1,27	1,27	3,81	1,27
Z_2	1,78	1,10	1,10	2,47	1,92	2,74	2,61	1,92	-0,96	2,06
Z_3	0,67	0,33	-0,83	0,17	2,00	1,00	-0,50	-0,50	-2,00	-0,17
D_3	1,90	1,71	1,38	2,78	2,84	3,18	2,94	2,36	4,40	2,42

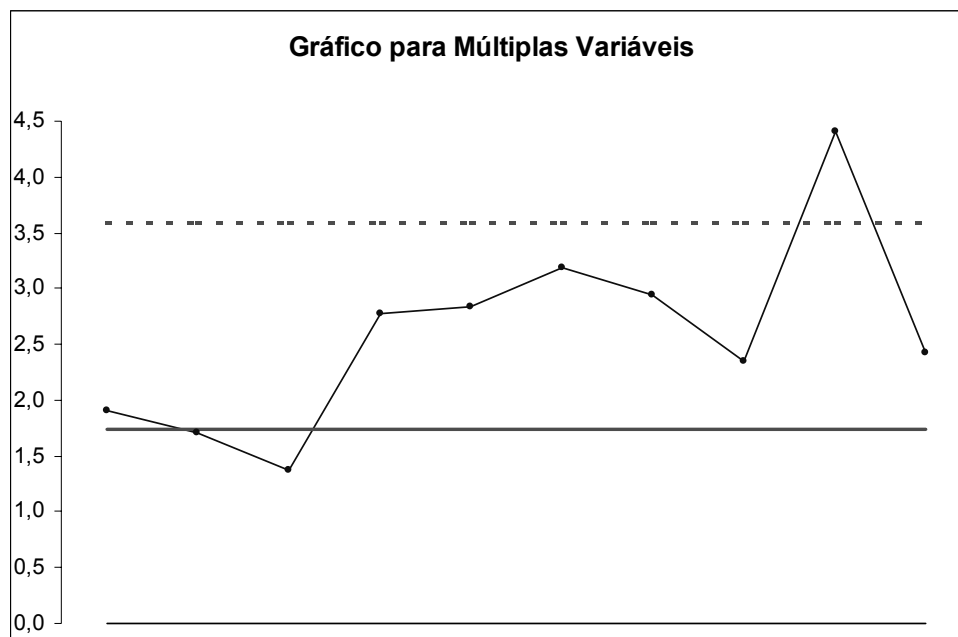


Figura 2.4 – Gráfico para múltiplas variáveis (d_3) da composição química da liga de aço

Os valores de d_p podem então ser colocados em um gráfico de controle. Embora se possam colocar esses valores em um gráfico de valores individuais, é mais comum e usualmente mais informativo, usar um modelo de distribuição qui-quadrada para construir limites aproximados. A distribuição qui-quadrada resulta em um limite superior de controle aproximado de:

$$UCL_{D_p} = \sqrt{\chi_{0,995}^2(p)} = \sqrt{\chi_{0,995}^2(3)} = 3,58 \quad (2.27)$$

e uma linha central de:

$$LC_{D_p} = \sqrt{p} = \sqrt{3} = 1,73 \quad (2.28)$$

O gráfico de controle de múltiplas variáveis da figura 2.4 ilustra o comportamento do processo em questão. Valores abaixo do limite superior de controle devem ser interpretados como variação ao acaso. O ponto acima do limite de controle caracteriza um fora do alvo detectável e deve ser tratado adequadamente.

Esta seção detalhou alguns tipos de gráficos de controle úteis para monitorar, melhorar e trazer um processo para o estado de controle estatístico. Estando um processo sob essa condição, sua capacidade em atender as especificações pode ser avaliada, como será descrito na seção seguinte.

2.2

A AVALIAÇÃO DA CAPACIDADE DE PROCESSO

A análise da capacidade de um processo produtivo é um procedimento para avaliar a condição de um processo em atender as especificações de determinada característica da qualidade do produto. Para a realização da análise da capacidade, o processo precisa estar na condição de controle estatístico, pois nessa condição diz-se que o processo é estável e sua variação deve-se, tão somente, às causas comuns, que são inerentes ao processo ^[25]. Em termos estatísticos, isso equivale a apresentar uma distribuição de probabilidade cujos parâmetros são constantes no tempo.

A capacidade de um processo pode ser medida por vários índices, que relacionam os limites de especificação e o valor alvo a parâmetros da distribuição do processo de manufatura ^[26]. Esses índices avaliam através de um único número a habilidade do processo em atingir as especificações de engenharia, ou seja, ilustram o que está acontecendo no ambiente produtivo ^{[27] [28]}.

A determinação dos índices de capacidade requer conhecimento das especificações de engenharia, da média do processo e da sua variação. Os índices mais difundidos nas indústrias são apresentados abaixo:

- Índice de Capacidade Potencial (C_p): é uma medida de capacidade que não considera a localização do processo no campo de tolerância. O C_p é estimado por

$$\hat{C}_p = \frac{USL - LSL}{6.\hat{\sigma}} \quad (2.29)$$

onde USL e LSL são respectivamente os limites superior e inferior de especificação e

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k (x_i - \bar{x})^2}{(k-1)}} \quad (2.30)$$

é a estimativa do desvio padrão do processo, sendo k o número de indivíduos da amostra.

- Índice de Capacidade Relativo à Localização (C_{pk}): esse índice considera a média do processo, sendo estimado por

$$\hat{C}_{pk} = \frac{\text{mínimo}(USL - \bar{x}, \bar{x} - LSL)}{3.\hat{\sigma}} \quad (2.31)$$

onde \bar{x} é a estimativa da média do processo.

Vários outros índices têm sido sugeridos nos últimos anos, tais como C_{pm} e C_{pmk} , que simultaneamente consideram a localização do processo e a dispersão em relação ao alvo ^[29]. O índice C_{pm} , ao contrário dos índices C_p e C_{pk} , não reporta diretamente o número de unidades não-conformes em um processo, mas avalia a aptidão do processo em estar próximo do alvo, visto que ele é baseado na filosofia de Taguchi de minimizar a variação do processo em torno do alvo ^[30] ^[31].

Como regra prática geral para interpretar o valor de C_{pk} , quando este é inferior a 1,33, então o processo é considerado incapaz de produzir peças repetitivamente e não satisfaz as expectativas da maioria dos clientes ^[32].

Entretanto, os índices de capacidade não são determinados com base em uma população, mas em uma amostra desta. Em outras palavras, eles são parâmetros estatísticos e estimam o valor verdadeiro, mas estão sujeitos a desvios amostrais. A magnitude do desvio associado a esses parâmetros estatísticos é função do tamanho da amostra da qual eles são calculados e do nível de confiança desejado para a estimativa. Logo, é mais conveniente reportar o resultado de uma

avaliação de capacidade em termos de um intervalo, sendo notificado também o tamanho da amostra e o nível de confiança utilizado.

A inequação

$$\hat{C}_{pk} - z_{\alpha/2} \sqrt{\frac{1}{9.k} + \frac{\hat{C}_{pk}^2}{2.(k-1)}} < C_{pk} < \hat{C}_{pk} + z_{\alpha/2} \sqrt{\frac{1}{9.k} + \frac{\hat{C}_{pk}^2}{2.(k-1)}} \quad (2.32)$$

possibilita estimar o intervalo de confiança para os índice de capacidade C_{pk} , onde k é o tamanho da amostra e α é o nível de confiança desejado [33]. Um procedimento semelhante pode ser aplicado para o índice de capacidade C_p .

Para elucidar os conceitos inseridos neste item, avaliar-se-á a capacidade de processo, índice C_{pk} , da característica usinada apresentada no item 2.1.1. Resgatam-se deste as seguintes informações: $\bar{x} = 7,586$ mm, $UCL = 7,68$ mm, $LCL = 7,44$ mm. O desvio padrão das medições individuais é calculado pela equação 2.30, resultando em 0,015 mm. De posse desses valores, estima-se $C_{pk} = 2,05$ pela equação 2.31. O erro associado a esse parâmetro estatístico devido somente ao tamanho da amostra é calculado pela inequação 2.32, resultando em $C_{pk} = (2,05 \pm 0,67)$, para 95 % de confiança. Isto implica que até no pior caso, a regra prática de interpretação do índice é satisfeita.

2.3 A ANÁLISE DE MÉDIAS

A análise de médias (ANOM) é uma modificação do gráfico de médias e amplitudes projetado para a análise de conjuntos finitos de dados. Ao contrário dos limites dos gráficos de controle, os limites de decisão da análise de médias são ajustados para um número particular de subgrupos. Qualquer mudança no número de subgrupos exigirá uma mudança nos limites de decisão.

De acordo com Wheeler [23], dados exatamente k subgrupos de tamanho n , os limites superior e inferior de decisão da análise de médias são, respectivamente:

$$UDL_{\bar{x}} = \bar{\bar{X}} + H.\hat{\sigma}_{\bar{x}} \quad (2.33)$$

$$LDL_{\bar{x}} = \bar{\bar{X}} - H.\hat{\sigma}_{\bar{x}} \quad (2.34)$$

onde \bar{X} é a grande média, $\hat{\sigma}_x$ é a estimativa do desvio padrão da média e H é um valor tabelado dependente do número de graus de liberdade (ν) da estimativa do desvio padrão da média, do número de médias de subgrupos sendo comparadas (k) e de um fator que denota o risco de um alarme falso (α).

As etapas para encontrar os limites de decisão para k subgrupos de tamanho n são:

- Estimar o desvio padrão da amostra: utilizar algum estimador para o desvio padrão e encontrar o número de graus de liberdade para esse estimador.
- Estimar o desvio padrão das médias dos subgrupos: encontrar o desvio padrão da média dividindo o desvio padrão da amostra pela raiz de n . O número de graus de liberdade para essa estimativa será exatamente o mesmo que o anterior.
- Encontrar o valor para H : escolher α , então usar α , k , e ν para encontrar o valor de H .
- Estimar os limites de decisão superior e inferior da análise de médias.

Para demonstrar essas etapas, um exemplo prático é apresentado. Para avaliar o gradiente de dureza em uma peça tratada termicamente, três pontos de dureza foram tomados em oito peças carregadas simultaneamente em um mesmo forno e resfriadas simultaneamente em um tanque com água. A tabela 2.5 contém os dados deste experimento (unidade: HB).

Tabela 2.5 – Valores de dureza em três pontos distintos de um lote de peças

	Peça									
	1	2	3	4	5	6	7	8	\bar{x}	R
x_1	555	532	555	532	578	532	532	532	543,5	46,0
x_2	418	495	495	430	477	477	477	532	475,1	114,0
x_3	532	600	555	578	512	532	532	532	546,6	88,0

A grande média, \bar{X} , é 521,8 HB e a amplitude média, \bar{R} , é 82,7 HB. Com base nesta, pode-se estimar o desvio padrão da amostra:

$$\hat{\sigma}_x = \frac{\bar{R}}{d_2^*} = \frac{82,7}{2,89} = 28,6 \text{ HB} \quad (2.35)$$

onde d_2^* é uma constante que depende do tamanho do subgrupo e do número de subgrupos. Para o caso em questão, com $n = 8$ e $k = 3$, $d_2^* = 2,89$.

O desvio padrão da média é obtido dividindo-se o desvio padrão da amostra pela raiz de n :

$$\hat{\sigma}_{\bar{x}} = \frac{\hat{\sigma}_x}{\sqrt{n}} = \frac{28,6}{\sqrt{8}} = 10,1 \text{ HB} \quad (2.36)$$

Como $k = 3$ e $n = 8$, o número de graus de liberdade para a amplitude média pode ser aproximado pela equação:

$$\nu \approx 0,85 \cdot k \cdot (n - 1) \approx 18 \quad (2.37)$$

O valor de H para as equações 2.33 e 2.34 é obtido através de tabelas que o informam a partir do número de graus de liberdade ($\nu = 18$), do número de subgrupos ($k = 3$) e do risco de um alarme falso ($\alpha = 0,10$). Com essas especificações, $H = 1,78$ e os limites de decisão são: $UDL_{\bar{x}} = 539,8$ HB e $LDL_{\bar{x}} = 503,7$ HB.

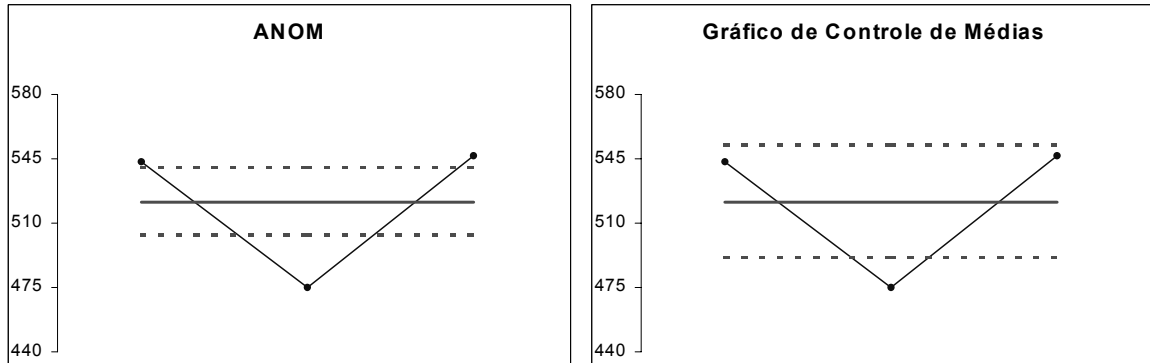


Figura 2.5 – Análise de médias e o correspondente gráfico de controle de médias para o conjunto de dados da tabela 2.5

Os limites de decisão, a grande média e os valores médios de cada subgrupo são mostrados no gráfico da esquerda na figura 2.5. Nele observa-se que o subgrupo 2 tem uma média significativamente inferior à grande média e os subgrupos 1 e 3 médias significativamente superiores à grande média, ou seja, estão fora dos limites de decisão e apresentam significativas diferenças com relação à grande média, provavelmente por estarem sob a ação de sistemas de causas distintos.

Da figura 2.5, podem ser ainda comparadas as abordagens da análise de médias e do gráfico de controle de médias. Verifica-se que este identificou apenas um comportamento como significativamente diferente da grande média, enquanto aquela identificou três comportamentos distintos. Em outras palavras, os gráficos de controle empregam uma abordagem conservativa e a análise de médias uma abordagem exploratória, que tem como fundamento a perda de poucos sinais e é típica para dados provenientes de experimentos.

2.4

SUMÁRIO

Esse capítulo ilustrou alguns métodos estatísticos empregados para o entendimento, monitoramento e melhoramento de processos. Em suma, eles permitem caracterizar um processo quando da produção contínua ou interpretar os resultados de experimentos complementares realizados para o entendimento do âmago do processo.

Os conceitos aqui abordados e as práticas da metrologia atual, que serão documentadas no capítulo seguinte, estão sendo gradativamente embutidos na prática industrial, pois através deles pode-se elevar o nível de qualidade dos produtos e processos e fortalecer a posição da empresa no competitivo mercado.

CAPÍTULO 3

PRÁTICAS DA METROLOGIA INDUSTRIAL

Os conceitos mencionados no capítulo anterior são dependentes de informações confiáveis adquiridas por sistemas de medição a partir do processo de produção. O quão confiável essas informações são é uma das tarefas pertencentes à ciência da medição: a metrologia.

Este capítulo identifica alguns procedimentos que gradualmente estão sendo embutidos na prática da metrologia industrial. A incerteza de medição, os estudos do processo de medição e métodos para garantir uma maior confiabilidade metrológica são apresentados e comentados, pois os conceitos aqui abordados são, assim como aqueles apresentados no capítulo anterior, alicerces para o entendimento dos estudos e conclusões almejadas nesta dissertação.

3.1

O PROCESSO DE MEDIÇÃO

Medir é o procedimento experimental pelo qual o valor momentâneo de uma grandeza física (mensurando) é determinado como um múltiplo e/ou uma fração de uma unidade, estabelecida por um padrão e reconhecida internacionalmente. A operação de medição é realizada por um instrumento de medição ou, de uma forma mais genérica, por um sistema de medição ^[34].

O processo de medição compreende não apenas o instrumento envolvido na medição, mas todos os fatores agindo sobre ele e a análise e interpretação dos resultados gerados. Isso forma uma conjuntura que engloba o procedimento de medição, o responsável pela medição, o ambiente onde as medições são

realizadas, as condições normais de operação, as técnicas utilizadas para analisar os dados e realimentar a base de dados da qualidade etc.

Experiências relevantes mostram que freqüentemente a influência do instrumento de medição representa a menor parcela dentro do processo de medição como um todo. Conseqüentemente, todas as fontes representativas devem ser consideradas ^[35].

Similar a todos os processos, o processo de medição é impactado por fontes de variações randômicas e sistemáticas, embora estas não sejam variação no sentido estrito. A sigla SWIPE é usada para representar seis elementos essenciais que afetam a exatidão de uma medição (padrão, peça, instrumento, operador, procedimento, ambiente) e pode ser imaginado como um modelo de erro para um sistema de medição completo ^[13].

Esses diferentes elementos que afetam a resposta de um processo de medição aparecem superpostos ao valor verdadeiro de um mensurando. Logo, uma expressão completa do resultado de uma medição inclui informações sobre a incerteza de medição, ou seja, um parâmetro que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser fundamentalmente atribuídos a um mensurando ^[36].

3.2

AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO

Por muitos anos tem-se insistido que uma declaração de incerteza acompanhe todas as medições. Em virtude disso, o GUM foi elaborado como sendo um guia para que a declaração de incerteza tenha um mesmo significado, independente da instituição.

O GUM propõe dois procedimentos distintos de avaliar as contribuições para a incerteza: tipo A e tipo B. O procedimento de avaliação do tipo A usa ferramentas estatísticas para determinar o desvio padrão experimental de uma série de observações. O procedimento de avaliação do tipo B usa outros meios para determinar um desvio padrão equivalente.

O procedimento de avaliação do tipo A é a técnica tradicionalmente usada para avaliar a incerteza de medição, e.g. estudo de repetitividade e reprodutibilidade.

Nesse procedimento assume-se que o desvio padrão estimado corresponde a uma distribuição normal. Os problemas com os procedimentos de avaliação do tipo A são que eles exigem trabalho intensivo, não há garantia que todas as variações que uma contribuição causa tenham sido observadas e não há meio de ter-se certeza que as amostras são representativas da variação que a contribuição possa causar ao longo do tempo ^[37].

O procedimento de avaliação do tipo B provê liberdade para usar toda a informação disponível, e.g. conhecimento passado, especificações do fabricante e informações de certificados de calibração, para estimar a incerteza naqueles casos em que o procedimento de avaliação do tipo A é inviável (e.g. incerteza associada a padrões físicos usados na medição) ou simplesmente quando não se dispõe de tempo, dinheiro ou infra-estrutura para realizar um procedimento de avaliação do tipo A.

Nos casos em que se utilizam distribuições finitas para o valor do mensurando, os procedimentos de avaliação do tipo B estimam os limites das variações causadas por uma contribuição para a incerteza, assumem uma distribuição para a variação entre esses limites e utiliza essa informação para calcular um desvio padrão equivalente.

As três distribuições finitas mais utilizadas são listadas abaixo:

- Distribuição triangular: é aplicada quando se sabe que há uma maior probabilidade de encontrar valores próximos ao valor médio que distante dele, e quando é mais confortável estimar a variação por meio de limites fixos.
- Distribuição retangular: é usada quando os limites de variação são conhecidos, mas não há informação sobre a distribuição entre esses limites. Esse é tipicamente o caso de informações provenientes de certificados de calibração e especificações do fabricante.
- Distribuição U: é usada quando se sabe que há maior probabilidade de encontrar-se valores próximos aos limites de variação que ao redor do valor médio.

O quociente entre a amplitude e a incerteza padrão para a distribuição retangular é maior que aquele para a distribuição triangular. Isso significa que se existe dúvida sobre qual das distribuições é a melhor opção para uma contribuição particular, a distribuição retangular é a mais conservadora, resultando em uma maior incerteza padrão equivalente para uma mesma faixa de variação.

