

MÉTODOS E FILOSOFIA DO CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSOS

- Ferramentas básicas para solução de problemas em CEP
- Base estatística das cartas de controle de Shewhart
- Questões práticas de implementação de CEP

CAUSAS COMUNS OU DE CHANCE E CAUSAS ESPECIAIS OU ATRIBUÍVEIS DE VARIAÇÃO DE QUALIDADE

- Um processo operando somente com *Causas de Chance de Variação*, ou *Causas Comuns* presentes é dito estar **em Estado de Controle Estatístico**.
- Um processo operando em presença de *Causas Atribuíveis*, ou *Causas Especiais*, é dito estar **fora de Estado de Controle Estatístico**.

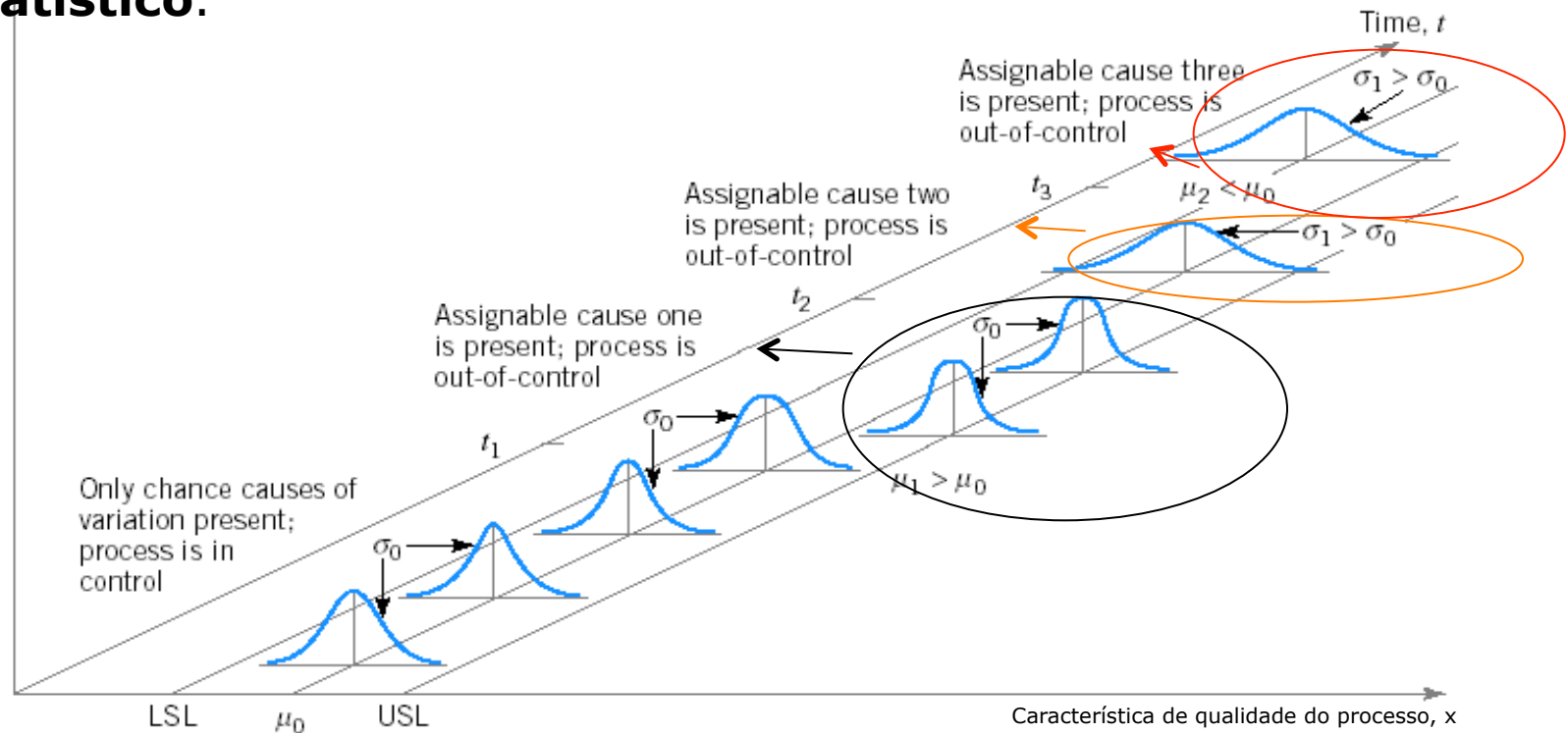


Figura 01: Causas Atribuíveis e Causas Comuns de variação

BASE ESTATÍSTICA DAS CARTAS DE CONTROLE

- Uma Carta de Controle contém:
 - Uma linha central (valor médio).
 - Um limite de controle superior, UCL, (**upper control limit**).
 - Um limite de controle inferior, LCL, (**lower control limit**).
- Pontos na carta *entre os limites de controle*:
 - Processo em CE. Nenhuma ação é necessária.
- Pontos na carta *fora dos limites de controle* evidencia que o processo está fora de controle estatístico:
 - Investigação e ação corretiva são requeridas para encontrar e eliminar as causas especiais.
- Pontos com comportamento sistemático ou não-aleatório.

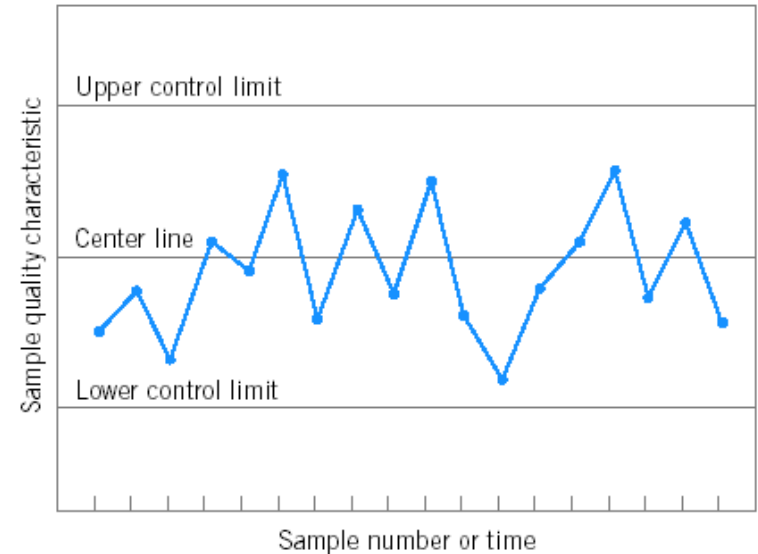


Figura 02: Carta de Controle Típica

Existe uma relação próxima entre cartas de controle e teste de **hipótese**.

INTERVALOS DE CONFIANÇA

- Suponha que x seja uma variável aleatória com média μ , desconhecida, e variância, σ^2 , conhecida. Para testar a hipótese de que a média é um valor nominal μ_0 , testa-se:
 - $H_0: \mu = \mu_0$
 - $H_1: \mu \neq \mu_0$
- Para testar esta hipótese toma-se uma amostra aleatória de n observações e calcula-se a estatística de teste:
$$Z_o = \frac{\bar{x} - \mu_0}{\sigma / \sqrt{n}}$$
- Rejeita-se H_0 se $|Z_o| > Z_{\alpha/2}$, onde $Z_{\alpha/2}$ é o ponto da distribuição normal padrão correspondente à porcentagem superior $\alpha/2$.

