

APLICAÇÃO DO CONTROLE ESTATÍSTICO DO PROCESSO

por

ESTELA MARI PIVETA POZZOBON

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Maria (RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de MESTRE EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO.

Santa Maria, RS – Brasil

2001

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA

CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO

A COMISSÃO EXAMINADORA, ABAIXO ASSINADA, APROVA A
DISSERTAÇÃO

APLICAÇÃO DO CONTROLE ESTATÍSTICO DO PROCESSO

ELABORADA POR
ESTELA MARI PIVETA POZZOBON

COMO REQUISITO PARCIAL PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Adriano Mendonça de Souza – Orientador

Prof. Dr. Luis Felipe Dias Lopes

Santa Maria, 21 de dezembro de 2001.

DEDICO

Ao meu filho Eugênio,
que nasceu durante a realização deste trabalho.

Por não ter dedicado o tempo que deveria,
dedico este trabalho,
com todo meu amor.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Adriano Mendonça de Souza, pela eficiente orientação deste trabalho e ainda pela maneira que soube conduzi-lo, bem como pelo relacionamento e amizade compartilhada.

Ao professores: Dr. Luis Felipe Dias Lopes e Dr. XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX, pela participação na banca examinadora e pelas sugestões dadas ao trabalho.

Ao engenheiro civil Marco Antonio Pozzobon, pela disponibilidade dos dados e ainda pelo tempo que se dispôs a esclarecer todas as dúvidas.

À colega e também professora M. Sc. Luciane Jacobi Flores que muito colaborou na realização deste trabalho, principalmente no período em que cursamos as disciplinas do curso.

Aos demais colegas e amigos que contribuíram para o término do curso, cujos nomes não menciono aqui por falta de espaço.

Aos meus pais e minhas irmãs que incentivaram minha caminhada, contribuindo de várias formas, principalmente por ajudar nos primeiros cuidados com meu filho.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	<i>iv</i>
LISTA DE FIGURAS	<i>viii</i>
LISTA DE TABELAS	<i>x</i>
LISTA DE ANEXOS	<i>xi</i>
LISTA DE SIGLAS	<i>xii</i>
LISTA DE SÍMBOLOS	<i>xiii</i>
RESUMO	<i>xvi</i>
ABSTRACT	<i>xviii</i>

CAPÍTULO I

1. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO	1
1.1 Introdução	1
1.2 Justificativa e Importância do Trabalho	4
1.3 Objetivos do Trabalho	5
1.3.1 Objetivo Geral	5
1.3.2 Objetivos Específicos	5
1.4 Estrutura do Trabalho	5

CAPÍTULO II

2. REVISÃO DA LITERATURA	7
2.1 Introdução	7
2.2 Histórico do Controle de Qualidade	7
2.3 Conceitos de Processo e de Variação	10
2.4 Controle Estatístico do Processo (CEP)	15

2.4.1 Gráficos de Controle	17
2.4.2 Tipos de Gráficos de Controle	19
2.4.3 Gráfico de Controle para Média (<i>X-barra</i>) e Amplitude (<i>R</i>)	23
2.4.4 Construção do Gráfico da Média (<i>X-barra</i>) e Desvio Padrão (<i>S</i>)	31
2.4.5 Interpretação dos Gráficos da Média <i>X-barra</i>	35
2.4.6 Alguns Aspectos Importantes na Construção e Utilização dos Gráficos de Média <i>X-barra</i>	39
2.4.7 Gráfico de Controle EWMA	41
2.4.7.2 Procedimento para a construção do gráfico EWMA	43
2.4.8 Escolha do Valor dos Parâmetros do Gráfico EWMA	52

CAPÍTULO III

3. GRÁFICOS DE CONTROLE COMBINADOS EWMA-SHEWHART (CES)	57
3.1 Introdução	57
3.2 Construindo o Gráfico de Controle Combinado EWMA-Shewhart	59
3.2.1 Etapas para a Construção do Gráfico de Controle Combinado	60

CAPÍTULO IV

4. ANÁLISE DOS GRÁFICOS DE CONTROLE ESTATÍSTICO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO – CONCRETO DOSADO EM CENTRAL	63
4.1 Introdução	63

4.2 Concreto Dosado em Central – A Busca da Qualidade	65
4.3 Amostragem do Concreto	69
4.4 Bombeamento: Uma Grande Solução no Transporte de Concreto	71
4.5 Rompimento dos Corpos de Prova e Análise dos Resultados	74
4.6 Controle da Qualidade	75
4.7 Análise dos Gráficos de Controle Estatístico	76
 CAPÍTULO V	
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	90
5.1 Conclusões	90
5.2 Recomendações	92

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – Representação de um processo produtivo. (Montgomery, 1991, p.12).	11
FIGURA 2 – Estabilidade do processo estatístico (Werkema, 1995b, p.118).	13
FIGURA 3 – A necessidade de controlar a média e a variabilidade do processo (Bartmann, 1986, p.42).	14
FIGURA 4 – Exemplo de gráficos de controle X-barra, sendo: (I) processo fora de controle; (II) processo sob controle.	18
FIGURA 5 – Processo considerado sob controle estatístico.	36
FIGURA 6 – Gráfico de Controle de Shewhart com os limites de controle.	37
FIGURA 7 – Configurações que indicam processo considerado fora de controle.	39
FIGURA 8 – Representação do processo recursivo EWMA.	44
FIGURA 9 – Gráfico mostra o decréscimo do peso por tempo de tomada da média da amostra.	46
FIGURA 10 – Gráfico EWMA para valores individuais (Saccucci, 2000).	52
FIGURA 11 – Moderna Central Dosadora de Concreto (ABESC, 2000).	66

FIGURA 12 – Procedimento de moldagem dos corpos de prova.	71
FIGURA 13 – Autobomba dotada de lança de distribuição para lançamento do concreto em grandes quantidades e a grandes distâncias.	72
FIGURA 14 – Gráfico X-barra para concreto bombeável de resistência característica = 15,0 MPa (MB1/4).	78
FIGURA 15 – Gráfico EWMA para concreto bombeável de resistência característica = 15,0 MPa (MB1/4), sendo $\lambda = 0,05$ e $L = 2,50$	80
FIGURA 16 – Gráfico X-barra para concreto bombeável de resistência característica = 15,0 MPa (MB2/4).	81
FIGURA 17 – Gráfico EWMA para concreto bombeável de resistência característica = 15,0 MPa (MB2/4), sendo $\lambda = 0,05$ e $L = 2,50$	82
FIGURA 18 – Gráfico X-barra para concreto bombeável de resistência característica = 18,0 MPa (MB1/6).	83
FIGURA 19 – Gráfico EWMA para concreto bombeável de resistência característica = 18,0 MPa (MB1/6), sendo $\lambda = 0,05$ e $L = 2,50$	84
FIGURA 20 – Gráfico X-barra para concreto bombeável de resistência característica = 20,0 MPa (MB1/7).	86
FIGURA 21 – Gráfico EWMA para concreto bombeável de resistência característica = 20,0 MPa (MB1/7), sendo $\lambda = 0,05$ e $L = 2,50$	87

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Tipos de gráficos de controle e suas respectivas medidas.	22
TABELA 2 – Concretos dosados em central e comumente utilizados.	69
TABELA 3 – Misturas usadas para confeccionar cada traço utilizado na avaliação dos produtos.	77

LISTA DE ANEXOS

Anexo A – Fatores para o cálculo dos limites de controle (3σ) para os gráficos: \bar{X} , R e S93
Anexo B – Valores de ARL combinado para diversos valores de L , λ e deslocamentos da média em termos de desvios padrões para o gráfico <i>EWMA</i>94
ANEXO C – Solução ótima para $ARL_0 = 300$98
ANEXO D – ARLs and CDFs for the $ARMA(p, q)$ Process with Trend Shifts.99
ANEXO E – Planilhas de resultados dos ensaios.100

LISTA DE SIGLAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ARL – Average Run Length – Comprimento Médio de Sequências
- ASQC – American Society for Quality Control
- AT&T – American Telephone and Telegraph
- CB 18 – Comitê Brasileiro do Cimento, Concreto e Agregados
- CEP – Controle Estatístico do Processo
- CES – Combinados EWMA-Shewhart
- CUSUM – Cumulative Sum – Soma Cumulativa
- EWMA – Exponentially Weighted Moving Average: Média Móvel Exponencialmente Ponderada
- GMA – Média Móvel Geométrica
- IMA – Médias Móveis Integradas
- ISO-9000 – International Organization for Standardization
- LC – Linha Central
- LIC – Limite Inferior e Controle
- LSC – Limite Superior de Controle
- MB1/4 – Concreto Bombeável de $f_{ck}=15,0\text{MPa}$ com brita 1
- MB1/6 – Concreto Bombeável de $f_{ck}=18,0\text{MPa}$ com brita 1
- MB1/7 – Concreto Bombeável de $f_{ck}=20,0\text{MPa}$ com brita 1
- MB2/4 – Concreto Bombeável de $f_{ck}=15,0\text{MPa}$ com brita 1+2
- NBR – Normas Brasileiras
- PG – Progressão Geométrica
- QS-9000 – Quality System Requirements
- RL – Run Length – Comprimento de sequências
- X-barra – Gráfico e Controle para a Média de Shewhart

LISTA DE SÍMBOLOS

- X – Constante de ponderação da estatística EWMA
- L – Número de unidades distantes da linha central do gráfico de controle
- μ – Média da população
- μ_0 – Valor desejado para a média do processo, média sob controle
- μ_1 – Valor da média do processo, para um estado fora de controle
- σ – Desvio padrão
- σ_0 – Desvio padrão da população
- $\bar{\bar{X}}$ – Média das médias das amostras
- \bar{X}_0 – Valor de referência
- c – Gráfico de controle do número de defeitos
- p – Gráfico de controle da fração defeituosa
- R – Gráfico de controle para a Amplitude
- S – Gráfico de controle para o Desvio padrão
- np – Número de unidades defeituosas numa amostra
- u – Gráfico de controle do número de defeitos por unidade
- x – Característica da qualidade
- N – Distribuição de probabilidade normal
- n – Número de elementos da amostra
- X_i – Variáveis aleatórias independentes
- \bar{X}_i – Média de cada amostra (média da i -ésima amostra)
- g – Número de amostras
- R_i – Amplitude da i -ésima amostra
- $\hat{\sigma}$ – Desvio padrão estimado
- d_2 – Fator de correção

A_2 – Constante utilizada para determinar os limites de controle do gráfico X-barra

D_1 – Constante utilizada para determinar o limite de controle inferior do gráfico R

D_3 – Constante utilizada para determinar os limites de controle do gráfico R

D_4 – Constante utilizada para determinar os limites de controle do gráfico R

S_i – Desvio padrão da i -ésima amostra

\bar{S} – Média dos desvios padrões da amostra

c_4 – Fator de correção tabelado em função do tamanho n de cada amostra

A_3 – Constante utilizada para determinar os limites de controle do gráfico X-barra

B_3 – Constante utilizada para determinar o limite de controle inferior do gráfico para o desvio padrão

B_4 – Constante utilizada para determinar o limite de controle superior do gráfico para o desvio padrão

B_5 – Constante utilizada para determinar o limite de controle inferior do gráfico para o desvio padrão

B_6 – Constante utilizada para determinar o limite de controle superior do gráfico para o desvio padrão

Z_i – Média Móvel Exponencialmente Ponderada

a_n – Último termo da progressão

a_1 – Primeiro termo da progressão

q – Razão da progressão

h – Intervalo de tempo entre as amostras

f – Função de magnitude

$\sigma_{\bar{x}}$ – Desvio padrão da média amostral

f_{ck} – Resistência característica do concreto

f_{cj} – Resistência média do concreto a j dias de idade

s_d – Desvio padrão da Central de Concreto

f_c – Resistência à compressão

kg/m³ - Quilograma por metro cúbico

MPa - MegaPascal

RESUMO

APLICAÇÃO DO CONTROLE ESTATÍSTICO DO PROCESSO

Autor: Estela Mari Piveta Pozzobon

Orientador: Adriano Mendonça de Souza

Nos últimos tempos as empresas vêm acompanhando um aumento relevante no grau de exigência do mercado consumidor e também no nível de competitividade. O consumidor defronta-se com uma nova situação: a possibilidade de que comprar e onde comprar, viabilizada pelo aumento da concorrência. Esta nova realidade, juntamente com o controle da qualidade, valorizou o consumidor como principal integrante da nova condição de competição. A mudança no comportamento do consumidor passa a impor novos intervenientes de sobrevivência e crescimento para as empresas, como por exemplo, procurar atingir um melhor desempenho global no que se refere a qualidade/custo, procurando assim, obter uma vantagem competitiva em relação aos concorrentes e conseqüentemente, tornando seu produto atraente aos olhos do consumidor. Neste contexto, o objetivo desse trabalho é realizar uma aplicação de uma metodologia univariada na indústria do concreto dosado em central. Para isso utiliza-se a ferramenta Controle Estatístico do Processo (CEP), o qual pode contribuir para os processos produtivos, na manutenção e melhoria dos níveis de qualidade dos produtos fabricados, refletindo na redução dos custos de produção. Desta forma, busca-se descrever as ferramentas utilizadas, os conceitos e normas relacionadas à produção e controle do concreto dosado em central, bem como também o processo produtivo da empresa. Posteriormente, os dados obtidos foram avaliados por meio de gráfico X-barra e EWMA, encontrando-se assim, os tipos de concretos fornecidos que apresentavam um comportamento instável. Estes

gráficos revelaram, com o auxílio das folhas de verificação e da experiência do engenheiro responsável pela produção as possíveis variáveis causadoras da instabilidade do sistema. Finalmente, com base nos resultados e, buscando uma estabilização do processo produtivo, deve-se proceder um estudo mais aprofundado nas misturas (traços) produzidas, modificando-as com a adição de aditivos, quantidade de água e outras misturas. Pois elas são as mesmas há muito tempo, o que, em virtude da variação das matérias-primas ao longo do tempo, vem a acarretar alterações que não podem ser controladas durante o processo.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção
Santa Maria, 21 de dezembro de 2001

ABSTRACT

STATISTICAL PROCESS CONTROL

Author: Estela Mari Piveta Pozzobon

Advisor: Adriano Mendonça de Souza

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
Engineering Master Dissertation
Santa Maria, December 21th, 2001.

