

15

Controle Estatístico da Qualidade

ESQUEMA DO CAPÍTULO

15.1 MELHORIA E ESTATÍSTICA DA QUALIDADE

15.2 CONTROLE ESTATÍSTICO DA QUALIDADE

15.3 CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSO

15.4 INTRODUÇÃO AOS GRÁFICOS DE CONTROLE

15.5 GRÁFICOS DE CONTROLE \bar{X} E R OU S

15.6 GRÁFICOS DE CONTROLE PARA MEDIDAS INDIVIDUAIS

15.7 CAPACIDADE DE PROCESSO

15.8 GRÁFICO DE CONTROLE PARA ATRIBUTOS

15.9 DESEMPENHO DO GRÁFICO DE CONTROLE

15.10 GRÁFICOS PODERADOS NO TEMPO

15.11 OUTRAS FERRAMENTAS PARA A SOLUÇÃO DE PROBLEMAS DE CEP

15.12 IMPLEMENTANDO O CEP

Objetivos de Aprendizagem

Após estudo cuidadoso deste capítulo você deverá ser capaz de:

1. Compreender o papel das ferramentas estatísticas na melhoria da qualidade;
2. Compreender os diferentes tipos de variabilidade, subgrupos racionais e como detectar causas atribuídas;
3. Compreender a forma geral do gráfico de controle de Shewhart e como aplicar as regras das zonas (tais como as regras Western Electric) e de análise de padrões para detectar causas atribuídas;
4. Construir e interpretar gráficos de controle de variáveis, tais como gráficos X-barra, R, S e gráficos para medidas individuais;
5. Construir e interpretar gráficos de controle para atributos, tais como gráficos P e U;
6. Calcular e interpretar razão de capacidade de processo;
7. Calcular o desempenho CMC de gráficos de controle de Shewhart;
8. Construir e interpretar gráficos de controle da soma cumulativa e média móvel ponderada exponencialmente;
9. Utilizar as outras ferramentas para resolver problemas de CEP.

15.1 Melhoria e Estatística da Qualidade

- Definições de qualidade:
 - **Qualidade** significa adequação ao uso, determinada através da interação da
 - qualidade do projeto e da
 - qualidade de conformidade;
 - **Qualidade** é inversamente proporcional a variabilidade.

15.1 Melhoria e Estatística da Qualidade

- Melhoria da Qualidade
 - **Melhoria da qualidade** é a redução da variabilidade em processos e produtos;
 - Alternativamente, **melhoria de qualidade** pode também ser vista como “eliminação de resíduos”.

15.1 Melhoria e Estatística da Qualidade

15.1.1 Controle Estatístico da Qualidade (CEQ)

- Campo pode ser definido como:
 - métodos estatísticos e de engenharia usados na
 - medida,
 - monitoramento,
 - controle e
 - melhoria da qualidade;
- Campo relativamente novo (década 1920):
 - Um dos pioneiros,
Dr. Walter A. Shewhart (Bell Telephone Labs);
- Largamente introduzido na II Grande Guerra;
- Os japoneses foram particularmente vitoriosos na sua aplicação.

15.1 Melhoria e Estatística da Qualidade

15.1.2 Controle Estatístico da Processo (CEP)

- CEP é uma coleção de ferramentas cujo uso combinado pode resultar em:
 - estabilidade do processo e
 - redução da variância;
- As **sete principais ferramentas** são:
 1. Histograma
 2. Gráfico de Pareto
 3. Diagrama de causa-e-efeito
 4. Diagrama de defeito-concentração
 5. Gráfico de controle
 6. Diagrama de dispersão
 7. Folha de verificação

15.2 Introdução aos Gráficos de Controle

15.2.1 Princípios Básicos

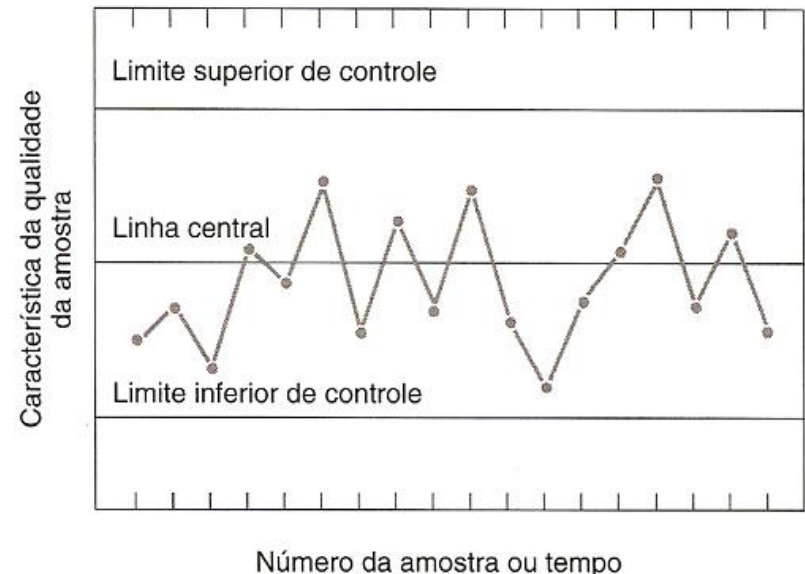
- Um processo que cuja operação esteja sujeita apenas a *causas casuais* (causas comuns) de variação é dito estar em *controle estatístico*;
- Um processo que esteja operando na presença de *causas atribuídas* (causas especiais) é dito estar *fora de controle*;
- O objetivo do CEP é a *eliminação da variabilidade* de um processo (se não sua eliminação, a sua redução ao mínimo possível).

15.2 Introdução aos Gráficos de Controle

15.2.1 Princípios Básicos

- Um gráfico de controle típico possui limites de controle situados em valores que, se o processo estiver sob controle, aproximadamente todos os pontos cairão dentro limite superior de controle (LSC) e do limite inferior de controle (LIC).

Figura 15.1 Gráfico típico de controle



15.2 Introdução aos Gráficos de Controle

15.2.1 Princípios Básicos

- Faça W ser uma *estatística* da amostra que meça alguma característica de controle de interesse e suponha que a média de W seja μ_W e o desvio-padrão σ_W . Então, a linha central, o limite superior de controle e o limite inferior de controle do **gráfico de controle de Shewhart** se tornam

$$\begin{aligned}LSC &= \mu_W + k\sigma_W \\LC &= \mu_W \\LIC &= \mu_W - k\sigma_W\end{aligned}\tag{15.1}$$

sendo:

- k a distância dos limites de controle a partir da linha central, expressa em unidades de desvio-padrão (uma escolha comum é $k=3$).

15.2 Introdução aos Gráficos de Controle

15.2.1 Princípios Básicos

- Usos importantes de um gráfico de controle:
 1. A maioria dos processos *não* operam no estado de controle estatístico;
 2. Consequentemente, o uso rotineiro e cauteloso dos gráficos de controle identificarão causas *atribuídas*, que, se puderem ser eliminadas, resultarão em redução da variabilidade e melhoria do processo;
 3. Um gráfico de controle *apenas* detectará causas atribuídas e a *ação* do gerente, do operador e do engenheiro será necessária para eliminá-las.