Observe que **α é a probabilidade de erro do tipo I para o teste** e se H_0 é verdadeira, devemos esperar que $100(1 - \alpha)\%$ dos valores de Z_o caiam entre $- Z_{\alpha/2}$ e $+ Z_{\alpha/2}$.

$100(1 - \alpha)\%$ é chamado intervalo de confiança de nível para a média desconhecida μ .

EXEMPLO: FABRICAÇÃO DE ANÉIS PARA PISTÃO DE MOTORES DE AUTOMÓVIES

- Uma característica de qualidade importante na fabricação destes anéis é o diâmetro interno.
- Processo é monitorado por meio da medida do diâmetro interno médio com:
 - amostra de 5 anéis
 - média de 1.5cm
 - desvio padrão de 0.15 cm
- Note que todos os pontos plotados estão dentro dos limites de controle
 - Processo é dito estar em CEP.

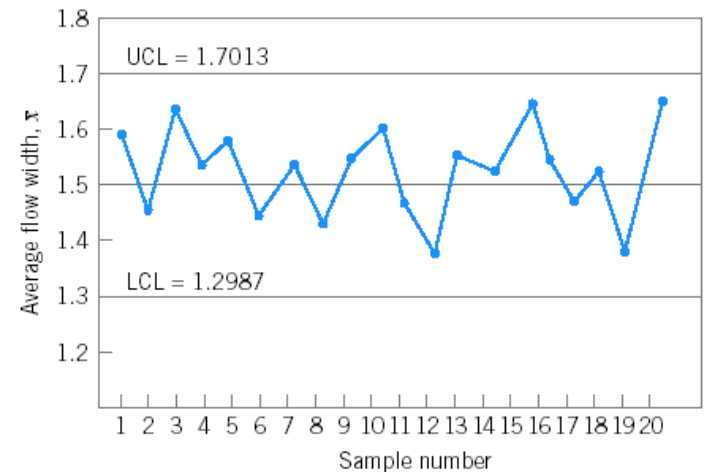


Figura 03: Carta de Controle \bar{X}_{bar} para Largura de Fluxo

EXEMPLO: FABRICAÇÃO DE ANÉIS PARA PISTÃO DE MOTORES DE AUTOMÓVIES

Sendo a média do processo 1,5 cm e o desvio padrão do mesmo 0,15cm, além do tamanho das amostras $n=5$, pode-se calcular o desvio padrão da média da amostra, $\bar{\sigma}_x$, como:

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{0.15}{\sqrt{5}} = 0.067$$

Assim, se o processo está em controle com diâmetro médio de 1,5cm, então pode-se, considerando o teorema do limite central, assumir que \bar{x} é aproximadamente normal distribuída, e com isso esperar:

$100(1 - \alpha)\%$ da amostra de diâmetros médio \bar{x} estará entre os limites

$$1.5 + Z_{\alpha/2}(0.067) \text{ e}$$

$$1.5 - Z_{\alpha/2}(0.067)$$

Se escolhermos a constante $Z_{\alpha/2}=3$ (freqüentemente chamado de limites de controle “três sigmas”), os limites de controle superior e inferior serão:

$$UCL = 1.5 + 3.(0.067) = 1.701 \text{ e } LCL = 1.5 - 3.(0.067) = 1.299$$

MODELO DA CARTA DE CONTROLE DE SHEWHART

Pode-se assumir um modelo geral para cartas de controle. Seja w uma amostra estatística que mede alguma característica de qualidade de interesse e assumamos que a média de w é μ_w e o desvio padrão de w é σ_w . Assim:

$$UCL = \mu_w + L\sigma_w$$

$$\text{Linha central} = \mu_w$$

$$LCL = \mu_w - L\sigma_w$$

onde L é a “distância” dos limites de controle da linha central, expressa em unidades de desvio padrão.

Esta teoria de cartas de controle foi proposta por Walter S. Shewhart e este modelo de cartas é chamado de **Carta de Controle de Shewhart**.