CAPÍTULO I

1. APRESENTAÇÃO DO TRABALHO

1.1 Introdução

A globalização da economia e a crescente competitividade conduzem grandes desafios à indústria, assim a importância da qualidade tem se tornado muito evidente. A diminuição do tempo de desenvolvimento dos produtos, a necessidade de certificação ISO-9000 (International Organization for Standardization) e QS-9000 (Quality System Requirements), melhoria da qualidade dos produtos e redução de custos são exigências do mercado global.

Muitas empresas já se conscientizaram de que a venda de produtos de baixa qualidade, isto é, produtos que apresentam defeitos ou confiabilidade reduzida, diminuem a sua competitividade. Estas empresas também sabem que a implantação de um programa para melhoria da qualidade pode eliminar desperdícios, reduzir os índices de produtos defeituosos fabricados, diminuir a necessidade da realização de inspeção e aumentar a satisfação dos clientes, estes fatores trazem como consequência um aumento da produtividade e da competitividade das empresas.

Observa-se então, que a tendência é de propagar o aperfeiçoamento contínuo da qualidade, englobando todas as atividades da empresa, pois este novo cenário competitivo obriga o setor a adotar novos parâmetros, como a flexibilidade, a integração e a qualidade. Desta forma, o setor produtivo é pressionado a buscar maior eficiência no mercado, por meio do uso de tecnologias avançadas, na redução de custo (eliminando o desperdício) e prazo de entrega, pelo aumento da produtividade e preparando-se para uma maior competitividade, que está associada à melhoria da qualidade, por intermédio de um melhor controle dos processos produtivos, de maneira a usufruir a capacidade dos recursos existentes.

Por tudo isso, torna-se evidente a importância da estatística em programas para a melhoria da qualidade, pois, pode-se usar as técnicas estatísticas para descrever e interpretar a variabilidade, que é a causa da fabricação de produtos defeituosos Werkema (1995). Assim sendo, o Controle Estatístico do Processo (CEP) transforma-se num importante instrumento a ser adotado em inúmeras indústrias.

O CEP é uma metodologia clássica na área de qualidade e certamente uma das mais usadas no meio industrial. Desde seu aparecimento, vem sendo aplicado em vários processos e regiões do mundo todo.

O *CEP* visa aprimorar e controlar o processo produtivo através da identificação das várias fontes de variabilidade do processo. Através dos conceitos de estatística procura-se identificar se estão presentes no processo as chamadas causas comuns ou as chamadas causas especiais. O *CEP* por meio dos gráficos de controle permite identificar se o processo está sob controle ou não, ou seja, o gráfico de controle funciona como um detector de anormalidades estatísticas no processo que poderia conduzir às saídas defeituosas. Somando-se a isso, também identifica o que está causando estas anormalidades. O gráfico de *EWMA*, que em inglês quer dizer '*Exponentially Weighted Moving Average*', é um modelo excelente para a realização deste trabalho, sendo neste trabalho, utilizado em conjunto com o gráfico *X-barra*.

Embora com o uso dos gráficos de controle não eliminaremos todas as causas assinaláveis de uma operação, em geral eles serão úteis para detectar causas assinaláveis de variabilidade e desta forma, pode-se sinalizar a alguém para eliminar estas causas. É evidente, então, que os gráficos de controle auxiliam na prevenção dos defeitos em um determinado processo de manufatura, isto quer dizer que auxiliam a monitoração de características de um determinado produto, como na monitoração do próprio processo.

Conforme a aplicação, os gráficos dividem-se em dois tipos: os gráficos para análise do processo que indicam a influência dos recursos (materiais, mão-de-obra, ferramentas, procedimentos operacionais) nas mudanças que ocorrem no

processo no decorrer do tempo. O objetivo da análise do processo é encontrar as causas da dispersão do processo. O outro tipo, é chamado gráfico para controle do processo, estes indicam se o processo está sob controle estatístico e se a padronização adotada nos procedimentos operacionais está mantendo o estado de controle projetado. O principal objetivo do controle do processo é identificar prontamente quaisquer irregularidades que apareçam no decorrer do tempo por meio da plotagem periódica dos dados observados, do monitoramento deste comportamento e da ação corretiva imediata (Nunes, 2001). Neste trabalho enfoca-se o segundo tipo de aplicação dos gráficos de controle.

1.2 Justificativa e Importância do Trabalho

Com o aumento da competitividade no setor produtivo, a melhoria contínua do processo só pode ser alcançada a partir do instante em que se tenta implantar novos procedimentos, novas metodologias, mediante a utilização do controle estatístico do processo e análise estatística. Neste contexto, o trabalho torna-se importante a medida em que busca fornecer subsídios para a aplicação de técnicas na melhoria contínua. Somando-se a isto, também servirá como fonte de pesquisa para aqueles que desejarem trabalhar com as ferramentas aqui descritas e estudadas.

1.3 Objetivos do Trabalho

1.3.1 Objetivo Geral

Utilizar o Controle Estatístico do Processo (CEP), por meio de gráficos *X-barra* e Médias Móveis Exponencialmente Ponderadas (EWMA), com o objetivo de controlar um processo produtivo, verificando e identificando possíveis causas de falta de controle no processo, evitando-se desta maneira que itens defeituosos sejam produzidos, reduzindo-se assim os custos de fabricação de cada item.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Estudar e caracterizar o procedimento de aplicação dos gráficos *X-barra* e *EWMA* para uma aplicação conjunta;
- Estudar os parâmetros do gráfico EWMA (λ , L), baseados nos estudos de ARL;
- Detectar por meio dos gráficos de controle de qualidade a adequação do traço utilizado para a elaboração do concreto;
- Estudar o processo de produção de concreto dosado em central para a aplicação da metodologia proposta;

1.4 Estrutura do Trabalho

Para atender aos objetivos propostos, o trabalho foi organizado em 05 (cinco) capítulos, como pode ser visto. O capítulo 1 traz a visão geral e introdutória do trabalho, bem como sua justificativa, seus objetivos, geral e específico, sua estrutura e limitações.

Já no capítulo 2, apresenta-se uma breve revisão de literatura sobre a caracterização do Controle Estatístico do Processo (CEP), a descrição dos gráficos de controle que serão utilizadas no presente trabalho.

No capítulo 3, aborda-se os gráficos de controle CES.

No capítulo 4 apresenta a aplicação da metodologia do controle estatístico do processo e comentários das principais ferramentas utilizadas.

Finalizando, no capítulo 5 apresentam-se as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

CAPÍTULO II

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados os principais conceitos envolvidos com o Controle Estatístico do Processo (CEP). O objetivo é estabelecer as principais definições que fazem parte de toda a base do trabalho. Inicia-se com um breve histórico do *CEP*, os conceitos básicos e apresentam-se ao final os gráficos de controle *X-barra* e *EWMA* com os trabalhos mais relevantes.

2.5 Histórico do Controle de Qualidade

A capacidade de um dado processo fabricar produtos dentro da faixa especificada surgiu do estudo sobre o controle estatístico do processo na década de 20 nos Estados Unidos, especificamente na empresa Bell Telephone, onde um grupo de pesquisadores estava empenhado em solucionar problemas de equipamentos eletrônicos, com elevada qualidade. Em 1924 o americano Walter Shewhart, autor de “Economic Control Of Quality Manufacture Product” desenvolveu os primeiros gráficos de controle para identificar pontos de variação fora de controle no sentido de aprimorar e controlar o processo produtivo e assim, assegurar produtos com qualidade. Este é considerado o início do Controle Estatístico da Qualidade e Shewhart foi considerado o pai do controle estatístico do processo. Shewhart,

também criou os conceitos das causas assinaláveis, que fundamenta a teoria do controle das variações dos processos produtivos.

Este trabalho inicial realizado no Bell Telephone foi à base das principais técnicas e ferramentas que surgiram nas empresas americanas e para tornar evidente o reconhecimento do valor do controle estatístico da qualidade a partir de 1942, foi aplicado durante a segunda guerra mundial. Em 1946 criou-se a American Society for Quality Control (ASQC), esta organização promoveu o uso do controle estatístico da qualidade em todos os meios de produção de bens de serviços por intermédio de publicações, conferências treinamentos e congressos. Em 1950, Willian Edwards Deming foi convidado a dar uma série de conferências sobre Métodos Estatísticos, direcionada aos engenheiros japoneses, e no que diz respeito as responsabilidades pela qualidade, direcionada aos executivos de indústrias japonesas. Devido ao impacto de suas idéias, Deming é, hoje, considerado o “pai” do “milagre” industrial japonês. Ele considera não ser suficiente, cumprir as especificações, e desta maneira, alertou os dirigentes das empresas para a necessidade de criar um ambiente onde as ferramentas estatísticas pudessem ser usadas, mais especificamente os instrumentos do controle estatístico de qualidade, em vez de mera inspeção de produtos.

Em 1954, Joseph Juran fez sua primeira visita ao Japão, solicitou a responsabilidade dos gerentes das empresas em conseguir a qualidade. Juran é considerado o primeiro *guru* da qualidade que aplicou a qualidade à estratégia empresarial, ao invés de a ligar meramente à estatística ou aos métodos de controle total de qualidade. Para ele a qualidade pode ser definida sob duas ópticas. A primeira diz respeito que os resultados a qualidade consiste nas características do produto que satisfazem as necessidades do cliente e produz lucro. E a segunda diz respeito aos custos, a qualidade é inexistência de defeitos. Portanto, alta qualidade, custa menos para as empresas.

Em 1960, Kaoru Ishikawa montou o primeiro círculo de controle de qualidade, onde os trabalhadores aprenderam e aplicaram técnicas de controle de qualidade. Uma de suas principais contribuições foi a idéia dos sete instrumentos do controle de qualidade: folha de verificação, estratificação, diagrama de Pareto, histograma, diagrama de dispersão, gráfico de controle de processos ou de Shewhart, diagrama de causa e efeito. Este último também chamado de diagrama espinha de peixe ou diagrama de Ishikawa em homenagem a Kaoru Ishikawa, que construiu o primeiro diagrama para explicar a alguns engenheiros de uma indústria japonesa como os vários fatores de um processo estavam inter-relacionados.

A partir do final da década de 80, nos Estados Unidos, iniciou-se um renascimento da qualidade com a companhia americana ATT (American Telephone and Telegraph) que permaneceu usando os

conceitos de controle estatístico da qualidade que foram desenvolvidos em seus laboratórios. É dito por vários autores que a qualidade dos produtos e serviços desta empresa é consequência do uso destes conceitos.

No próximo item, serão apresentados os conceitos de processo e variação, pois são fundamentais para se introduzir o controle estatístico do processo que vem a após estes conceitos.

2.6 Conceitos de Processo e de Variação

Um processo produtivo pode ser representado pela Figura 1, nele pode-se observar que existem causas e efeitos, estas causas podem ser devido a variáveis de entrada controláveis como medidas de tamanho, peso, volume etc, mas também podem ser originadas de variáveis de entrada não controláveis, como temperatura ambiente, variações da própria matéria-prima, fadiga e humor dos operadores. Para o primeiro caso o Controle de Engenharia de Processos é recomendado, pois o uso de retroalimentação mantém o processo sob controle. No segundo caso o Controle Estatístico do Processo é muito útil, sendo utilizados os mais diversos gráficos de controle, como por exemplo *X-barra*, *EWMA*, *CUSUM*, entre outros.

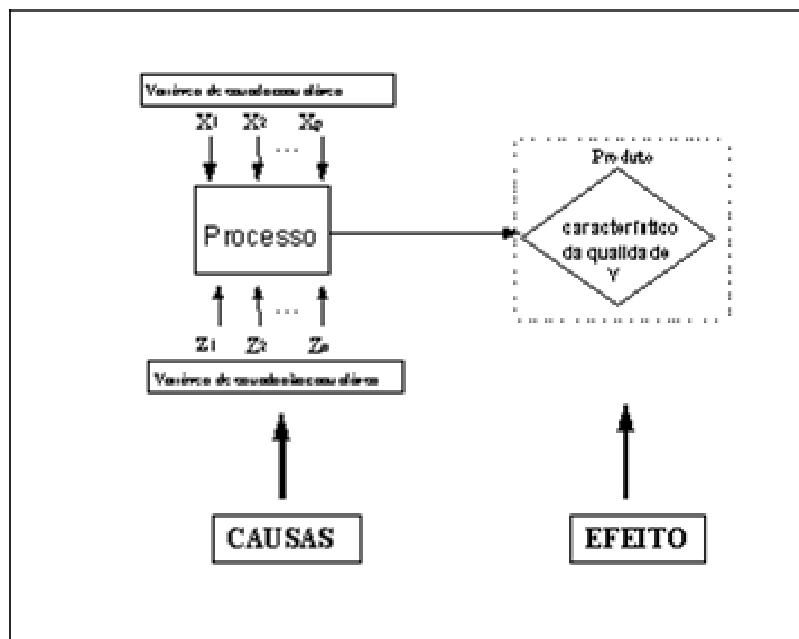


FIGURA 1 – Representação de um processo produtivo. (Montgomery, 1991, p.12)

Os produtos manufaturados possuem diferenças entre si, e estas diferenças dos diversos produtos decorrem de dispersões no processo, ou seja, das variáveis de entrada do processo.

E se as diferenças são significantes em relação às especificações dos projetos, existe a possibilidade, de se ter produtos que não atendam às especificações, ou seja, produtos não conformes.