Também se pode usar a distribuição normal quando a dispersão do valor do mensurando resulta de um conjunto grande de causas de similar intensidade.

O GUM recomenda utilizar a distribuição apropriada caso a distribuição seja conhecida. Se o tipo de distribuição é desconhecido, a prática usual é assumir que ela seja uma distribuição retangular. Entretanto, quando a componente de incerteza determinada dessa maneira contribui significativamente para a incerteza de medição, o GUM recomenda que se deve obter informações adicionais para uma nova avaliação ^[16].

3.2.1

CONSIDERAÇÕES RELATIVAS AO GUM E À ISO/TS 14253-2

A avaliação da incerteza de medição no meio industrial ainda não está bem estabelecida, principalmente naquelas indústrias que não enxergam a medição como um processo de extrema importância como qualquer outro. Parte dessa fobia ao GUM deve-se a complexidade do mesmo, pois é comum que os técnicos que operam na metrologia não tenham adquirido a formação necessária para um perfeito entendimento dos conceitos expostos no guia.

Do ponto de vista acadêmico, todo o rigor matemático é o meio exato e correto de fazer as coisas. Entretanto, quando se olha a esfera industrial, a simplificação dos procedimentos permite uma boa estimativa da incerteza de medição, dificilmente envolvendo algo mais complicado que uma raiz quadrada da soma quadrática das incertezas padrões ^[38].

Em outras palavras, o GUM é um documento pesado e completo e é visto, assim como outras normas, como matematicamente intenso, muito comprimido e inacessível. Muitos países, entre eles os Estados Unidos, têm editado versões locais e adicionado apêndices com exemplos a fim de esclarecer os conceitos intrínsecos ao guia ^[39].

Mesmo com esses ajustes na estimação da incerteza e a existência de programas computacionais que realizam os cálculos mais avançados, reluta-se na correta, ou melhor, aproximada avaliação da incerteza de medição. Isto se deve, em parte, a cultura de atendimento às especificações, a qual não implica conhecer o processo e atuar buscando a sua constante melhoria, e a imagem que o erro gerado por um instrumento de medição é desprezível.

Para tentar mudar essa cultura, a especificação técnica ISO/TS 14253-2 ^[40] procura, de modo simplificado, induzir os responsáveis pela metrologia a avaliar e determinar as incertezas de medição padrão e expandida, embutindo um certo nível de praticidade ao GUM. Essa especificação técnica introduz um procedimento iterativo e simplificado, o PUMA, cujo princípio baseia-se na sobreestimação da incerteza em todos os níveis, mas as iterações controlam a quantidade de sobreestimação. A sobreestimação intencional, em detrimento da subestimação, é necessária para prevenir decisões erradas com base nos resultados de medição. A quantidade de sobreestimação deve ser controlada pela avaliação econômica da situação.

Todos esses esforços visam garantir um conhecimento da incerteza de medição, de maneira que se possa afirmar que os requisitos de capacidade de medição sejam atingidos, principalmente quando se consideram os níveis atuais de produção, com tolerâncias de produto cada vez mais apertadas ^[38].

3.3

CRITÉRIOS PARA AVALIAR O PROCESSO DE MEDIÇÃO

Como salientado no item anterior, muitos profissionais nas indústrias estão ainda incertos sobre a incerteza de medição, questionando-se sobre a sua real necessidade. Esses ainda operam na denominada “regra de ouro” da metrologia, que se baseia na tolerância especificada para uma característica. Se o resultado de uma medição indica que uma peça está exatamente na tolerância, ela pode, na verdade, ser uma peça não-conforme. Mas o risco é aceito, pois se sabe que caso o inverso aconteça, estar-se-á, em primeira instância, desperdiçando dinheiro, pois uma peça conforme estará sendo refugada. Além disso, tem-se

como álibi o fato de trabalhar-se assim há muito tempo e, o mais importante, funcionando.

Entretanto, cada vez mais se sabe que esse pensamento é incompatível com as tolerâncias exigidas e com o valor agregado ao produto no atual mercado, ou seja, os custos relacionados a erros de classificação podem ser desastrosos, pois há várias outras perdas envolvidas. No caso de uma peça enviada a um cliente externo, pode haver despesas com retrabalho, transporte, indenizações e, como se não bastasse, denigre-se a imagem da empresa. Apesar disso, e denotando ainda a falta de cultura metrológica e a pouca difusão do GUM nas indústrias, normalmente se utiliza a resolução no lugar da incerteza expandida na “regra de ouro”, tornando a situação supracitada ainda mais crítica, pois a resolução é apenas uma das componentes que influencia a estimação da incerteza.

Por outro lado, os clientes desejam ter um elevado nível de confiança nos produtos adquiridos e têm exigido de seus fornecedores informações sobre o processo produtivo ou de medição que permitam garantir que os produtos agreguem qualidade. Neste propósito, vários métodos para se garantir que um processo de medição é confiável têm sido sugeridos. No âmbito do controle de processos, o capítulo 2 ilustrou algumas ferramentas que têm sido implantadas em plantas industriais para se conhecer melhor o processo, detectar problemas críticos etc. Quando se consideram processos com alta capacidade ($Cpk > 2$), a “regra de ouro” atestará um sistema de medição adequado, pois ela depende da especificação do produto. Entretanto, o sistema de medição poderá ser inadequado para o requisito de controle estatístico de processo, pois a variável de interesse é a variabilidade observada do processo de fabricação.

Quando o controle estatístico de processo está em questão, a avaliação do processo de medição torna-se mais rigorosa. Para isso, utilizam-se métodos estatísticos para identificar causas de variações (e.g. estabilidade, inconsistência, repetitividade) que perturbariam o controle do processo. Assim, pode-se julgar se o sistema de medição é adequado (avaliação de desempenho), compará-lo com outros sistemas, concluir sobre a necessidade de treinamento na sua utilização etc. Desta maneira, reduz-se a chance de erros de classificação de processo e, conseqüentemente, de peças.

3.3.1

AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE MEDIÇÃO

Muitos métodos têm sido sugeridos para investigar o comportamento de um processo de medição. O estudo de repetitividade e reprodutibilidade de instrumentos, introduzido pelo manual da MSA ^[13], é o método mais conhecido e difundido nas indústrias de manufatura. O EMP, proposto por Wheeler e Lyday ^[14], traz conceitos similares ao GRR, mas em uma forma mais clara, utilizando gráficos de controle para detectar tendências e inconsistências no estudo.

O propósito desta dissertação de mestrado não é discutir intensamente esses métodos, pois informações detalhadas podem ser adquiridas nas referências citadas. Por outro lado, alguns dos conceitos mais importantes do estudo de GRR são clarificados na seqüência, pois eles serão aplicados nos capítulos seguintes desta pesquisa.

A repetitividade é tradicionalmente referida como a variação devido ao instrumento de medição, i.e. a habilidade de um operador para repetir medições em uma mesma peça usando o mesmo instrumento ^[24]. Expressando-se de maneira mais rigorosa, a repetitividade é a variação randômica de sucessivas medições sob condições definidas, incorporando fontes tais como: erro de forma da peça, flutuação de curto prazo nas condições ambientais, fadiga do operador, entre outras ^[13].

A reprodutibilidade é tradicionalmente referida como a variação devido a distintos operadores tomando as medições, i.e. habilidade de diferentes operadores em produzir os mesmos resultados de medição em uma mesma peça usando o mesmo instrumento ^[24]. Entretanto, essa definição não é válida para processos de medição automatizados, onde o operador não é a maior fonte de variação ^[13].

O quanto a repetitividade, a reprodutibilidade, ou ambas consomem da tolerância de engenharia ou da variabilidade do processo são informações que podem ser obtidas do estudo e permitem concluir sobre a necessidade ou não de modificar-se o processo de medição, atuando-se, por exemplo, no treinamento dos operadores, na manutenção do sistema de medição, na alteração dos procedimentos etc. Outra informação útil é o número de categorias distintas que podem ser distinguidas com confiabilidade pelo sistema de medição (ndc). O

manual da MSA ^[13] reporta, em maiores detalhes, o como analisar essas informações.

3.4

GARANTIA DA QUALIDADE DO PROCESSO DE MEDIÇÃO

A utilização de um programa de garantia do processo de medição (PMAP) para controlar o sistema de medição de uma maneira contínua tem sido recomendado por vários especialistas, com o objetivo de determinar, monitorar, controlar e melhorar a capacidade de medição do sistema de medição.

Através de um PMAP, pode-se garantir que um processo de medição continua a medir dentro de limites confiáveis de incerteza, utilizando-se para isso técnicas de controle estatístico de processo.

O PMAP é baseado na avaliação de um valor de referência e permite estimar a incerteza que pode estar presente em cada produto que esteja sendo medido. Para estabelecer o valor de referência, medições são realizadas em um padrão de controle calibrado, que é escolhido ou manufaturado para representar as características do produto que será medido com o sistema de medição ^[41].

Medições preliminares, i.e. medições de controle, são realizadas em um padrão de controle por um especialista. Entre 20 e 25 medições são realizadas no padrão de controle, sendo a média e o desvio padrão dessas medições calculadas. Os limites de referência são estabelecidos como a média e os limites superior e inferior de controle correspondentes a 99,73 %, denotados respectivamente por \bar{X} , UCL e LCL na figura 3.1.

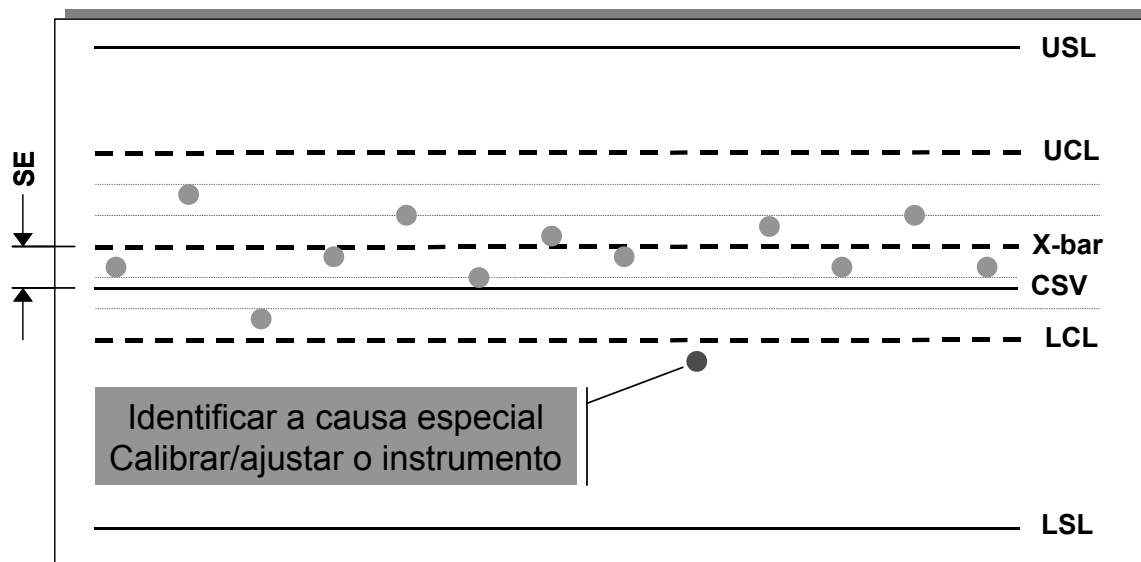


Figura 3.1 – Modelo de gráfico de controle para o programa de garantia da qualidade do processo de medição

Adicionalmente, os limites de especificação superior e inferior (USL e LSL, respectivamente) e o valor do certificado de calibração (CSV) para o padrão de controle podem ser identificados. A diferença entre a média das medições de controle e o valor do certificado de calibração fornece uma estimativa do erro sistemático, SE, do instrumento de medição. Cabe destacar que, caso seja viável, o erro sistemático pode ser corrigido após as medições de controle.

3.5 SUMÁRIO

A prática comum da metrologia nas indústrias e algumas ações recentes na busca pela melhoria das práticas metrológicas foram apontadas nesse capítulo. Do conceito de incerteza de medição às técnicas para avaliar a capacidade de um processo de medição, foram apresentados procedimentos que visam garantir uma maior confiabilidade no resultado de uma medição.

Entretanto, nenhum dos procedimentos pode ser isoladamente aplicado, pois o valor agregado por eles depende não apenas da aplicação no ambiente fabril, mas da correta interpretação e da simbiose entre eles, tendo-se como delineador o porquê uma medição está sendo feita. De maneira mais sucinta, o PMAP não deve ser visto como um substituto da calibração, assim como o estudo de

repetitividade e reprodutibilidade não pode suprir a falta de uma avaliação de incerteza. Deve-se sim, conciliar durante o ciclo de vida de um sistema de medição a sua calibração em intervalos adequados com a verificação e avaliação periódica do processo de medição.

CAPÍTULO 4

A INTERAÇÃO: ESTUDOS DE CASO

Os estudos de caso relatados neste capítulo são fruto do trabalho desenvolvido na Electro Aço Altona S/A, como parte integrante do projeto DECAM. A empresa, uma metalúrgica que se caracteriza pela produção de peças fundidas, tratadas termicamente e usinadas, tem capacidade de produzir mais de novecentas toneladas por mês de componentes usinados e fundidos, que são aplicados em setores como: mineração, dragagem, geração de energia elétrica, entre outros.

A empresa opera com unidades de produtos seriados, sob encomenda e ligas especiais, caracterizando-se por corridas curtas, i.e. lotes pequenos, fornece produtos para clientes como a Caterpillar, Volvo, DaimlerChrysler etc., exporta cerca de 25 % da sua produção e é certificada ISO 9000:2000 desde 2002. Os estudos de caso apresentados focam a linha de produtos seriados, pois estes gerariam um maior conjunto de informações em um menor tempo e agregariam mais valor dentro da estrutura atual da empresa.

Dois estudos de caso serão abordados, abrangendo os setores de usinagem e tratamento térmico, embora o trabalho junto à empresa tenha envolvido muitas outras aplicações que, por terem apresentado resultados similares aos dois estudos de caso que serão apresentados, foram omitidos.

Esses estudos basearam-se na aplicação de ferramentas estatísticas e na melhoria das práticas metrológicas, cujos conceitos foram caracterizados nos capítulos anteriores, mas que terão um cunho prático no transcorrer deste capítulo.

4.1

ESTUDO DE CASO 1: SETOR DE USINAGEM

O principal cliente, responsável por cerca de 40 % do faturamento da Electro Aço Altona S/A, solicitou a implantação do controle estatístico de processos em cotas críticas e importantes de produtos usinados com razoáveis níveis de produção. O controle de processo faz parte do objetivo APEX 2004 desse cliente e é requisito para a continuidade de fornecimento a partir da recertificação.



Figura 4.1 – Peça selecionada para o estudo de caso: alojador da ponta de eixo de motoniveladoras

A situação exposta mostra o quão importante para a Electro Aço Altona S/A foi e continua sendo o projeto realizado, no qual vários modelos de produtos do cliente foram incluídos. Todavia, este estudo de caso está concentrado no alojador da ponta de eixo (do inglês *spindle housing*) de motoniveladoras, cuja produção mensal supera as duzentas unidades, possuindo seis cotas críticas/importantes conforme indicado pelo cliente (tabela 4.1).

Tabela 4.1 – Conjunto de cotas críticas/importantes, indicadas pelo cliente, que deveriam ser controladas por meio de gráficos de controle

Cota	Característica	Especificação
<i>D1</i>	<i>Diâmetro</i>	<i>(50,698 ± 0,020) mm</i>
<i>D2</i>	<i>Diâmetro</i>	<i>(119,941 ± 0,038) mm</i>
<i>D3</i>	<i>Diâmetro</i>	<i>(129,941 ± 0,038) mm</i>
<i>D4</i>	<i>Diâmetro</i>	<i>(158,95 ± 0,13) mm</i>
<i>D5</i>	<i>Diâmetro</i>	<i>(127,00 ± 0,15) mm</i>
<i>P1</i>	<i>Profundidade</i>	<i>(7,56 ± 0,12) mm</i>

O cliente exige que essas cotas sejam controladas e que sejam emitidos mensalmente relatórios registrando a capacidade dos processos, cujo requisito é

$Cpk > 1,33$. Os próximos itens descrevem o estado inicial do processo, a sistemática seguida e o estado final após seis meses de intenso trabalho na busca por satisfazer as expectativas do cliente.

4.1.1

ESTADO INICIAL DO PROCESSO PRODUTIVO E DE INSPEÇÃO

A pressão do cliente para a aplicação de controle estatístico de processo em algumas características teve origem em meados de 2001. No período que antecedeu este trabalho de pesquisa, apesar do cliente ter inclusive ministrado cursos no âmbito do assunto, verificou-se que ainda seriam necessários aperfeiçoamentos. O controle de processos era pouco eficaz, com estratégias pouco consistentes e informações de baixa confiabilidade. Isso porque gráficos de controle que requeriam adequação eram utilizados, com dados provenientes de instrumentos de medição e procedimentos que exigiam mudanças para os fins do controle estatístico de processo e com métricas de capacidade estimadas sob essas condições.

Tanto que, após os primeiros estudos realizados, verificaram-se processos fora de controle estatístico, com variabilidade excessiva e com instrumentos de medição não próprios para a aplicação do controle estatístico de processo.

4.1.2

SISTEMÁTICA APLICADA

As constatações mencionadas no item anterior persuadiram que uma sistemática bem definida de trabalho seria necessária. Esta incluiria a seleção das características críticas para a qualidade, a definição do tipo de gráfico de controle a ser utilizado, a implementação de ações para reduzir a variabilidade etc., na busca pela melhoria contínua (figura 4.2).

Uma vez que as cotas críticas foram definidas pelo cliente, recaiu-se sobre a seleção do gráfico de controle mais adequado para os processos. Visto que a produção envolve pequenos lotes e que a possibilidade de agrupamento inexistia, os gráficos de controle de valores individuais e amplitudes móveis tornaram-se a opção mais convidativa.

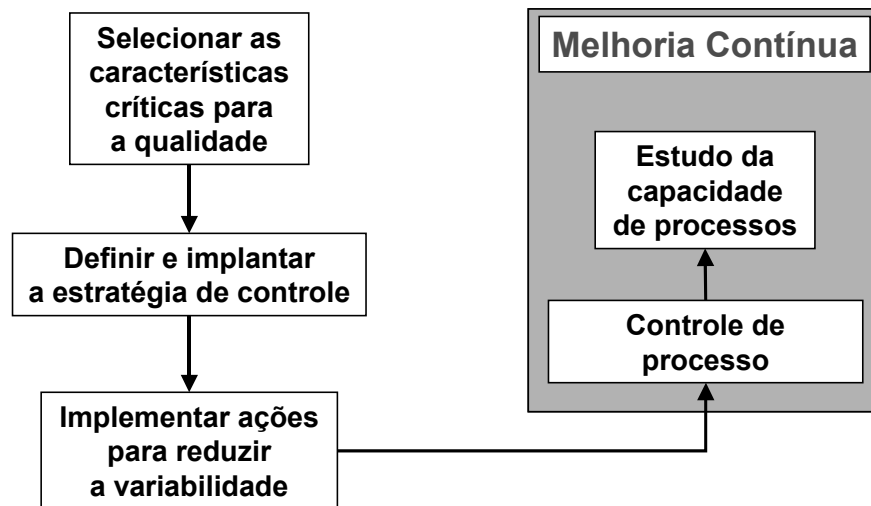


Figura 4.2 – Estratégia adotada para a implantação do controle estatístico de processo e para a posterior avaliação da capacidade, visando a melhoria contínua

Contudo, o intuito do trabalho não era espalhar indiscriminadamente dezenas de gráficos de controle pela produção e aguardar os possíveis efeitos. Por isso, os envolvidos no processo (supervisores, programadores, operadores) foram treinados e as instruções de trabalho relacionadas ao controle de processo (requisito da norma ISO 9000:2000) foram reformuladas. Para que fossem atingidos bons resultados, implantou-se o cronograma descrito no item seguinte.