15.2 Introdução aos Gráficos de Controle

15.2.1 Princípios Básicos

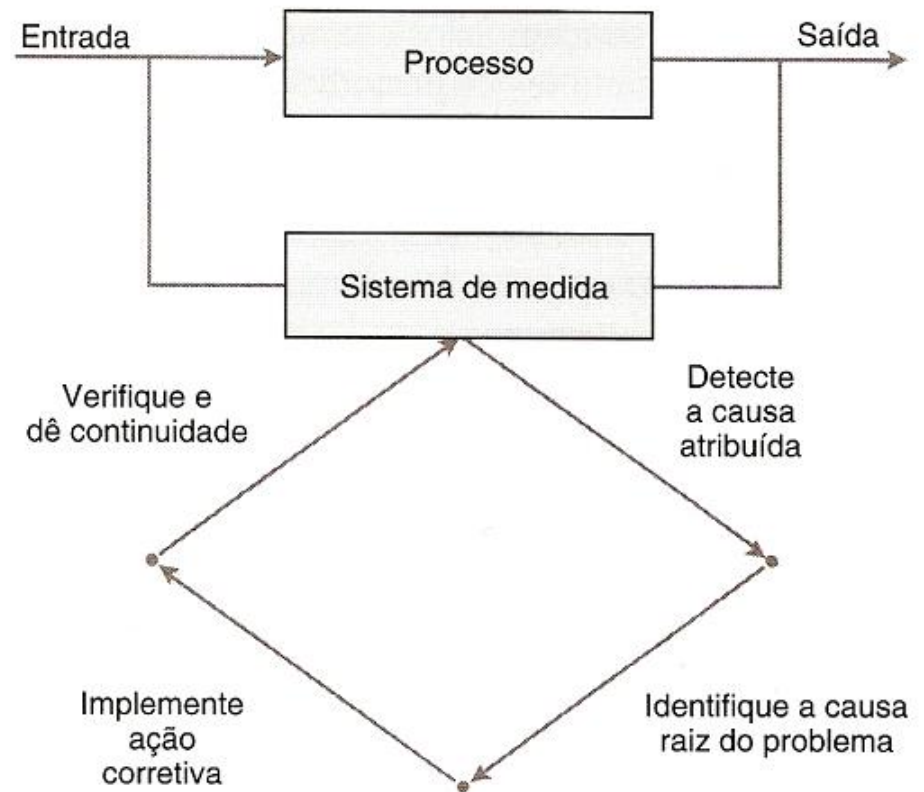


Figura 15.2 Melhoria de processo usando o gráfico de controle

15.2 Introdução aos Gráficos de Controle

15.2.1 Princípios Básicos

- Tipos de gráficos de controle:
 - Gráficos de controle de variáveis
 - Estes gráficos são aplicados a dados que seguem uma distribuição *contínua*;
 - Gráficos de controle para atributos:
 - Estes gráficos são aplicados a dados que seguem uma distribuição *discreta*.

15.2 Introdução aos Gráficos de Controle

15.2.1 Princípios Básicos

- Popularidade dos gráficos de controle:
 1. Gráficos de controle são uma técnica comprovada para melhoria da produtividade;
 2. Gráficos de controle são efetivos na prevenção de defeitos;
 3. Gráficos de controle previnem ajustes desnecessários no processo.
 4. Gráficos de controle fornecem informações sobre diagnóstico;
 5. Gráficos de controle fornecem informações sobre a capacidade de processo.

15.2 Introdução aos Gráficos de Controle

15.2.2 Projeto de um Gráfico de Controle

- Exemplo:
Suponha que temos um processo para o qual assumimos que a média verdadeira seja $\mu = 74$ e que o desvio-padrão seja $\sigma = 0.01$. Amostras de tamanho $n = 5$ são retiradas, fornecendo um desvio-padrão amostral igual a

$$\sigma_{\bar{X}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{0,01}{\sqrt{5}} = 0,0045$$

15.2 Introdução aos Gráficos de Controle

15.2.2 Projeto de um Gráfico de Controle

- Limites de controle podem ser estabelecidos em 3 desvios-padrão a partir da média, para mais e para menos;
- Limites de controle 3-sigma são portanto:

$$LSC = 74 + 3(0,0045) = 74,0135$$

e

$$LIC = 74 - 3(0,0045) = 73,9865$$

15.2 Introdução aos Gráficos de Controle

15.2.2 Projeto de um Gráfico de Controle

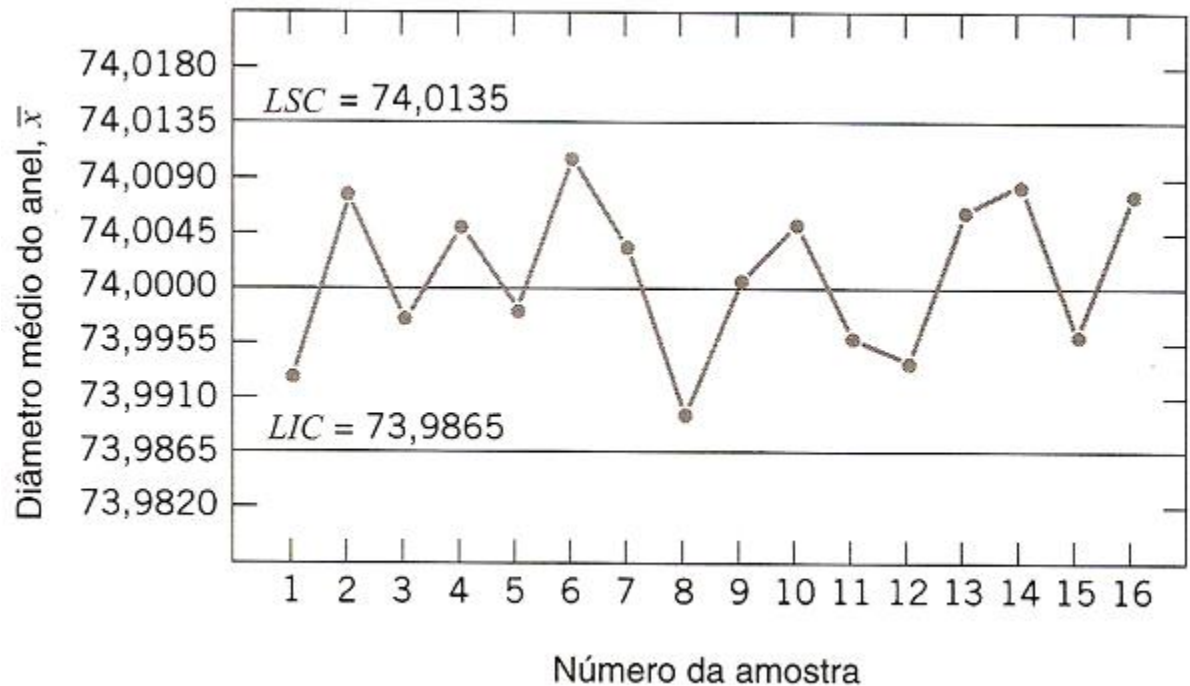


Figura 15.3 Gráfico de controle X-barra, para o diâmetro do anel do pistão

15.2 Introdução aos Gráficos de Controle

15.2.2 Projeto de um Gráfico de Controle

- A escolha dos limites de controle é na realidade equivalente a estabelecer a região crítica para o teste de hipóteses (com $\sigma = 0,01$ conhecido)

$$H_0: \mu = 74$$

$$H_1: \mu \neq 74$$

15.2 Introdução aos Gráficos de Controle

15.2.3 Subgrupos Racionais

- Subgrupos racionais (ou amostras) devem ser selecionados de tal forma que, se causas atribuídas estiverem presente,
 - seja *maximizada* a chance de diferenças *entre* subgrupos enquanto
 - seja *minimizada* a chance de diferenças *dentro* dos subgrupos.

15.2 Introdução aos Gráficos de Controle

15.2.3 Subgrupos Racionais

- Construção de subgrupos racionais
 - Seleção de unidades de produção consecutivas:
 - Provê um instantâneo do processo;
 - Bom para detectar mudanças no nível do processo;
 - Seleção de uma amostra aleatória de toda a saída do processo:
 - Bom para detectar se houve modificação na média;
 - Bom para detectar situações de mudança para o estado “fora de controle” com retorno ao estado “sob controle”.