As variações podem aparecer de três formas: a variação interna que ocorre dentro de um mesmo item; a variação item a item que ocorre entre os itens produzidos em tempos próximos; a variação tempo a tempo que ocorre entre itens produzidos em diferentes períodos durante o dia. E para que ocorram

estas variações existem algumas fontes que contribuem, entre elas: máquinas, métodos, materiais, meio ambiente, mão-de-obra e meios de medição (Siqueira, 1995). E assim pode-se afirmar que desgaste de ferramentas, matéria-prima fora de especificação, método de trabalho incorreto, falhas humanas e gerenciamento inadequado são causas de variação que podem ser classificadas em dois tipos:

- **Causas comuns**, *são as causas de variação inevitáveis, inerentes a variação do processo produtivo e individualmente de pequena significância e difíceis de identificar. “As deficiências do processo representam 85% dos problemas, são de responsabilidade dos gerentes e só podem ser eliminados com a intervenção direta da alta administração; exemplos de causas comuns são: equipamento inadequado e/ou obsoleto, métodos inadequados ou incorretos, ambiente de trabalho impróprio (iluminação, umidade, temperatura)” (Nunes, 2001, p.11).*

- **Causas especiais**, *são as causas de variação de grande significância e de fácil identificação, por serem derivadas da atuação de variáveis específicas e controláveis pela técnica composta de uma ferramenta principal, chamada gráficos de controle. “Causas especiais são fontes de dispersão que geram desvios esporadicamente, não pertencem ao contexto do processo, são perfeitamente*

identificáveis e podem ser rastreadas até sua origem. As causas especiais representam 15% dos problemas, são de responsabilidade do operador e do supervisor, podem ser eliminadas pela implantação de medidas corretivas decididas nesse nível hierárquico” (Nunes, 2001, p.11).

O processo é dito sob controle quando apenas as causas comuns estão presentes, mas temos um processo estável e quando as causas especiais aparecem a variação é excessiva, mostrando instabilidade no processo e deste modo o processo é dito que está fora de controle. Na Figura 2 se tem a representação gráfica de causas comuns e causas especiais de variação.

“A vantagem prática de um processo estável é que a saída do processo é previsível dentro de uma certa faixa de dispersão. Se houver algumas causas especiais o processo é dito ser instável, visto que não podemos prever quando a próxima causa especial vai se manifestar e portanto não podemos prever a amplitude¹ da dispersão” (Nunes, 2001, p.11).

¹ Amplitude – é a diferença entre o maior e o menor valor que foi observado para a variável aleatória, no geral não é calculada, no entanto serve para indicar o valor máximo e mínimo da amostra.

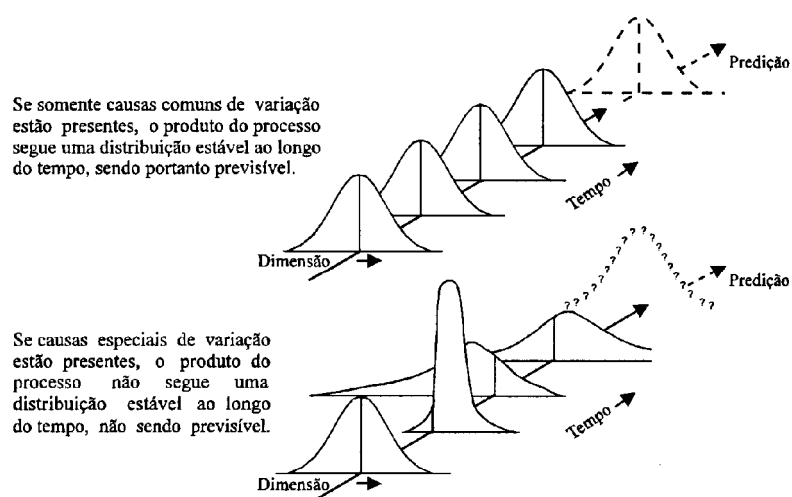


FIGURA 2 – Estabilidade do processo estatístico (Werkema, 1995b, p.118).

É fundamental manter sob controle tanto o desempenho médio como a variabilidade do processo. Isso, se verifica nos gráficos da Figura 03, (Bartmann,1986.p.42)

É visível, no gráfico (a) da Figura 3 que a média e a variabilidade estão sob controle, portanto, pode-se dizer que a quase totalidade de produção alcança as especificações. Já no gráfico (b) o valor da produção não alcança as especificações. E por fim no gráfico (c), a variabilidade aumentou, mesmo com a média inalterada em relação ao nível original.

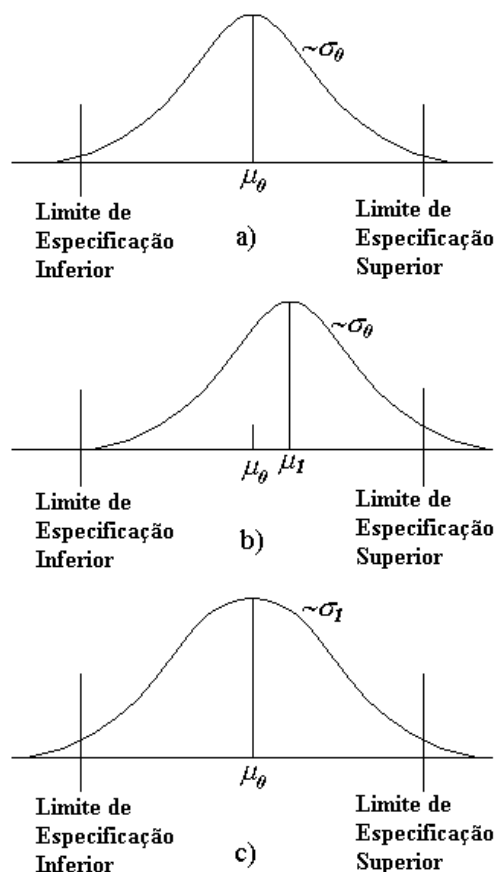


FIGURA 3 – A necessidade de controlar a média e a variabilidade do processo (Bartmann, 1986, p.42).

Por tudo isso, percebe-se que é imprescindível para o aperfeiçoamento do processo produtivo uma análise criteriosa da frequência e da distribuição dos inúmeros defeitos que surgem no processo. O diagrama de Espinha de Peixe é usado para identificar as várias fontes de problemas e defeitos e as relações entre elas. “O diagrama é útil na medida em que chama a atenção de operadores, engenheiros da produção e gerentes para os problemas envolvidos na obtenção de melhores níveis de qualidade no processo” (Bartmann, 1986, p.39).

Segundo Kume (1993), mesmo que as causas das variações da qualidade sejam incontáveis, nem toda causa prejudica a qualidade com a mesma intensidade. Algumas delas afetam muito a qualidade, e outras, mesmo consideradas de grande

importância na teoria, afetam muito pouco a variação da qualidade se devidamente controladas. Desta maneira, o *CEP* tem como objetivo aprimorar o processo, detectando rapidamente por meio dos gráficos de controle, a ocorrência de causas especiais no processo, com a finalidade de diminuir a variabilidade do mesmo e assim, produzir produtos com mais garantia de qualidade e menor custo.

2.7 Controle Estatístico do Processo (CEP)

O *CEP* é o ramo do controle da qualidade que se baseia na utilização de técnicas estatísticas, como coleta, análise e interpretação de dados, comparação de desempenho, verificação de desvios para se controlar o processo através das ações de melhoramento e controle da qualidade de produtos e serviços e que tem como ferramenta básica e mais usada, os gráficos de controle, cujas funções são: monitorar a variabilidade e avaliar a instabilidade do processo.

É relevante citar a importância de verificar a estabilidade dos processos, já que processos instáveis provavelmente irão resultar em produtos defeituosos, perda de produção, baixa qualidade e de modo geral, perda da confiança do cliente (Werkema, 1995). Pode-se afirmar ainda que com um processo deficitário, teremos produtos com elevado custo de produção, portanto baixa rentabilidade, uma vez que a competitividade do mercado não permite que se comercialize da

forma ou jeito que a empresa quer, mas sim como mandam as leis desse mercado. Desta maneira, vê-se a importância para a economia de uma empresa através de produção de produtos conformes, pois assim menores serão os custos de fabricação e maiores os lucros da empresa.

“Controle Estatístico do Processo é um método para monitoramento de qualquer processo produtivo – do automóvel ou serviço de tradução – com o objetivo de controlar a qualidade dos produtos ou serviços no momento em que estão sendo produzidos, em vez de confiar numa inspeção após estarem prontos. Assim, o operador pode agir de imediato, se constatar algum tipo de anomalia.” (Nunes, 2001, p.01).

Ainda, segundo Nunes (2001) que afirma: a definição citada confronta o conceito de prevenção – ação imediata, com o conceito tradicional de detecção – ação após o fato.

a) Controle por Detecção

Depois de concluído o produto ou serviço, este é comparado com as especificações e julgado conforme (aceito) ou não conforme (rejeitado), onde este último é devolvido para retrabalho, ou vendido a preço de sucata.

b) Controle por Prevenção

Aqui as medições são realizadas periodicamente e seletivas em tempo real durante todo o período que compreende a jornada de trabalho, tanto do produto ou serviço como também do processo. Desta forma, ao chegar ao final do ciclo produtivo, o produto ou serviço esteja em conformidade com as especificações e pronto para ser consumido pelos usuários. Verifica-se então que é mais lucrativo melhorar o produto evitando desperdício, reduzindo os custos.

2.4.1 Gráficos de Controle

O gráfico de controle utiliza conceitos estatísticos como amplitude, média aritmética e desvio padrão, procurando identificar os efeitos da variabilidade.

“Os gráficos de controle do processo oferecem a visualização das ocorrências do processo ao longo do tempo, incorporam essa natureza dinâmica e evidenciam quaisquer anormalidades que eventualmente se manifestam durante o ciclo produtivo de produtos ou serviços” (Nunes, 2001, p.11)

Pode-se dizer que são registros gráficos dos dados mensurados em um ponto crítico do processo, construídos num sistema de coordenadas cartesianas. O eixo vertical do gráfico é representado pelas medidas feitas de uma determinada característica do produto, ou seja, é a variável que está sendo controlada. O eixo horizontal é

representado pelo número do subgrupo, um modelo de gráfico de controle pode ser visto na Figura 4.

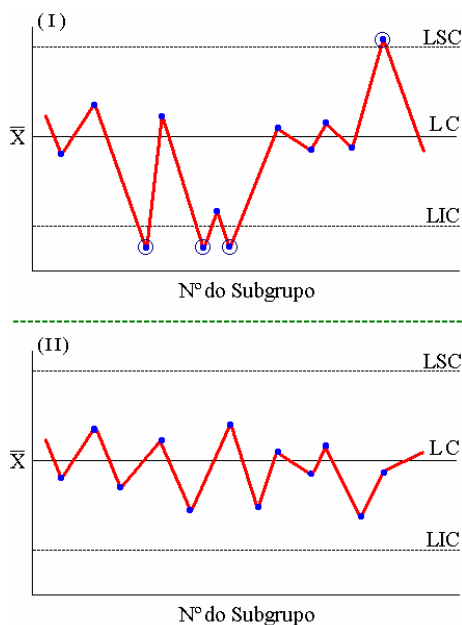


FIGURA 4 – Exemplo de gráficos de controle X-barra, sendo: (I) processo fora de controle; (II) processo sob controle.

Aparecem três linhas paralelas ao eixo da abscissa. A linha cheia no centro do gráfico é identificada como uma linha central (LC), pode ser a média dos dados plotados ou a média das médias ($\bar{\bar{X}}$); também pode ser um valor de referência \bar{X}_0 , baseado em dados históricos como por exemplo, valores econômicos de custo de produção em necessidade de serviço, e ainda, pode ser a média da população μ . As duas linhas pontilhadas são chamadas limites de controle, ou seja, limite inferior de controle (LIC) e limite superior de controle (LSC), sendo estes limites de controle usados para avaliar as variações da qualidade entre os subgrupos. Os limites de controle são

fixados em múltiplos de desvios padrões, em geral para uma variação de ± 3 desvios padrões da linha central. E ainda, estes limites em um gráfico de controle são utilizados como os critérios para um sinal de ação, ou seja, os limites de controle ajudam verificar se os dados indicam um controle estatístico ou não, e ainda, se o processo está sob controle, todos os pontos plotados estarão entre estas linhas e agrupados em torno da linha central. A Figura 4 mostra um modelo de gráfico de controle para a média, isto é, o gráfico *X-barra*.

2.4.2 Tipos de Gráficos de Controle

Segundo Werkena (1995) é importante salientar que os gráficos de controle são classificados em:

- Gráfico de controle para variáveis, quando a característica da qualidade é expressa por um número em uma escala contínua de medidas, são exemplos: gráficos de controle pra o rendimento de uma reação química, tempo de entrega de um produto ao cliente, dimensões de peças, volume e peso.

- Gráfico de controle para atributos, quando as medidas representadas no gráfico resultam de contagens do número de itens do produto (escala discreta) que apresentam uma característica particular de interesse, as medições destes são feitas por inspeção visual, calibradores, passa-não-passa, bom ou ruim, entre outros, são exemplos: gráficos de controle de peças para o número de peças cujos

diâmetros não satisfazem as especificações (peças defeituosas), número de roupas danificadas em uma lavanderia.

Entende-se que o gráfico de controle para variáveis registra as características mensuráveis do produto ou serviço, já o gráfico de controle por atributo registra as características não mensuráveis.