MODELO DA CARTA DE CONTROLE DE SHEWHART

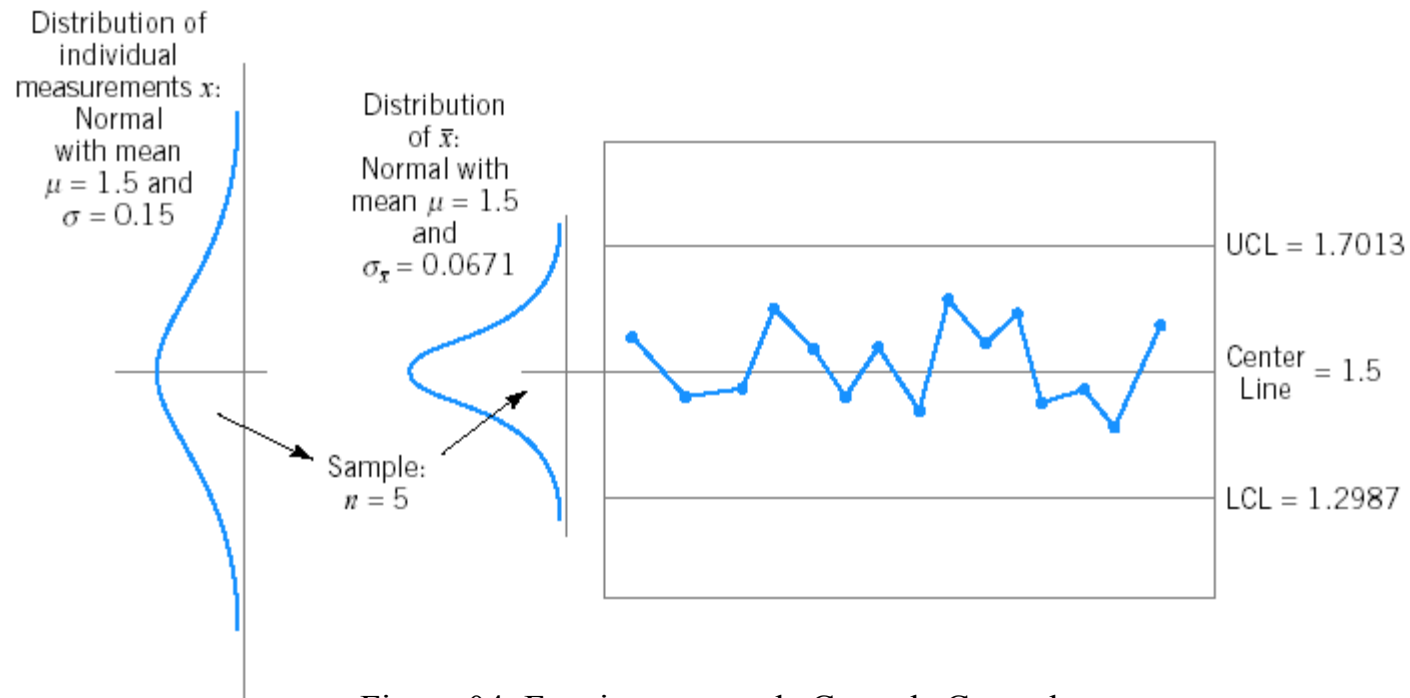


Figura 04: Funcionamento da Carta de Controle

USO DE CARTAS DE CONTROLE

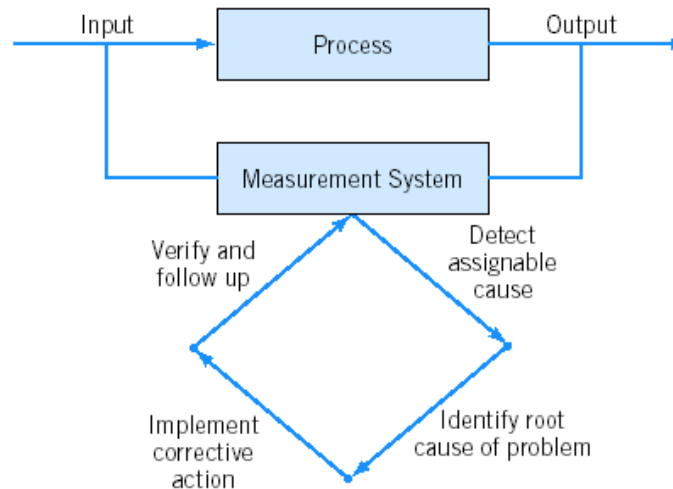


Figura 05: Processo de melhoria usando Carta de Controle

O objetivo mais importante de uma carta de controle é melhorar o processo. A maioria dos processos não opera em estado de controle estatístico e, assim:

1. Consequentemente, a rotina e o uso atento das cartas de controle irão identificar a existência de causas especiais ou atribuíveis. Se estas causas puderem ser eliminadas do processo, a variabilidade será reduzida e o processo será melhorado.
2. A carta de controle irá detectar somente causas especiais ou atribuíveis. A ação do gerenciamento, dos operadores e da engenharia serão, usualmente, necessárias para eliminar as causas atribuíveis.

USO DE CARTAS DE CONTROLE

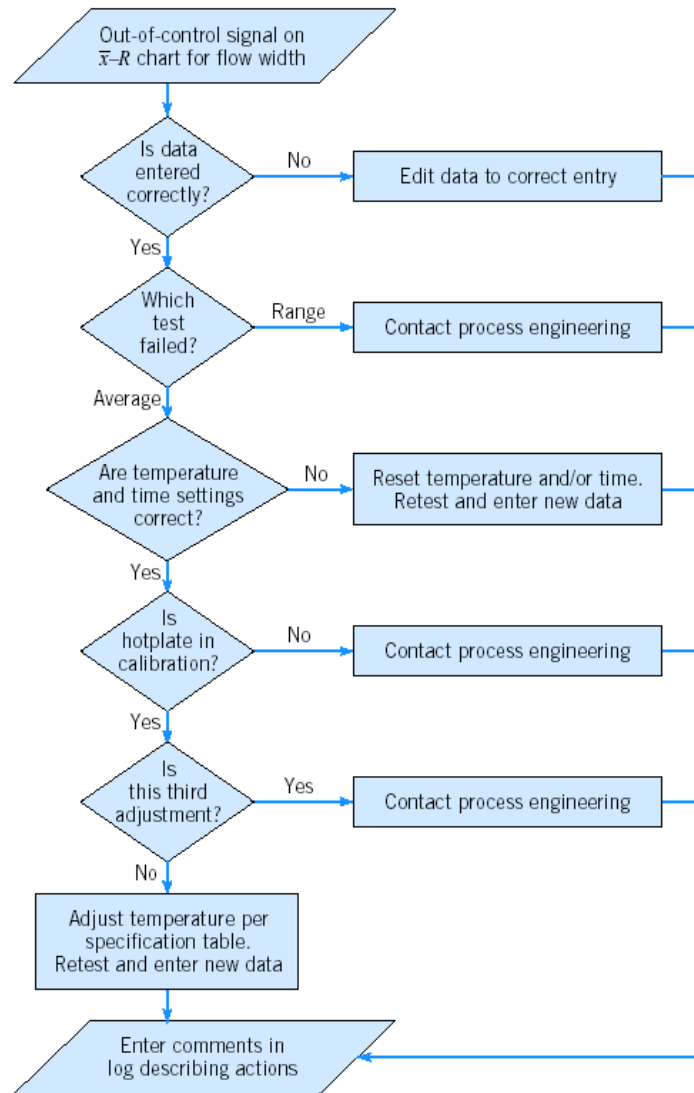


Figura 06: Plano de ação para perda de estado de controle para um processo Hard-bake

OUTROS PRINCÍPIOS BÁSICOS

- Cartas de controle podem ser usadas para estimar parâmetros de processo que são usados para determinar a capacidade (**capability**).
- Existem dois tipos gerais de Cartas de Controle:
 - Variáveis (Cap. 5)
 - Escala contínua de medição
 - Característica de qualidade descrita pela tendência central e a medida de variabilidade.
 - Atributos (Cap. 6)
 - Conforme/não-conforme
 - Contável
- **Projeto de cartas de controle** compreende a seleção do tamanho da amostra, a definição dos limites de controle e da frequência de amostragem.
- (No exemplo anterior, $n=5$, limites de controle definidos por 3σ , e frequência de amostragem a cada hora.)

TIPOS DE VARIABILIDADE DE PROCESSO

- **A) Estacionária e não-correlacionada** - os dados variam em torno de uma média fixa de uma maneira estável e previsível (ruído branco).
- **B) Estacionária e autocorrelacionada** - observações sucessivas são dependentes com tendência a mover por “longos períodos” em cada lado da média.
- **C) Não estacionário** - desvios do processo sem qualquer sentido de uma média fixa ou estável. O processo é instável, no sentido em que “vagueia” sem sentido de uma média fixa ou estável. Notoriamente é o caso de um processo que demanda controle realimentado de processos.
- Comportamentos A e B correspondem ao que Shewhart queria dizer de resultado de um processo operando sob controle.

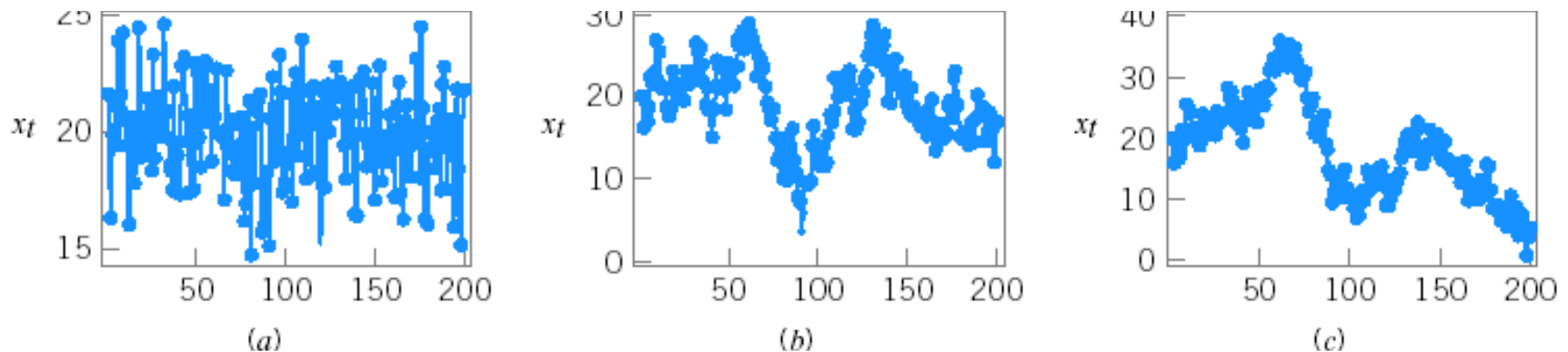


Figura 07: Dados provenientes de três processos. a) Estacionário e não correlacionado (ruído branco). b) Estacionário e Autocorrelacionado. c) Não estacionário.