15.2 Introdução aos Gráficos de Controle

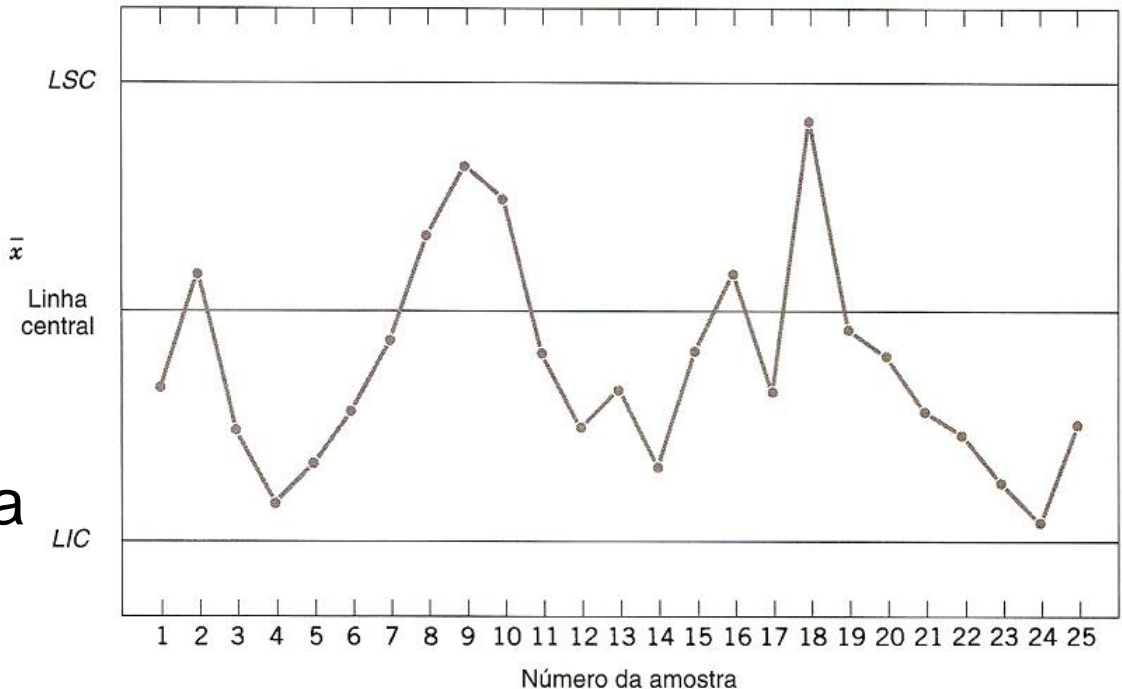
15.2.4 Análise de Padrões de Comportamento para Gráficos de Controle

- Procurar por *corridas*, i.e., uma sequência de observações do mesmo tipo:
 - crescente,
 - decrescente,
 - todas acima da linha média, ou
 - todas abaixo da linha média;
- Corridas de, digamos, 8 observações ou mais são indicação de situações fora de controle.

15.2 Introdução aos Gráficos de Controle

15.2.4 Análise de Padrões de Comportamento para Gráficos de Controle

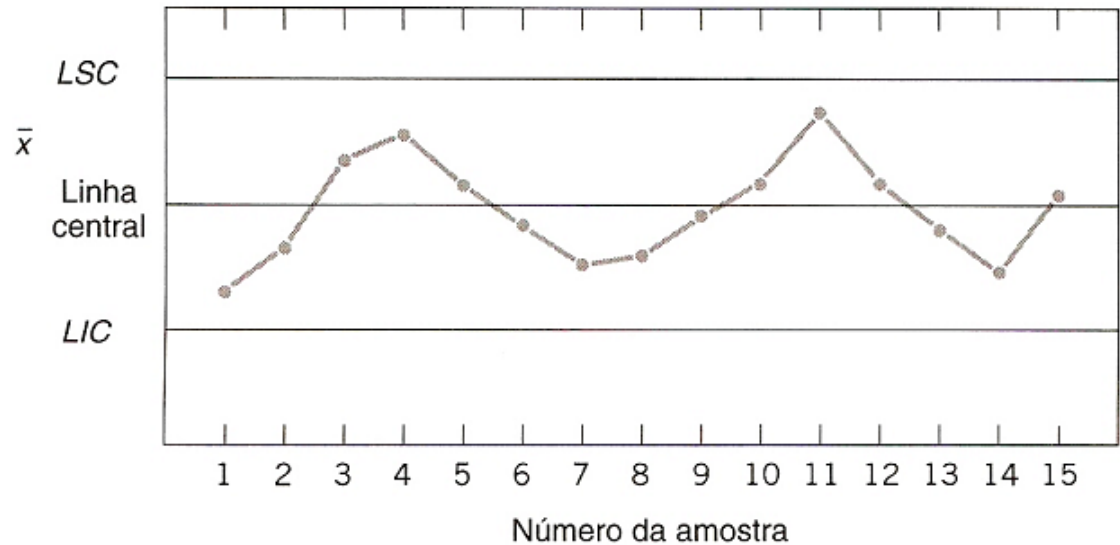
Figura 15.4 Gráfico de controle X-barra com padrão não aleatório na aparência



15.2 Introdução aos Gráficos de Controle

15.2.4 Análise de Padrões de Comportamento para Gráficos de Controle

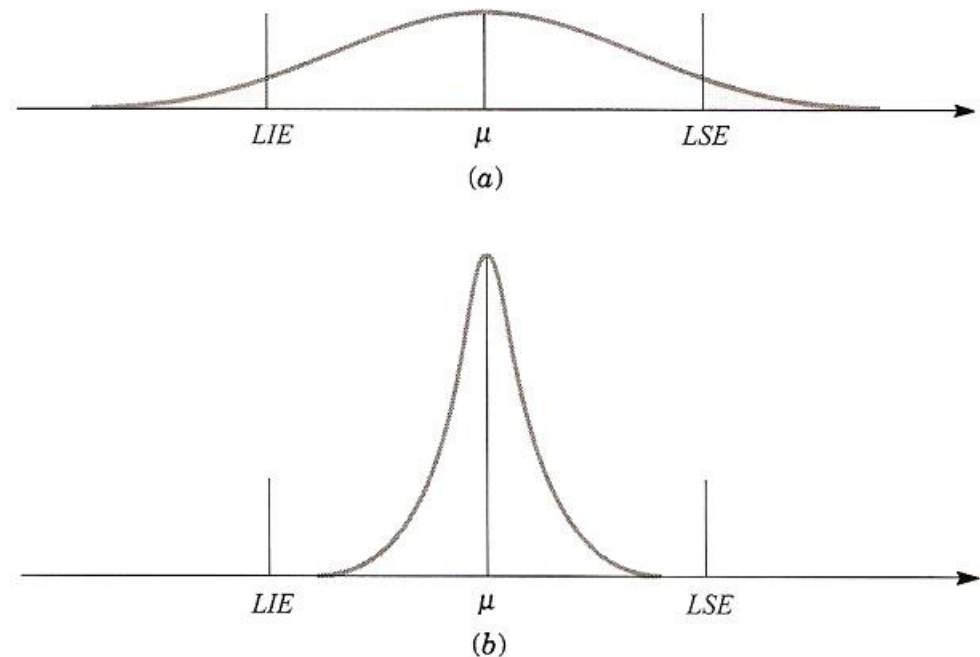
Figura 15.5 Gráfico de controle X-barra com padrão cíclico de comportamento



15.2 Introdução aos Gráficos de Controle

15.2.4 Análise de Padrões de Comportamento para Gráficos de Controle

Figura 15.6 (a) Variabilidade com padrão cíclico de comportamento e (b) variabilidade com o padrão cíclico eliminado



15.2 Introdução aos Gráficos de Controle

15.2.4 Análise de Padrões de Comportamento para Gráficos de Controle

- Regras *Western Electric*

Um processo é considerado fora de controle se qualquer das situações ocorrer:

1. Um ponto cair fora dos limites de 3 sigmas;
2. Dois de três pontos consecutivos caírem além do limite de 2 sigmas;
3. Quatro de cinco pontos consecutivos caírem a uma distância de 1 sigma ou além da linha central;
4. Oito pontos consecutivos caírem em um lado da linha central.