Gráfico de controle por atributo pode ser dito gráfico de controle por variável aleatória discreta com função de densidade de probabilidade de Poisson, na construção do gráfico c , e função de densidade de probabilidade binomial na construção do gráfico p . Já os gráficos de controle por variável aleatória contínua são regidas pela função de densidade de probabilidade normal (μ, σ^2) e agrupam grande parte dos gráficos de controle usados na indústria, como os gráficos de Shewhart de amplitude R , de desvio padrão S , e também os gráficos de somas acumuladas (CUSUM) e as médias móveis exponencialmente ponderada (EWMA), este por sua vez, é aplicado geralmente a processos onde existe uma variabilidade muito pequena e ainda a detecção desta é de grande valia para a qualidade do produto. (Lago Neto, 1999)

Segundo Bartmann (1986) os gráficos de controle para atributo não usam toda a informação disponível sobre a distribuição dos valores assumidos pelas variáveis, portanto tendem a serem ineficazes no controle de aspectos quantitativos da qualidade. Desta maneira, percebe-se que procedimentos mais eficientes são necessários para o

tratamento dessas situações, que são chamados gráficos de controle para variáveis, estes por sua vez fornecem um maior número de informações a respeito do desempenho do processo do que os gráficos para atributos. Quando se quer analisar um aspecto quantitativo da qualidade, em geral se controla o valor médio e a variabilidade por meio de gráficos separados. O gráfico *X-barra* é utilizado para o controle do valor médio do desempenho do processo. O gráfico do desvio padrão (gráfico *S*) ou o mais comum que é denominado de amplitude (gráfico *R*) são utilizados para o controle da variabilidade do processo. Na Tabela 01, SILVA *Apud* Drain (1999) resume os tipos de cartas de controle e suas unidades de medidas.

Conforme Siqueira (1997), os gráficos de controle por variáveis tem a finalidade de informar a respeito de: 1º) melhoria da qualidade; 2º) capacidade do processo; 3º) tomadas de decisões relativas à especificação do produto; 4º) tomadas de decisões sobre o processo de produção; 5º) tomadas de decisões sobre peças recém produzidas.

Por tudo isso, verifica-se que as cartas de controle por variáveis são ótimas técnicas para controlar e melhorar a qualidade. No entanto, existem algumas limitações para esta técnica.

Uma, óbvia, é que estas técnicas não são utilizadas por características de qualidade que não podem ser medidas.

Outra, surge em função de que existem muitas características de qualidade em um específico item de produção, e os gráficos de controle por variáveis são determinados para cada característica independente. Neste

caso passa-se a utilizar um gráfico de controle multivariado, ganhando em eficácia e tempo de construção. Na Tabela 1 apresenta-se o resumo dos tipos de gráficos de controle.

TABELA 1 – Tipos de gráficos de controle e suas respectivas medidas.

Nome do Gráfico	Aplicação	Tipos
Gráficos de controle indicados para indústrias de manufatura em geral.		
X-barra	Médias do conjunto de medidas.	Variáveis
Amplitude (R)	Amplitudes do conjunto de medidas.	Variáveis
Desvio Padrão (S)	Desvio padrão do conjunto de medidas.	Variáveis
Individuais	Medidas individuais	Variáveis
Np	Número de unidades defeituosas em uma amostra de tamanho fixo.	Atributo
P	Proporção de unidades defeituosas em uma amostra de tamanho variável.	Atributo
C	Número de defeitos em uma amostra de área fixa.	Atributo
U	Densidade de defeitos derivados das amostras de área variável.	Atributo
Gráficos de controle indicados para processos contínuos.		
Média Móvel	Médias de várias medidas individuais sucessivas.	Variáveis
EWMA	Médias de várias medidas individuais sucessivas, ponderadas para controlar a influência das observações mais recentes.	Variáveis
CUSUM	Somas acumuladas dos	

<i>desvios do valor objetivo – mais útil para detectar pequenas mudanças da média em processos contínuos.</i>	<i>Variáveis</i>
---	------------------

Fonte: SILVA apud Drain (1999) com adaptações.

Os gráficos de controle monitorando ao mesmo tempo diferentes características de qualidade são chamados de gráficos de controle multivariados. Quando apenas uma característica é de interesse, os gráficos de controle univariados são usados para o processo de monitoração. Neste estudo, restringe-se aos gráficos de controle univariados aplicados em variáveis aleatórias contínuas.

O objetivo dos gráficos de controle é verificar como o conjunto de dados se comporta, pois as tendências e trocas nos níveis das variáveis são rapidamente percebidas e no momento que os dados não seguem uma distribuição aleatória é sinal que alguma mudança ocorreu no sistema. Neste trabalho os gráficos utilizados para avaliarem a estabilidade do processo são os de Shewhart (X-barra), e o de Médias Móveis Exponencialmente Ponderadas, o primeiro tem o objetivo de detectar grandes variações da média do processo ao passo que o segundo é mais utilizado para capturar os pequenos desvios da média, por isso recomenda-se que eles sejam utilizados conjuntamente.

Descreve-se no próximo item os gráficos de controle univariados *X-barra* e o de Médias Móveis Exponenciais Ponderadas.

2.4.3 Gráfico de Controle para Média (*X-barra*) e Amplitude (*R*)

O gráfico de controle para média (gráfico *X-barra*) é usado para controlar a média do processo enquanto o gráfico de controle da Amplitude ou Range (gráfico *R*) é usado para controlar a variabilidade do processo em questão. Estes gráficos são os mais usados e devem ser empregados simultaneamente.

Suponha que a característica de qualidade (x) a ser controlada tenha distribuição normal com média μ e desvio padrão σ , $x \sim N(\mu, \sigma)$

E se $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ é uma amostra do tamanho n , onde a média amostral é

$$\bar{X} = \frac{(X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n)}{n} \quad (1)$$

Tem distribuição normal com média μ e desvio padrão

$$\sigma_{\bar{X}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}};$$

$$\bar{X} \sim N\left(\mu, \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right) = N(\mu, \sigma_{\bar{X}})$$

Das propriedades da distribuição normal, sabe-se que uma probabilidade é igual a $1 - \alpha$ de que a média amostral \bar{X} esteja entre os limites

$$\mu \pm Z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$$

onde $\frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ é o desvio padrão de \bar{X} .

Para a determinação dos limites de controle é usual utilizar o chamado 3σ , que consiste em fazer $Z_{\alpha/2} = 3$. E se $\bar{X} \sim N(\mu, \frac{\sigma}{\sqrt{n}})$, então 99,73% das observações de \bar{X} estarão no intervalo $\mu \pm 3 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$. (Werkema, 1995). É a partir desta expressão que se constrói os gráficos de *X-barra*, sendo que o procedimento para construção de outros gráficos é praticamente o mesmo. Troca-se apenas os parâmetros da média e do desvio padrão por outros relacionados especificamente com cada gráfico.

Na prática, os parâmetros μ e σ são desconhecidos e devem ser estimados em função de dados amostrais. Assim sendo, deve-se fazer uso de subgrupos (amostras) e considerar de 20 a 25 subgrupos, sendo que estes subgrupos são formados por 4 ou 5 medições (observações da característica da qualidade considerada). Os subgrupos devem ser formados na seqüência da produção e não aleatoriamente no lote em que foi produzido (Werkema,1995).

Descrevem-se agora, as etapas para a construção dos gráficos de controle para a média (*X-barra*) e range (*R*). Para a elaboração destes passos baseou-se em (Siqueira,1997 e Werkema,1995).

1º) *Determinar a característica da qualidade a ser encontrada.*

Deve-se dar prioridade às que afetam o desempenho do produto e que sejam mensuráveis. E aqui o gráfico de Pareto é de grande valia para se estabelecer as prioridades para o controle da qualidade.

2º) *Definir o método de amostragem e o tamanho da amostra.*

Método Instantâneo: retira-se a amostra, correspondente ao subgrupo da produção, simultaneamente ou consecutivamente.

Método Periódico: retira-se a amostra, correspondente ao subgrupo, aleatoriamente, da produção realizada durante um determinado intervalo de tempo, de maneira que a amostra seja representativa de toda a produção neste intervalo.

3º) *Coletar os dados.*

Utiliza-se formulário, colocando-se os registros dos dados em colunas.

4º) *Determinar a média \bar{X}_i de cada amostra.*

$$\bar{X}_i = \frac{X_{i1} + X_{i2} + X_{i3} + \dots + X_{in}}{n}, i = 1, 2, \dots, g \quad (2)$$

Onde n é número de observações da característica de qualidade e \bar{X}_i é a média do i -ésimo subgrupo (amostra) e g é o número de subgrupos.

5°) Determinar a média global $\bar{\bar{X}}$.

$$\bar{\bar{X}} = \frac{\bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \bar{X}_3 + \cdots + \bar{X}_g}{g} = \frac{1}{g} \sum_{i=1}^g \bar{X}_i \quad (3)$$

Onde $\bar{\bar{X}}$ é a média das médias dos subgrupos.

6°) Determinar a amplitude R_i de cada subgrupo.

R_i é o Range (amplitude) do i -ésimo subgrupo.

$R_i =$ maior valor da amostra menos o menor valor da amostra

7°) Determinar a amplitude média \bar{R} e estimar σ .

$$\bar{R} = \frac{R_1 + R_2 + R_3 + \cdots + R_g}{g} \quad (4)$$

onde:

\bar{R} é a média dos Ranges dos subgrupos;

E o desvio padrão pode ser estimado por:

$$\hat{\sigma} = \frac{\bar{R}}{d_2} \quad (5)$$

onde d_2 é um fator de correção que serve para estimar σ_0 a partir de R_0 tabelado em função do tamanho n de cada subgrupo e é retirado da tabela em Anexo A.

A estimação do desvio padrão σ a partir da amplitude média \bar{R} (gráfico Range) é apropriada quando o tamanho do subgrupo é menor ou igual a 10. Para amostras de tamanho grande \bar{R} perde a eficiência, pois no cálculo da amplitude não são utilizados todos os dados do subgrupos, e sim o maior e menor valor x_{\min} e x_{\max} . Dessa forma, percebe-se que é melhor utilizar o gráfico do desvio padrão (gráfico S) que será mostrado no item (2.4.4)

8º) Determinar os limites e controle dos gráficos X-barra pelas seguintes fórmulas.

$$LSC = \bar{\bar{X}} + 3 \frac{R}{d_2} \sqrt{n} = \bar{\bar{X}} + A_2 \bar{R} \quad (6)$$

$$LM = \bar{\bar{X}} \quad (7)$$

$$LIC = \bar{\bar{X}} - 3 \frac{R}{d_2} \sqrt{n} = \bar{\bar{X}} - A_2 \bar{R} \quad (8)$$

9º) Determinar os limites de controle do gráfico R pelas seguintes fórmulas.

$$LSC_R = \bar{R} + 3\hat{\sigma}_R = \bar{R} + 3d_3 \frac{\bar{R}}{d_2} = D_4 \cdot \bar{R} \quad (9)$$

$$LM_R = \bar{R} \quad (10)$$

$$LIC_R = \bar{R} - 3\hat{\sigma}_R = \bar{R} - 3d_3 \frac{\bar{R}}{d_2} = D_3 \cdot \bar{R} \quad (11)$$

O valor de $\frac{3}{d_2}\sqrt{n}$ é uma constante denominada A_2 , e os valores $1 - 3\frac{d_3}{d_2}$ e $1 + 3\frac{d_3}{d_2}$ são denominados respectivamente por D_3 e D_4 .

Estas constantes variam de acordo com o tamanho do subgrupo e são encontradas na tabela em Anexo A.

10º) Traçar os limites de controle e marcar os pontos nos gráficos e também escrever as informações que devam constituir os gráficos.

- Traçar o eixo vertical do lado esquerdo estabelecendo-se os valores de *X-barra* e *R*.

- Traçar as linhas dos limites.

- Colocar os “g” valores de \bar{X} , e os “g” valores de R_i nos gráficos de *X-barra* e *R* respectivamente.

- Escrever o título, o tamanho do subgrupo “g”, o período em que os dados foram coletados, a especificação do processo e do produto, o método de medição, colocando também o responsável pela construção dos gráficos.

11º) *Interpretação dos gráficos construídos.*

Analisa-se o comportamento dos pontos no gráfico *X-barra* e no gráfico *R*, verificando se o processo está sob controle. Se o controle do processo é alcançado, adota-se a gráfico de controle para monitorar as observações atuais e futuras; caso contrário, conduzem-

se ações de melhoria até que seja atingido o nível de qualidade desejado para o processo, onde os limites de controle são recalculados e os pontos fora destes limites são descartados no cálculo dos valores revisados dos gráficos ou somente no cálculo dos valores revisados do gráfico em que o ponto caiu fora dos limites de controle até que se encontre a estabilidade do sistema. Estes limites devem ser revisados periodicamente, para que seja possível estar com os limites sempre atualizados.

Os novos valores de \bar{X} e \bar{R} são usados para estabelecer os valores padrões \bar{X}_0 , R_0 e σ_0

$$\bar{X}_0 = \bar{X}_{novo} = \frac{\sum_{i=1}^g \bar{X}_i - \sum_{i=1}^{g_d} \bar{X}_d}{g - g_d} \text{ e } R_0 = \bar{R}_{novo} = \frac{\sum_{i=1}^g R_i - \sum_{i=1}^{g_d} R_d}{g - g_d}$$

$$\bar{X}_0 = \bar{X} \text{ novo, } R_0 = \bar{R} \text{ novo e } \sigma_0 = \frac{R_0}{d^2}$$

Novos limites do gráfico R :

$$LSC = D_2 \cdot \sigma_0 \quad (12)$$

$$LIC = D_1 \cdot \sigma_0 \quad (13)$$

Novos limites do gráfico X -barra:

$$LSC = \bar{X}_0 + A\sigma_0 \quad (14)$$

$$LIC = \bar{X}_0 - A\sigma_0 \quad (15)$$

Onde d_2 é um fator retirado da tabela em Anexo A que serve para estimar σ_0 a partir de R_0 e A , D_2 e D_1 são fatores também retirados da tabela do Anexo A e servem para calcular os novos limites de controle dos gráficos \bar{R} e X -barra.