4.1.3 IMPLANTAÇÃO DO CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSO

Como descrito no capítulo 2, a implantação do controle estatístico de processo é usualmente dividida em duas fases que têm objetivos e formas de trabalho diferentes. A fase 1, também denominada estudo inicial, envolve o conhecimento do processo, utilizando a informação para atingir o estado de controle ou previsibilidade. A fase 2, ou de supervisão, consiste na periódica observação do processo para evitar o retorno ao estado de imprevisibilidade.

Durante a fase 1, gráficos de conformidade foram utilizados para coletar dados do processo, sendo recomendado o preenchimento do diário de bordo quando fosse realizado qualquer tipo de ajuste no processo. Esse diário de bordo visava obter informações que possibilitariam a identificação da causa de alguns padrões atípicos de variação nos dados. Adotou-se uma frequência de amostragem de

100 % para que fosse coletado o máximo de informação e para melhorar a capacidade de detecção do gráfico.

Se uma menor frequência de amostragem fosse utilizada, os resultados poderiam exigir demasiado tempo, uma vez que o processo é caracterizado por corridas curtas e tempos de usinagem longos. Apesar dessas necessidades, foi necessário quebrar o paradigma que a produtividade cairia em função do tempo tomado pela inspeção. Uma vez que o tempo demandado pela usinagem de uma peça na máquina-ferramenta é suficiente para a completa medição das características monitoradas da peça anteriormente usinada, a produtividade não seria prejudicada.

Sendo contornada essa situação, e sabendo-se que as informações até então disponibilizadas eram de pouca relevância, foram inseridos gráficos de conformidade para fazer um estudo preliminar dos processos. Cada cota crítica recebeu um gráfico que possuía, em seu verso, um diário de bordo que deveria ser preenchido relatando qualquer alteração realizada no processo. Após as primeiras análises, mesmo sem o adequado preenchimento do diário de bordo, dois fatos foram consignados na maioria das cotas monitoradas, os quais são explicitados nos parágrafos seguintes.

Para que o controle estatístico de processo opere de forma confiável, é importante que o processo de medição também seja confiável e para isso é necessário que o instrumento de medição detecte e reflita apropriadamente as variações do processo. Normalmente essa questão é facilmente detectada por gráficos de controle, sem que haja a necessidade de estudos especiais. A resolução de um instrumento não será apropriada para o propósito dos gráficos de controle se houver menos de quatro valores possíveis para a amplitude dentro dos limites de controle ^[14]. A figura 4.3 ilustra um dos casos encontrados, onde se percebem muitos valores semelhantes devido à falta de capacidade de detecção do instrumento, e a tabela 4.2 mostra os instrumentos que eram utilizados antes da implantação do controle estatístico de processo e os que foram adotados para a consolidação do trabalho, em virtude do problema apontado.

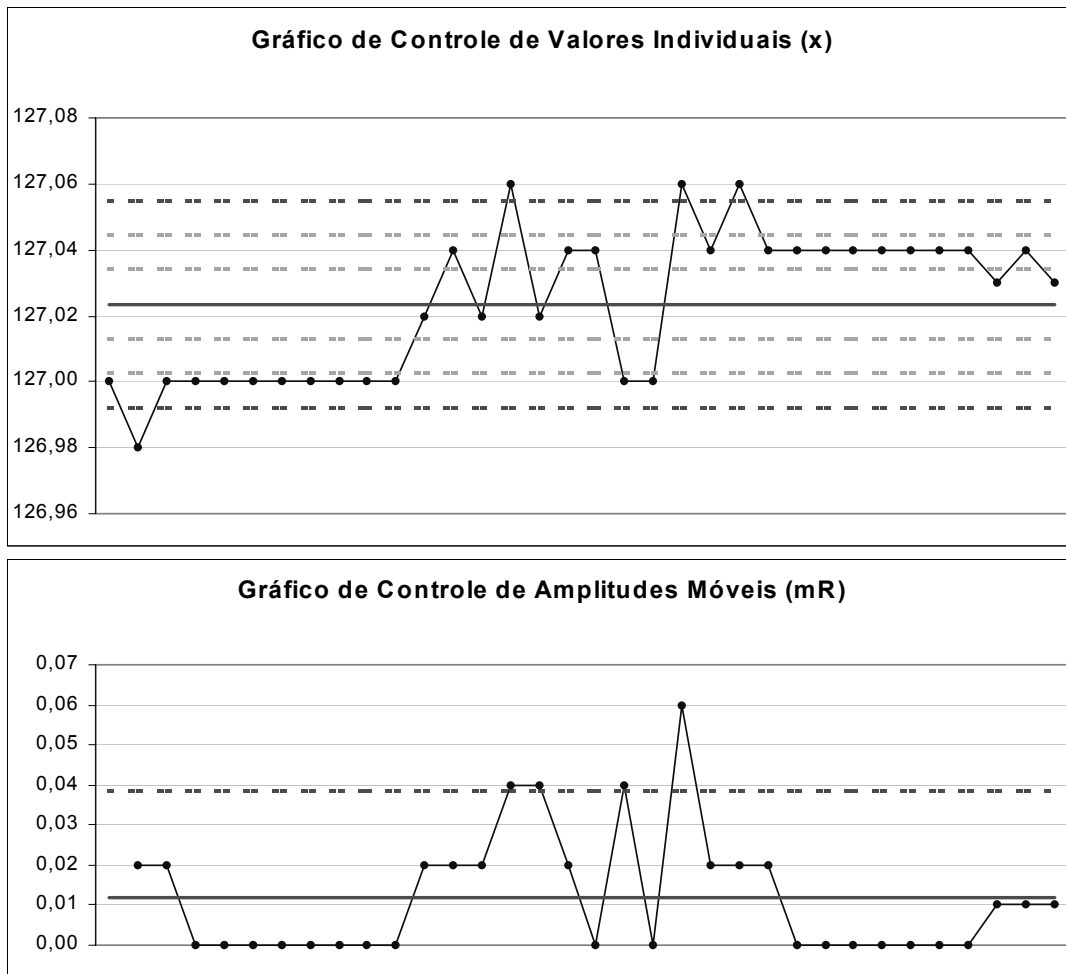


Figura 4.3 – Caso em que a resolução do instrumento de medição é inadequada para o propósito do controle estatístico de processo (cota D5, referente à tabela 4.1)

Tabela 4.2 – Instrumentos de medição utilizados para a inspeção das características críticas/importantes, antes e depois da implantação do controle de processo

Cota	Antes		Depois	
	Instrumento	Resolução	Instrumento	Resolução
D1	Súbito	0,01 mm	Súbito	0,001 mm
D2	Súbito	0,01 mm	Súbito	0,001 mm
D3	Súbito	0,01 mm	Súbito	0,001 mm
D4	Paquímetro	0,02 mm	Paquímetro	0,02 mm
D5	Paquímetro	0,02 mm	Súbito	0,001 mm
P1	Micrômetro	0,01 mm	Micrômetro	0,01 mm

Quando os instrumentos detectavam a variabilidade do processo, os gráficos de controle mostravam processos com elevada variabilidade e fora de controle (figura 4.4). Uns porque a média do processo constantemente variava, em princípio, devido à prática do sobreajuste pelos operadores, embora nada estivesse

relatado no diário de bordo. Outros porque não se atingia repetitividade, por problemas advindos do processo de usinagem, do bruto fundido, do tratamento térmico, ou do processo de medição.

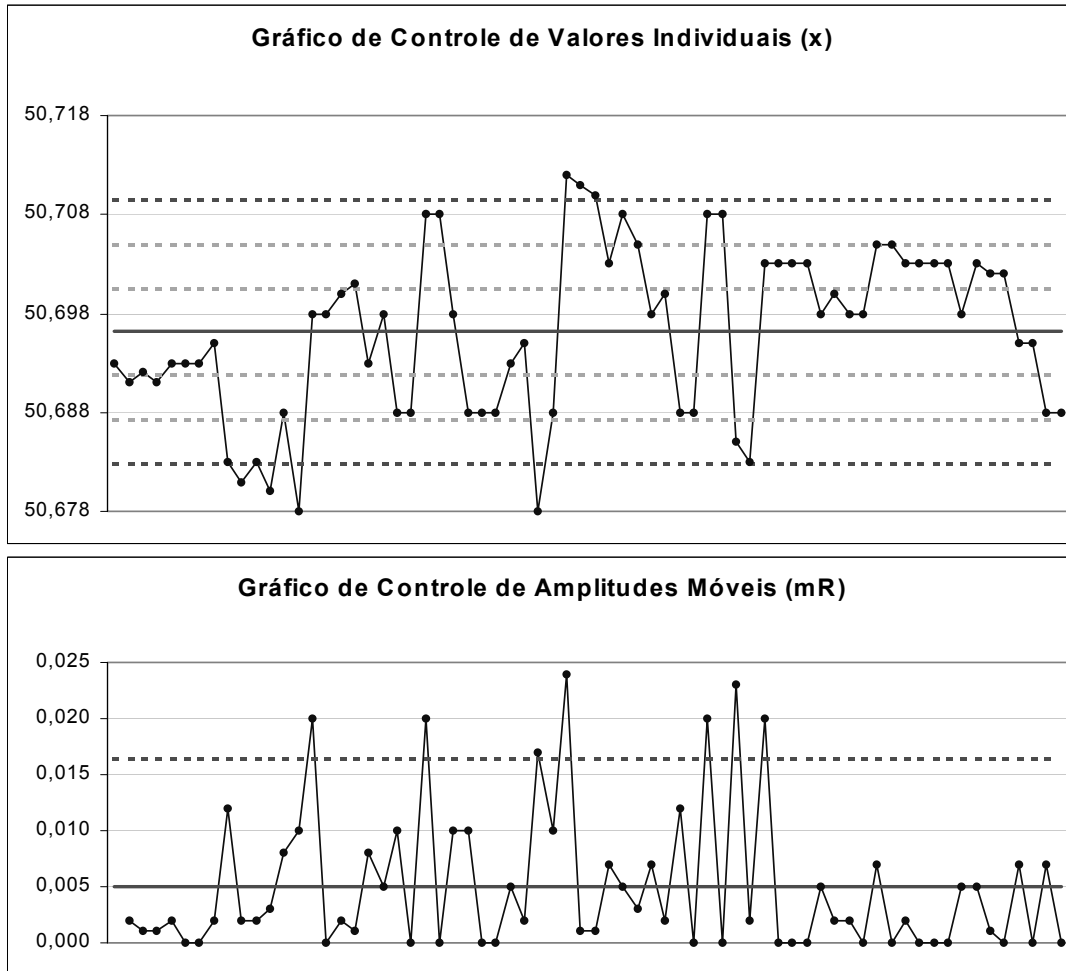


Figura 4.4 – Processo fora de controle e com baixa capacidade comumente encontrado nas primeiras avaliações dos processos produtivos (cota D1, referente à tabela 4.1)

Foram induzidos, então, investimentos envolvendo os instrumentos de medição, que passaram a condizer com a variabilidade dos processos. A partir disso, conduziram-se novas análises, agora com o acompanhamento de todo o processo, da colocação da peça no dispositivo de fixação à medição da última cota, das quais se inferiu que grande parte da variação do processo era gerada pelos próprios operadores, com ajustes constantes do processo que, por considerarem comuns ao processo, não tinham sido registrados em diário de bordo na primeira análise.

A justificativa dos operadores para tais ajustes era que o material bruto variava de lote para lote e que o processo era muito instável, requerendo muitos ajustes para mantê-lo dentro das especificações. Normalmente esse tipo de tratamento provoca um aumento na variabilidade do processo, pois se está respondendo a um ruído próprio do processo e não a um sinal evidente de mudança. A aplicação de gráficos de controle (com limites bem estimados) possibilita informar aos operadores quando se deve realmente agir sobre o processo, ou seja, permite distinguir entre variações devido a causas comuns e variações devido a causas especiais. Adicionalmente, algumas características apresentavam poros ou inclusões de areia provenientes da fundição e outras mostravam um processo com baixa capacidade.

As constatações acima implicaram ações visando a melhoria dos processos. Uma vez que a empresa adotava modelos de fundição distintos de um mesmo produto para o mercado nacional e para exportação, foi recomendada a utilização do modelo para o mercado externo também para o mercado interno, pois nesse modelo era reduzida a incidência de defeitos de fundição. A prática do sobreajuste foi minimizada através da conscientização dos operadores e da adoção de gráficos de controle na produção, com limites de controle baseados na última análise.

Os processos de medição foram avaliados através de estudos de repetitividade e reprodutibilidade. A figura 4.5 ilustra um desses estudos, onde três operadores mediram aleatoriamente cinco peças extraídas da produção duas vezes. Desta maneira, as fontes de variação presentes são estas: repetitividade, operador para operador e peça para peça. A repetitividade aparece dentro de cada subgrupo, enquanto que as diferenças entre operadores e peças aparecem entre os subgrupos.

Cabe ressaltar que, ao contrário da prática adotada em algumas indústrias, o estudo foi feito com operadores que efetivamente medem as peças em condições normais de produção e não por profissionais da metrologia, caracterizando de maneira mais fiel o processo de medição. A parcela da variação do processo consumida pela combinação das componentes de repetitividade e reprodutibilidade foi aceitável ($\%GRR = 12,4 \%$), assim como o número de categorias distintas ($ndc = 11$). Cabe ressaltar que o manual da MSA ^[13] traz

como regra prática para a aceitação de um processo de medição o seguinte:
 $\%GRR < 30\%$ e $ndc > 5$.

Operador		Repetição		Peça					Média
		1	2	3	4	5			
A	1	50,697	50,699	50,683	50,686	50,702			
	2	50,698	50,697	50,685	50,688	50,703			
Média		50,698	50,698	50,684	50,687	50,703	X_A-bar	50,694	
Amplitude		0,001	0,002	0,002	0,002	0,001	R_A-bar	0,002	
B	1	50,696	50,699	50,685	50,688	50,703			
	2	50,698	50,699	50,684	50,687	50,703			
Média		50,697	50,699	50,685	50,688	50,703	X_B-bar	50,694	
Amplitude		0,002	0,000	0,001	0,001	0,000	R_B-bar	0,001	
C	1	50,697	50,701	50,683	50,688	50,702			
	2	50,699	50,700	50,683	50,688	50,703			
Média		50,698	50,701	50,683	50,688	50,703	X_C-bar	50,694	
Amplitude		0,002	0,001	0,000	0,000	0,001	R_C-bar	0,001	
Grande média		50,698	50,699	50,684	50,688	50,703	R_p	0,019	
EV:		0,00095	%EV:			12,36%	R-dbar	0,001	
AV:		0,00010	%AV:			1,25%	X-bar_{DIFF}	0,001	
GRR:		0,00095	%GRR:			12,42%	UCL_R	0,003	
PV:		0,00759	%PV:			99,23%	LCL_R	0,000	
TV:		0,00765	ndc:			11	R-max	0,002	

Figura 4.5 – Planilha do estudo de repetitividade e reprodutibilidade do instrumento da cota D1 (referente à tabela 4.1)

De acordo com o estudo, também não foram detectadas inconsistências ou tendências no processo de medição, como enfatizam os gráficos do estudo básico da figura 4.6, pois todas as amplitudes situam-se dentro dos limites, e o processo de medição é aparentemente consistente e não tendencioso. Para o gráfico de médias, visto que os limites de controle são computados utilizando o erro de repetitividade e que nenhuma referência é feita com relação à variação entre peças, o gráfico pode aparentar estar fora de controle. Na verdade, quanto mais

fora de controle o gráfico aparenta estar (embora haja exceções), melhor é o processo de medição.

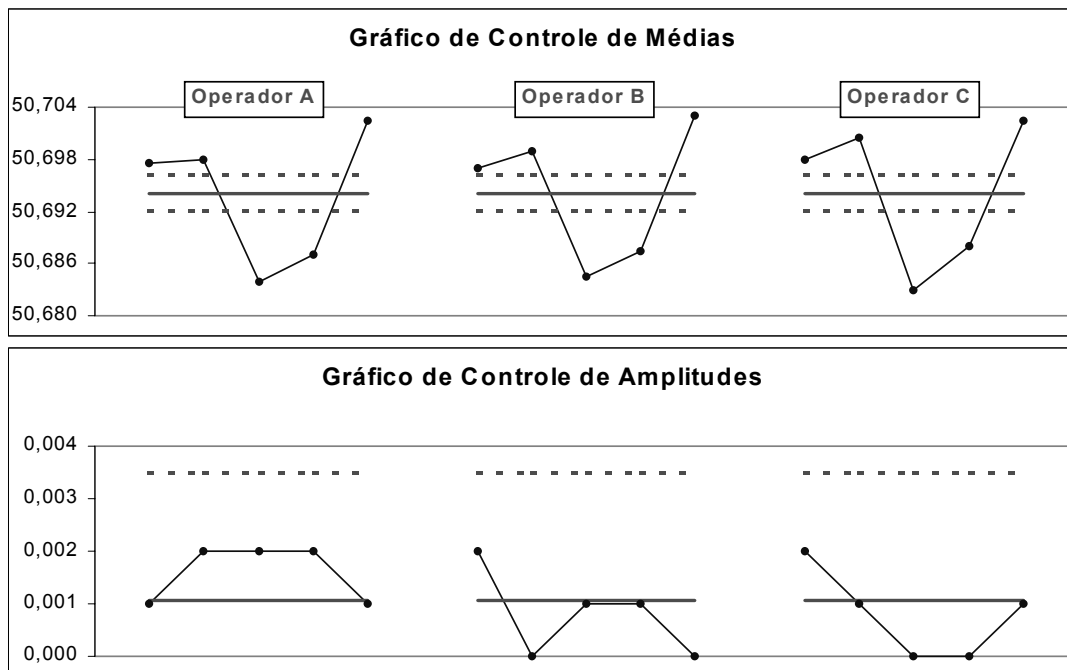


Figura 4.6 – Gráficos de controle para o estudo básico do processo de medição da cota D1 (referente à tabela 4.1)

Tendo-se agido sobre os processos de produção e de medição, gráficos de controle foram inseridos na produção – fase 2. Eles foram centrados nos valores alvos para que fossem empregados também para o *set-up* do processo e para induzir os operadores a operarem no alvo e com variação mínima. Para simplificar o trabalho deles, aplicaram-se apenas os gráficos de valores individuais, por se considerar que, para a situação em questão, o gráfico de amplitudes móveis não agregaria valor na produção, embora ambos os gráficos continuassem sendo utilizados na análise *off-line*. A interpretação dos gráficos foi restrita às regras 1 e 4 da “Western Electric” (figura 2.1), mas que não deveriam ser cegamente aplicadas, ou seja, o bom senso deveria prevalecer.

4.1.4 ATIVIDADES PARALELAS

Apesar dos gráficos de controle demonstrarem que a resolução dos instrumentos de medição, após as alterações, era compatível com o processo e da realização

de estudos do processo de medição, que se mostraram aptos, ainda não se podia afirmar que a condição de capacidade e estabilidade do instrumento de medição permanecia inalterada durante o intervalo de calibração, pois além da degradação natural do instrumento por uma miríade de fatores, a freqüente prática de ajuste do instrumento de medição por parte dos operadores ocasiona um aumento da variabilidade, uma vez que a variação dos ajustes é adicionada à variação natural das próprias medições. Para tanto, tem-se aplicado um programa de garantia do processo de medição (item 3.4) nos instrumentos utilizados para inspecionar o alojador da ponta de eixo, em particular os quatro súbitos descritos na tabela 4.2. O procedimento empregado é descrito abaixo.

Sempre que o instrumento de medição volta da produção, a verificação é realizada (uma medição) e documentada no gráfico de controle relativo ao instrumento. Quando se tem um lote maior de peças (i.e. exigindo mais de um dia de produção contínua), a verificação é feita com freqüência, pelo menos, diária e também documentada.