15.2 Introdução aos Gráficos de Controle

15.2.4 Análise de Padrões de Comportamento para Gráficos de Controle

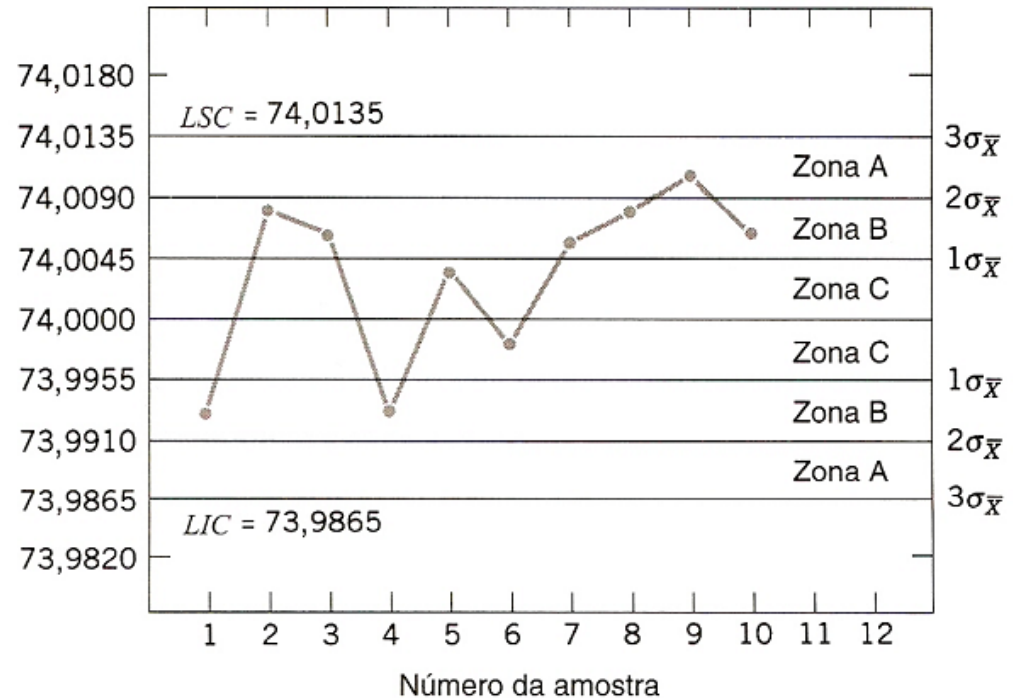


Figura 15.7 As regras das zonas *Western Electric*

15.3 Gráficos de Controle

\bar{X} -R ou \bar{X} -S

- Limites 3 sigma:
$$\text{LSC} = \mu + 3\sigma / \sqrt{n}$$
$$\text{LC} = \mu$$
$$\text{LIC} = \mu - 3\sigma / \sqrt{n}$$
- Média global:
$$\bar{\bar{X}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \bar{X}_i$$
- Amplitude média:
$$\bar{R} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m R_i$$
- Um estimador não-tendencioso para σ :

$$\hat{\sigma} = \frac{\bar{R}}{d_2}$$

15.3 Gráficos de Controle

\bar{X} -R ou \bar{X} -S

- Gráfico \bar{X} (com desvio-padrão estimado pelo \bar{r}):

$$\text{LSC} = \bar{\bar{x}} + A_2 \bar{r}$$

$$\text{LC} = \bar{\bar{x}}$$

$$\text{LIC} = \bar{\bar{x}} - A_2 \bar{r}$$

em que A_2 é tabelada, para vários tamanhos de amostra, na **Tabela XI** do Apêndice;

- O gráfico R:

$$\text{LSC} = D_4 \bar{r}$$

$$\text{LC} = \bar{r}$$

$$\text{LIC} = D_3 \bar{r}$$

em que \bar{r} é a amplitude média da amostra e as constantes D_3 e D_4 são tabeladas, para diversos tamanhos de amostra, na **Tabela XI**.

15.3 Gráficos de Controle

\bar{X} -R ou \bar{X} -S

Tabela XI Fatores para Construir Gráficos de Controle para Variáveis

n^*	Fator para os Limites de Controle						
	Gráfico \bar{X}			Gráfico R		Gráfico S	
	A_1	A_2	d_2	D_3	D_4	c_4	n
2	3,760	1,880	1,128	0	3,267	0,7979	2
3	2,394	1,023	1,693	0	2,575	0,8862	3
4	1,880	0,729	2,059	0	2,282	0,9213	4
5	1,596	0,577	2,326	0	2,115	0,9400	5
6	1,410	0,483	2,534	0	2,004	0,9515	6
7	1,277	0,419	2,704	0,076	1,924	0,9594	7
8	1,175	0,373	2,847	0,136	1,864	0,9650	8
9	1,094	0,337	2,970	0,184	1,816	0,9693	9
10	1,028	0,308	3,078	0,223	1,777	0,9727	10
11	0,973	0,285	3,173	0,256	1,744	0,9754	11
12	0,925	0,266	3,258	0,284	1,716	0,9776	12
13	0,884	0,249	3,336	0,308	1,692	0,9794	13
14	0,848	0,235	3,407	0,329	1,671	0,9810	14
15	0,816	0,223	3,472	0,348	1,652	0,9823	15
16	0,788	0,212	3,532	0,364	1,636	0,9835	16
17	0,762	0,203	3,588	0,379	1,621	0,9845	17
18	0,738	0,194	3,640	0,392	1,608	0,9854	18
19	0,717	0,187	3,689	0,404	1,596	0,9862	19
20	0,697	0,180	3,735	0,414	1,586	0,9869	20
21	0,679	0,173	3,778	0,425	1,575	0,9876	21
22	0,662	0,167	3,819	0,434	1,566	0,9882	22
23	0,647	0,162	3,858	0,443	1,557	0,9887	23
24	0,632	0,157	3,895	0,452	1,548	0,9892	24
25	0,619	0,153	3,931	0,459	1,541	0,9896	25

* $n > 25$: $A_1 = 3/\sqrt{n}$, sendo n = número de observações na amostra.

15.3 Gráficos de Controle

\bar{X} -R ou \bar{X} -S

- Exemplo:** Uma peça componente de um motor de avião a jato é fabricada por um processo de fundição do invólucro. A abertura do rotor nessa fundição é um importante parâmetro funcional da peça. Ilustraremos o uso de gráficos de controle \bar{X} e R para verificar a estabilidade estatística desse processo. A Tabela 16.1 apresenta 20 amostras de cinco peças cada uma. Os valores dados na tabela foram codificados pelo uso dos três últimos dígitos da dimensão, isto é, o valor 31,6 *deve* ser 0,50316 polegada.