2.4.4 Construção do Gráfico da Média (X -barra) e Desvio Padrão (S)

O gráfico R é mais fácil de ser construído e aplicado e o gráfico S é mais preciso, pois no cálculo do desvio padrão são utilizados todos os dados dos subgrupos, e não apenas o maior e menor valor, utilizados no cálculo do range. Quando o tamanho da amostra (subgrupo) é menor ou igual a dez, os gráficos R e S terão o mesmo aspecto. No entanto, quando o tamanho da amostra cresce, o gráfico S se torna mais preciso do que o gráfico R , e deve ser usado (Siqueira, 1997).

Desta forma o gráfico R é substituído pelo gráfico S (também conhecido por gráfico σ), sendo que o desvio padrão do processo é estimado diretamente ao invés de ser calculado indiretamente, por meio da amplitude R . Para controlar o processo, os dois gráficos, X -barra e S , devem ser empregados simultaneamente, onde X -barra é

utilizado para o controle da média do processo e o gráfico S para o controle da variabilidade do processo em questão.

A construção dos gráficos X -barra e S são semelhantes a já apresentada na construção dos gráficos X -barra e R , mudando-se apenas o cálculo do valor central e dos limites de controle. Então, suponha-se que a característica de qualidade (x) a ser controlada tenha distribuição normal com média μ e desvio padrão σ , $x \sim N(\mu, \sigma)$

Descrevem-se agora as etapas para a construção dos gráficos de controle X -barra e S .

- 1º) Escolher a característica de qualidade a ser controlada.
- 2º) Definir o método de amostragem e o tamanho da amostra.
- 3º) Coletar os dados.
- 4º) Determinar a média \bar{X}_i de cada amostra.

$$\bar{X}_i = \frac{X_{i1} + X_{i2} + X_{i3} + \dots + X_{in}}{n}$$

Onde n é o número de observações da característica de qualidade e \bar{X}_i é a média do i -ésimo subgrupo (amostra).

5º) Determinar a média global $\bar{\bar{X}}$.

A estimação de μ é definida por:

$$\bar{\bar{X}} = \frac{\bar{X}_1 + \bar{X}_2 + \bar{X}_3 + \cdots + \bar{X}_g}{g} = \frac{1}{g} \sum_{i=1}^g \bar{X}_i \quad (16)$$

Onde $\bar{\bar{X}}$ é a média das médias dos subgrupos e g é o número de subgrupos.

6º) Determinar o desvio padrão S_i de cada subgrupo.

$$S_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (X_{ij} - \bar{X}_i)^2}{(n-1)}} \quad (17)$$

Onde S_i é o desvio padrão do i -ésimo subgrupo e n é o tamanho do subgrupo.

7º) Calcular \bar{S} e estimar σ .

$$\bar{S} = \frac{S_1 + S_2 + S_3 + \cdots + S_g}{g} = \frac{1}{g} \sum_{i=1}^g S_i \quad (18)$$

Onde \bar{S} é a média dos desvios padrões dos subgrupos e g é o número de subgrupos.

E ainda, o desvio padrão pode ser estimado por:

$$\hat{\sigma} = \frac{\bar{S}}{c_4} \quad (19)$$

onde c_4 é um fator de correção, tabelado em função do tamanho n de cada subgrupo e é retirado da tabela em Anexo A.

8º) Calcular os limites de controle do gráfico *X-barra* pelas seguintes fórmulas

$$LSC = \bar{\bar{X}} + 3 \frac{S}{c_4} \sqrt{n} = \bar{\bar{X}} + A_3 \bar{S} \quad (20)$$

$$LM = \bar{\bar{X}} \quad (21)$$

$$LIC = \bar{\bar{X}} - 3 \frac{R}{c_4} \sqrt{n} = \bar{\bar{X}} - A_3 \bar{S} \quad (22)$$

O valor de $\frac{3}{c_4} \sqrt{n}$ é uma constante denominada A_3 .

9º) Calcular os limites de controle do gráfico *S* pelas seguintes fórmulas

$$LSC = \bar{S} + 3\hat{\sigma}_S = B_4 \cdot \bar{S} \quad (23)$$

$$LM = \bar{S} \quad (24)$$

$$LIC = \bar{S} - 3\hat{\sigma}_S = B_3 \cdot \bar{S} \quad (25)$$

Sendo $\hat{\sigma}_S$ o desvio padrão da distribuição de S e A_3 , B_3 , e B_4 as constantes retiradas da tabela em Anexo A, em função do tamanho n das amostras.

10º) Traçar os limites de controle e marcar os pontos nos gráficos e também escrever as informações que devam constituir os gráficos.

11º) Após interpretação dos gráficos construídos, em caso seja necessário, recalcular os limites dos gráficos usa-se os seguintes valores:

$$\bar{X}_0 = \bar{\bar{X}}_{novo} = \frac{\sum_{i=1}^g \bar{X}_i - \sum_{i=1}^{g_d} X_d}{g - g_d}$$

$$S_0 = \bar{S}_{novo} = \frac{\sum_{i=1}^g S_i - \sum_{i=1}^{g_d} S_d}{g - g_d}$$

$$\sigma_0 = \frac{S_0}{C_4}$$

Novos limites do gráfico X -barra:

$$LSC = \bar{\bar{X}}_0 + A \cdot \sigma_0 \quad (26)$$

$$LIC = \bar{\bar{X}}_0 - A \cdot \sigma_0 \quad (27)$$

Novos limites do gráfico S :

$$LSC = B_6 \cdot \sigma_0 \quad (28)$$

$$LIC = B_5 \cdot \sigma_0 \quad (29)$$

Onde S_d são os desvios padrões dos subgrupos descartados e C_4 e A , B_5 , e B_6 as constantes retiradas da tabela em Anexo A.

2.4.5 Interpretação dos Gráficos da Média X -barra

Para a avaliação da estabilidade do processo o modelo clássico de Shewhart, também chamado de gráfico X -barra, não assume uma única regra de decisão, onde a obtenção de um valor de X -barra fora dos limites de controle, caracteriza um processo não estável, mas é auxiliado por uma série de procedimentos e regras que revelam se o processo está sob controle, sendo um dos mais importante denominado de Teste de Seqüência, conhecido por '*runs tests*', onde o padrão formado pelos pontos grafados determina se o processo está sob controle. Portanto, para a análise dos gráficos, deve-se ter uma atenção especial aos dados que apresentam uma variação incomum ou sistemática, visto que as variações aleatórias dificilmente tiram o processo fora de controle. Assim, o processo será considerado sob controle nas seguintes condições:

- 1. Todos os pontos se apresentam compreendidos nos limites de controle superior e inferior e não seguem nenhuma variação sistemática (Figura 5).*
- 2. O gráfico apresenta aproximadamente o mesmo número de pontos acima e abaixo da linha central.*
- 3. A maioria dos pontos (cerca de dois terços) situa-se próximos à linha central, (Figura 6).*
- 4. Poucos pontos situam-se próximos aos limites de controle.*

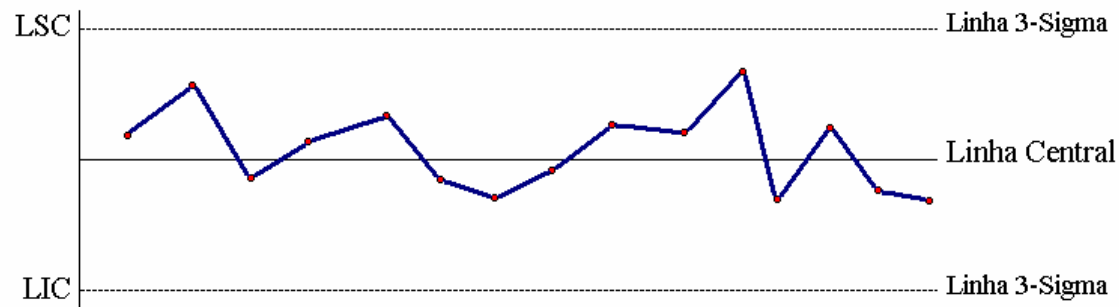


FIGURA 5 – Processo considerado sob controle estatístico.

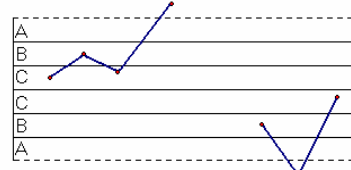
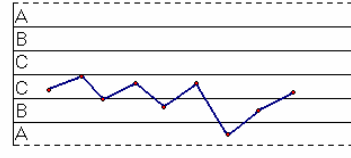
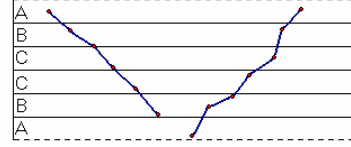
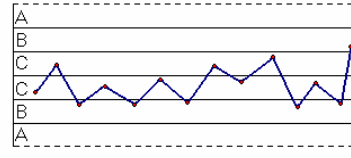
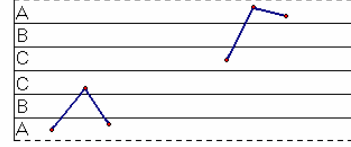
Na Figura 6, estão os intervalos dos limites de controle, divididos e 6 (seis) zonas, com o valor de k , variando de 1 a 3, estas zonas entre os limites são descritas como A, B e C e nelas verifica-se a distribuição dos pontos. Este procedimento é denominado de ‘runs tests’.

		$\bar{X} + (3\sigma / \sqrt{n})$
A	2.5%	$\bar{X} + (2\sigma / \sqrt{n})$
B	13.5%	$\bar{X} + (\sigma / \sqrt{n})$
C	34.0%	\bar{X}
C	34.0%	$\bar{X} - (\sigma / \sqrt{n})$
B	13.5%	$\bar{X} - (2\sigma / \sqrt{n})$
A	2.5%	$\bar{X} - (3\sigma / \sqrt{n})$

FIGURA 6 – Gráfico de Controle de Shewhart com os limites de controle.

Mas sabe-se que apenas a observância de um ponto fora dos limites de controle não é suficiente para informar sobre a estabilidade do processo, por isso Nelson (1984 e 1985), mostrou oito situações que podem ocorrer em gráficos de controle, baseadas no comportamento das variáveis que podem revelar alguma instabilidade

no processo, sugerindo-se, assim, que algum procedimento alternativo deve ser executado, pois o processo corre o risco de sair de controle. Segundo a análise do gráfico, subdividida em zonas, quando ocorrer uma das oito configurações descritas na Figura 7, o processo será considerado fora de controle.

<p><u>1º CONFIGURAÇÃO:</u></p> <p>Um ponto além da zona A, isto é, acima do limite superior de controle ou abaixo do limite inferior de controle.</p>	
<p><u>2º CONFIGURAÇÃO:</u></p> <p>Nove pontos sucessivos de um mesmo lado do valor central, ou seja, todos acima ou abaixo da linha média.</p>	
<p><u>3º CONFIGURAÇÃO:</u></p> <p>Seis pontos sucessivos aumentando ou diminuindo constantemente.</p>	
<p><u>4º CONFIGURAÇÃO:</u></p> <p>Quatorze pontos sucessivos alternando-se para cima e para baixo.</p>	
<p><u>5º CONFIGURAÇÃO:</u></p> <p>Dois em três pontos sucessivos na mesma zona A ou além dela.</p>	

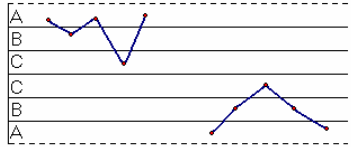
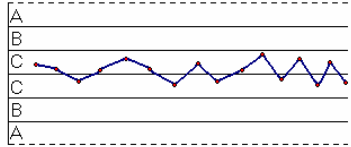
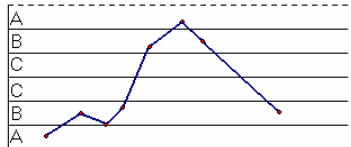
<p><u>6º CONFIGURAÇÃO:</u></p> <p>Quatro em cinco pontos sucessivos, situados na zona A ou B ou além dela, de um mesmo lado do gráfico.</p>	
<p><u>7º CONFIGURAÇÃO:</u></p> <p>Quinze pontos sucessivos situados na zona C, acima ou abaixo da linha central.</p>	
<p><u>8º CONFIGURAÇÃO:</u></p> <p>Oito pontos sucessivos de ambos os lados da linha central fora da zona C.</p>	

FIGURA 7 – Configurações que indicam processo considerado fora de controle.

Se o estado de controle é alcançado no processo, adota-se o gráfico de controle para monitorar as observações atuais e futuras; em caso negativo, ou seja, se uma situação de instabilidade for detectada por pontos fora dos limites de controle ou pelas 8 configurações mostradas na Figura 7, o processo será considerado fora de controle. Isto quer dizer que uma causa especial de variação está presente e assim, conduzem-se ações de melhoria até que seja atingido o nível de qualidade desejado para o processo, onde os limites de controle são recalculados e os pontos fora destes limites são abandonados até que se encontre a estabilidade do sistema. Estes limites devem ser revistos periodicamente, para que seja possível estar com os limites sempre atualizados.