RAZÕES PARA POPULARIDADE DAS CARTAS DE CONTROLE

1. Constituem-se uma técnica comprovada para melhoria de produtividade.
2. São efetivas na prevenção de defeitos.
3. Evitam ajustes desnecessários no processo.
4. Disponibilizam informações diagnósticas.
5. Disponibilizam informações a respeito da **capacidade** do processo (de produzir produtos aceitáveis, conformes).

ESCOLHA DOS LIMITES DE CONTROLE

■ 3-Sigma Limites de Controle

Probabilidade de erro do tipo I é $p = 0.0027$ (probabilidade de que um ponto seja plotado fora dos limites quando o processo está sob controle - 99,73% de acerto para 3-Sigma).

■ Limites de Ação: Limites de probabilidade de erro Tipo I - probabilidade é escolhida diretamente (onde existe 1 chance em 1000 (0.001) de um ponto amostrado estar fora dos limites de controle):

- p. ex., 0.001 dá 3.09-sigma – limites de controle típicos.

■ Limites de Advertência (Warning): onde existe 1 chance em 40 de um ponto amostrado estar fora dos limites de controle:

- tipicamente selecionados como limites 2-sigma.

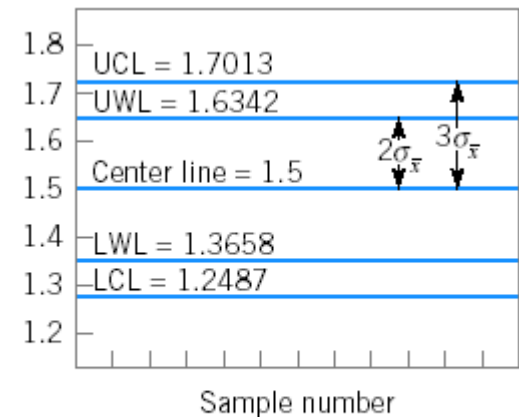


Figura 08: Uma carta \bar{X}_{bar} com limites de advertência

TAMANHO DA AMOSTRA E FREQUÊNCIA DE AMOSTRAGEM

- Em geral, *amostras maiores* permitem detectar com maior facilidade *pequenos deslocamentos* no processo. Para detectar mudanças maiores tamanhos de amostras menores são mais adequados.
- Ao escolher, portanto, o tamanho da amostra, deve-se considerar o tamanho do *deslocamento* que se espera detectar.
- Amostragem relaciona-se aos esforços/custos da mesma. A medição e transmissão automática e remota de variáveis de qualidade torna possível aumentar as frequências de amostragem.

TAMANHO DA AMOSTRA E FREQUÊNCIA DE AMOSTRAGEM

- Outra maneira de avaliar decisões com relação a tamanho de amostra e frequência de amostragem é por meio do *Comprimento Médio da Sequência* (ARL: Average Run Length) da carta de controle.
 - CMS (ARL) corresponde ao número médio de pontos que deve ser plotado antes que um ponto indique uma condição *fora de controle*.
- Se as observações são não correlacionadas, então, para qualquer carta de controle de Shewhart: $CMS = ARL = \frac{1}{p}$
onde p é a probabilidade de qualquer ponto exceda os limites de controle.

Para uma carta de controle tipo \bar{X} com limites 3σ , $p=0.0027$, o comprimento médio da sequência, CMS, da carta quando o processo está sob controle é:

$$ARL = \frac{1}{p} = \frac{1}{0.0027} = 370$$

TAMANHO DA AMOSTRA E FREQUÊNCIA DE AMOSTRAGEM

- Isto significa que, mesmo o processo estando sob controle, a cada 370 pontos, em média, haverá um ponto fora dos limites de controle.
- O uso de CMS para descrever desempenho de cartas de controle tem sido criticado. A razão é o fato da distribuição de uma CMS para uma carta de Shewhart ser uma distribuição geométrica. Assim há dois aspectos a considerar com CMS:
 - o desvio padrão do CMS é muito grande.
 - a distribuição geométrica é muito inclinada, assim a média da distribuição do CMS não é necessariamente um valor muito típico do tamanho de uma execução.
- *Por exemplo:* para a carta anterior com limite de 3σ e $p=0.0027$, em controle, $CMS_o = 1/0.0027 = 370$ é a *média da distribuição geométrica*. O *desvio padrão* desta distribuição é dado por:

$$\frac{\sqrt{(1-p)}}{p} = \sqrt{(1-0,0027)}/0,0027 \cong 370$$

TAMANHO DA AMOSTRA E FREQUÊNCIA DE AMOSTRAGEM

- Neste caso, o desvio padrão e a média são aproximadamente iguais. O resultado é que numa carta de Shewhart \bar{X} o CMSo variará consideravelmente.
- Algumas vezes é conveniente expressar o desempenho das cartas de controle em termos do seu **Tempo Médio para Alerta** - TMA. Se amostras são tomadas em intervalos fixados de 1h, então:

$$TMA = CMS_1 h$$

- Em situações onde o CMS = 370, supondo amostragem a cada 1h, a equação anterior indica que haverá um alarme falso a cada 370h, em média.
- Para *responder a questão da frequência de amostragem* mais precisamente, vários fatores devem ser considerados:
 - o custo da amostragem;
 - as perdas associadas com a operação fora de controle;
 - a taxa de produção;
 - a probabilidade com que vários tipos de deslocamento no processo ocorrem.

SUBGRUPOS RACIONAIS

- O conceito de **subgrupos racionais** significa que subgrupos ou amostras devem ser selecionados tal que se uma causa especial (ou atribuível) está presente, a chance de haver diferenças *entre* subgrupos será maximizada, enquanto a chance de haver diferenças devido a causas especiais *dentro* de um subgrupo será minimizada.
- Duas abordagens gerais para construir subgrupos racionais:
 1. Amostra consiste de unidades produzidas ao mesmo tempo - **unidades consecutivas**
Proposição primária é detectar mudanças (deslocamentos) no processo (amostras regulares, num intervalo ΔT de comprimento ΔT_a , estão sujeitas ao falseamento quando houver ocorrência de medidas espúrias - outliers)
 2. Amostra consiste de unidades selecionadas aleatoriamente no intervalo de amostragem.