O padrão de controle (no caso, quatro anéis padrões com os diâmetros das cotas mostradas na tabela 4.1) deve ser mantido no laboratório de metrologia, ou seja, os operadores terão acesso apenas aos instrumentos de medição e aos respectivos gráficos de controle, não sendo permitido qualquer ajuste do instrumento por parte deles. Caso o instrumento sofra algum dano na produção, é mister que o mesmo seja verificado por pessoal especializado, observando se o resultado da medição do padrão de controle ainda se encontra dentro dos limites estabelecidos para o instrumento, sendo registrado o valor no gráfico e o fato no diário de bordo. Se o gráfico mostrar um ponto fora de controle, o instrumento deve ser ajustado ou, em caso extremo, consertado e calibrado.

Cabe ressaltar que nenhum ajuste deve ser feito no instrumento, que foi lacrado, sem que o gráfico de controle indique um ponto fora de controle, pois enquanto as medições se enquadrarem dentro dos limites de controle, a variação é resultante somente de causas comuns, as quais não podem ser corrigidas pelo ajuste do instrumento, sob pena de estar-se realizando um sobreajuste. Caso ocorra um ponto fora de controle, deve-se procurar a causa especial que provocou uma alteração no processo de medição, buscando a sua eliminação para que ela não ocorra novamente.

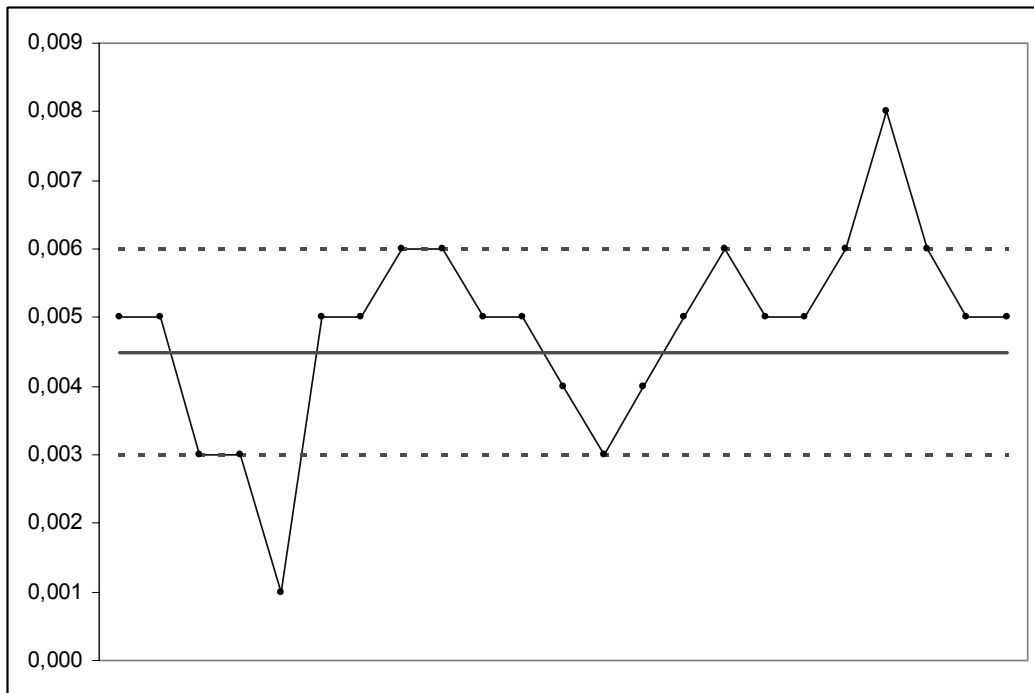


Figura 4.7 – Resultado do monitoramento via gráfico de controle do instrumento de medição da cota D1 (referente à tabela 4.1), onde cada ponto medido representa uma verificação contra o anel padrão

Um grande benefício de monitorar a verificação por meio de gráficos de controle é a determinação dos intervalos de calibração. Estes são um importante e persistente tópico na metrologia, pois a calibração de instrumentos é freqüentemente a maior despesa individual para um laboratório. Tornar o intervalo muito curto pode resultar no colapso do sistema e torná-lo muito longo pode resultar em erros de medição com conseqüências imprevisíveis. Se a data de calibração do instrumento se aproxima e o gráfico de controle do padrão de controle mostra evidências de controle estatístico, por que é necessário calibrar? Provavelmente não é.

O PMAP pode implicar redução de custos com o mínimo de esforço, através da eliminação da calibração desnecessária. Adicionalmente, como o padrão de controle é mantido no laboratório e manuseado por especialistas, é muito provável que se possa estender também o seu intervalo de calibração. Além disso, através do PMAP, aumenta-se também a confiabilidade na inspeção de produtos, pois se sabe de antemão o estado do instrumento de medição, bastando para isso analisar o gráfico de controle, pois se este se mostra sob controle, o instrumento garante medições consistentes.

4.1.5

RESULTADOS OBTIDOS APÓS A CONSOLIDAÇÃO DO TRABALHO

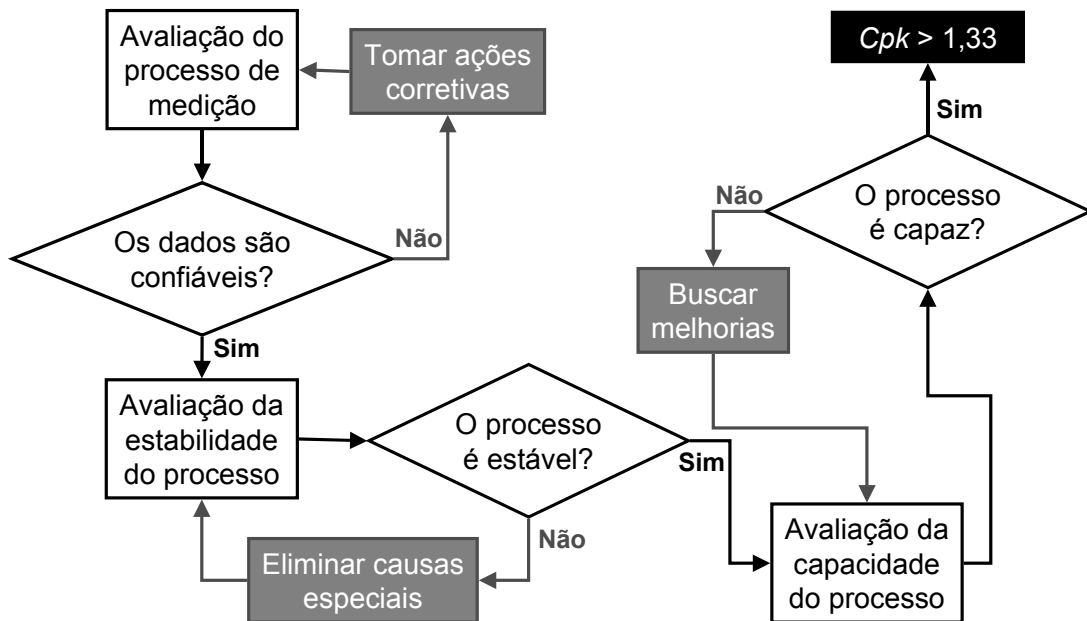


Figura 4.8 – Fluxograma descrevendo as etapas que devem ser seguidas para a avaliação da capacidade de processo (adaptado) ^[43]

A colocação de gráficos de controle na produção visava não somente a obtenção da estabilidade dos processos mas também avaliar a respectiva capacidade, pois não há capacidade sem controle ^[42]. Uma vez que a metrologia dimensional foi adequada aos processos de fabricação e que foi atingido o estado de controle estatístico, a capacidade dos processos pode ser estimada, apresentando um caráter presciente (ver figura 4.8).

O gráfico da figura 4.9 ilustra a evolução dos índices de capacidade para quatro das cotas monitoradas por gráficos de controle, do estado inicial (janeiro de 2003) até a conclusão das ações na usinagem (julho de 2003). Percebe-se que houve um aumento da capacidade de todas as cotas monitoradas por gráficos de controle, graças ao esforço das pessoas envolvidas no processo. O requisito de capacidade exigido pelo cliente ($Cpk > 1,33$) foi atingido em todas as cotas, sendo a característica $(7,56 \pm 0,12)$ mm aquela que demandou mais tempo e maiores investimentos no processo, tais como: troca de ferramenta, alteração de parâmetros de corte e do procedimento de usinagem.

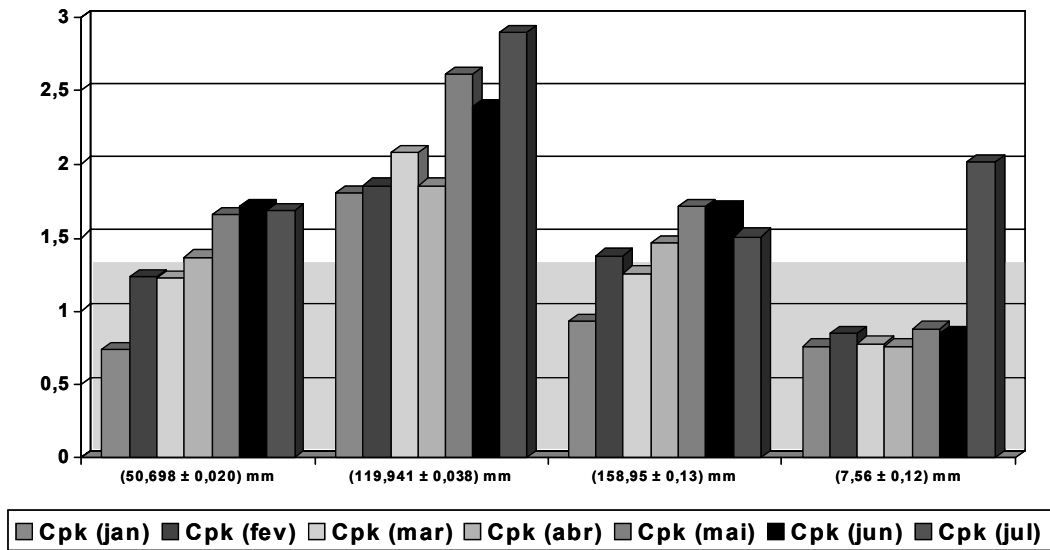


Figura 4.9 – Comportamento do índice de capacidade Cpk em algumas das cotas monitoradas por gráficos de controle, sendo alcançando o requisito de capacidade exigido pelo cliente em todas elas

Os índices de capacidade são parâmetros estatísticos e, por sua natureza, variam de amostra para amostra, mesmo quando o processo em questão não é alterado. Wheeler ^[44] sugere que as métricas de capacidade devem ser tratadas de um modo especial, i.e. aplicar gráficos de controle de valores individuais. Tal procedimento mostra, por exemplo, que o índice Cpk de lotes sucessivos da cota (50,698 ± 0,020) mm no período de abril a julho apresenta uma variação por causa comum apenas, sem a presença de sinais que pudessem indicar qualquer mudança na capacidade do processo (figura 4.10).

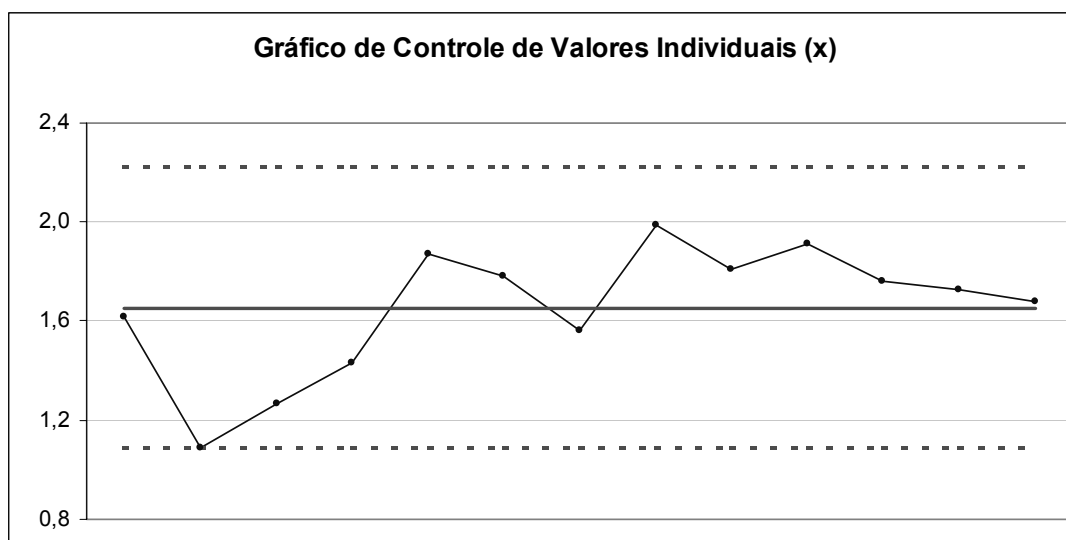


Figura 4.10 – Gráfico de valores individuais para o índice C_{pk} , lote a lote

O aumento da capacidade e a conseqüente diminuição da variabilidade durante os seis meses, em parte, podem ser atribuídos à redução dos ajustes feitos empiricamente pelos operadores (eliminação do sobreajuste) e a mudança do bruto de fundição.

As ações sobre os processos implicaram redução superior a 50 % na variabilidade em alguns casos. Na figura 4.11, pode-se perceber a evolução do processo com relação ao estado inicial (figura 4.4), com as condições fora de controle no gráfico de amplitudes móveis retratando ajustes realmente necessários para que o processo não saísse do estado de controle. Cabe lembrar que foram utilizadas as regras 1 e 4 da “Western Electric”, e que o bom senso era preconizado.

Em virtude do trabalho realizado, os processos de fabricação passaram a ser mais confiáveis e previsíveis, operando com pouca ou nenhuma interferência dos operadores e com baixíssimas taxas de refugo e retrabalho. Além disso, reduziu-se o risco de julgamento errado na classificação de peças, pois foi ampliada a zona de conformidade ^[45] graças à melhoria do processo de medição e, por ter-se processos operando próximo ao alvo e com boa capacidade, garante-se que produtos com maior qualidade cheguem às mãos do cliente.

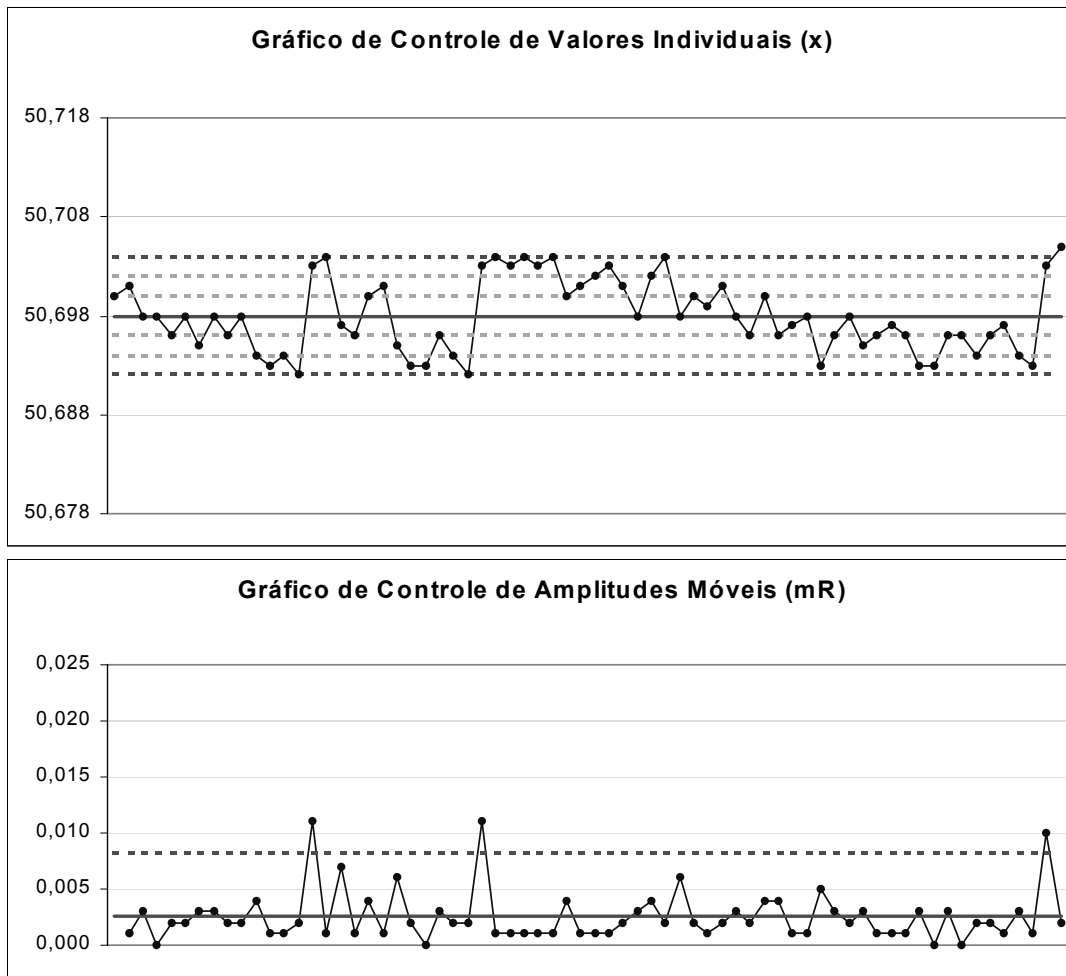


Figura 4.11 – Exemplo de resultado alcançado após a implantação do controle de processos, sendo atingido o estado de controle e reduzida a variabilidade do processo (cota D1, referente à tabela 4.1)

Contudo, o trabalho não pode ser dado por finalizado no momento em que foram atingidos os requisitos de capacidade. É essencial que o monitoramento dos processos de fabricação e medição continuem ao longo de sua operação, pois um processo que esteja apresentando uma pequena variação pode passar a variar com maior intensidade a qualquer momento, em função de um conjunto de fatores agindo sobre ele.

4.2 ESTUDO DE CASO 2: SETOR DE TRATAMENTO TÉRMICO

Esta seção descreve toda a análise realizada no processo de tratamento térmico de um produto específico. Tal análise envolveu a aplicação de técnicas

estatísticas para a detecção de problemas do processo, assim como a avaliação dos meios de inspeção. Todo o diagnóstico do processo, inicial e vivenciado, é apresentado, assim como os resultados e as ações que foram tomadas para minimizar os problemas apontados.



Figura 4.12 – Peça selecionada para o estudo de caso: barra de ligação de motoniveladoras

O produto em questão é mostrado na figura 4.12, o qual é uma barra de ligação (do inglês *bar link*) utilizada em motoniveladoras, com pedidos superando as trezentas unidades por mês e cuja faixa de dureza exigida pelo cliente compreende o intervalo de (269 a 321) HB.

4.2.1

DIAGNÓSTICO INICIAL DO PROCESSO

As primeiras constatações do processo indicavam a possibilidade de ter-se uma metrologia inepta para o nível de tolerância exigido pelo cliente. Aliado a isso ficou evidente, após diálogos com os responsáveis pelo processo, que este não estava garantindo produtos conformes, exigindo assim constante retrabalho (peças sendo revenidas duas ou mais vezes).

Nesta vertente, estratégias foram traçadas para avaliar tanto o processo produtivo como o processo de medição, utilizando para tanto ferramentas estatísticas e cujos resultados obtidos são exibidos nos próximos itens.

4.2.2 ESTUDO DO PROCESSO DE MEDIÇÃO

Um dos maiores questionamentos com relação ao processo de tratamento térmico baseava-se na confiabilidade metrológica do sistema de medição utilizado para a inspeção da dureza. O sistema de medição, durômetro tipo King, é utilizado tanto para a inspeção após a têmpera quanto para a inspeção após o revenido, sendo esta uma inspeção 100 % (dois pontos são medidos em cada peça) que atrasa significativamente a produção. Sempre que um dos pontos está fora de especificação, a peça é retratada termicamente, ou seja, o resultado da medição é usado para classificar as peças como conformes ou não-conformes. Logo, é importante que o processo de medição mostre-se adequado para a avaliação de conformidade.