2.4.6 Alguns Aspectos Importantes na Construção e Utilização dos Gráficos de Média *X-barra*

Estes aspectos foram estabelecidos segundo Werkema (1995). As observações são válidas para os gráficos X -barra e R e também para X -barra e S :

- *Se todos os pontos estiverem dentro dos limites de controle e nenhuma configuração especial estiver evidente, podemos dizer que o processo está sob controle no passado, então os limites de controle experimentais são apropriados para controlar a produção atual e futura;*
- *Se algum ponto X_i ou R_i está fora do limite de controle, estes pontos devem ser removidos e os limites experimentais devem ser recalculados, para que se possa monitorar a produção atual e futura;*
- *Quando alguns pontos forem retirados da amostra para recalcular-se os novos limites, poderão ocorrer novos pontos fora de controle, porque os novos limites, em geral, determinarão uma faixa mais estreita;*
- *Quando muitas das amostras iniciais estiverem fora dos limites de controle, é importante prestar atenção ao padrão formado por estes pontos, pois estes padrões são mais fáceis de serem identificados;*
- *Quando as causas de variação forem as assinaláveis associadas ao padrão de pontos fora de controle são mais fáceis de serem identificadas;*

- *Para que o processo possa ser considerado sob controle estatístico, é necessário que ele esteja estável em relação à média e à variabilidade;*
- *Deve-se, primeiro, analisar o gráfico R ou S, pois se ele apresentar-se fora de controle, não é necessário analisar o gráfico da média. (Pois o gráfico X-barra depende da estimativa do desvio padrão do processo, obtida através da amplitude média \bar{R} ou \bar{S});*
- *Se houver mudanças de maquinaria, matéria-prima, operador ou mudanças desta natureza, os limites de controle dos gráficos (X-barra e R) e (X-barra e S) devem ser reavaliados.*

2.4.7 Gráfico de Controle EWMA

Agora se passa a descrever com detalhes o gráfico EWMA: O gráfico de controle EWMA foi introduzido por Roberts (1950) e intensamente discutido por Crowder (1987) e Lucas & Saccucci (1990), e é excelente para detectar pequenas mudanças que ocorram no processo. Uma diferenciação deste gráfico em relação ao X-barra é que ele considera um processo fora de controle apenas se um ponto estiver fora dos limites de controle, não sendo necessário utilizar uma outra regra auxiliar como os Testes de Sequência para a avaliação do processo. Desta forma, o

gráfico de controle EWMA é um bom complemento aos gráficos de Shewhart quando se está interessado em detectar pequenas mudanças no processo.

*Para enfatizar o que foi dito, segundo Epprecht, Ninio & Souza (1988, p.10) “o gráfico de Shewhart possui boa eficiência para detectar diferenças entre a média μ_x (ou o parâmetro do processo sendo considerado) e o seu valor-alvo μ_0 (diferenças que chamaremos de **desvios**) acima de uma magnitude $1,0\sigma$ ou $1,5\sigma$.; para desvios menores, outros esquemas são mais eficientes e indicados, como o esquema de somas acumuladas (CUSUM) e o gráfico de EWMA”.*

O *EWMA* surgiu, principalmente, para cobrir uma lacuna deixada pelos gráficos de Shewhart, pois ela é utilizada para descobrir pontos que estão fora de controle em um processo onde existem pequenas variações na média esperada do processo de $1,0\sigma$ ou $1,5\sigma$. *EWMA*, também, pode ser utilizado para se fazer previsões. Este aspecto é muito importante para as indústrias, tais como as de fibras e as químicas onde muitas medidas de qualidade são exibidas. *EWMA* pode ser utilizada para determinar um apropriado “feedback”¹ para um ajustamento do processo da média, pois com a previsão, sempre, se saberá o possível comportamento do processo a um passo-à-frente. Este procedimento é detalhado em *Box et al.(1974)*.

¹ A palavra inglesa Feedback, pode ser traduzida por realimentação ou retroalimentação em português.

Embora Box, Jenkins & Macgregor (1974) tenham demonstrado que o gráfico EWMA possui propriedades ótimas em aplicações de previsão e controle, estas continuam sendo largamente negligenciadas como ferramenta pelos analistas da qualidade. Recentemente, autores como Hunter (1986), Lucas & Saccucci (1990), Montgomery & Mastrangelo (1991), seguindo os estudos de Roberts (1959), enfatizam o uso do gráfico de média móvel geométrica em aplicações de controle de qualidade. (Lago Neto, 1999, p.18)

Um sistema de controle pode ser estabelecido para determinar os ajustes necessários, como uma forma de compensar o comportamento alterado do processo, ficando o operador alerta na presença de uma causa especial. Deve-se salientar que a intervenção no processo, por causas desnecessárias ou por alarmes falsos, causa um desajuste no sistema, por isso é necessário ter uma regra muito específica para detecção de 'outlier' ou alguma causa especial, devendo-se ter em mente que uma pequena variabilidade é inerente ao próprio processo.

O gráfico de controle EWMA é muito efetivo contra pequenas mudanças no processo. Para que isto ocorra, os valores de L e λ , que são os parâmetros do gráfico, devem ser escolhidos de maneira a fornecer um melhor valor para o número de amostras que devem ser produzidas até que se encontre o primeiro valor fora de controle.

A vantagem principal deste procedimento é que ele detecta pontos fora de controle mais rápido que os gráficos *X-barra* e esta descoberta pode ser realizada se estes pontos estiverem dentro dos limites de confiança de 3σ .

Para uma melhor compreensão dos valores de L e λ , estuda-se, como encontrar o número médio de itens que podem ser detectados fora dos limites de controle.

2.4.7.2 Procedimento para a construção do gráfico EWMA

Segundo Hunter (1986) e Crowder (1987) o gráfico de controle de Shewhart apresenta uma menor sensibilidade em detectar pequenas mudanças no processo da média do que o gráfico EWMA, pois este possui um mecanismo que incorpora as informações de todas as observações anteriores mais a informação atual. Estas informações são ponderadas possibilitando atribuir aos valores passados um determinado grau de importância conforme desejado.

Conforme mostra a Figura 8.

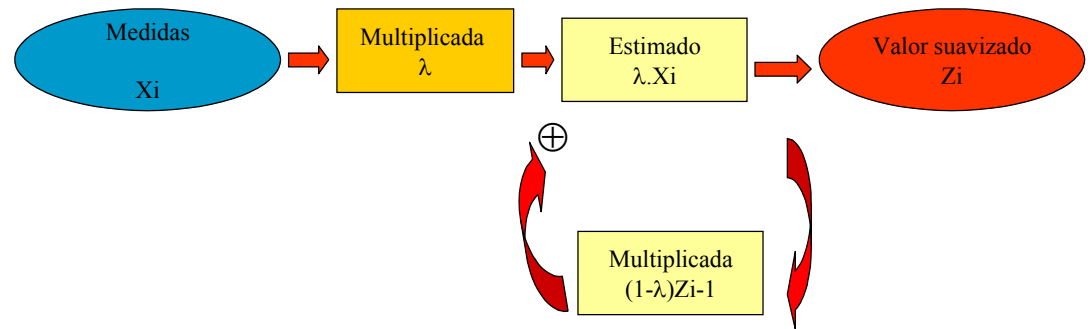


FIGURA 8 – Representação do processo recursivo EWMA.

Este processo é atualizado recursivamente como mostra a equação (30).

$$Z_i = \lambda X_i + (1 - \lambda)Z_{i-1} \text{ onde } 0 < \lambda \leq 1 \quad (30)$$

Muitas vezes a média do processo é utilizada para determinar o valor inicial da estatística *EWMA*, logo $Z_0 = \bar{X}$; a demonstração de que a estatística *EWMA* Z_i é uma média ponderada de todas as amostras anteriores substituindo por Z_{i-1} , no lado direito de (30) tem-se:

$$\begin{aligned} Z_i &= \lambda X_i + (1 - \lambda)[\lambda X_{i-1} + (1 - \lambda)Z_{i-2}] \\ &= \lambda X_i + \lambda(1 - \lambda)X_{i-1} + (1 - \lambda)^2 Z_{i-2} \end{aligned}$$

Desenvolvendo recursivamente para Z_{i-j} , com $j = 2, 3, \dots, t$, tem-se:

$$\begin{aligned}
Z_i &= \lambda x_i + \lambda(1-\lambda)x_{i-1} + (1-\lambda)^2[\lambda x_{i-2} + (1-\lambda)Z_{i-3}] \\
Z_i &= \lambda x_i + \lambda(1-\lambda)x_{i-1} + \lambda(1-\lambda)^2 x_{i-2} + (1-\lambda)^3 Z_{i-3} \\
Z_i &= \lambda x_i + \lambda(1-\lambda)x_{i-1} + (1-\lambda)^2 x_{i-2} + (1-\lambda)^3[\lambda x_{i-3} + (1-\lambda)Z_{i-4}] \\
Z_i &= \lambda x_i + \lambda(1-\lambda)x_{i-1} + \lambda(1-\lambda)^2 x_{i-2} + \lambda(1-\lambda)^3 x_{i-3} + (1-\lambda)^4 Z_{i-4} \\
&\vdots \qquad \qquad \qquad \vdots
\end{aligned}$$

Generalizando

$$Z_i = \lambda \sum_{j=0}^{j=i-1} (1-\lambda)^j X_{i-j} + (1-\lambda)^i Z_0 \quad (31)$$

Da equação (31) pode-se observar que os pesos $\lambda(1-\lambda)^j$ unidos aos valores médios precedentes na equação decrescem geometricamente com o aumento do tamanho da amostra, qualificando assim o gráfico de ponderado exponencialmente (Montgomery, 1996). Devido a este decréscimo geométrico às vezes o gráfico de controle *EWMA* é designado de *Média Móvel Geométrica (GMA)*, ou, média móvel exponencialmente geométrica ou ainda média móvel exponencialmente alisada. O termo exponencial, significa que às observações ou subgrupos individuais são dados progressivamente com menor importância ou peso. Para exemplificar, a Figura 9 mostra a quantidade $\lambda(1-\lambda)$ para $\lambda = 0,2$

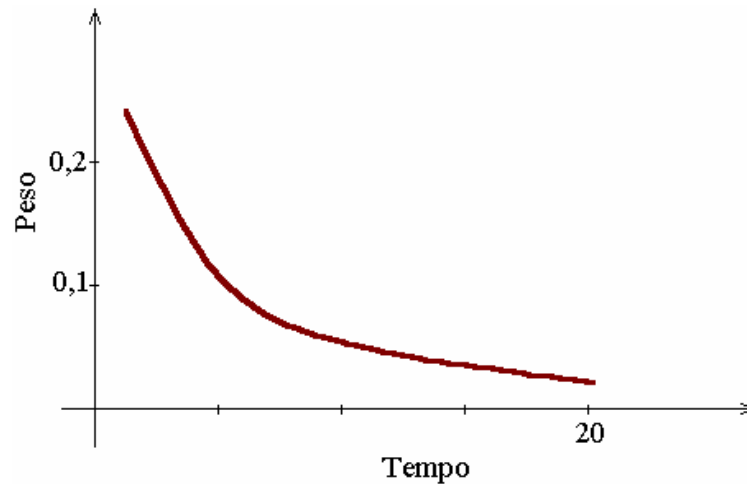


FIGURA 9 – Gráfico mostra o decréscimo do peso por tempo de tomada da média da amostra.

Fazendo-se a soma de uma Progressão Geométrica (PG), dada por

$$S_i = \frac{a_1 - a_n q}{1 - q}$$

dos pesos

$$[\lambda(1 - \lambda)^0, \lambda(1 - \lambda)^1, \lambda(1 - \lambda)^2, \lambda(1 - \lambda)^3, \dots, \lambda(1 - \lambda)^{i-1}]$$

vimos que eles somam a unidade, conforme mostrado abaixo.

$$\lambda \sum_{j=0}^{i-1} (1 - \lambda)^j = \lambda \left[\frac{1 - (1 - \lambda)^{i-1} \cdot (1 - \lambda)}{1 - (1 - \lambda)} \right] = \lambda \left[\frac{1 - (1 - \lambda)^i}{\lambda} \right] = 1 - (1 - \lambda)^i$$

Supondo-se que na equação (30), o valor de $\lambda = 0,2$ atribui-se um peso de 0,2 para o valor atual e 0,16, 0,128, 0,102 para os valores anteriores e repetindo-se esse procedimento observa-se que:

$$Z_i = \lambda X_i + (1 - \lambda) Z_{i-1}$$

$$Z_1 = 0,2 X_1 + 0,8 Z_0$$

$$\begin{aligned} Z_2 &= 0,2 X_2 + 0,8 Z_1 \\ &= 0,2 X_2 + 0,8 [0,2 X_1 + 0,8 Z_0] \\ &= 0,16X_1 + 0,2 X_2 + 0,64 Z_0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z_3 &= 0,2 X_3 + 0,8 Z_2 \\ &= 0,2 X_3 + 0,8 [0,16X_1 + 0,2 X_2 + 0,64 Z_0] \\ &= 0,128 X_1 + 0,16 X_2 + 0,2 X_3 + 0,512 Z_0 \end{aligned}$$

O fator de ponderação λ , pode ser ajustado para fornecer maior ou menor ponderação as observações atuais, resultando desta maneira em vários processos de suavização. Lucas & Saccucci (1987, 1990) mostram que o valor de lambda deve estar sempre entre zero e um ($0 \leq \lambda \leq 1$) e demonstram via simulação e estudos de sensibilidade que os gráficos *EWMA* com valores da constante de ponderação λ próximos de zero são úteis para detectar pequenas mudanças no processo. Eles recomendam a utilização do valor de 0,2 como sendo uma boa escolha e que serve como uma regra prática para ser utilizada na maioria das situações.

Segundo Lucas & Saccucci (1999) o parâmetro λ determina a média em que os dados mais antigos participam no cálculo da estatística *EWMA*. Um valor de $\lambda = 1$ implica que somente a medida mais recente influencia o *EWMA*. Assim, um valor grande para λ dá mais peso aos dados recentes e menos pesos aos dados antigos, um

valor pequeno para λ dá mais peso aos dados mais antigos. O valor de λ é ajustado geralmente entre 0,2 e 0,3 (Hunter, 1886), embora esta escolha seja um tanto arbitrária. Lucas & Saccucci (1990) dão as tabelas que ajudam ao usuário selecionar λ .