SUBGRUPOS RACIONAIS

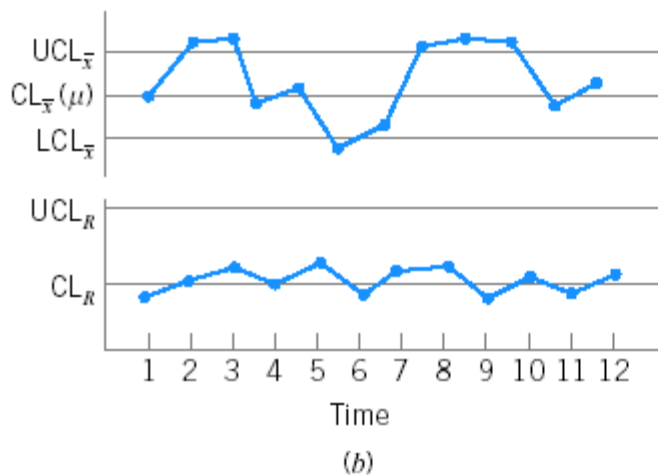
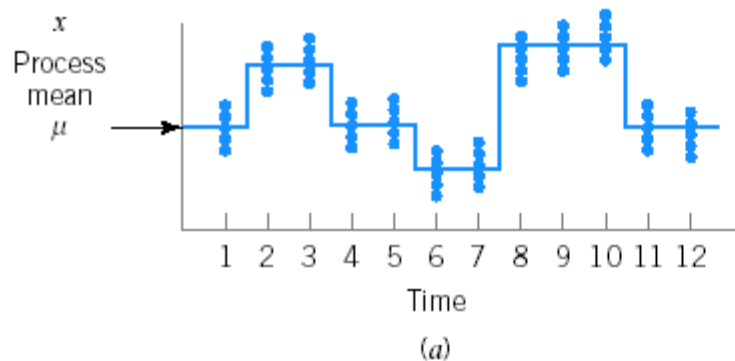


Figure 4-10 The “snapshot” approach to rational subgroups. (a) Behavior of the process mean. (b) Corresponding \bar{x} and R control charts.

Abordagem do “Instantâneo”

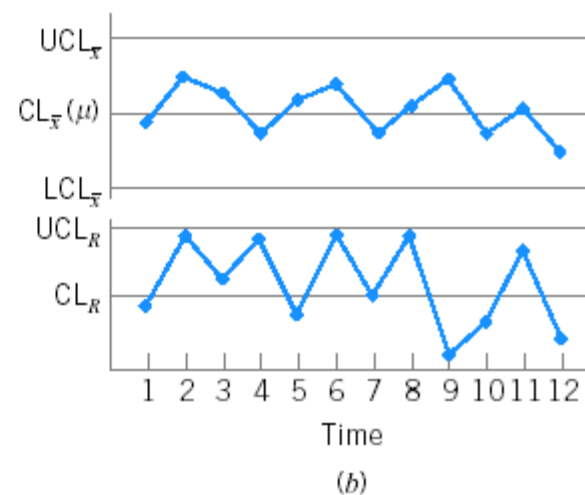
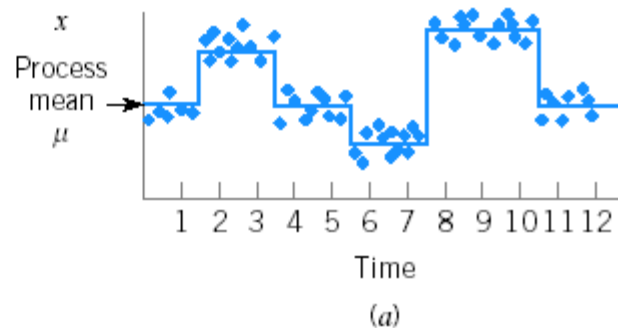
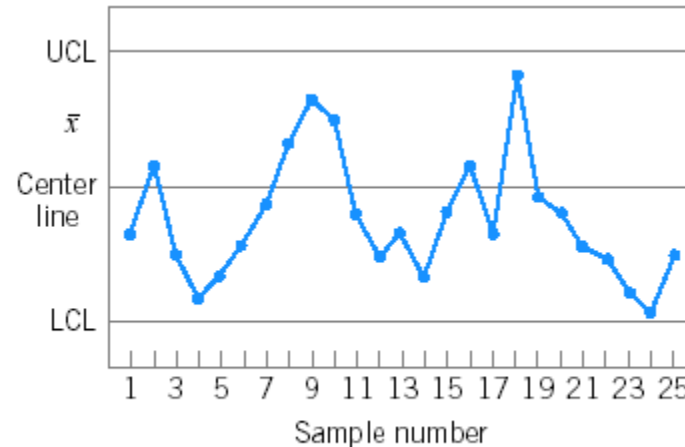


Figure 4-11 The random sample approach to rational subgroups. (a) Behavior of the process mean. (b) Corresponding \bar{x} and R control charts.

Abordagem de Amostra Aleatória

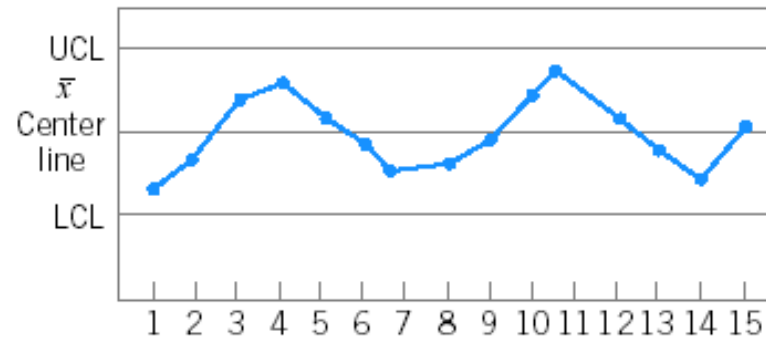
ANÁLISE DE PADRÕES NAS CARTAS DE CONTROLE

Exemplo:

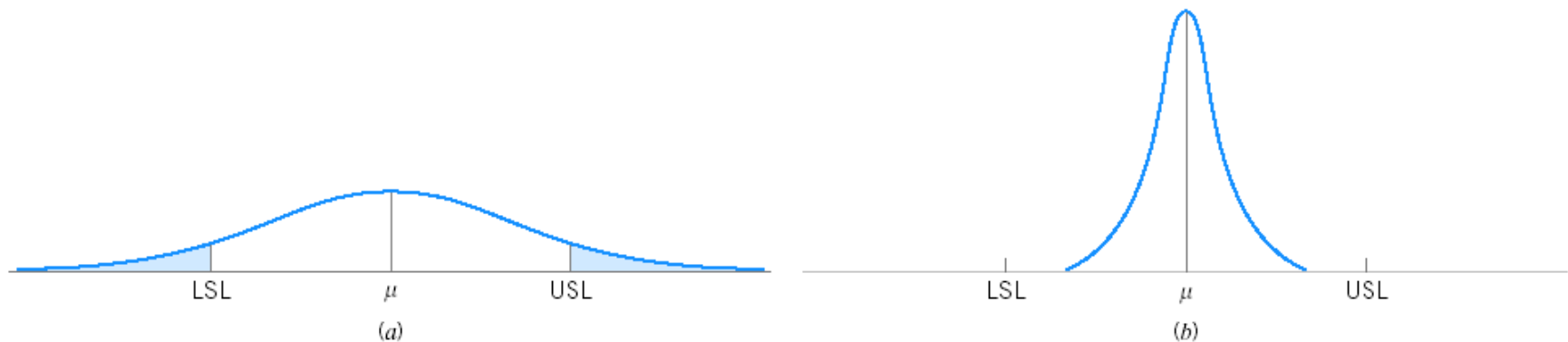


- O padrão parece ser muito não aleatório.
- 19 dos 25 pontos plotados abaixo da linha central, enquanto somente 6 acima.
- Seguindo o 4º ponto, 5 pontos em uma linha aumentaram em magnitude, um *run up*, uma *sequência crescente*.
- Existe, também, um não usual longo *run down*, *sequência decrescente*, começando com 18º ponto.