Um estudo de repetitividade e reprodutibilidade foi conduzido para investigar o processo de medição, no qual participaram três operadores e cinco peças foram empregadas para introduzir a variação do produto. Cada peça foi medida duas vezes por cada operador, gerando um total de trinta medições. Cada medição foi definida como o procedimento de aplicar uma carga de 3.000 kg e medir o diâmetro da calota deixada pela impressão com uma lupa de resolução 0,05 mm. As medidas referem-se, então, ao diâmetro da calota e não à dureza Brinell (HB), pois a conversão de uma grandeza para outra contribuiria com uma componente adicional de erro, pois a escala de conversão não é linear.

Os dados apresentados na figura 4.13 mostram que a variação devido ao operador, i.e. reprodutibilidade (AV), foi bastante superior à variação devido ao equipamento, i.e. repetitividade (EV), evidenciando que diferentes operadores aplicam diferentes métodos. O gráfico de médias do estudo básico (figura 4.14) ratifica a tendência entre os operadores (baixa reprodutibilidade), e o gráfico de amplitudes caracteriza a baixa capacidade do processo de medição (resolução inadequada), pois apenas dois pontos distintos foram detectados.

A medição de dureza depende, dentre outros fatores, da aplicação de uma carga, da qualidade da superfície onde a carga é aplicada e da posterior leitura do diâmetro deixado por uma esfera após a carga. Conseqüentemente, algumas são as fontes de variação atuando no resultado da medição.

ALTONA		PósMCI		Estudo de Repetitividade e Reprodutibilidade				
Nome do instrumento:	Durômetro Brinell	Modelo da peça:	8X3314					
Número do instrumento:	88888888	Variável analisada:	Diâmetro (mm)					
Data do estudo:	04/16/03	Realizado por:	Christian Baldo					
Operadores:	A	B	C					
Número de operadores:	3	Tolerância:	0,3					
Número de repetições:	2	Número de peças:	5					
Operador	Repetição	Peça					Média	
		1	2	3	4	5		
A	1	3,80	3,90	3,85	3,80	3,75	3,810	
	2	3,80	3,85	3,85	3,80	3,75		
Média		3,80	3,88	3,85	3,80	3,75	X _A -bar	3,815
Amplitude		0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	R _A -bar	0,010
B	1	3,95	4,00	3,95	4,05	3,90	3,970	
	2	3,95	4,00	3,95	4,05	3,95		
Média		3,95	4,00	3,95	4,05	3,93	X _B -bar	3,975
Amplitude		0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	R _B -bar	0,010
C	1	3,90	3,95	3,85	4,00	3,85	3,910	
	2	3,90	3,95	3,85	4,00	3,85		
Média		3,90	3,95	3,85	4,00	3,85	X _C -bar	3,910
Amplitude		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	R _C -bar	0,000
Grande média		3,883	3,942	3,883	3,950	3,842	R _p	0,108
EV: 0,00591		%EV: 6,25%		R-dbar		0,007		
AV: 0,08368		%AV: 88,48%		X-bar _{DIFF}		0,160		
GRR: 0,08388		%GRR: 88,70%		UCL _R		0,022		
PV: 0,04366		%PV: 46,17%		LCL _R		0,000		
TV: 0,09456		ndc: 1		R-max		0,050		

Figura 4.13 – Planilha do estudo de repetitividade e reprodutibilidade do durômetro Brinell tipo King

Embora o procedimento de medição seja padronizado por instruções de trabalho, o princípio de funcionamento do sistema de medição (peso morto) pode não garantir boa repetitividade, tanto pela sobrecarga como pela oscilação durante a aplicação. Além disso, é difícil assegurar que a qualidade da superfície (rugosidade e planeza) seja similar em todas as medições. Dessa maneira, torna-se praticamente impossível assegurar que os operadores apliquem a mesma carga na mesma direção repetidamente. Logo, o diâmetro lido posteriormente através de uma lupa com resolução de 0,05 mm certamente será diferente, seja pela diferente penetração da esfera ou pela possibilidade de ovalização da marca

deixada por ela, mesmo com a repetitividade sendo mascarada pela resolução da lupa.

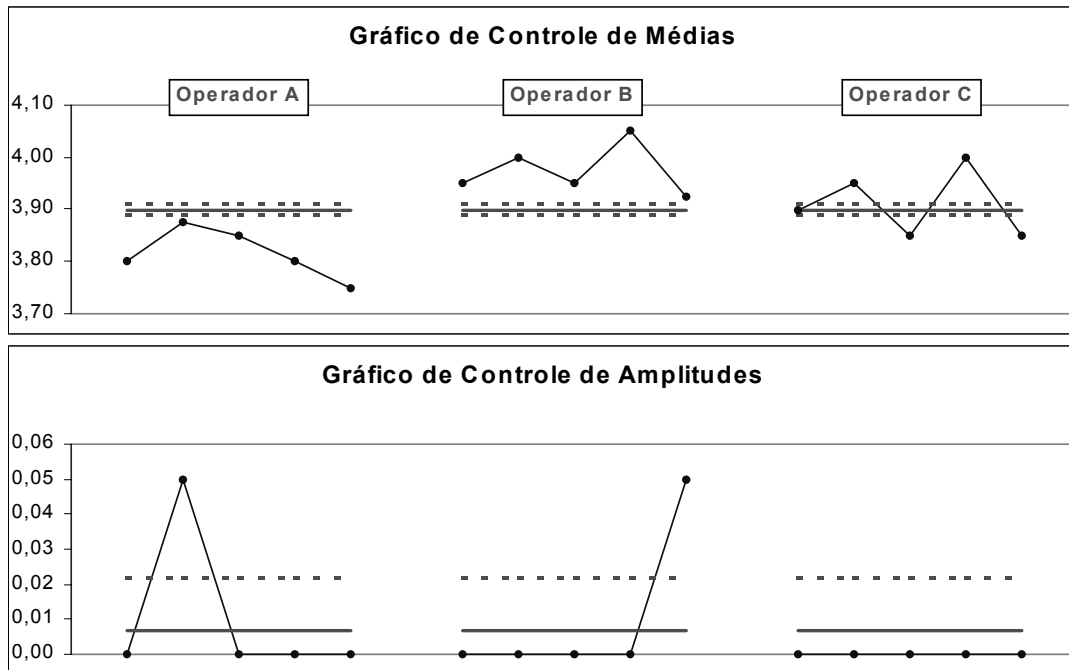


Figura 4.14 – Gráficos de controle para o estudo básico do processo de medição de dureza

A porcentagem da variação do processo consumida pelo GRR foi de 89 %, a qual é absolutamente inaceitável (o MSA^[13] estipula 30 % como valor aceitável). Isso indica ser imprescindível a melhoria do processo de medição através da adoção de um sistema de medição de manuseio mais fácil e que garanta confiabilidade e reprodutibilidade, tais como sistemas de medição de circuito fechado, que possibilitam a mecanização e automação do processo de medição, tornando-o menos dependente do operador. Entretanto, não se deve agir apenas no processo de medição, como se poderá notar na seção seguinte.

4.2.3 AVALIAÇÃO DO PROCESSO PRODUTIVO

O tratamento térmico é, sem dúvida, um processo complexo em que muitas variáveis agem conjuntamente e provocam desvios nas propriedades do produto final. Com o intuito de investigar algumas possíveis causas dos desvios

excessivos de qualidade, estudos pilotos foram realizados e analisados através da utilização de ferramentas estatísticas.

O primeiro deles foi avaliar o quão uniforme era a temperatura dentro dos fornos utilizados nos processos de têmpera e revenido. A primeira idéia, medir diretamente a temperatura por meio de termopares, foi abortada em função do custo associado e da não aceitação por parte da equipe. Partiu-se então para a avaliação indireta do processo, utilizando a própria dureza do produto resultante como base de informação.

Estratégias foram traçadas para que houvesse rastreabilidade dos dados e para que fosse extraído o máximo de informação do estudo, tais como a numeração de cada peça e a disposição uniforme das peças dentro do forno, práticas essas que não denotam a rotina de produção. Cabe mencionar que as medições foram realizadas por meio do durômetro King.

Para o processo de têmpera, utilizou-se uma amostra de trinta peças que foram divididas em duas corridas de tamanhos distintos (vinte e quatro peças numa e seis na outra) no mesmo forno, por limitação de espaço. Todas as peças foram carimbadas e posicionadas de modo similar dentro do forno (figura 4.15), para que a partir das medições dos três pontos de dureza (nos extremos e no centro – figura 4.16), fossem plausíveis conclusões eficazes. Cabe ressaltar que o processo de têmpera compreende não apenas o aquecimento da peça mas também o resfriamento, no caso em questão, em água.

Como ferramenta estatística de avaliação, utilizou-se a análise de médias (ANOM). Esta permite comparar o efeito de diferentes tratamentos sobre alguma variável e separar as diferenças que possam representar sinais daquelas que simplesmente representam ruídos.

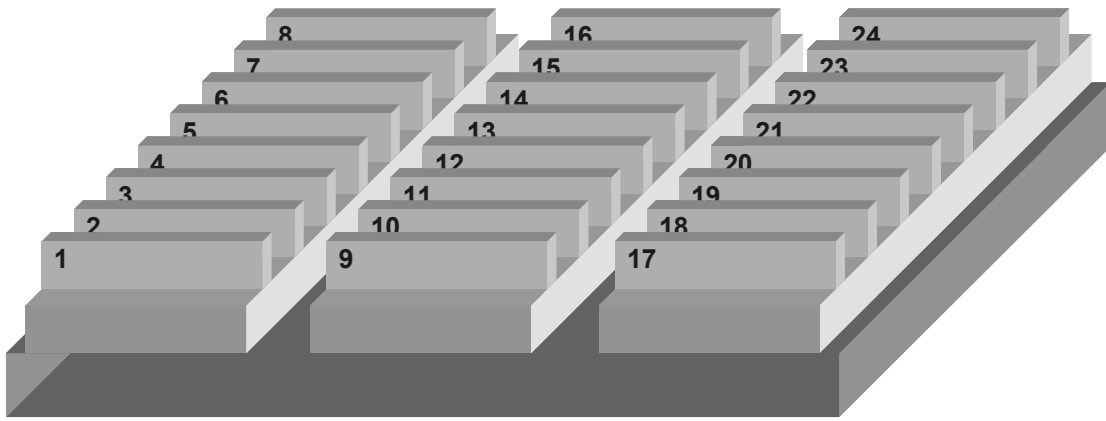


Figura 4.15 – Posicionamento das peças no forno de têmpera na primeira corrida, sendo cada peça identificada através de um carimbo que representa a ordem de colocação no forno (na segunda corrida, as seis peças foram colocadas na grelha à esquerda)

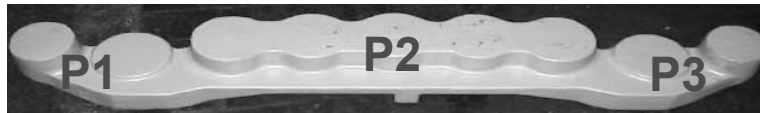


Figura 4.16 – Indicação de onde foram tomados os três pontos de dureza tanto após a têmpera como após o revenido

Como cada peça do lote foi disposta em distintas posições no forno e no tanque de resfriamento, foram feitas várias análises para detectar possíveis causas de variação no processo como um todo, sendo a mais relevante delas apresentada na figura 4.17, que mostra a existência de um gradiente de dureza que atinge seu mínimo no centro da peça e o máximo nos extremos, com uma variação média dentro de uma peça superior a 100 HB.

As três posições mostradas correspondem àquelas onde os pontos de dureza foram tomados. O primeiro ponto do gráfico de ANOM representa a média da dureza tomada na posição 1 da grelha à esquerda, o segundo ponto a média da dureza tomada na posição 2 da grelha central, e assim sucessivamente, até o último ponto, que representa a média da dureza tomada na posição 3 da grelha à direita.

O comportamento supracitado leva a crer que não existe problema relacionado à homogeneidade de temperatura dentro do forno, mas que o procedimento de resfriamento pode não ser o mais apropriado, sendo o principal suspeito para tais variações. Durante o resfriamento, os jatos incidem nos extremos da peça e a

agitação do banho é mínima, resultando em excessiva variação de dureza dentro da unidade, o que é agravado pelo dispositivo (grelha) no qual são colocadas as peças, pois ele tem uma massa de aproximadamente 500 kg e, indubitavelmente, afeta tanto o resfriamento como a distribuição de temperatura dentro do forno.

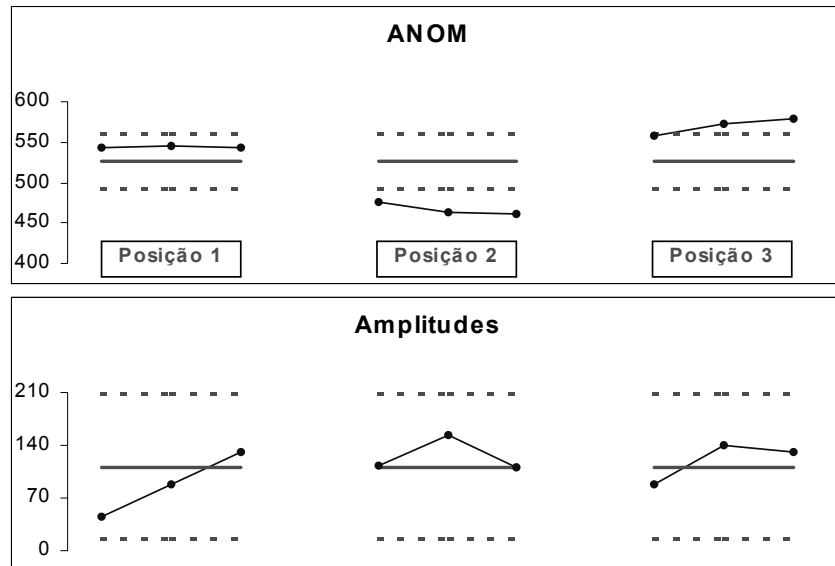


Figura 4.17 – Análise de médias e gráfico de amplitudes para a dureza das peças após a têmpera, indicando comportamentos distintos nas diferentes posições de medição (referente às figuras 4.15 e 4.16)

Para o processo de revenido, utilizou-se uma amostra de quinze peças para cada um dos dois fornos do circuito. A partir das medições dos três pontos de dureza, avaliaram-se os resultados também através da análise de médias.

Como as quinze peças foram dispostas em três camadas com cinco peças cada (figura 4.18), os dados foram agrupados considerando as três posições onde os pontos de dureza foram tomados, sendo as camadas representadas pelos subgrupos. As três posições mostradas correspondem às posições onde os pontos de dureza foram tomados (figura 4.16).

Para o forno com circulador de ar, que garante maior homogeneidade da temperatura, a análise de médias mostra que houve simplesmente um deslocamento sistemático do valor de dureza com relação à dureza de têmpera (figura 4.17) em todas as posições medidas.

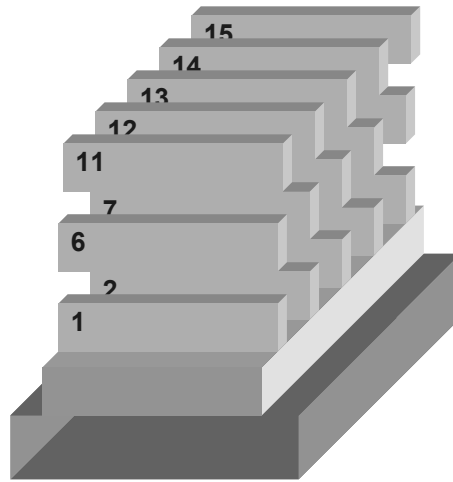


Figura 4.18 – Posicionamento das peças em ambos os fornos de revenido, sendo as peças numeradas de 1 a 15 colocadas no forno sem circulador de ar e as quinze peças restantes colocadas no forno com circulador de ar

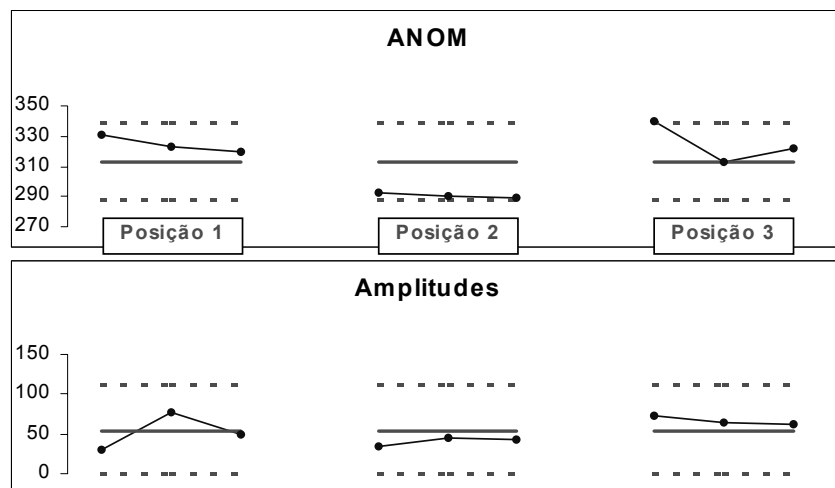


Figura 4.19 – Análise de médias e gráfico de amplitudes para a dureza das peças após o revenido no forno com circulador (referente às figuras 4.16 e 4.18)

A análise de médias para o outro forno, sem circulador de ar e sem resistores em um dos lados (na porta do forno – refere-se, na figura 4.18, ao lado onde foram carimbados os números de identificação das peças), ressaltou dois problemas. O primeiro é que existe um gradiente de temperatura no sentido horizontal, i.e. da porta para o fundo do forno, acarretando maior dureza de revenido na extremidade da peça localizada na porta do forno, pois a temperatura nesse ponto era menor. A segunda constatação foi a existência de um gradiente de temperatura também na direção vertical, sendo que as peças localizadas em

posições mais elevadas obtiveram menor dureza de revenido, i.e. a temperatura aumenta em posições mais altas do forno.

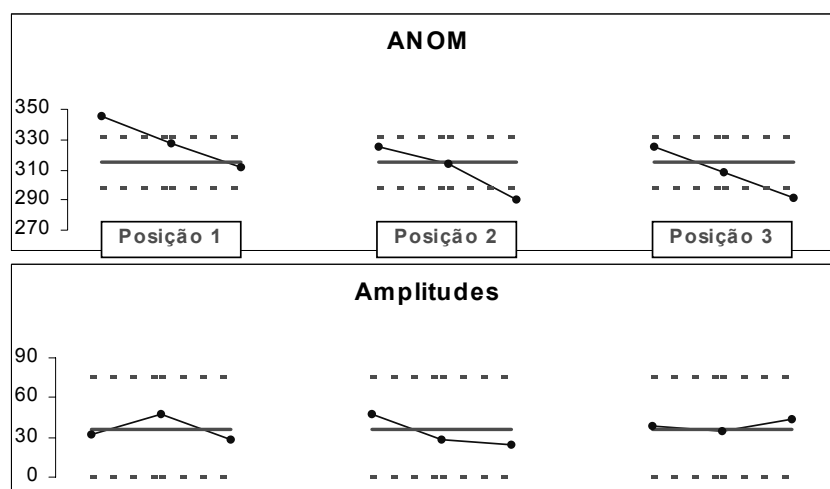


Figura 4.20 – Análise de médias e gráfico de amplitudes para a dureza das peças após o revenido no forno sem circulador (referente às figuras 4.16 e 4.18)

No início deste item, foi informado que as medições foram obtidas por meio do durômetro King. Este, apesar do estudo de repetitividade e reprodutibilidade tê-lo indicado como não aceitável ($\%GRR > 30\%$), mostrou-se apto para o propósito dos estudos realizados, pois a contribuição majoritária de incerteza proveniente dos operadores foi minimizada pela seleção de um único operador para todo o estudo e por não se ter como meta a avaliação de conformidade ou o controle de processo.

4.2.4 RELACIONAMENTO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA COM A DUREZA

Um dos objetivos traçados para este trabalho foi relacionar, se possível, as variáveis de tratamento térmico com a composição química do bruto fundido para que ajustes adequados pudessem ser realizados. Aplicaram-se, na tentativa de achar alguma correlação, gráficos de múltiplas variáveis num estudo piloto.