Para a descrição dos limites de controle do gráfico *EWMA*, supõe-se que as observações X_i são variáveis aleatórias independentes com variância σ^2 , então a variância de Z_i , conforme desenvolvida por Wasserman (1995), é mostrada a seguir:

$$V(Z_i) = V[\lambda X_1 + (1 - \lambda)Z_{i-1}]$$

$$V(Z_i) = \lambda^2 V(X_1) + (1 - \lambda)^2 V(Z_{i-1})$$

Assumindo $V(Z_i) = V(Z_{i-1})$ tem-se que:

$$V(Z_i)[1 - (1 - \lambda)^2] = \lambda^2 \cdot \sigma^2$$

Conseqüentemente

$$V(Z_i) = \frac{\lambda}{2 - \lambda} \cdot \sigma^2$$

Para pequenos valores de i , a variância de Z_i é deduzida pelos seguintes passos:

$$V(Z_1) = \lambda^2 V(\bar{X}_1) + (1 - \lambda)^2 V(Z_0) = \lambda^2 \cdot \sigma^2$$

$$V(Z_2) = \lambda^2 \cdot \sigma^2 + (1 - \lambda)^2 \lambda^2 \cdot \sigma^2$$

$$V(Z_2) = [1 + (1 - \lambda)^2] \lambda^2 \cdot \sigma^2$$

Por caminho similar, pode-se mostrar que:

$$V(Z_3) = \lambda^2 \cdot \sigma^2 [1 + (1 - \lambda)^2 + (1 - \lambda)^4]$$

$$V(Z_4) = \lambda^2 \cdot \sigma^2 [1 + (1 - \lambda)^2 + (1 - \lambda)^4 + (1 - \lambda)^6]$$

Generalizando, obtém-se que:

$$V(Z_i) = \lambda^2 \cdot \sigma^2 [1 + (1 - \lambda)^2 + (1 - \lambda)^4 + (1 - \lambda)^6 + \dots + (1 - \lambda)^{2(i-1)}]$$

$$V(Z_i) = \lambda^2 \cdot \sigma^2 \left[\frac{1 - (1 - \lambda)^{2i}}{1 - (1 - \lambda)^2} \right] = \sigma^2 \left[\frac{\lambda}{2 - \lambda} \right] \cdot (1 - (1 - \lambda)^{2i})$$

Ou seja,

$$\sigma_{Z_i}^2 = \sigma^2 \left[\frac{\lambda}{2 - \lambda} \right] \cdot (1 - (1 - \lambda)^{2i}) \quad (32)$$

Baseado na equação (32) os limites de controle para *EWMA* são um conjunto de três linhas. Uma linha central representa o valor μ_0 que é o valor objetivo que se deseja alcançar, mas podendo ser substituído pela média do processo e duas linhas externas dispostas a L unidades de desvio padrão da média do processo (L é a extensão dos limites de controle, ou seja, fator de abertura dos limites de controle), de escolha do usuário. Para a construção dos limites de controle também se utiliza o valor de λ , pois este fator de ponderação entra no cálculo do desvio padrão σ . Os limites de controle para o gráfico *EWMA*, são:

$$LSC = \mu_0 + L\sigma_{Z_i} = \mu_0 + L\sigma \sqrt{\frac{\lambda}{(2-\lambda)}[1-(1-\lambda)^{2i}]} \quad (33)$$

$$LC = \mu_0 \quad (34)$$

$$LIC = \mu_0 - L\sigma_{Z_i} = \mu_0 - L\sigma \sqrt{\frac{\lambda}{(2-\lambda)}[1-(1-\lambda)^{2i}]} \quad (35)$$

Onde:

μ_0 → valor alvo que se deseja alcançar;

L → comprimento dos Limites de Controle;

σ → desvio padrão dos Z_i ;

λ → constante de ponderação, devendo estar compreendida no intervalo de $0 \leq \lambda \leq 1$.

Pode-se observar que o fator $[1 - (1 - \lambda)^{2i}]$ tende à unidade, se i for um valor grande, isto é, a variância de Z_i tende para o valor limite $\sigma^2 \cdot \left(\frac{\lambda}{2-\lambda}\right)$, ou seja,

$$\lim_{i \rightarrow \infty} \sigma_{Z_i} = \sigma \cdot \sqrt{\frac{\lambda}{2-\lambda}} \quad (36)$$

e isto explica que no gráfico de controle EWMA após vários períodos de tempo os limites de controle tornam-se paralelos à linha central. Assim, para valores grandes de i , adotam-se limites de controle constantes, substituindo σ_{Z_i} em (33) e (35) por seu limite em (36), obtém-se os seguintes limites de controle:

$$LSC = \mu_0 + L\sigma\sqrt{\frac{\lambda}{(2-\lambda)}} \quad (37)$$

$$LIC = \mu_0 - L\sigma\sqrt{\frac{\lambda}{(2-\lambda)}} \quad (38)$$

No entanto, para valores pequenos de i , isto é, para as primeiras amostras, é aconselhável utilizar limites de controle que variam de amostra para amostra baseados no valor exato de σ_{Zi} que se obtém extraíndo a raiz quadrada em (32). O fator k é usualmente ajustado para 2 ou 3 ou dependendo do número de sinais fora de controle que pode ser tolerado no processo, ou escolhido usando-se as tabelas de Lucas & Saccucci (1990)².

O processo será julgado sob controle se todos os pontos estiverem dentro dos limites estabelecidos. Na Figura 10 tem-se um exemplo do gráfico de EWMA com tamanho do subgrupo igual a 1. Este gráfico usa $\lambda = 0,2$ e a estimativa média móvel da escala do sigma dos dados aleatórios tem N (38,1). Geralmente um controle combinado dos gráficos de Shewhart e EWMA é utilizado, onde primeiro avalia o sistema através do *X-barra* procurando-se por grandes variações e logo após se utiliza EWMA para se avaliar as pequenas discrepâncias.

² Os dados são supostos para serem independentes e estas tabelas supõem também uma população normal.

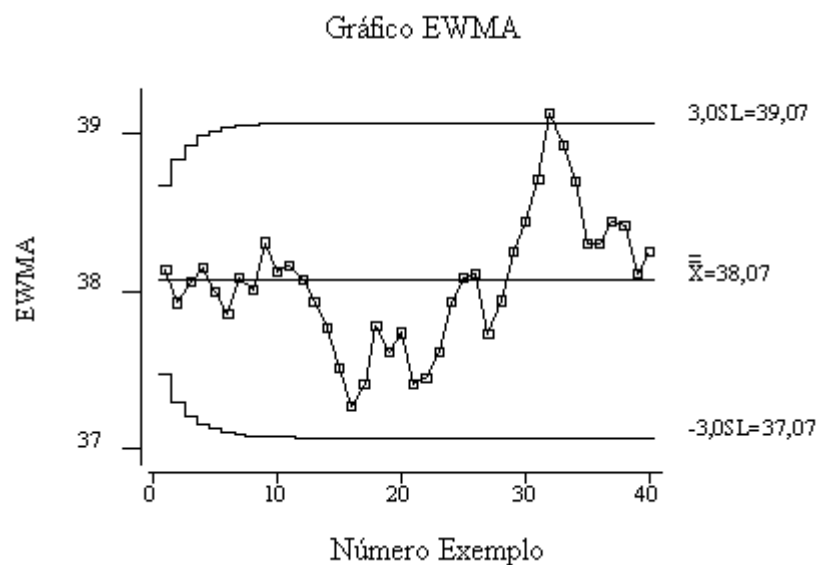


FIGURA 10 – Gráfico EWMA para valores individuais (Saccucci, 2000).

2.4.8 Escolha do Valor dos Parâmetros do Gráfico EWMA

Preocupado em providenciar uma medida para os gráficos de controle Page (1954) propôs a medida denominada em inglês “Average Run Length – ARL”. O “ARL” representa o número médio de períodos amostrais antes do processo sinalizar uma falta de controle, sendo utilizado para descrever a provável performance do gráfico de controle. Para a sua obtenção é necessário calcular o “Run Length – RL” que é definido como número de amostras observadas até que o gráfico mostre um ponto fora de controle, o que significa que algumas trocas ocorreram e que medidas corretivas devem ser tomadas. O cálculo do valor médio de RL fornecerá o valor do ARL.

Para a construção do gráfico de controle EWMA é necessário se definir os valores de L e λ que são os parâmetros do gráfico. Estes parâmetros devem ser escolhidos de maneira a fornecerem um melhor valor para o número de amostras que devem ser produzidas até que se encontre o primeiro ponto fora de controle. Crowder (1987); Lucas & Saccucci (1990) fornecem diversas combinações de deslocamentos de pontos da média e dos parâmetros λ e L , desta forma é possível escolher qual o valor do ARL que se deseja trabalhar. Considerando-se um valor de 370 ARL's para o gráfico X-barra têm-se uma referência na escolha dos parâmetros do gráfico EWMA, pois recomenda-se que primeiro seja especificado o valor desejado para o ARL e a mudança no processo que se deseja detectar, para depois se determinar os parâmetros. A combinação dos parâmetros para o gráfico EWMA e seus respectivos ARL's serão baseados nas simulações feitas por Crowder (1987), mostradas no Anexo B.

Quando os dados são correlacionados ou o objetivo do estudo é a previsão Montgomery & Mastrangelo (1991) e também Hunter (1986) sugerem selecionar o valor de λ que minimize a soma dos quadrados dos resíduos a um passo-à-frente dos erros de previsão. Eles também demonstram que se a série temporal comporta-se como um passeio aleatório, esta irá produzir previsões dos erros não-

correlacionados a um passo-à-frente, conduzindo a limites estreitos nos gráficos de controle.

Woodall & Maragah (1990) recomendam escolher os valores dos parâmetros e L que possibilitem minimizar o valor de ARL para uma mudança específica no controle da média desejada de um ARL sob controle. Eles também recomendam utilizar os limites de Shewhart, combinados com EWMA, para se precaver de problemas de inércia no sistema.

Em geral, os valores $0,05 \leq \lambda \leq 0,25$ funcionam bem para o papel de ponderação, pois $\lambda = 0,05$; $\lambda = 0,10$ e $\lambda = 0,20$ são uma boa regra para detectar pequenas mudanças.

Segundo estudos de Epprecht, Ninio & Souza (1998), afirmam que uma questão que surge em qualquer esquema de controle estatístico do processo, mais especificamente na implementação do gráfico *EWMA* é a do projeto do gráfico: a escolha dos valores para seus parâmetros, que no caso são: o tamanho da amostra n , o intervalo de tempo entre as amostras h , o fator de abertura dos limites de controle L , isto é , a distância entre os limites de controle e a linha central do gráfico, dividida pelo desvio padrão da estatística grafada e a constante de amortecimento λ . Segundo os autores, na literatura, não aparece proposta clara e acabada para a escolha destes parâmetros. Como exemplos eles citam o caso de soluções com grande frequência

de alarmes falsos. Muitas vezes as recomendações são genéricas e não muito precisas com relação aos parâmetros λ e L , no entanto nada falando com relação ao tamanho da amostra e ao intervalo de tempo entre as amostras.

Os autores também afirmam que: esquemas *EWMA* para \bar{X} , Lucas & Saccucci (1990, 1987) fornecem tabelas de *ARL* (o valor esperado do número de amostras até a detecção de um descontrole – desvio da média μ_x) para diversos valores de λ e L . O *ARL* é tabelado em função da magnitude δ do desvio de μ_x em relação ao seu valor alvo, medido em números de desvios-padrão de \bar{X} onde μ_0 é o valor alvo e $\sigma_{\bar{X}}$ o desvio padrão de \bar{X} ;

$$\delta = \frac{\mu_x - \mu_0}{\sigma_{\bar{X}}} \quad (39)$$

Contudo, o desvio padrão $\sigma_{\bar{X}}$ e, em consequência, δ , depende do tamanho da amostra. Desta forma, estas tabelas podem ser úteis para orientação da escolha de λ e L ; no caso do valor de n ser especificado. No entanto, não apresentam orientação para esta escolha do valor de n também não oferecem indicações para a escolha do valor de h . Eles afirmam ainda, que Crowder (1989) aconselha uso de tabelas de Lucas & Saccucci (1987), seguido de uma análise de sensibilidade, e mostra graficamente resultados que os últimos apresentam tabelados. Mesmo, com a permanência da limitação em relação ao tamanho da amostra, sendo esta pré-estabelecida. Deve-se dar consideração para a escolha do tamanho da amostra para poder-se

decidir entre usar um esquema *EWMA* ou um gráfico convencional de shewhart, pois, sabe-se, que cada um dos esquemas é mais eficiente em uma faixa de valores δ e também que δ , depende do tamanho da amostra.

Como pode ser visto existem diferentes abordagens para se determinar as constantes λ e L para a construção do gráfico de *EWMA*. E neste estudo serão utilizados os resultados de Crowder (1987).

No Anexo C encontram-se as tabelas com os valores sugeridos por Epprecht, Ninio & Souza (1998), que se basearam para sua construção nas tabelas de Crowder (1987) apresentadas no Anexo B, que também são usadas para construir os gráficos de *EWMA* com *ARL's* especificado em $\mu = 0$ e em $\mu = \mu_l$, para algum desvio do alvo, e escolhe o gráfico que se baseou em um perfil de *ARL* sobre a região fora de controle de maior interesse. Os esquemas relatados do controle do gráfico *EWMA* e das análises foram baseados geralmente em considerações de *ARL*, tais como precedem. Entretanto mais do que *ARL's* pode ser necessário. Na maioria dos casos, o projeto de *EWMA* pode ter relação com a probabilidade de sinais falsos, fora de controle para o esquema de controle de *EWMA*.

CAPÍTULO III
3. GRÁFICOS DE CONTROLE COMBINADOS
EWMA-SHEWHART (CES)

Neste capítulo, apresenta-se a proposta para eliminar a dúvida entre o uso do esquema EWMA e o esquema X-barra, isto é, a sugestão é aplicar os esquemas simultaneamente. E a implementação deste esquema não apresenta nenhum trabalho extra, já que no esquema EWMA é necessário o cálculo da média.

3.1 Introdução

Sabe-se que o gráfico EWMA não substitui o gráfico X-barra, pois o gráfico EWMA é projetado para detectar rapidamente pequenas mudanças no processo, o gráfico X-barra foi projetado para detectar grandes mudanças no processo, no

entanto a utilização em conjunto, ou seja, X-barra combinado com EWMA, oferece um monitoramento mais detalhado do processo, captando grandes e pequenas mudanças.