Tabela 16.1 Medidas de Abertura do Rotor

Número da Amostra	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	\bar{x}	r
1	33	29	31	32	33	31,6	4
2	33	31	35	37	31	33,4	6
3	35	37	33	34	36	35,0	4
⋮							
19	25	27	34	27	28	28,2	9
20	35	35	36	33	30	33,8	6
						$\bar{\bar{x}} = 33,32$	$\bar{r} = 5,8$

15.3 Gráficos de Controle

\bar{X} -R ou \bar{X} -S

- Exemplo (cont.):

As quantidades $\bar{\bar{x}} = 33,3$ e $\bar{r} = 5,8$ são mostradas na parte inferior da Tabela 16.1. O valor de A_2 para amostras de tamanho 5 é $A_2 = 0,577$. Então, os limites tentativas de controle para o gráfico \bar{X} são

$$\bar{\bar{x}} \pm A_2 \bar{r} = 33,32 \pm (0,577)(5,8) = 33,32 \pm 3,35$$

ou

$$LSC = 36,67$$

$$LIC = 29,97$$

Para o gráfico R , os limites tentativas de controle são

$$LSC = D_4 \bar{r} = (2,115)(5,8) = 12,27$$

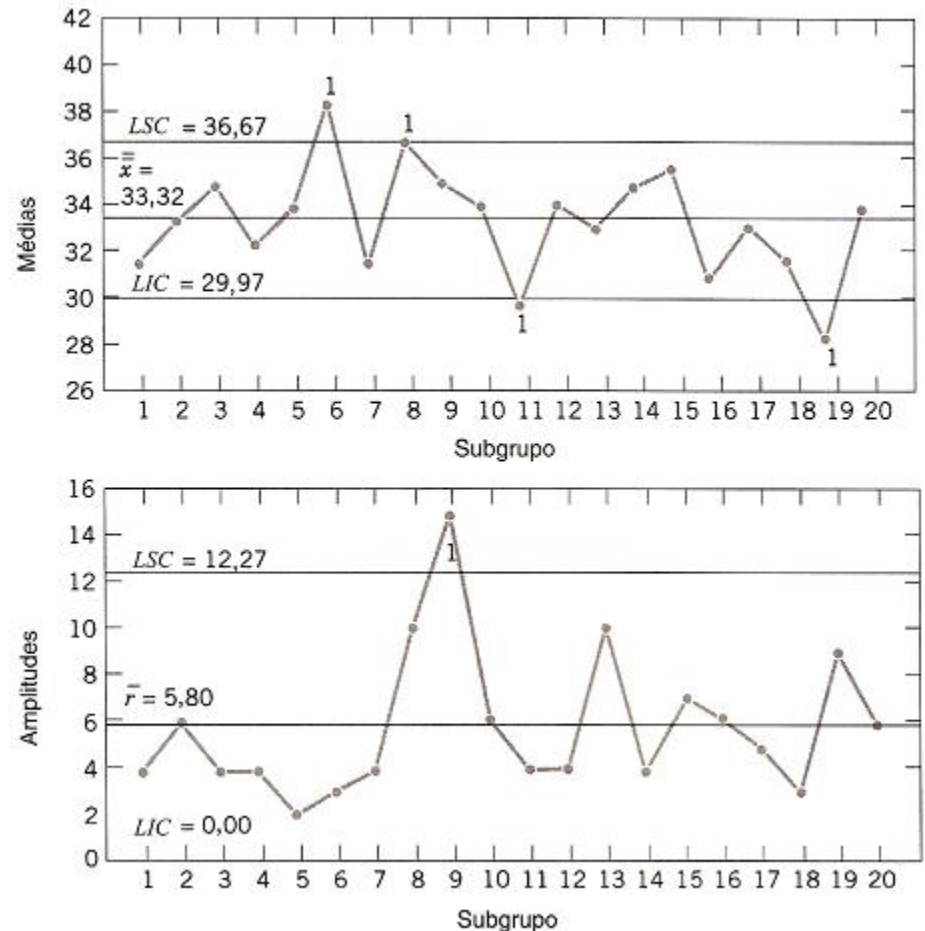
$$LIC = D_3 \bar{r} = (0)(5,8) = 0$$

15.3 Gráficos de Controle

\bar{X} -R ou \bar{X} -S

- Exemplo (cont.):

Figura 15.8 Gráficos de controle \bar{X} e R para a abertura do rotor



15.3 Gráficos de Controle

\bar{X} -R ou \bar{X} -S

- Exemplo (cont.):

Os gráficos de controle \bar{X} e R com esses limites tentativas de controle são mostrados na Fig. 16.8. Note que as amostras 6, 8, 11 e 19 estão fora de controle no gráfico \bar{X} , e que a amostra 9 está fora de controle no gráfico R . (Esses pontos estão marcados com um “1” porque eles violam a primeira regra *Western Electric*.) Suponha que todas essas causas atribuídas existam por causa de uma ferramenta defeituosa na área de moldagem de cera. Devemos descartar essas cinco amostras e recalculer os limites para os gráficos \bar{X} e R . Esses novos limites revistos são, para o gráfico \bar{X} ,

$$LSC = \bar{\bar{x}} + A_2\bar{r} = 33,21 + (0,577)(5,0) = 36,10$$

$$LIC = \bar{\bar{x}} - A_2\bar{r} = 33,21 - (0,577)(5,0) = 30,33$$

e para o gráfico R ,

$$LSC = D_4\bar{r} = (2,115)(5,0) = 10,57$$

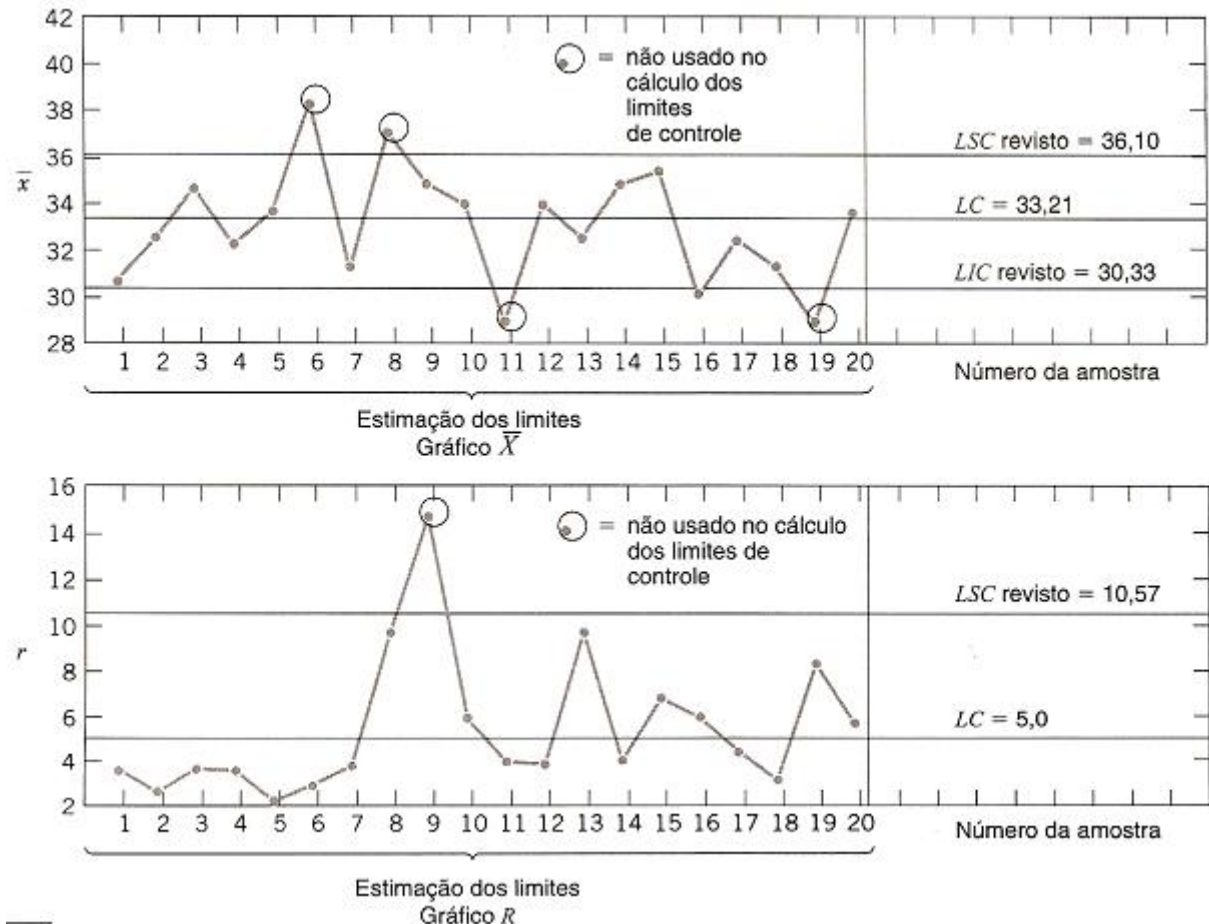
$$LIC = D_3\bar{r} = (0)(5,0) = 0$$

15.3 Gráficos de Controle

\bar{X} -R ou \bar{X} -S

- Exemplo (final):

Figura 15.10 Gráficos de controle \bar{X} e R para a abertura do rotor, **limites revistos**



15.4 Gráficos de Controle para Medidas Individuais

- A *amplitude móvel* (AM) é definida como a diferença absoluta entre duas observações sucessivas:

$$AM_i = |X_i - X_{i-1}|$$

que indicará possíveis mudanças ou desvios de uma observação para outra.