ANÁLISE DE PADRÕES NAS CARTAS DE CONTROLE



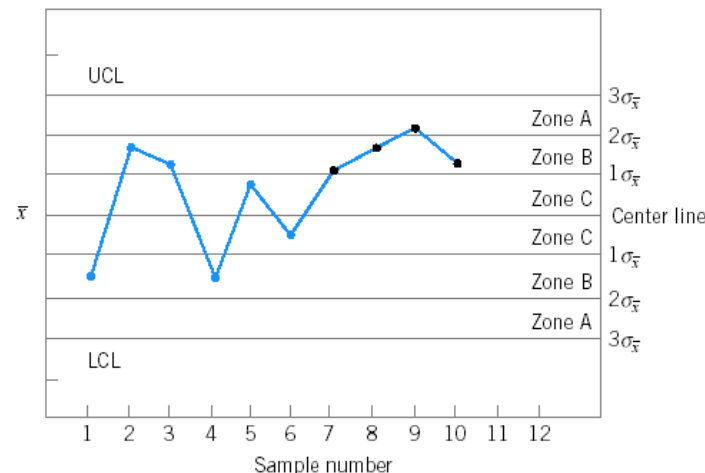
Carta de controle de média \bar{X} com padrão cíclico.



- a) Variabilidade com padrão cíclico.
- b) Variabilidade com padrão cíclico eliminado

ANÁLISE DE PADRÕES NAS CARTAS DE CONTROLE

- O **Western Electric Handbook (1956)** sugere um conjunto de regras de decisão para detectar padrões não aleatórios em cartas de controle. Especificamente, isto sugere concluir que o processo está fora de controle se ocorrerem:
 - Um ponto ou mais fora dos limites de controle 3σ .
 - Dois ou três pontos consecutivos entre os limites de alerta de 2σ .
 - Quatro ou cinco pontos consecutivos além dos limites 1σ .
 - Oito pontos consecutivos de um lado da linha central.



As regras das Zonas ou Western Electric, com os últimos 4 pontos apresentando violação da regra 3.

REGRAS DE SENSIBILIZAÇÃO DAS CARTAS DE CONTROLE

1. Um ponto fora dos limites de controle 3σ .
2. 2 ou 3 pontos consecutivos fora dos limites de alerta 2σ .
3. 4 a cada 5 pontos consecutivos além dos limites 1σ .
4. 8 pontos consecutivos em um lado da linha central.
5. 6 pontos em uma sequência crescente ou decrescente.
6. 15 pontos em uma sequência na zona C (acima e abaixo da linha central).
7. 14 pontos em uma sequência alternando acima e abaixo.
8. Oito pontos em uma sequência nos dois lados da linha central com nenhum na zona C.
9. Um padrão não-usual ou não-aleatório nos dados.
10. Um ou mais pontos próximos a um limite de alerta ou de controle.

REGRAS DE SENSIBILIZAÇÃO DAS CARTAS DE CONTROLE

- As regras de sensibilização devem ser usadas com CUIDADO, pois um número excessivo de alarmes falsos podem ser gerados e serem prejudiciais ao uso do CEP.
- Quanto mais regras são aplicadas mais complicado torna-se o processo de análise e decisão e a simplicidade desejável das cartas de Shewhart fica perdida.
- Os pacotes modernos de CEP implementam algumas destas regras de sensibilização, mas o analista deve ter cuidado com o seu uso/interpretação.
- Estas regras costumam ser úteis quando o CEP está sendo usado pela primeira vez e o processo está fora de controle estatístico. Mas quando este encontra-se razoavelmente estável, estas regras utilizadas na rotina já não são tão capazes de detectar pequenos deslocamentos no processo, causados por causas especiais.
- As cartas de controle de Soma Cumulativa (CUSUM) e Média Móvel com Peso Exponencial (EWMA) é que devem ser usadas quando pequenos deslocamentos ocorrem no processo.

AS DUAS FASES DE APLICAÇÃO DE CARTAS DE CONTROLE

- Fase I é a **Análise Retrospectiva** dos dados de processo para construir Limites de Controle Experimentais
 - Cartas são efetivas em detectar grandes deslocamentos sustentados nos parâmetros do processo, outliers, erros de medição, erros de entrada de dados, etc.
 - Facilita identificação e remoção de causas especiais ou atribuíveis.
- Na Fase II, as cartas de controle são usadas para **monitorar** o processo
 - Processo é assumido ser razoavelmente estável.
 - Ênfase está no monitoramento do **processo**, não em trazer um processo sem regras ao estado de Controle Estatístico (detectar pequenos deslocamentos).

AS DEMAIS FERRAMENTAS DE CEP

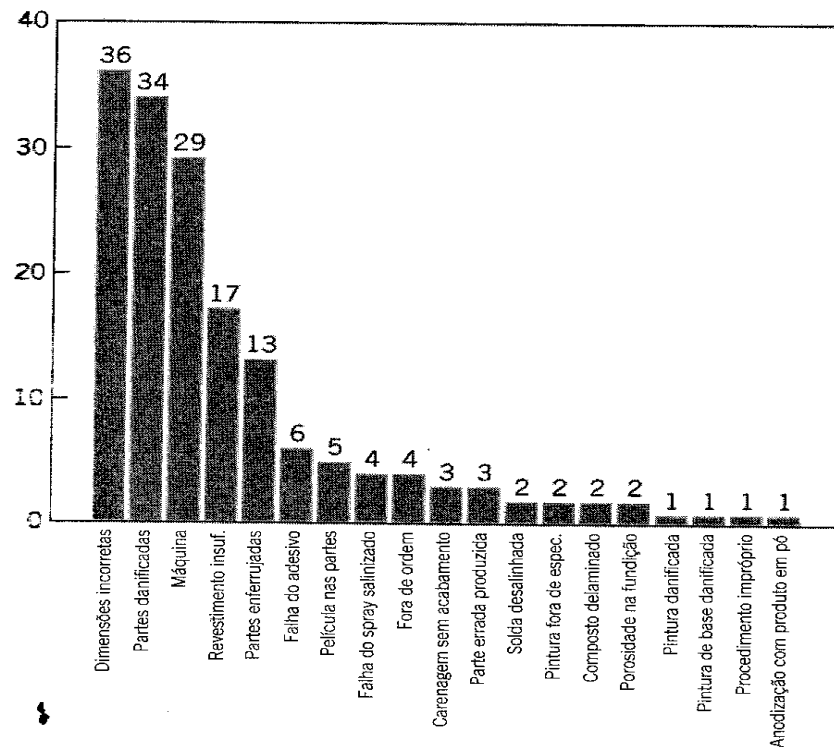
1. Histograma ou Gráfico Caule e Folha (stem-and-leaf plot)
2. Folha de Checagem
3. Carta de Pareto
4. Diagrama de Causa-e-Efeito
5. Diagrama de Concentração de Defeito
6. Diagrama de Espalhamento
7. Cartas de Controle