Rotineiramente, para cada lote de peças de uma mesma seqüência, i.e. mesma composição química, duas eram medidas após o processo de têmpera. A partir de uma amostra, foram correlacionados os quatro elementos químicos de maior

influência no tratamento térmico com a dureza pós-têmpera (carbono, manganês, silício, cromo).

Entretanto, a excessiva variabilidade do processo de tratamento térmico aponta a necessidade de melhorias. Aliada a isso, tem-se a baixa confiabilidade do sistema de medição. A falta de relacionamento entre a variável de tratamento térmico e a composição química do bruto não pode ser indiscriminadamente aceita, pois a variação do processo como um todo oculta um possível relacionamento entre a dureza do bruto e a sua composição química.

4.2.5

IMPLANTAÇÃO DO CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSO

Com o intuito de disseminar a cultura do controle estatístico de processo no setor de tratamento térmico, gráficos de controle de três vias foram adotados, devido à considerável variação dentro da unidade, tomando-se, por lote, três pontos (nos extremos e no centro) em cinco peças aleatórias escolhidas após o processo de revenido.

Durante a fase 1 do CEP, gráficos de conformidade foram utilizados para coletar dados do processo, sendo recomendado o preenchimento do diário de bordo quando fosse realizado algum ajuste no processo.

A fase 1 foi concluída após se adquirir uma amostra representativa do processo e verificar que o mesmo estava sob controle estatístico, i.e. previsível, apesar de ser constatada uma excessiva variabilidade; com a voz do processo excedendo as especificações de engenharia e com a variação dentro da unidade sendo mais significativa que a entre unidades, em função dos problemas salientados nos itens anteriores, os quais não foram solucionados no decorrer do estudo.

No transcorrer da fase 2, percebiam-se constantes flutuações no comportamento do processo, apesar dele não ter sido alterado em momento algum. Na figura 4.21 são visualizadas três dessas flutuações. O processo apresentou uma redução significativa da variação na segunda análise, tanto entre unidades como dentro da unidade. Entretanto, nas duas outras análises, um comportamento menos favorável foi identificado, com a variação dentro da unidade superando a tolerância especificada para o produto.

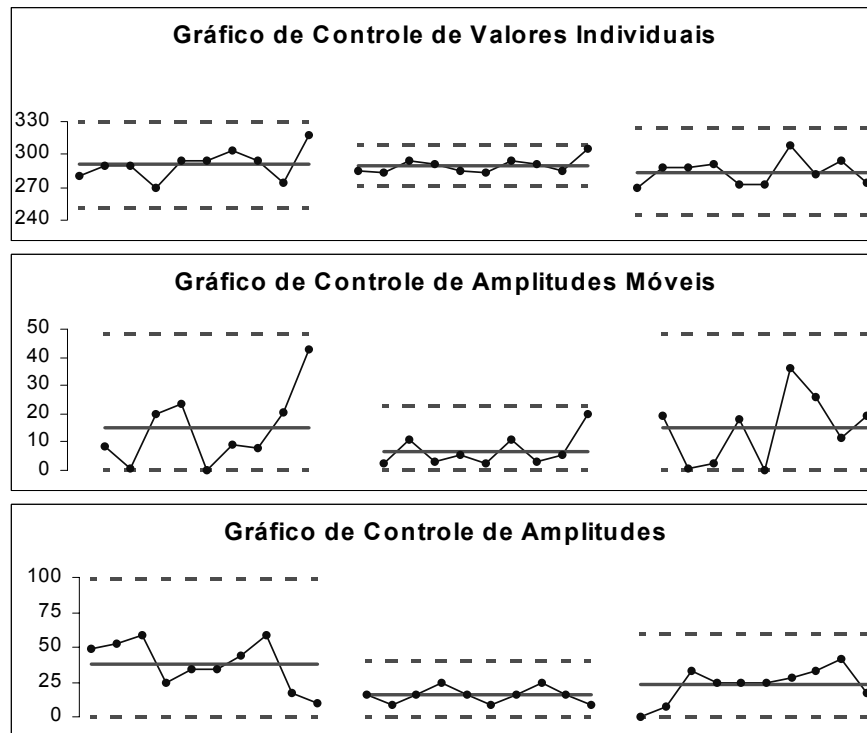


Figura 4.21 – Gráfico de três vias indicando a variação característica da dureza das peças após o processo de revenido

Essa conjuntura espelha um processo que requer melhoria, na qual diversas causas quase randômicas estão atuando simultaneamente, embora nenhuma delas seja dominante. Esse é um caso típico onde os gráficos de controle são ineficazes para encontrar causas especiais, e a única maneira de diminuir-se a variação é atuar drasticamente sobre o processo, caso realmente se deseje um processo estável e capaz de produzir peças conformes.

4.2.6 CONSIDERAÇÕES, RECOMENDAÇÕES E AÇÕES FUTURAS

A aplicação de gráficos de controle no processo de revenido mostrou que a variação natural do processo excede as expectativas do cliente. Caso não se esteja contente com a quantidade de variação mostrada pelos limites naturais do processo, deve-se trabalhar no sistema para melhorar o processo corrente e não traçar alvos arbitrários ou procurar meios alternativos de computar os limites ^[46]. Todas essas análises mostram que é fundamental que os responsáveis pelo setor de tratamento térmico se empenhem na melhoria do processo, para que o mesmo

não continue com elevada variabilidade, prejudicando assim a qualidade do produto final.

Em virtude dos resultados apresentados, foi recomendado que o forno sem circulador fosse retirado do circuito de têmpera/revenido do produto em questão, embora tal recomendação possa ser também estendida para as outras peças (de menor porte), pois ao invés de ocorrer variação dentro da unidade, acontecerá variação entre unidades.

Uma alternativa para minimizar o efeito do resfriamento seria adotar um banho com maior agitação, de maneira que ocorresse um resfriamento mais homogêneo. Outra seria adotar um dispositivo de menores dimensões, que provavelmente influenciaria menos o processo. Ambas as sugestões, que são economicamente viáveis, estão sendo averiguadas pelos responsáveis do setor de tratamento térmico, a fim de reduzir a variabilidade decorrente no processo em função dessas variáveis.

Coincidentemente, a chegada de um novo conjunto de equipamentos (fornos para têmpera e revenido e um tanque de resfriamento) está prevista para outubro deste ano. Poder-se-á, assim, reduzir sensivelmente os problemas apontados no processo atual, melhorando o grau de satisfação dos clientes internos e externos e a qualidade dos produtos tratados termicamente.

Com relação ao sistema de medição, foi sugerido que, enquanto não houvesse uma melhoria significativa do processo produtivo, não se deveria atuar sobre o processo de medição, pois o mesmo, ainda que longe do ideal, é capaz de fornecer resultados úteis para a avaliação de conformidade. A partir da melhoria do processo produtivo, naturalmente será exigida uma melhoria no processo de medição. Nesse caso, tornar-se-á imprescindível adotar um sistema de medição que garanta maior confiabilidade e reprodutibilidade. Adicionalmente, com um processo sob controle e capaz, poder-se-á inspecionar por amostragem, minimizando assim o gargalo existente na produção atual.

CAPÍTULO 5

DISCUSSÃO

5.1

CONSTATAÇÕES DOS ESTUDOS DE CASO

O controle estatístico de processos é reconhecidamente uma ferramenta com grande potencial para a melhoria contínua dos processos. Entretanto, é importante que os dados sejam corretamente avaliados e que não sejam divorciados do seu contexto. O inverso desse ideal foi presenciado durante a implantação do controle estatístico de processos no setor de usinagem. Primeiro porque o agrupamento dos dados era inadequado, pois em um mesmo subgrupo havia diferentes sistemas de causas, o que gerava resultados sem o menor sentido prático. Segundo porque os dados eram privados de qualquer informação sobre o processo, não permitindo tirar conclusões apropriadas sobre o porquê dos desvios presentes no processo.

A correta utilização do controle de processos propiciou a obtenção de resultados satisfatórios e que atenderam as expectativas da empresa demandante. Parte desse sucesso deve-se ao fato que a maioria dos processos eram potencialmente capazes, mas operados de maneira inconsistente, uma vez que a prática de sobreajuste reduz sensivelmente a capacidade e é tratada com sucesso pelos gráficos de controle. É importante ter em mente que um processo pode continuar operando mesmo se o gráfico de controle indica pontos fora de controle. O fato de surgirem pontos além dos limites de controle não significa que o processo seja inconsistente e que não possa mais operar, mas que ele requer ajustes que o tragam para uma condição mais confortável, ou seja, no alvo e com variação

mínima. Os outros processos, que apresentavam baixa capacidade, foram otimizados por meio de modificações no processo, tais como novas ferramentas de corte e novos procedimentos de usinagem.

No tratamento térmico, apesar do êxito alcançado após a aplicação de ferramentas estatísticas para avaliar o processo como um todo, detectando problemas no processo que afetavam a qualidade dos produtos e prejudicavam os processos posteriores (conceito de cliente interno), os investimentos foram pouco efetivos, mesmo com sugestões de baixo custo e que poderiam resultar num significativo salto em qualidade. Por outro lado, a aquisição de dois novos fornos e de um tanque de resfriamento anunciada durante a realização do projeto, certamente contribuirá para a melhoria dos processos de têmpera e revenido.

O fato de ter-se verificado processos com baixa capacidade foi, entretanto, salutar para entender os conceitos por trás do controle de processos. Essa ferramenta, quando aplicada ao controle de dureza final do produto (ver capítulo 4), não possibilitou aperfeiçoamento algum, pois o processo revelava uma variação praticamente caótica. Nesse caso, não é vantajoso procurar causas especiais de variação, mas alterá-lo radicalmente para reduzir a variação e adequar os limites naturais do processo com as especificações do cliente ^[23]. Ou seja, apesar das modificações sugeridas não terem sido adotadas, a aquisição de novos equipamentos vai ao encontro das informações providas pelos gráficos de controle.

Paralelamente ao enfoque na melhoria dos processos produtivos, os processos de medição também foram avaliados e melhorias induzidas, quando possível ou realmente necessário. Isto porque as avaliações, analogamente aos testes de hipóteses, podem resultar em decisões errôneas. Nos testes de hipóteses, pode-se rejeitar uma hipótese verdadeira (erro tipo I) e aceitar uma hipótese falsa (erro tipo II). Transportando esses conceitos para a análise de um sistema de medição, define-se o seguinte:

- Erro tipo I: declarar que um sistema de medição não é capaz quando, na realidade, ele pode ainda fornecer dados confiáveis para a tarefa.
- Erro tipo II: declarar que um sistema de medição é capaz quando, na verdade, ele pode apresentar um desempenho inaceitável para a tarefa.

O erro tipo I foi evidenciado na inspeção de dureza das peças tratadas termicamente. Apesar do estudo de repetitividade e reprodutibilidade e da “regra de ouro” da metrologia apontarem um instrumento inadequado, a prática apresentou outra tendência. A excessiva variabilidade do processo, evidenciada nos gráficos de controle do processo, não foi apropriadamente detectada pelo estudo do processo de medição, implicando resultados contraditórios (falibilidade do estudo de repetitividade e reprodutibilidade).

Essa conclusão vai ao encontro das considerações já apresentadas no capítulo 1, mas que serão repetidas pela sua relevância: o estudo de repetitividade e reprodutibilidade inclui apenas os erros que variam durante o experimento, são cegos para erros constantes, não possuem caráter presciente e não podem fornecer detalhes das causas de variação como base para mudanças e melhorias [15]. A “regra de ouro” da metrologia, que aplica um atributo do produto, e não do processo, mostrou-se pouco eficaz, como já argumentado no capítulo 3, principalmente quando se deseja atuar sobre o processo de fabricação. O erro tipo I trata-se, portanto, não de um mérito do processo de medição, mas de um demérito do processo de fabricação.

Em nenhuma parte desta dissertação foi citada a presença de uma máquina de medir por coordenadas (CMM) na Electro Aço Altona, mas ainda é tempo, visto que o ambiente ao seu redor representa um caso típico, na opinião de quem escreve, de erro tipo II. O equipamento em questão foi adquirido devido a exigências de um cliente e é utilizado notadamente para a inspeção de peças fundidas. Antes de prosseguir com essa passagem, cabem algumas colocações.

Os altos investimentos necessários para a utilização da tecnologia de medição por coordenadas nem sempre asseguram o retorno esperado pelas empresas. Erros cometidos na especificação, instalação e utilização dessa tecnologia podem não só provocar um baixo retorno do investimento, mas, em certos casos, até provocar piora na eficiência e na confiabilidade das medições para controle de qualidade, com conseqüências diretas na conformidade dimensional das peças [47].

A sofisticação tecnológica das máquinas de medir por coordenadas e o elevado grau de automação do processo têm levado a alguns julgamentos equivocados sobre a tecnologia ^[48]:

- Os erros de medição são sempre pequenos.
- O operador praticamente não tem interferência sobre a exatidão das medições.
- A incerteza do resultado da medição depende basicamente do equipamento.
- O ganho de qualidade nos produtos é certo com o uso da tecnologia.
- A aquisição da máquina é o único investimento necessário.

Voltando ao caso em evidência, algumas dessas percepções negativas foram constatadas no caso da máquina de medir por coordenadas da empresa demandante do projeto. A máquina foi instalada sobre o setor de usinagem, mas sem terem sido levadas em consideração as vibrações provenientes tanto das máquinas-ferramenta como do deslocamento de veículos de carga nas proximidades. Adicionalmente, o posicionamento do sistema de climatização do ambiente é ineficiente e o sistema de controle de temperatura é pouco eficaz, resultando em gradientes de temperatura que certamente afetam a qualidade dos resultados das medições. Essa conjuntura, aliada a recursos humanos meramente operacionais e situações estranhas, e.g. esfera de calibração do apalpador não é calibrada; acarretam resultados não condizentes com o investimento e denota um caso de erro tipo II.

Alguns podem não concordar com esse exemplo, indagando que o instrumento ou equipamento de medição não pode estar desligado daquilo que o envolve, i.e. conceito de processo de medição: operadores, estratégias, mensurando etc. Essa indagação é absolutamente pertinente, principalmente na visão dos profissionais da metrologia. Por outro lado, é sabido que equipamentos similares ao utilizado pela Electro Aço Altona podem gerar informações com maior nível de exatidão, o que permitiria utilizar a máquina de medir por coordenadas também para inspeção de peças usinadas, desde que fossem respeitadas certas condições de operação do equipamento. Esse foi o argumento empregado para enquadrar o caso em questão como um erro tipo II, ou seja, tem-se um equipamento que pode produzir

resultados confiáveis, mas devido às variáveis presentes no processo como um todo, restringe-se a sua aplicação para atividades onde o nível de incerteza requerido é menos rigoroso.

5.2

A METROLOGIA NA AVALIAÇÃO DE CAPACIDADE

O estudo de caso realizado no setor de usinagem tinha como requisito adicional fornecer à cliente da empresa relatórios de capacidade de processo. A suposição capital para o cálculo dos índices de capacidade é a condição de estabilidade do processo. Aliado a isso, tem-se o fato de os estimadores do processo serem obtidos a partir de amostras, ou seja, inserindo um certo nível de incerteza nos valores estimados de capacidade. Isso é particularmente relevante no caso de empresas que trabalham com lotes pequenos.

O capítulo 2 mostrou que é muito mais conveniente declarar os índices por meio de intervalos de confiança. Wheeler ^[44] argumenta que os índices são parâmetros estatísticos e que todos esses parâmetros variam de amostra para amostra, mesmo quando o processo em questão não é alterado. Ele sugere que os valores dos índices de capacidade devem ser tratados de um modo especial, i.e. aplicando-se gráficos de controle de valores individuais. Isso implica que quando um relatório de capacidade é gerado, deve-se verificar se a variação de lote para lote é resultante apenas de causas comuns, ou se há uma diferença significativa que permita concluir se houve uma alteração no processo. Desta maneira, reduz-se o risco de erro na avaliação de conformidade do processo e evita-se que ações inapropriadas sejam tomadas.

Adicionalmente, as propriedades estatísticas do processo também são afetadas por uma parcela não conhecida, atribuível ao erro de medição. Normalmente o efeito do erro de medição é ignorado, pois os instrumentos de medição supostamente introduzem erros que são desprezíveis quando comparados à variação do processo produtivo ^[49]. Entretanto, a convivência com o meio industrial mostrou que tal afirmação não condiz, pois as práticas da metrologia não estão bem estabelecidas e raras são as situações onde são realmente conhecidos os atributos da medição.

Mittag ^[50] quantificou o erro percentual na avaliação de índices de capacidade de processo na presença de erros de medição. No modelo aplicado pelo autor, os erros sistemáticos são considerados constantes e produzem um deslocamento na média da distribuição de valores observados, mas sem alterar a sua forma. Os erros aleatórios são supostos como distribuídos normalmente, afetando somente a dispersão observada do processo. Os resultados gerados por Mittag enfatizam que a precisão de uma análise de capacidade pode ser significativamente influenciada pela exatidão dos instrumentos de medição e, conseqüentemente, os erros de medição devem receber maior atenção.

Bordignon e Scagliarini ^[28] estenderam a análise considerando as propriedades estatísticas do estimador de C_p . Nas análises, os autores consideram que o erro de medição pode ser modelado usando uma distribuição normal com média zero. Eles mostraram que o erro de amostragem superestima e o erro aleatório de medição subestima o índice de capacidade potencial. A combinação desses dois efeitos resulta em uma tendência positiva ou negativa, dependendo de qual fator é predominante.

Significativos esforços têm sido direcionados para a solução dessa problemática, de maneira que o risco de erro na avaliação de processos seja minimizado. O conceito de incerteza de medição tem sido proposto nessa vertente em trabalhos recentes.

Weckenmann et al. ^[51] mencionam que quando um processo é observado através de um instrumento de medição, então o resultado da medição não somente representa as características geradas pelo processo produtivo, mas a superposição da dispersão real do processo (porém desconhecida) com a dispersão do processo de medição. Os autores propõem realizar uma correção aos valores de C_p estimados por medição, para neutralizar o efeito da incerteza:

$$Cp_p = \frac{USL - LSL}{6 \cdot \sqrt{\sigma_m^2 - u^2}} \quad (5.1)$$

Onde Cp_p é a capacidade do processo com a compensação do efeito da incerteza de medição, σ_m é o desvio padrão das medições e u é a incerteza de medição padrão. Entretanto, Weckenmann et al. pecam ao sugerir uma correção da

dispersão do processo através da incerteza de medição, principalmente quando as contribuições sistemáticas para a incerteza são expressivas.

Baldo e Donatelli ^[52] investigaram, por meio de um modelo de simulação, o comportamento de C_p e C_{pk} quando os seus valores são estimados a partir de medições imprecisas dos indivíduos de uma amostra aleatória de distintos tamanhos, assumindo-se que o valor do mensurando distribui-se normalmente. O modelo de erro de medição adotado considerou as seguintes contribuições para a incerteza: resolução da indicação, erro aleatório, erro sistemático constante e erro sistemático linearmente dependente do valor do mensurando.

A resolução do instrumento de medição pode afetar os resultados quando ela não permite detectar e refletir adequadamente a variabilidade de um processo. O erro aleatório provém da falta de repetitividade, de efeitos térmicos de curto prazo etc., o erro sistemático constante deve-se a efeitos térmicos de longo prazo, desvio do valor representado por um padrão etc., enquanto o erro sistemático linear surge de resíduos da calibração, erro de escala do instrumento etc.

Essas fontes de incerteza podem ser combinadas, considerando-as estatisticamente independentes, através da soma dos quadrados das respectivas incertezas padrões, que são obtidas conforme descrito na seqüência.