15.4 Gráficos de Controle para Medidas Individuais

- E se o tamanho da amostra *não* pode ser maior que 1 ($n = 1$)? Exemplos:
 - Tecnologia de inspeção e medição automatizada e *toda* unidade produzida é analisada;
 - A taxa de produção é muito baixa e é *inconveniente* o acúmulo das amostras de $n > 1$ antes da análise;
 - Medições repetidas do processo diferem apenas devido a *erros* de laboratório ou de análise, como ocorrem em muitos processos químicos;
- Gráficos de controle para medidas individuais são *úteis* para amostras de tamanho $n = 1$.

15.4 Gráficos de Controle para Medidas Individuais

- Definição:

A linha central e os limites superior e inferior de controle para o gráfico de controle para as medidas individuais são

$$\begin{aligned}LSC &= \bar{x} + 3 \frac{\overline{am}}{d_2} = \bar{x} + 3 \frac{\overline{am}}{1,128} \\LC &= \bar{x} \\LIC &= \bar{x} - 3 \frac{\overline{am}}{d_2} = \bar{x} - 3 \frac{\overline{am}}{1,128}\end{aligned}\tag{15.9}$$

e para o gráfico de controle para amplitudes móveis

$$\begin{aligned}LSC &= D_4 \overline{am} = 3,267 \overline{am} \\LC &= \overline{am} \\LIC &= D_3 \overline{am} = 0\end{aligned}$$

15.4 Gráficos de Controle para Medidas Individuais

- Exemplo:

A Tabela 15.3 mostra 20 observações da concentração na saída de um processo químico. As observações são retiradas em intervalos de uma hora. Se várias observações forem retiradas ao mesmo tempo, a leitura da concentração observada diferirá somente por causa do erro de medida. Uma vez que o erro de medida é pequeno, somente uma observação é retirada a cada hora.

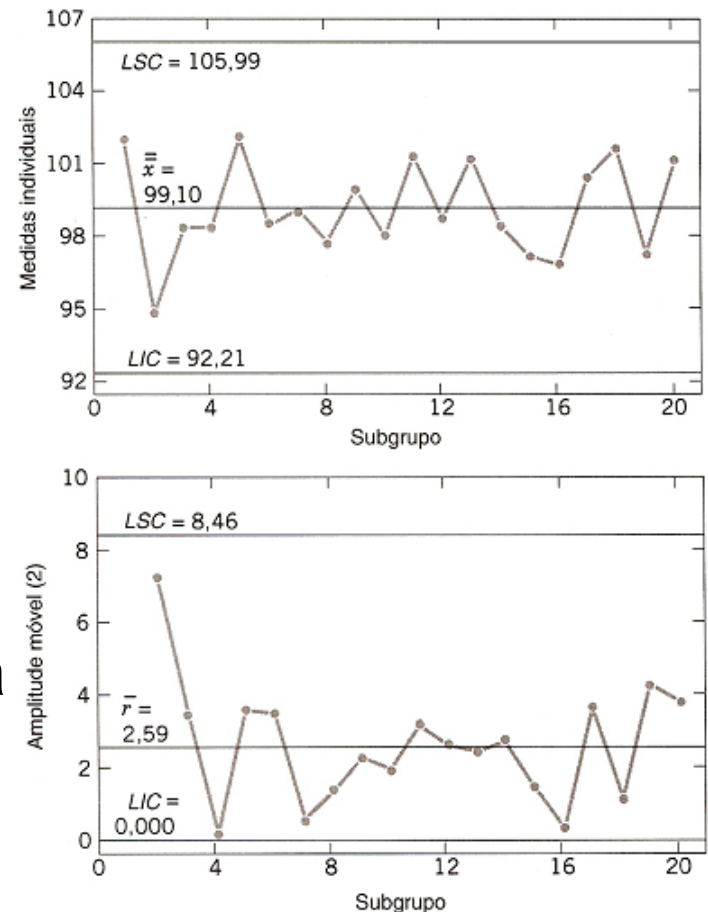
Observação	Concentração x	Amplitude Móvel am
1	102,0	
2	94,8	7,2
3	98,3	3,5
19	97,2	4,2
20	101,0	3,8
	$\bar{x} = 99,1$	$\overline{am} = 2,59$

Tabela 15.3 Medidas de concentrações do processo químico

15.4 Gráficos de Controle para Medidas Individuais

- Exemplo (final):

Figura 15.11 Gráficos de controle para medidas individuais e para a amplitude móvel, para os dados da concentração do processo químico no exemplo



15.4 Gráficos de Controle para Medidas Individuais

- Interpretação dos gráficos:
 - Os gráficos X *podem* ser interpretados como os gráficos \bar{X} ;
 - Os gráficos AM *não podem* ser interpretados da mesma forma que gráficos \bar{X} ou R;
 - Uma vez que há “correlação” entre os dados apresentados nos gráficos AM, *não faz sentido* procurar por padrões;
 - Gráficos AM na verdade *não fornecem* informações úteis sobre a variabilidade do processo;
 - *Maior ênfase* deve ser colocada na interpretação do gráfico X.

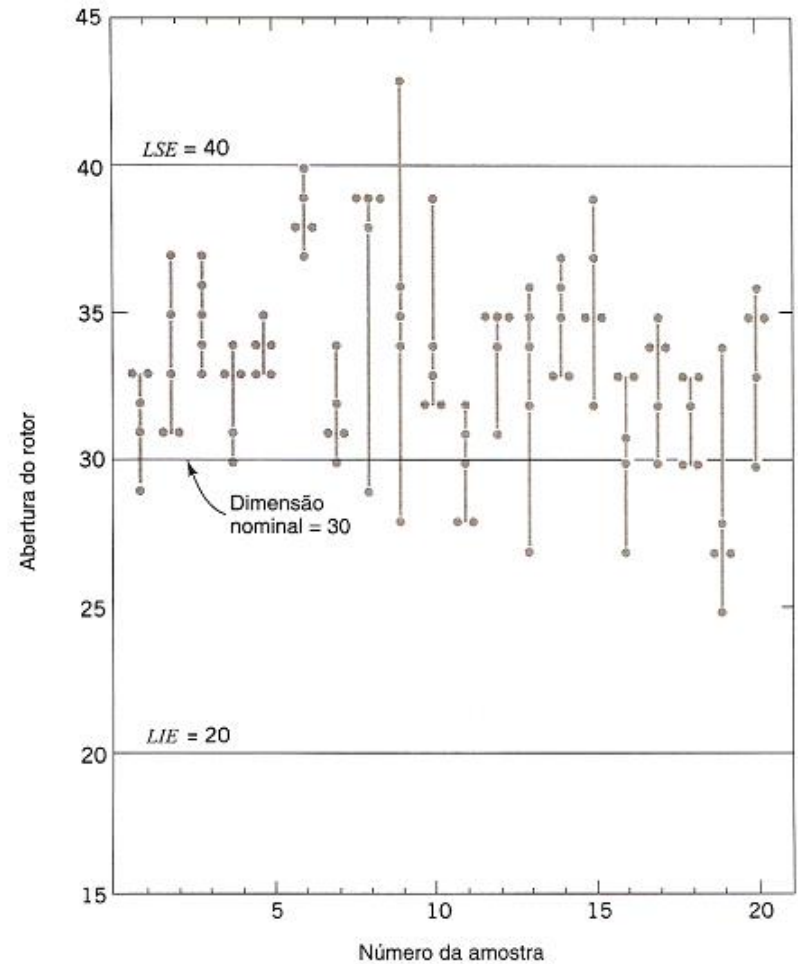
15.5 Capacidade de Processo

- *Capacidade de processo* refere-se ao desempenho do processo quando opera sob controle estatístico;
- *Duas* ferramentas gráficas são úteis para estimar a capacidade de processo:
 - gráfico de tolerância (ou gráfico de amarração);
 - histograma.