FOLHA DE CHECAGEM

CHECK SHEET																									
DEFECT DATA FOR 2002-2003 YTD																									
Part No.: TAX-41																									
Location: Bellevue																									
Study Date: 6/5/03																									
Analyst: TCB																									
		Meses do ano 1988												Meses do ano 1989											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5					Total		
Partes danificadas		1		3	1	2		1		10	3			2	2	7	2						34		
Problemas de máquina				3	3				1	8		3		8	3								29		
Def	Partes fornecidas enferrujadas			1	1		2	9															13		
Part	Revestimento insuficiente	3	6	4	3	1																	17		
Ma	Solda desalinhada	2																					2		
Sup	Processamento fora de ordem	2															2						4		
Ma	Parte errada produzida	1							2														3		
Mis	Carenagem sem acabamento			3																			3		
Pro	Falha do adesivo				1							1		2			1	1					6		
Wrr	Anodização com produto em pó					1																	1		
Unf	Pintura fora dos limites						1								1								2		
Adl	Tinta danificada por produto químico			1																			1		
Pov	Película nas partes						3		1	1													5		
Pair	Latas da tinta de base danificada								1														1		
Filr	Porosidade na fundição									1	1												2		
Prir	Composto delaminado										2												2		
Vo	Dimensões incorretas											13	7	13	1		1	1					36		
Del	Procedimento de teste impróprio										1												1		
Inco	Falha no spray salinizado														4								4		
Imr	TOTAL	4	5	14	12	5	9	9	6	10	14	20	7	29	7	7	6	2					166		
Salt																									
TO																									

Folha de checagem para registro de defeitos em um tanque usado em uma aplicação aeroespacial.

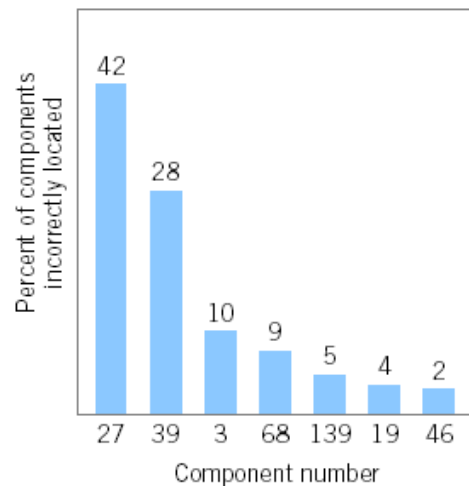
CARTA DE PARETO



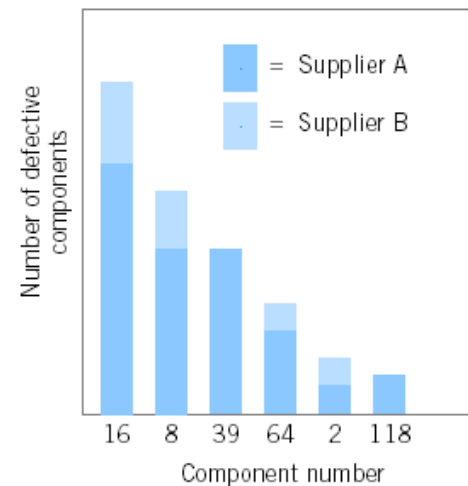
Carta de Pareto dos Dados de Defeito do Tanque

Esta carta é simplesmente uma distribuição de frequência (ou histograma) de dados de atributos organizados por categoria.

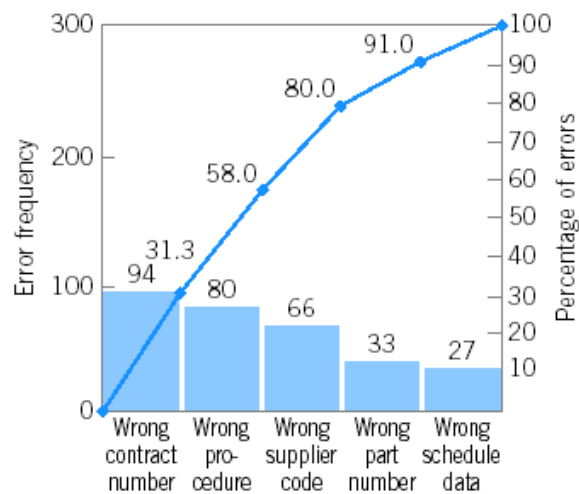
CARTA DE PARETO



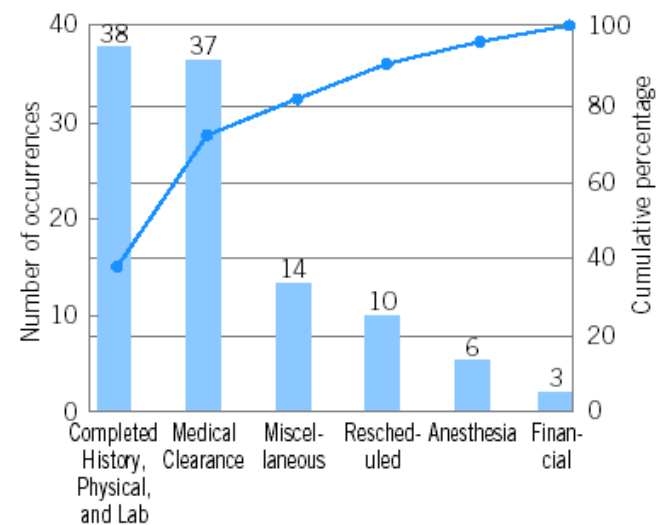
(a)



(b)



(c)



(d)