A resolução, R , do instrumento afeta o valor do mensurando dentro de uma região centrada no resultado da medição, cuja amplitude total é o valor da própria resolução. Pode-se considerar que qualquer valor do mensurando dentro da região de incerteza é igualmente provável, ou seja, a incerteza padrão é estimada considerando-se uma distribuição retangular:

$$u_R = \frac{R}{2\sqrt{3}} \quad (5.2)$$

O erro aleatório, caracterizado pelo desvio padrão, σ_A , pode ser representado por uma distribuição normal centrada no resultado da medição. Logo, a incerteza padrão é igual ao desvio padrão do erro:

$$u_A = \sigma_A \quad (5.3)$$

Um erro residual sistemático constante causa um desvio não conhecido do valor do mensurando, o qual pode estar situado em uma região de amplitude $\pm E_S$,

simetricamente distribuída ao redor do valor medido. Ou seja, a incerteza padrão é estimada considerando-se uma distribuição retangular:

$$u_S = \frac{E_S}{\sqrt{3}} \quad (5.4)$$

O erro sistemático linear depende do valor do mensurando, o qual é normalmente distribuído. Assim, valores do mensurando próximos à média estarão afetados por erros menores que os valores mais afastados. Nesta investigação, a incerteza associada a este tipo de erro foi especificada a partir de uma distribuição triangular no intervalo $\pm E_L$, pois há maior probabilidade dos erros estarem situados próximo ao centro da distribuição. Assim:

$$u_L = \frac{E_L}{\sqrt{6}} \quad (5.5)$$

Conseqüentemente, a incerteza expandida, considerando as componentes estatisticamente independentes, para um fator de abrangência de 95,45 % ($k = 2$) é dada por:

$$U_{95} = 2 \cdot \sqrt{\frac{R^2}{12} + \sigma_A^2 + \frac{E_S^2}{3} + \frac{E_L^2}{6}} \quad (5.6)$$

Tabela 5.1 – Diferentes combinações de erros de medição utilizadas

	σ_A	E_S	E_L	R	U_{95}
Caso A	0	0	0	0	0
Caso B	0,5	0	0	0	1
Caso C	1	0	0	0	2
Caso D	0	0,87	0	0	1
Caso E	0	1,73	0	0	2
Caso F	0	0	1,23	0	1
Caso G	0	0	2,45	0	2
Caso H	0	0	0	1	0,57

A tabela 5.1 ilustra as diferentes combinações de erros de medição estudadas pelos autores, sendo consideradas amostras de tamanho 25, 50 e 100 unidades de um processo que apresenta um C_p verdadeiro unitário, sendo computados os valores médios estimados e os limites superiores e inferiores para 95 % de confiança. Os resultados das simulações são apresentados na figura 5.1.

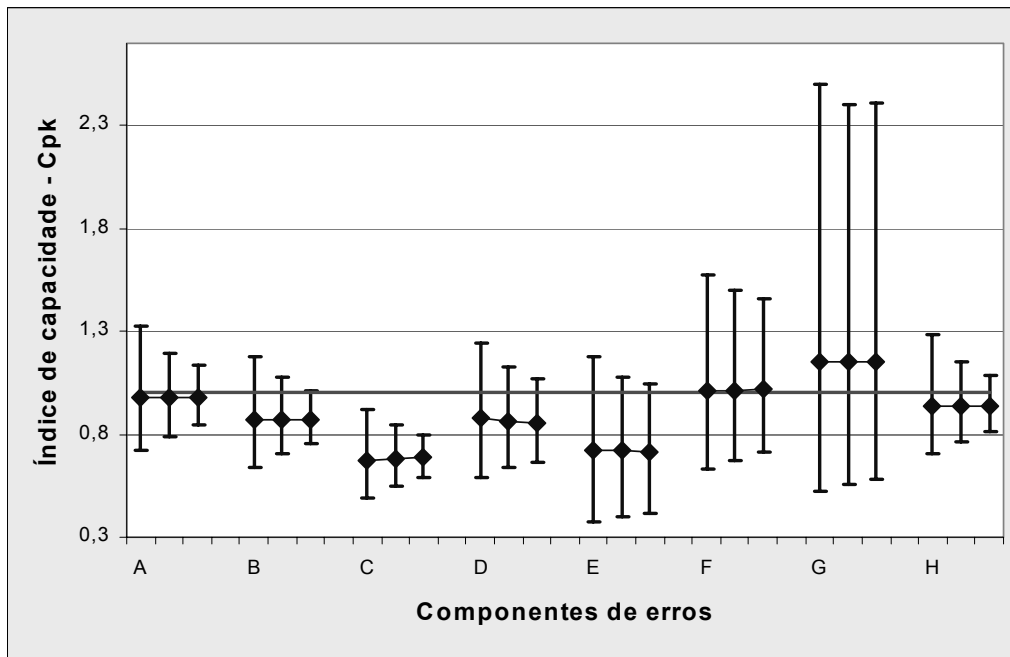
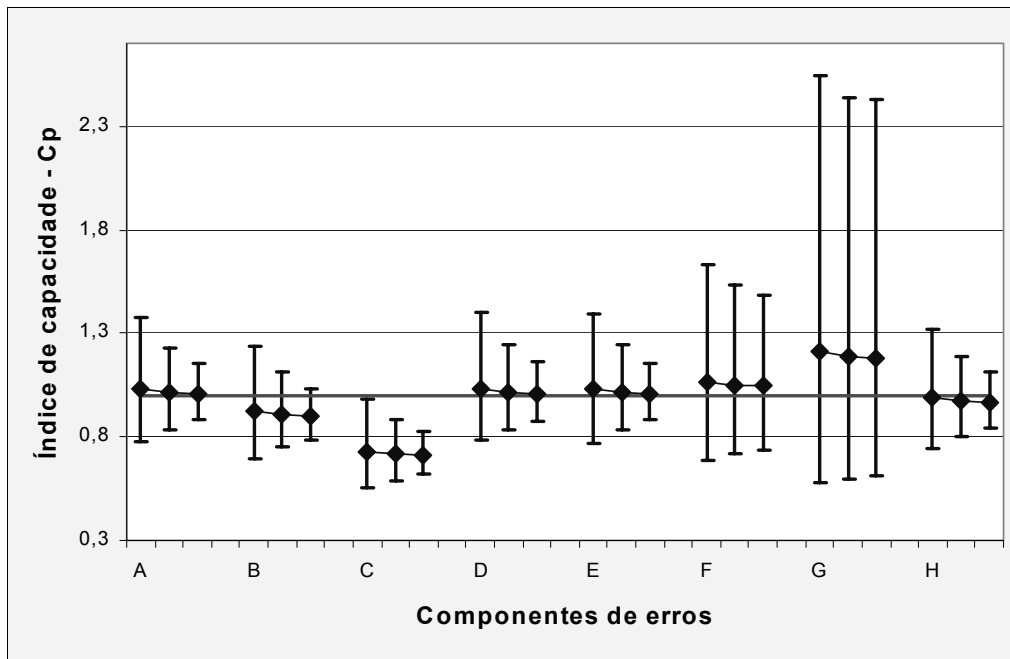


Figura 5.1 – Comportamento dos índices de capacidade para distintos tamanhos de amostra (25, 50, 100) e erros de medição (ver tabela 5.1)

Para o caso A, no qual tem-se apenas o erro de amostragem, i.e. o processo está isento de erro de medição, observa-se que à medida que o tamanho da amostra aumenta, o valor observado para a capacidade reduz-se, tendendo ao valor verdadeiro. Tal constatação implica risco de avaliação de um processo quando pequenas amostras são consideradas. Adicionalmente, a incerteza associada à estimação dos índices reduz-se com o aumento do tamanho da amostra. A

superposição dos erros de medição e do efeito de amostragem traz resultados interessantes, descritos na seqüência.

O erro puramente aleatório, casos B e C, subestima os índices de capacidade, pois estão sendo superpostas as variações provenientes dos processos de produção e de medição. Procedimentos de medição que apresentam maior erro aleatório associado contribuirão com uma maior parcela de variação medida, reduzindo a capacidade observada do processo. Essa situação pode implicar risco de rejeitar um processo que, na realidade, apresenta uma capacidade adequada.

A contaminação dos índices de capacidade pelos erros sistemáticos constantes, casos D e E, mostra comportamentos distintos para C_p e C_{pk} . Pode-se afirmar que o primeiro não sofre influência significativa de tais erros, pois ele não considera a localização do processo (média) em seu cálculo. Entretanto, o segundo é bastante influenciado pelo erro sistemático constante, pois se estará adicionando a cada medição uma quantidade que deslocará a média do processo. Esse deslocamento pode apontar um processo pior do que ele realmente é, embora em alguns casos possa transparecer um processo melhor do que ele realmente é.

O efeito da resolução do instrumento, caso H, pode ser explicado pela seguinte afirmação: à medida que a resolução do instrumento aumenta, o desvio padrão estimado do processo de medição também aumenta. Mesmo para o caso marginal, ou seja, desvio padrão do processo igual à resolução do instrumento, em função de estar-se trabalhando com amostras finitas, o desvio padrão também tende a aumentar, implicando redução para ambos os índices de capacidade.

Em suma, os resultados da simulação permitiram afirmar que os valores de C_p e C_{pk} são afetados de forma diferenciada pelas contribuições de incerteza associadas aos distintos tipos de erro. Mostra-se também que, para valores industrialmente aceitos da incerteza de medição, o efeito da medição pode ser, em muitos casos, mais relevante que aquele associado ao tamanho da amostra. Tal constatação reforça a necessidade de terem-se processos de medição confiáveis, ou seja, com variabilidade tal que a influência sobre o processo não

crie uma imagem distorcida da sua variação e indica que a metrologia deve receber um tratamento diferenciado em relação aos níveis atualmente praticados.

5.3

A METROLOGIA NO CONTROLE DE PROCESSOS

Na implantação do controle estatístico de processos no setor de usinagem da Electro Aço Altona, o primeiro investimento incidu na aquisição de instrumentos de medição com melhor resolução, ou seja, atuou-se sobre o processo de medição e não no processo de fabricação. Isso porque este pode ser descaracterizado por aquele quando a resolução for inadequada ante a variação do processo. A falta de resolução pode criar pontos fora de controle artificiais que nada tem a ver com o processo em análise, mesmo quando este se apresenta sob controle estatístico [23].

O parágrafo anterior adverte que o controle de processos requer um meio distinto de pensar-se sobre o processo de medição, pois a intenção é conhecer o comportamento do processo e não apenas se os produtos atendem ou não as exigências do cliente. Contudo o cuidado com a metrologia não deve ser restrito ao instrumento de medição, mas ao processo de medição como um todo.

Mittag e Stemann [53] estudaram a influência de medições imprecisas nos gráficos de controle de médias e desvios padrões. Por medições imprecisas os autores interpretaram aquelas afetadas por erros puramente aleatórios. Eles demonstraram que os erros aleatórios de medição influenciam em forma relevante o poder do gráfico de controle, mas não tratam o efeito dos erros sistemáticos, porque estes não afetam o poder do gráfico de controle.

Silva e Donatelli [54] avaliaram a influência do processo de medição na sensibilidade do gráfico de controle de valores individuais quando considerado que o erro de medição é composto por uma componente aleatória, uma componente sistemática constante e uma componente sistemática que depende linearmente do valor do mensurando; além do efeito da resolução com que se registram os dados. Os resultados apresentados pelos autores mostraram que diferentes contribuições para a incerteza influenciam de forma distinta a

sensibilidade do gráfico de valores individuais. Os efeitos predominantes são o aleatório e o arredondamento dos dados. A incerteza associada às contribuições sistemáticas de valor constante na faixa de medição não influencia a sensibilidade do gráfico, mas pode fazer com que o processo opere fora do alvo.

Toda a conjuntura exposta leva a crer que, no âmbito do controle de processos produtivos, o processo de medição deve ser suficientemente confiável e com pouca influência sobre os valores verdadeiros do processo produtivo, para não implicar decisões erradas no processo, tanto na detecção de alarmes falsos como na perda de sinais potenciais de mudança.

5.4

A METROLOGIA NA ISO 9000:2000

É sabido que a norma ISO 9000:2000 foca a satisfação do cliente e a melhoria contínua do processo. Necessariamente, ambos os objetivos exigem um certo rigor metrológico, como já resumidamente apontado na introdução desta dissertação e explicitado nos capítulos posteriores. Tanto que no item 7.6 dessa norma – Controle de Dispositivos de Medição e Monitoramento; referencia-se a norma ISO 10012, apesar de não ser de uso mandatário. Ela contém requisitos de garantia da qualidade para assegurar que as medições sejam feitas com a exatidão planejada, tais como a incerteza de medição, calibração e métodos de verificação.

Na opinião de quem escreve, a calibração é, dentre os conceitos presentes na ISO 10012, o mais aplicado nas indústrias, embora não de maneira otimizada. Tanto que os resultados dela, com muita frequência, não são bem interpretados e aplicados, devido, em parte, ao desconhecimento do conceito de incerteza e as condições distintas de calibração do instrumento e de sua utilização no meio produtivo.

Com o intuito de reduzir os custos, normalmente as companhias estendem os intervalos de calibração em instrumentos da seguinte maneira: uma vez que o instrumento falhe, assume-se que se tenha chegado ao maior tempo que o instrumento pode ser usado antes de realmente requerer calibração, e assume-se

esse período como o intervalo entre calibrações. Tal idéia parece boa e pode até funcionar em alguns casos, mas não é uma prática que deve ser seguida nos atuais níveis de exigência tanto de produção como de qualidade ^[55].

Entretanto, a frequência de calibração não deve ser dependente apenas do custo inerente à calibração mas também das conseqüências potenciais e dos custos resultantes da não calibração. Tanto que, em alguns casos, é preferível calibrar com maior frequência, pois os custos associados aos erros são elevados ^[56].

O conceito de “intervalo ótimo” de calibração, proposto por Osanna et al. ^[57], busca minimizar os custos associados à calibração e à má qualidade. Tal intervalo é dependente da frequência de utilização, da aplicação, do número de usuário etc. Estes não são elementos que se mantêm estáticos ao longo do tempo, o que resulta num “intervalo ótimo” variável, indo de encontro à prática atual de estabelecer intervalos fixos de calibração, o que fere a entropia dos sistemas.

A utilização de programas de garantia da qualidade do processo de medição, assim como aquele descrito no capítulo 4, permite monitorar o comportamento do sistema de medição e verificar se nada catastrófico tem acontecido. Assim, quando se depara com um problema, o instrumento é tirado de serviço e ações corretivas são efetuadas. Desta maneira, pode-se atingir o “intervalo quase-ótimo” de calibração e otimizar a confiabilidade dos resultados fornecidos pelo processo de medição, indo ao encontro dos requisitos da ISO 9000:2000.

5.5

O QUE FAZER?

Todos os itens precedentes deste capítulo evidenciaram que a metrologia tem aplicabilidade e pode agregar real valor ao meio industrial. Entretanto, as evidências normalmente são circundadas por indagações similares a esta: como as coisas funcionaram até hoje, mesmo com uma metrologia que na ótica atual parece precária? A resposta, que não é tão direta, será esboçada nos parágrafos seguintes.

Antes, ressaltar-se-á outro questionamento bastante freqüente quando da busca pela “Qualidade Classe Mundial” (operar no alvo e com variação mínima): por que

continuar a reduzir a variabilidade de um processo quando as especificações do produto foram atendidas?

A resposta para a última questão é baseada nesta argumentação de Hare ^[58]: duas coisas acontecem quando a variação do processo é reduzida, ambas boas. A primeira é que se aumenta a produtividade, i.e. minimiza-se o refugo e o retrabalho; adicionalmente, tem-se uma produção com maior previsibilidade. A segunda é a melhoria da qualidade, garantindo a satisfação do cliente e contribuindo para negociações futuras.

Resta agora tentar replicar a questão inicial. A primeira argumentação é que a metrologia não é a única causa de problemas no sistema produtivo, mas faz parte de uma cadeia que compreende aspectos como as especificações do produto, as características funcionais do produto e o processo de fabricação. A questão pode ainda ser respondida com base em uma situação vivenciada no setor de usinagem da Electro Aço Altona, que no início do projeto operava com instrumentos que, quiçá, fossem aptos para a tarefa de inspeção, mas que se mostraram inadequados para os fins do controle de processos. Obviamente que os processos podem operar sem o auxílio de métodos estatísticos, e não raras eram as situações onde isso acontecia.

Mas com o advento das normas visando a qualidade e de outros fatores que podem ser sumarizados no termo globalização, conceitos que antes eram vistos como utópicos, passaram a ser tratados com mais seriedade. Contudo, para que esses conceitos sejam concisamente definidos, é indispensável que a metrologia acompanhe o nível exigido pela aplicação. O caso do instrumento ser apto ou não para uma dada atividade é somente um dos diversos focos compreendidos na ciência das medições. Logo, a metrologia é um setor com demanda crescente, pois é ela quem fornece as informações necessárias para avaliar se um produto ou processo atende ou não as expectativas da cadeia produtiva, ou seja, permite inferir se há qualidade, agilidade, eficiência e custo adequados.

Obviamente que tudo era mais simples quando o nível de qualidade era medido em função das peças conformes e não-conformes, sem levar em consideração o custo de má qualidade envolvido no desconhecimento do processo como um todo. Porém, hoje, o resultado de uma medição não implica apenas conhecer

binariamente o produto, mas utilizar o resultado para atuar sobre o processo, para avaliar a sua capacidade etc., ou mesmo para a própria tarefa de inspeção.

Cada uma dessas tarefas requererá modos distintos de a metrologia ser operacionalizada. Para se definir se um processo de medição é capacitado ao exercício de um determinado serviço, primeiramente se deve definir o porquê se está medindo ^[26]. Sem dúvida que o rigor metrológico por trás de uma inspeção é distinto daquele por trás da avaliação de um processo, tanto com relação à estabilidade quanto à capacidade. Isso foi demonstrado nos estudos de caso do capítulo 4, quando instrumentos que eram aparentemente eficazes para a tarefa de inspeção mostraram-se inadequados para o controle de processos.

O critério estabelecido pela regra de ouro da metrologia não leva em conta a variabilidade do processo, mas apenas a tolerância do produto. A norma ISO 14253-1 especifica regiões de dúvida em virtude da incerteza associada ao processo de medição, reduzindo teoricamente os limites de especificação do produto. Processos com elevada capacidade requererão medições menos rigorosas (baixa probabilidade de produzir-se unidades próximas aos limites de especificação), enquanto que processos com baixa capacidade exigirão medições com menor incerteza (considerável fração de produtos próxima aos limites de especificação), para que o risco de aceitar-se um produto não-conforme ou de rejeitar-se um produto conforme seja reduzido – figura 5.2.

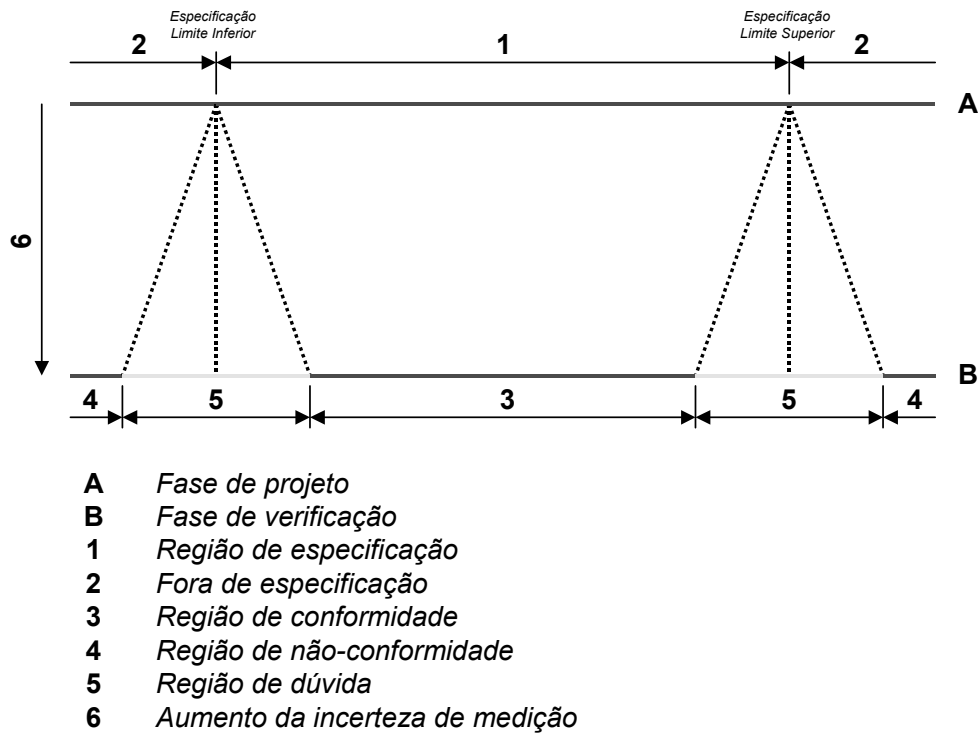


Figura 5.2 – O efeito da incerteza de medição na avaliação da conformidade (adaptado) ^[45]

Entretanto, sob o ponto de vista do controle de processos, a situação é um pouco diferente. Quando se tem um processo produtivo com baixa capacidade, a incerteza associada ao processo de medição é menos crítica que no caso de um processo produtivo com elevada capacidade. Como este sempre é influenciado por um conjunto de fatores (e.g. ambiente, mão-de-obra, limitações técnicas etc.) que não são invariáveis, a avaliação do processo, na prática, sempre é possível, mesmo sem um instrumento dito ideal.