15.5 Capacidade de Processo

- Gráfico de tolerância:

Figura 15.12 Diagrama de tolerância das aberturas do rotor



15.5 Capacidade de Processo

- Histograma:

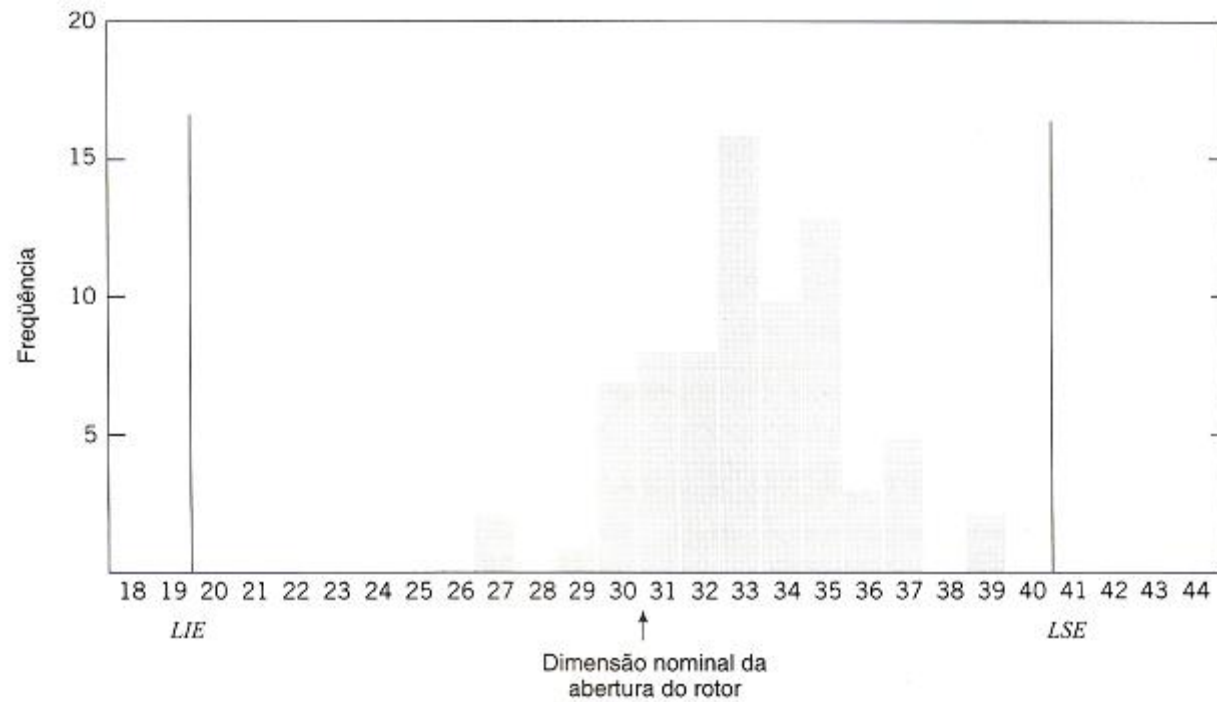


Figura 15.13

Histograma para a abertura do rotor

15.5 Capacidade de Processo

- Definição de RCP :

A razão da capacidade de processo (RCP) é

$$RCP = \frac{LSE - LIE}{6\sigma} \quad (15.10)$$

- RCP_k :

$$RCP_k = \min \left[\frac{LSE - \mu}{3\sigma}, \frac{\mu - LIE}{3\sigma} \right] \quad (15.11)$$

15.5 Capacidade de Processo

- Exemplo:

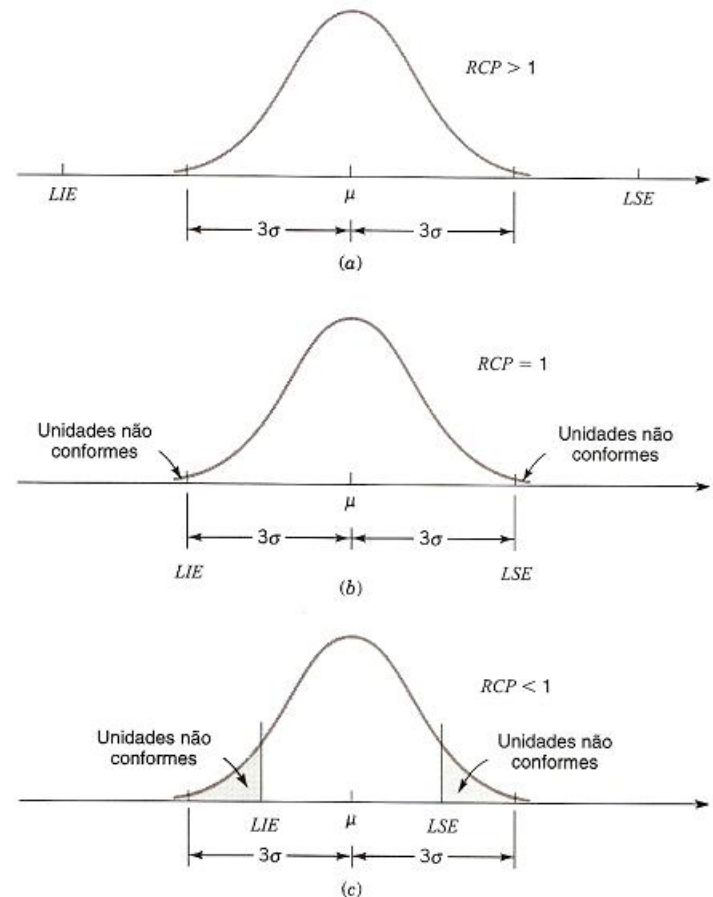


Figura 15.14 Fração não conforme do processo e razão da capacidade de processo (RCP)

15.6 Gráficos de Controle para Atributos

15.6.1 Gráfico P (Gráfico de Controle de Proporções)

Definição

A linha central e os limites superior e inferior de controle para o gráfico P são

$$LSC = \bar{p} + 3 \sqrt{\frac{\bar{p}(1 - \bar{p})}{n}}$$

$$LC = \bar{p}$$

$$LIC = \bar{p} - 3 \sqrt{\frac{\bar{p}(1 - \bar{p})}{n}} \quad (15.14)$$

sendo \bar{p} o valor observado da fração defeituosa média.