Vários exemplos de Carta de Pareto

DIAGRAMA DE CAUSA-E-EFEITO

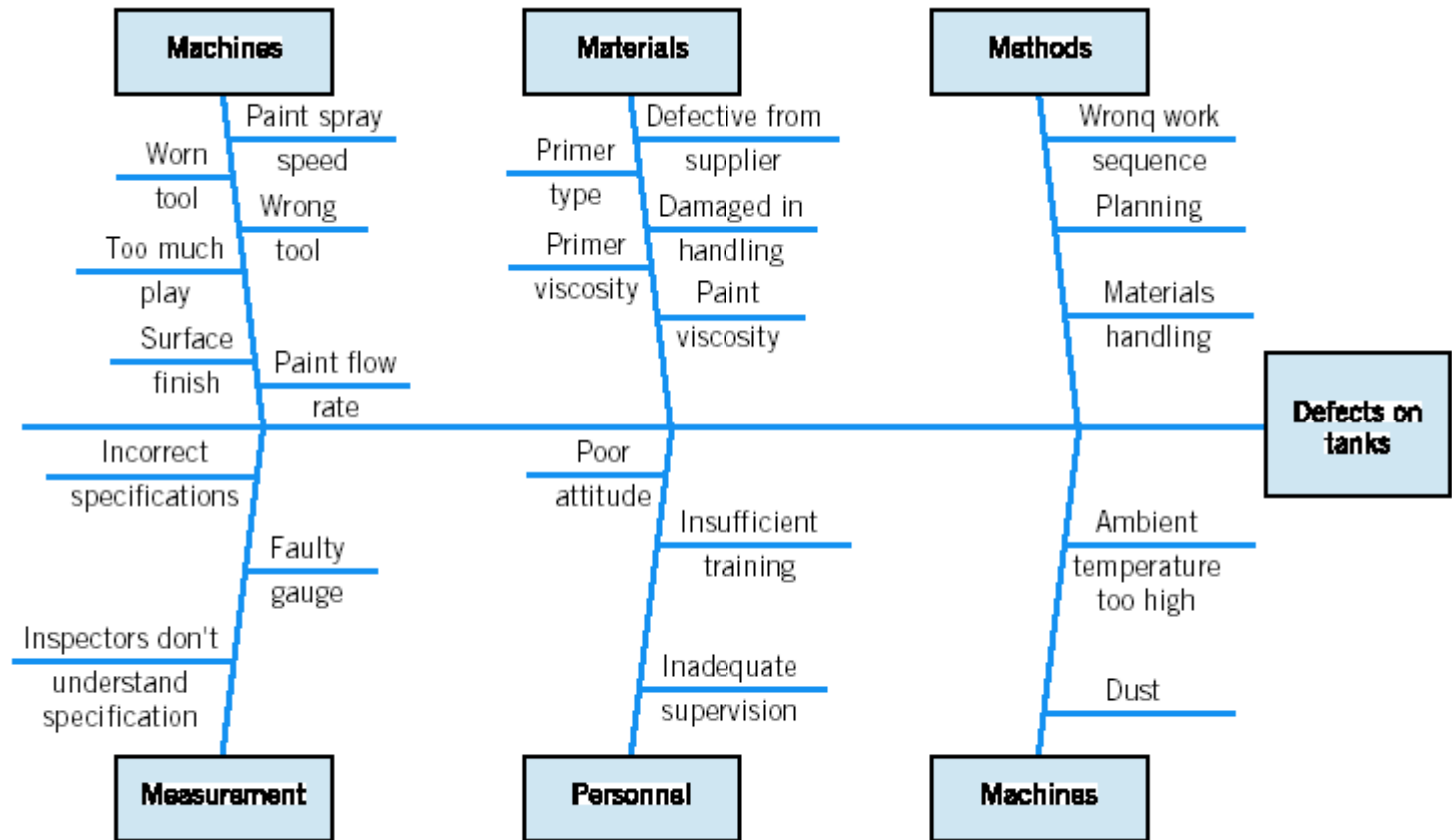
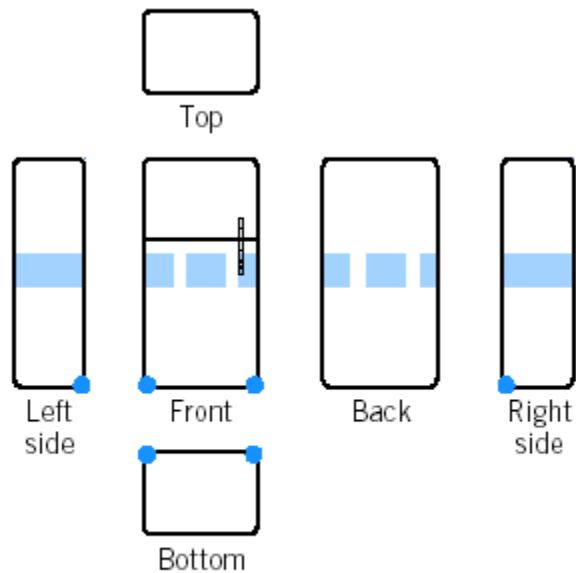


Diagrama de Causa-e-Efeito para o problema de Defeito do Tanque

DIAGRAMA DE CONCENTRAÇÃO DE DEFEITOS



Defeito de acabamento de superfície
em um refrigerador

Tank number _____
Serial number _____

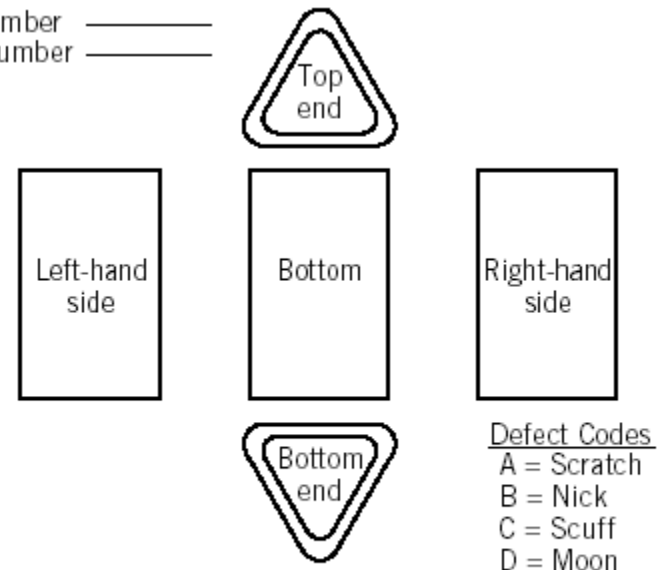


Diagrama de Concentração de Defeito
para o tanque

DIAGRAMA DE ESPALHAMENTO (SCATTER DIAGRAM)

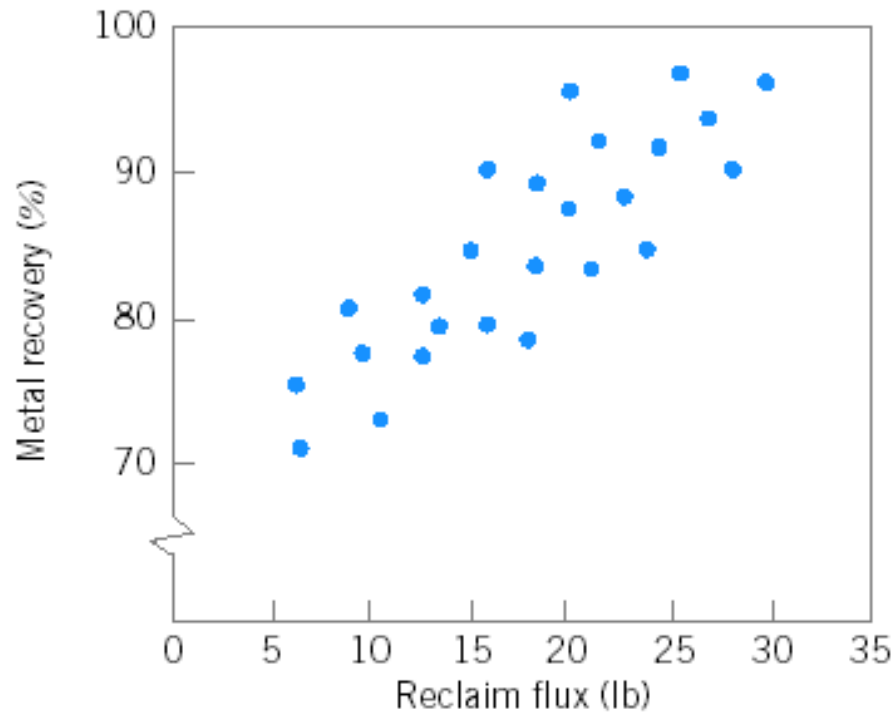


Diagrama de Espalhamento

BIBLIOGRAFIA

1. Douglas C. Montgomery: *Introduction to Statistical Quality Control*, 4th Edition.