Obviamente que processos excessivamente capazes, na ótica do controle estatístico, exigirão um controle mais sofisticado e, necessariamente, mais caro. Ou seja, um investimento no processo de fabricação exigirá uma conotação similar quanto ao processo de medição, que deve ser convenientemente contrabalanceada com o retorno do investimento. Neste íterim, a melhor qualidade possível pode acarretar investimentos excessivos, sendo a metrologia o meio de avaliar-se um processo na busca pela qualidade necessária e diferenciada.

Porém antes de analisar um processo de fabricação, é necessário o conhecimento do processo de medição. Algumas formas de avaliá-lo foram realçadas nesta dissertação, as quais se mostram de suma importância na

garantia da qualidade atual. Da simples adequação envolvendo a resolução de um instrumento de medição na utilização de gráficos de controle, ao entendimento do processo de medição por meio de estudos de repetitividade e reprodutibilidade e de programas para a garantia da qualidade da medição, a escolha do sistema de medição mais apto está intrinsecamente ligada ao meio, ou seja, ao propósito da medição.

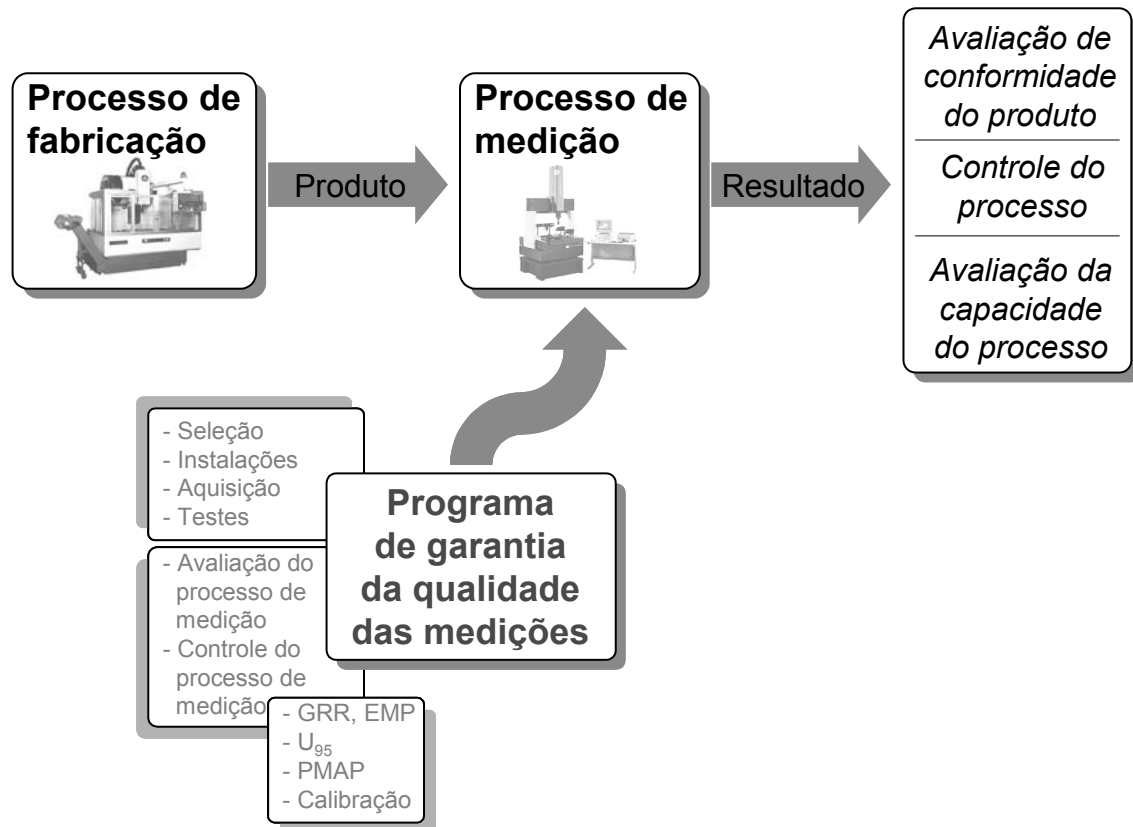


Figura 5.3 – A dependência entre a qualidade do produto/processo e a qualidade da medição

A figura 5.3 sumariza a cadeia de informações envolvidas na avaliação de um processo de fabricação, abrangendo o processo de medição e a utilização das informações obtidas para reportar uma determinada tarefa, e.g. avaliação da conformidade do produto, controle do processo, avaliação da capacidade do processo. Para que essas tarefas resultem em avaliações confiáveis, a qualidade inerente ao processo de medição deve ser conhecida e compatível com a tarefa em questão. Nessa vertente, a calibração do sistema de medição, a aplicação de técnicas estatísticas, a avaliação de incerteza de medição são atividades necessárias.

Em suma, pode-se fazer uma analogia entre os conceitos presentes no processo de fabricação com aqueles do processo de medição. O controle estatístico de processo tem como “versão metrológica” o programa para a garantia da qualidade do processo de medição (PMAP). A avaliação de um processo produtivo por meio de índices de capacidade é similar ao estudo de repetitividade e reprodutibilidade. Outras analogias podem ser evidenciadas, mas o ponto principal é que para que um processo de fabricação opere corretamente, o processo de medição deve funcionar dentro de limites coerentes, que só podem ser atingidos a partir de uma garantia da qualidade das medições eficiente.

Ou seja, o questionamento inicial deste item: como as coisas funcionaram até hoje, mesmo com uma metrologia que na ótica atual parece precária?, deveria ser ajustado para o seguinte: como a metrologia deve ser ajustada para sintetizar as necessidades atuais. O imperativo pela metrologia foi imposto pelo cenário mundial, e não se tem por interesse mudar o rumo da história, mas adequar-se a ela. Isto implica, dentre outras coisas, conhecer o que se faz, e o “instrumento” mais adequado para tal é a metrologia.

CAPÍTULO 6

CONSIDERAÇÕES FINAIS E OPORTUNIDADES FUTURAS

Que a metrologia assumiu um papel de extrema importância na era da informação, ficou evidente. Não foram raras as ocasiões vivenciadas durante este trabalho em que informações concisas eram desejadas, tanto no plano gerencial como na produção. Queira ou não, a metrologia tornou-se uma grande ferramenta para conciliar a indústria aos exigentes mercados nacional e internacional.

Nos capítulos anteriores desta dissertação, ressaltou-se que a metrologia não está restrita ao instrumento de medição, mas a um conjugado sumarizado na expressão processo de medição. Este requer, além de um equipamento de medição condizente com a aplicação, que um conjunto de fatores que afetam o resultado de uma medição seja coerentemente abordado. As condições ambientais, as características do mensurando, o operador do instrumento e outros fatores são misteres para que a imagem da metrologia não seja arranhada, e que os resultados proporcionados por ela não sejam distorcidos. Isso requererá investimentos que podem não ser suportados pelos diretores da empresa, por estes ainda considerarem a metrologia apenas como uma área de apoio e não como um processo cujo produto final são informações que auxiliam no atendimento às necessidades da empresa e dos clientes.

Entretanto, as exigências por parte dos clientes e os novos padrões de qualidade têm induzido uma mudança de paradigma com relação à metrologia, que não mais se encaixa na tradicional visão operacional, com mão-de-obra incapaz de interpretar um resultado de medição. Desprovido de significado, o resultado de uma medição não permite que ações sejam tomadas a fim de minimizar o refugo, o retrabalho e os custos de produção. A completa implantação dos requisitos da

norma ISO 9000:2000 exige da empresa sob auditoria um perito no tema, que nem sempre está disponível no seio de seus quadros e que também é relativamente raro no mercado.

Para mudar esse modelo de sistema, são necessários metrologistas que tenham discernimento sobre os fatores que influenciam o resultado de uma medição, sobre como minimizar ou corrigir a influência desses fatores para que haja uma adequação com o propósito da medição e capacidade de avaliar o resultado de uma medição, para realimentar a organização com informações de onde se deve atuar para que a produção opere em nível ótimo.

Adicionalmente, a metrologia não deve ser reservada à indústria apenas. Os auditores que participam de auditorias relativas às normas da garantia da qualidade desconhecem ou ignoram os requisitos metrológicos. Ou seja, é importante que eles sejam capazes de assimilar a metrologia e investigar se as necessidades metrológicas de uma empresa são coerentes.

No âmbito da academia, são necessárias pesquisas para averiguar o efeito da amostragem e da incerteza de medição tanto na avaliação de capacidade como no controle estatístico de processos (e.g. gráficos de controle). Como é técnica e economicamente inviável obter parâmetros do processo em caráter populacional e sem a contribuição da medição – “erro zero de medição”, deve-se conviver com essas limitações. Por outro lado, é fundamental o conhecimento de ambos os fatores para que decisões coerentes sejam tomadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] NBR ISO 9000, *Sistemas de Gestão da Qualidade – Fundamentos e Vocabulário*, dezembro de 2000.
- [2] M. A. L. de Oliveira, *A ISO 9000 e o Consumidor*, Banas Qualidade, fevereiro de 2001.
- [3] F. Banas, *O Desafio da Produtividade*, Seminário: A Medida da Qualidade e Produtividade, Fundação CERTI, Florianópolis, março de 2003.
- [4] *Eight of every 10 cars to 'run on ISO 9001:2000'*, Disponível em: <http://www.iso.org/iso/en/commcentre/pressreleases/2003/Ref853.html>. Acesso em: 01/08/2003.
- [5] The ISO Survey of ISO 9000 and ISO 14000 Certificates – Twelfth cycle: up to and including 31 December 2002. Disponível em: <http://www.iso.ch/iso/en/iso9000-14000/pdf/survey12thcycle.pdf>. Acesso em: 24/09/2003.
- [6] W. E. Deming, *Out of the Crisis*, Massachusetts Institute of Technology, Center for Advanced Engineering Study, Cambridge, Mass, 1986.
- [7] T. Pfeifer, F. Torres, *Manual de Gestión e Ingeniería de la Calidad*, Mira Editores, 1999.
- [8] G. D. Donatelli, *Gestão de Processos*, Seminário: A Medida da Qualidade e Produtividade, Florianópolis, março de 2003.
- [9] NBR ISO 9001, *Sistemas de Gestão da Qualidade – Requisitos*, dezembro de 2000.
- [10] ISO 10012-1, *Quality Assurance Requirements for Measuring Equipment – Part 1: Metrological Confirmation System for Measuring Equipment*, 1992.
- [11] NBR ISO/IEC 17025, *Requisitos Gerais para Competência de Laboratórios de Ensaio e Calibração*, janeiro de 2001.
- [12] J. L. Everhart, *Developing a Process Measurement Assurance Program (PMAPTM)*, Cal Lab, January-February, 1997.
- [13] AIAG, ASQ, *Measurement Systems Analysis (MSA)*, Reference Manual, Third Edition, The Automotive Industries Action Group, Troy, 2002.

- [14] D. J. Wheeler, R. W. Lyday, *Evaluating the Measurement Process*, Second Edition, SPC Press, Knoxville, Tennessee, 1989.
- [15] P. Bennich, *Planning Metrology in Advanced Product Quality Planning*, Seminário: A Medida da Qualidade e Produtividade, Fundação CERTI, Florianópolis, março de 2003.
- [16] Guia para a Expressão da Incerteza de Medição, Segunda Edição Brasileira do Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, Edição Revisada (agosto de 1998).
- [17] R. Brinkmann, *Planung industrieller Messtechnik*, Seminário: A Medida da Qualidade e Produtividade, Fundação CERTI, Florianópolis, março de 2003.
- [18] M. T. C. Dória, R. C. dos Santos, *Normas ISO e o Controle de Dispositivos de Medição*, M&I, junho de 2001.
- [19] W. Shewhart, *Economic Control of Quality of Manufactured Product*, republished by American Society for Quality Control, Milwaukee, Wisconsin, 1980.
- [20] W. H. Woodall, *Controversies and Contradictions in Statistical Process Control*, Journal of Quality Technology, Vol. 32, No. 4, pp. 341-350, October 2000.
- [21] G. P. Ferguson, *Essential SPC*, Quality Digest, August 2000. Disponível em: <http://www.qualitydigest.com/aug00/html/spc.html>. Acesso em: 23/07/2003.
- [22] D. J. Wheeler, *Short Run SPC*, SPC Press, Knoxville, Tennessee, 1991.
- [23] D. J. Wheeler, *Advanced Topics in Statistical Process Control*, SPC Press, Knoxville, Tennessee, 1995.
- [24] *Advanced Quality System Tools*, Boeing Commercial Airplane Group, 1998.
- [25] C. Bayeux, *Análise da Capacidade de Processos (Parte I)*, Banas Qualidade, pp. 57-60, maio de 2001.
- [26] G. D. Donatelli, A. M. Barp, C. A. Schneider, *The Influence of Measurement Errors on the Values of Process Capability Indices*, 6th IMEKO SYMPOSIUM Metrology for Quality Control in Production, pp.133-141, 1998.
- [27] S. Kotz, N. L. Johnson, *Process Capability Indices – A Review, 1992-2000*, Journal of Quality Technology, Vol. 34, No. 1, pp. 2-19, January 2002.

- [28] S. Bordignon, M. Scagliarini, *Statistical Analysis of Process Capability Indices with Measurement Errors: The Case of Cp*, Statistical Methods & Applications, No. 10, pp. 273-285, 2001.
- [29] J. Jessenberger, C. Weihs, *A Note on the Behavior of Cpmk with Asymmetric Specification Limits*, Journal of Quality Technology, Vol. 32, No. 4, pp. 440-443, October 2000.
- [30] F. Spiring, S. Cheng, A. Yeung, B. Leung, *Discussion*, Journal of Quality Technology, Vol. 34, No. 1, pp. 23-27, January 2002.
- [31] D. R. Bothe, *Discussion*, Journal of Quality Technology, Vol. 34, No. 1, pp. 32-37, January 2002.
- [32] C. Waxer, *Process Capability (Cp, Cpk) and Process Performance (Pp, Ppk): What's the Difference?*, iSix Sigma. Disponível em: <http://www.isixsigma.com/library/content/c010806a.asp>. Acesso em: 02/08/2003.
- [33] M. L. Crossley, *Size Matters: How Good is Your Cpk, really?*, Quality Digest. Disponível em: <http://www.qualitydigest.com/may00/html/lastword.html>. Acesso em: 24/06/2003.
- [34] A. A. Gonçalves Jr., *Metrologia Parte I – 2002.1*, Apostila do Programa de Pós-graduação em Metrologia Científica e Industrial.
- [35] E. Dietrich, A. Schulze, *Eignungsnachweis von Prüfprozessen: Prüfmittelfähigkeit und Messunsicherheit im aktuellen Normenumfeld*, Carl Hanser Verlag.
- [36] INMETRO, *Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais em Metrologia*, 1995.
- [37] B. H. S. Nielsen, *Know Your Uncertainty*, Quality Magazine, April 2000.
- [38] T. Heston, *Certain about Uncertainty*, F&M Magazine On-line, August 2002. Disponível em: http://www.ndx.com/article.asp?article_id=375. Acesso em: 23/07/2003.
- [39] P. Stein, *Statistical Issues in Measurement*, Special Publication ASQ Statistics Division, July 2002.
- [40] ISO/TS 14253-2, *Geometrical Product Specifications (GPS) – Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment – Part 2: Guide to the*

estimation of uncertainty in GPS measurement, in calibration of measuring equipment and in product verification, International Organization for Standardization, First Edition, 1999.

- [41] S. K. Kimothi, *The Uncertainty of Measurements, Physical and Chemical Metrology: Impact and Analysis*, ASQ Quality Press, Milwaukee, Wisconsin, 2002.
- [42] E. R. Ott, E. G. Schilling, D. V. Neubauer, *Process Quality Control: Troubleshooting and Interpretation of Data*, 3rd Edition, McGraw-Hill, 2000.
- [43] J. Richter, *Engenharia da Qualidade*, Seminário: A Medida da Qualidade e Produtividade, Fundação CERTI, Florianópolis, março de 2003.
- [44] D. J. Wheeler, *Capability Ratios Vary*, Quality Digest, June 1997. Disponível em: <http://www.qualitydigest.com/june97/html/capablty.html>. Acesso em: 23/07/2003.
- [45] ISO 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 specifications*, International Organization for Standardization, First Edition, 1998.
- [46] D. J. Wheeler, *Understanding Variation – The Key to Managing Chaos*, SPC Press, Knoxville, Tennessee, 1993.
- [47] A. R. Sousa, C. A. Schneider, *Recomendações para uma Utilização Eficiente e Confiável da Tecnologia de Medição por Coordenadas*, Máquinas & Metais, maio de 2001.
- [48] A. R. Sousa, A. L. Oliveira, G. G. Soares, *Garantia da Confiabilidade Metrológica na Medição por Coordenadas*, Fundação CERTI, Florianópolis, novembro de 2002.
- [49] ASQC, AIAG, *Statistical Process Control*, Automotive Industry Action Group, Troy, Mi, 1992.
- [50] H. J. Mittag, *Measurement Error Effects on the Performance of Process Capability Indices*, in *Frontiers in Statistical Quality Control 5* (ed. H. J. Lenz, P. Th. Wilrich), pp. 195-206, Heidelberg Physica-Verlag, 1997.

- [51] D. Geus, T. Killmaier, A. Weckenmann, *Measurement Uncertainty and Statistical Process Control in Manufacturing Processes*, Course for Technical Universities: Geometrical Product Specifications, Chapter 24.
- [52] C. R. Baldo, G. D. Donatelli, *Avaliação da Capacidade de Processos: Efeito da Amostragem e da Incerteza de Medição*, Anais do III Congresso Brasileiro de Metrologia, Recife, setembro de 2003.
- [53] H. J. Mittag, D. Stemann, *Gage Imprecision Effect on the Performance of \bar{X} -S Control Chart*, Journal Applied Statistics, March 1998.
- [54] J. H. C. Silva, G. D. Donatelli, *Efeito da Incerteza de Medição na Sensibilidade da Carta de Controle de Valores Individuais*, Anais do III Congresso Brasileiro de Metrologia, Recife, setembro de 2003.
- [55] D. Dusharme, *Gage Use and Abuse*, Quality Digest, February 1997. Disponível em: http://www.qualitydigest.com/feb99/html/body_gages.html. Acesso em: 23/07/2003.
- [56] P. Stein, *Don't Whine – Calibrate*, Quality Progress, pp. 85-87, November 2000.
- [57] P. H. Osanna, M. N. Durakbasa, A. Nomak Akdogan, A. Afjehi-Sadat, *Artificial Intelligence Based Supervision and Confirmation of Complex Measurement Systems*, Anais do III Congresso Brasileiro de Metrologia, Recife, setembro de 2003.
- [58] L. B. Hare, *Process Variation Reduction and How the Cookie Crumbles*, Kraft Foods.