15.6 Gráficos de Controle para Atributos

15.6.1 Gráfico *P* (Gráfico de Controle de Proporções)

- Exemplo:

Suponha que desejemos construir um gráfico de controle da fração defeituosa para uma linha de produção de substrato cerâmico. Temos 20 amostras preliminares, cada uma de tamanho 100; o número dos defeitos em cada amostra é apresentado na Tabela 15.4. Considere que as amostras sejam numeradas na seqüência de produção. Note que $\bar{p} = (800/2.000) = 0,40$; logo, os parâmetros tentativas para o gráfico de controle são

Tabela 15.4 Número de defeitos em amostras de 100 substratos cerâmicos

Amostra	N.º de Defeitos	Amostra	N.º de Defeitos
1	44	11	36
2	48	12	52
3	32	13	35
4	50	14	41
5	29	15	42
6	31	16	30
7	46	17	46
8	52	18	38
9	44	19	26
10	48	20	30

$$LSC = 0,40 + 3 \sqrt{\frac{(0,40)(0,60)}{100}} = 0,55$$

$$LC = 0,40$$

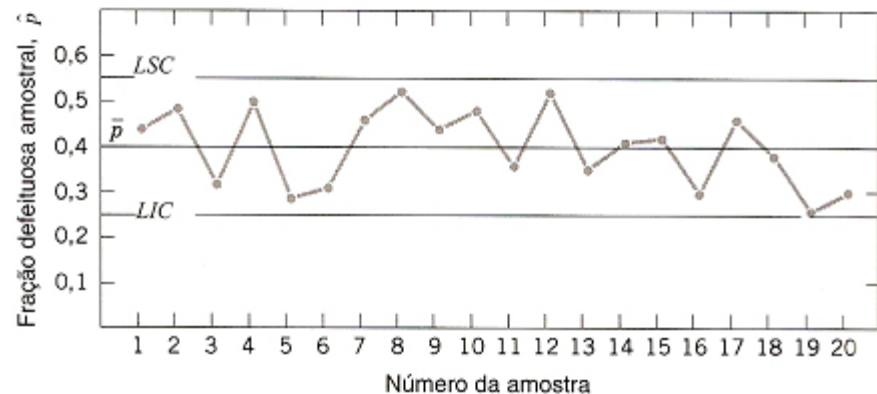
$$LIC = 0,40 - 3 \sqrt{\frac{(0,40)(0,60)}{100}} = 0,25$$

15.6 Gráficos de Controle para Atributos

15.6.1 Gráfico P (Gráfico de Controle de Proporções)

- Exemplo (final):
O gráfico de controle é mostrado na Fig. 15.16. *Todas* as amostras estão *sob controle*.
Se elas não estivessem, procuraríamos as causas atribuídas de variação e revisariamos os limites.
Esse gráfico pode ser usado para controlar a produção futura.

Figura 15.16 Gráfico P para o substrato cerâmico



15.6 Gráficos de Controle para Atributos

15.6.2 Gráfico U (Gráfico de Controle para Defeitos por Unidade)

Definição

A linha central e os limites superior e inferior de controle para o gráfico U são

$$\begin{aligned}LSC &= \bar{u} + 3 \sqrt{\frac{\bar{u}}{n}} \\LC &= \bar{u} \\LIC &= \bar{u} - 3 \sqrt{\frac{\bar{u}}{n}}\end{aligned}\tag{15.16}$$

sendo \bar{u} o número médio de defeitos por unidade.

15.6 Gráficos de Controle para Atributos

15.6.2 Gráfico U (Gráfico de Controle para Defeitos por Unidade)

- Exemplo:

Placas de circuito impresso são montadas por uma combinação de montagem manual e automática. Uma máquina de soldagem contínua é usada para fazer as conexões mecânicas e elétricas dos componentes de chumbo na placa. Essas placas são passadas, quase continuamente, através do processo de soldagem e, a cada hora, cinco placas são selecionadas e inspecionadas para finalidades de controle de processo. O número de defeitos em cada amostra de cinco placas é anotado. Os resultados para 20 amostras são mostrados na Tabela 15.5.

15.6 Gráficos de Controle para Atributos

15.6.2 Gráfico U (Gráfico de Controle para Defeitos por Unidade)

- Exemplo (cont.):

Tabela 15.5 Número de defeitos nas amostras de cinco placas de circuito impresso

Amostra	Número de Defeitos	Defeitos por Unidade u_i	Amostra	Número de Defeitos	Defeitos por Unidade u_i
1	6	1,2	11	9	1,8
2	4	0,8	12	15	3,0
3	8	1,6	13	8	1,6
4	10	2,0	14	10	2,0
5	9	1,8	15	8	1,6
6	12	2,4	16	2	0,4
7	16	3,2	17	7	1,4
8	2	0,4	18	1	0,2
9	3	0,6	19	7	1,4
10	10	2,0	20	13	2,6

15.6 Gráficos de Controle para Atributos

15.6.2 Gráfico U (Gráfico de Controle para Defeitos por Unidade)

- Exemplo (cont.): A linha central para o gráfico U é

$$\bar{u} = \frac{1}{20} \sum_{i=1}^{20} u_i = \frac{32}{20} = 1,6$$

e os limites superior e inferior de controle são

$$LSC = \bar{u} + 3 \sqrt{\frac{\bar{u}}{n}} = 1,6 + 3 \sqrt{\frac{1,6}{5}} = 3,3$$

$$LIC = \bar{u} - 3 \sqrt{\frac{\bar{u}}{n}} = 1,6 - 3 \sqrt{\frac{1,6}{5}} < 0$$

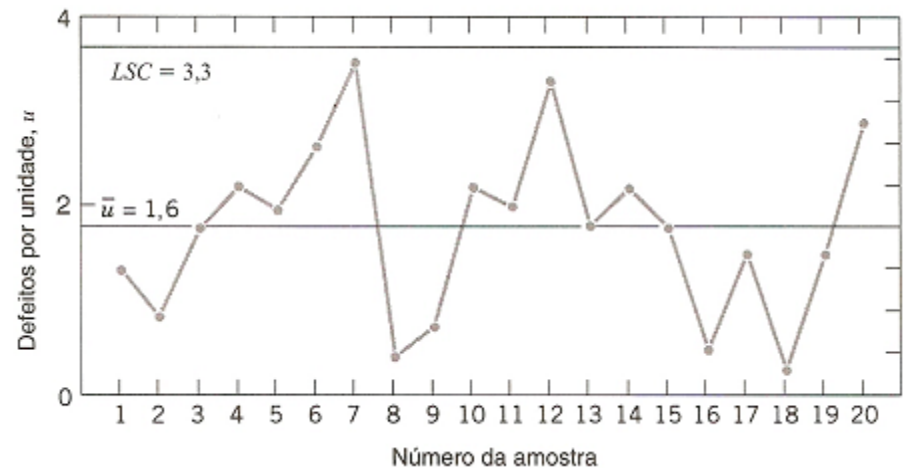
Qualidade

15.6 Gráficos de Controle para Atributos

15.6.2 Gráfico U (Gráfico de Controle para Defeitos por Unidade)

- Exemplo (cont.):

Figura 15.17 Gráfico U de defeitos por unidade nas placas de circuito impresso



15.7 Desempenho do Gráfico de Controle

- **Comprimento Médio de Corrida**

- O comprimento médio de corrida (CMC) é uma forma bastante efetiva de avaliar as decisões em relação ao tamanho e à frequência de amostragem;
- Seja p a probabilidade de que qualquer ponto exceda os limites de controle. Então

$$\text{CMC} = \frac{1}{p}.$$

- **Exemplo:**

Para um gráfico \bar{X} , como limites 3σ , $p=0,0027$ é a probabilidade que um ponto caia fora dos limites de controle, quando na realidade estiver sob controle.

Logo:

$$\text{CMC} = \frac{1}{p} = \frac{1}{0,0027} \cong 370.$$

TERMOS E CONCEITOS IMPORTANTES

CMC	<i>RCP</i>	Gráfico R	qualidade
Causas atribuídas	RCP_k	Subgrupo racional	Alarme falso
Gráficos de controle para atributos	Linha central	Corrida	Gráfico de controle para proporção
Comprimento médio de corrida	Causas casuais	Gráficos de controle de Shewhart	Gráfico de controle para medidas individuais
Gráfico U	Limites de controle	Processo seis-sigma	Regras <i>Western Electric</i>
Amplitude móvel	Capacidade de processo	Limites de especificação	
Gráfico NP	Razão da capacidade de processo	Controle estatísticos de processos (CEP)	
Gráfico P	Controle de qualidade	Controle estatístico de	Gráfico Xbarra