De acordo com estudos realizados por Vargas (2001), diz que o gráfico CUSUM (gráfico das Somas Acumuladas) e o gráfico EWMA possuem uma boa performance para detectar pequenas mudanças e o contrário ocorre para grandes mudanças que neste caso é o gráfico Shewhart que se desempenha bem. Diz ainda, que o gráfico de EWMA muitas vezes é superior ao gráfico de CUSUM para grandes mudanças, particularmente se $\lambda > 0,10$. A autora acrescenta também que uma boa forma de melhorar a sensibilidade do método de controle para grandes mudanças, sem sacrificar a capacidade em detectar pequenas mudanças com rapidez, é fazendo-se o uso da combinação dos gráficos de Shewhart com o EWMA. Este método de controle combinado de EWMA-Shewhart é eficiente para as pequenas e também para as grandes mudanças. Para o uso deste gráfico, é útil ampliar os limites usuais do gráfico de Shewhart, no intervalo de amplitudes de desvios padrões (3,25 a 3,5 sigmas). Também, pode-se demarcar X_i (ou \bar{X}_i) e a estatística Z_i no mesmo gráfico de controle juntamente com os limites de Shewhart e EWMA. Com isto produz-se o gráfico

combinado onde os operadores rapidamente mostram a capacidade para interpretar. E, se gerado por um programa computacional, pode-se fazer o uso dos dois limites de controle em uma única estatística.

Segundo Epprecht, Ninio & Souza (1998), o esquema combinado foi criado para prover proteção contra desvios de diferentes magnitudes e não para otimizar a proteção contra uma única magnitude de desvios da média. Como por exemplo, o esquema EWMA seria utilizado com os parâmetros mais adequados para proporcionar proteção contra desvios da ordem de $0,7\sigma$, o de Shewhart seria utilizado para proporcionar proteção contra desvios da ordem de $1,7\sigma$.

3.2 Construindo o Gráfico de Controle Combinado EWMA-Shewhart

Segundo Lin & Adams (1996), gráfico de controle de controle combinado EWMA-Shewhart (CES) é obtido alterando o gráfico tradicional de controle EWMA de modo que um sinal fosse considerado fora de controle pelo gráfico de EWMA ou se a observação mais recente se desviar do valor alvo por mais do que um valor especificado (limite de Shewhart). Os limites de Shewhart no gráfico combinado são recomendados a serem maiores do que se fosse usado para um gráfico tradicional do controle de Shewhart para evitar uma grande redução de ARL. Lucas & Saccucci

(1990) fornecem um algoritmo computacional para se determinar os parâmetros do gráfico de controle necessários para fornecer o controle desejado do ARL's para o gráfico de controle CES que supõe observações independentes e identicamente distribuídas.

Este mesmo autor afirma que, os ARL's do gráfico de controle de EWMA e do gráfico de controle CES na tabela em Anexo D são consistentes com os resultados de Lucas & Saccucci (1990). Os trabalhos do gráfico de controle CES são eficientes em detectar grandes e pequenas mudanças com ARL's perto daqueles do gráfico de controle de EWMA para pequenas mudanças. E para grandes mudanças os ARL's do gráfico de controle CES são menores do que aqueles dos gráficos para valores individuais.

Já os autores Lucas & Saccucci (1990) afirmam que as tabelas de ARL's para o gráfico combinado EWMA-Shewhart dadas por eles, indicam que as amostras combinadas de EWMA-Shewhart melhoram os valores de ARL similarmente aos que são obtidos por um Combinado CUSUM-Shewhart, (Lucas, 1982). Eles sugerem que os limites do gráfico de Shewhart sejam maiores do que os usados para um gráfico padrão de controle de Shewhart impedindo que os limites de Shewhart causem uma grande redução no controle do ARL. Embora os limites de controle de Shewhart

recomendados dependam do controle do ARL e do valor de λ os limites de controle de Shewhart entre 4,0 e 4,5 desvios padrões da média, trabalham bem para um EWMA com um controle de ARL igual a 500.

3.2.1 Etapas para a Construção do Gráfico de Controle Combinado

A elaboração desta proposta de construção é baseada em Lins & Adams (1996). O fenômeno da recuperação da previsão deve ser considerado na construção dos gráficos de controle CES aplicados aos erros previstos. O raciocínio da abordagem do projeto é simples. O gráfico de controle para valores individuais é mais provável ao sinal na primeira observação depois da mudança, visto que o gráfico de controle de EWMA é mais provável sinalizar em períodos de tempo subseqüentes. Por isso, o projeto baseia-se do componente de EWMA do gráfico de controle Combinado EWMA-Shewhart no tamanho esperado do erro previsto e que segue a recuperação da previsão. A melhoria real no desempenho do gráfico de controle depende do modelo básico especificado, ou seja, dos valores da constante de ponderação. Para processos com pequenos valores para constante de ponderação a representação do processo é atingida muito mais rápido que para processos com grandes valores para a constante de ponderação. Runger, Willemain & Prabhu (1995)

estudam o impacto da recuperação prevista e recomendam modificações similares as etapas fundamentais para projetar gráficos de controle CUSUM para aplicações baseadas em previsão.

A idéia básica do CES é grafar conjuntamente a estatística EWMA com um fator de ponderação em torno de 4 e 4,5 desvios padrões e um fator de ponderação para a estatística EWMA em torno de 0,7 Lucas & Saccucci (1990); onde esta estatística é grafada simultaneamente contra os limites X-barra e EWMA, desta forma é possível com um único gráfico capturar pequenas e grandes variações. Mas um cuidado especial deve ser tomado quando o processo apresentar um comportamento autoregressivo, pois neste caso os pressupostos de independência do gráfico X-barra são violados. Sendo assim, gráficos separados X-barra e EWMA são recomendados.

Para Crowder (1989) a escolha para o melhor gráfico de controle depende também do critério usado para avaliar o desempenho do esquema de monitoração. Determinar um esquema apropriado baseado na previsão depende conseqüentemente do desconhecido e da informação desconhecida. O gráfico de controle combinado EWMA-Shewhart fornece a versatilidade requerida para o

praticante ao monitorar processos com os esquemas baseados na previsão.

O gráfico de controle CUSUM é um concorrente popular do gráfico EWMA e é eficaz para detectar pequenas mudanças no processo. Os resultados fornecem para o EWMA e para os gráficos de controle CES generalizações para incluir o gráfico de controle CUSUM. Os estudos de Lins & Adams (1996) não mostram nenhuma diferença prática quando comparado com o desempenho do gráfico de controle de EWMA com o gráfico de controle CUSUM, sendo aplicados aos erros previstos. Não há também alguma diferença prática nos desempenhos dos gráficos de controle combinado EWMA-Shewhart ao gráfico de controle combinado CUSUM-Shewhart aplicados aos erros previstos (Lins & Adams, 1996).

CAPÍTULO IV
4. ANÁLISE DOS GRÁFICOS DE CONTROLE
ESTATÍSTICO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO –
CONCRETO DOSADO EM CENTRAL

Neste capítulo se faz a aplicação da metodologia proposta em uma empresa do setor da Construção Civil que produz concreto dosado em central, a qual fornece às empresas e particulares da região de Santa Maria.

4.1 Introdução

O concreto é um material heterogêneo formado pela mistura de materiais cimentícios, agregado miúdo (areia), agregado graúdo (pedra) e água, com ou sem a incorporação de aditivos ou adições minerais, que desenvolve suas propriedades pelo endurecimento da pasta de cimento (cimento e água). Assim podemos descrever seus componentes da seguinte forma:

Materiais Cimentícios

Materiais que desenvolvem propriedades aglomerantes quando utilizados em concreto, tais como: cimento portland ou

combinações desse com cinzas volantes, outros tipos de materiais pozolânicos, sílica ativa ou escória granulada de alto-forno.

Cimento Portland é um aglomerante hidráulico obtido pela moagem de clínquer portland, ao qual se adiciona, durante essa operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. Durante a moagem é permitido adicionar a essa mistura materiais pozolânicos, escórias granuladas de alto-forno e/ou materiais carbonáticos, nos teores indicados nas normas específicas. (ABESC, 2000, p.5)

Agregados

Material sem forma ou volume definido, geralmente inerte, de dimensões e propriedades adequadas para a produção de argamassa e concreto.

Água

Considerada potável, sem presença de substâncias deletérias que podem ocasionar reações químicas com o concreto e/ou atacar a armadura da estrutura (corrosão).

Aditivos Químicos

Material adicionado durante o processo de mistura do concreto em pequenas quantidades (geralmente inferior a 5,0%) proporcionais à massa de cimento para modificar as propriedades do concreto fresco ou endurecido.

Adições Minerais

Material inerte ou ativo, sob o ponto de vista de reatividade hidráulica, adicionado ao concreto para melhorar certas propriedades ou para alcançar propriedades especiais.

4.2 Concreto Dosado em Central – A Busca da Qualidade

O Concreto dosado em central é um concreto dosado, misturado em equipamento estacionário ou em caminhão betoneira, sendo transportado por caminhão betoneira ou outro tipo de equipamento, dotado ou não de dispositivo de agitação, para entrega antes do início de pega do cimento, em local e tempo determinados, para que se processem as operações subseqüentes à entrega, necessárias à obtenção de um concreto endurecido com as propriedades especificadas.

A empresa que fornece serviços de concretagem é a empresa responsável pelos serviços de dosagem, quantificação dos materiais e, geralmente, mistura e transporte de concreto, da central até o local de entrega, de acordo com o estabelecido em contrato. A Figura 11 mostra uma central de concreto, mostrando o conjunto de instalações onde se efetuam as operações de quantificação dos materiais e, conforme o caso, mistura do concreto, de acordo com Norma específica (NBR 12655).

O concreto dosado em central é normalizado pela ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas através do CB-18 Comitê Brasileiro de Cimento, Concreto e Agregados. O conhecimento e o cumprimento das normas técnicas sobre a execução do concreto dosado em central é uma das exigências para execução com qualidade dos serviços de concretagem. As normas que orientam sobre a perfeita utilização do concreto são:

- NBR 6118 (Projeto e Execução de Obras de Concreto Armado),
- NBR 7212 (Execução do Concreto Dosado em Central),
- NBR 12654 (Controle Tecnológico dos Materiais Componentes do Concreto),
- NBR 12655 (Preparo, Controle e Recebimento de Concreto) e
- NBR 8953 (Concreto para Fins Estruturais - Classificação por Grupos de Resistência).



FIGURA 11 – Moderna Central Dosadora de Concreto, (ABESC, 2000).

Uma família de concreto é um grupo de composição de concreto para o qual uma relação confiável entre propriedades relevantes é estabelecida e documentada. Normalmente uma família de concreto deve compreender concretos que apresentem consistência dentro de um mesmo intervalo, elaborados com cimento de mesmo tipo e classe de resistência e proveniente de um único fabricante, contendo agregados de uma mesma origem

geológica, tipo e dimensões. Se aditivos ou adições forem usados, as novas composições do concreto podem formar famílias separadas.

As etapas de preparo do concreto dosado em central são as seguintes:

- a) caracterização dos materiais componentes do concreto;
- b) estudo de dosagem do concreto;
- c) ajuste e comprovação do traço de concreto;
- d) elaboração do concreto.

A elaboração do concreto consiste nas operações iniciadas com o armazenamento dos materiais, sua medida e mistura, bem como na verificação das quantidades utilizadas desses materiais. Essa verificação tem por finalidade comprovar que o proporcionamento da mistura atende ao traço especificado e deve ser feita no mínimo uma vez ao dia, ou quando houver alteração do traço.

O concreto é um dos materiais da construção mais utilizados em todo o mundo, seu volume de consumo só perde para a água. A busca constante da qualidade, a necessidade da redução de custos e a racionalização dos canteiros de obras, faz com que o concreto dosado em central, seja cada vez mais utilizado. Entre as vantagens de se aplicar o concreto dosado em central, destaca-se:

- Eliminação das perdas de areia, brita e cimento;

- Racionalização do número de operários da obra, com conseqüente diminuição dos encargos sociais e trabalhistas;
- Maior agilidade e produtividade da equipe de trabalho;
- Garantia da qualidade do concreto graças ao rígido controle adotado pelas centrais dosadoras;
- Redução no controle de suprimentos, materiais e equipamentos, bem como eliminação das áreas de estoque, com melhor aproveitamento do canteiro de obras;
- Redução do custo total da obra.

A produção de concretos especiais no próprio canteiro de obras é considerada antieconômica, além de não ser permitido pelas normas vigentes, em virtude de características que necessitam de grande controle de produção. O sucesso de uma construção depende, em grande parte, da correta definição do tipo de concreto a ser utilizado. A Tabela 2 traz os principais tipos de concreto dosado em central e suas características.

TABELA 2 – Concretos dosados em central e comumente utilizados.

Tipo	Aplicação	Vantagens
Rolado	Barragens, pavimentação rodoviária (base e sub-base) e urbanas (pisos, contra-pisos).	Maior durabilidade.
Bombeável	De uso corrente em qualquer obra. Obras de difícil acesso. Necessidade de vencer alturas elevadas ou longas distâncias.	Maior rapidez na concretagem. Otimização da mão-de-obra e equipamentos. Permite concretar grandes volumes em curto espaço de tempo.
Resfriado	Peças de elevado volume como bases ou blocos de fundações.	Permite o controle da fissuração
Colorido	Estruturas de concreto aparente, pisos (pátios, quadras, calçadas), monumentos, defensas,	Substitui gasto com revestimento. Evita o custo de manutenção de pinturas.

Projetado	guarda-corpo de pontes, etc. Reparo ou reforço estrutural, revestimento de túneis, monumentos, contenção de taludes, canais e galerias.	Dispensa a utilização de fôrmas.
Alta Resistência Inicial	Estruturas convencionais ou protendidas, pré-fabricados (estruturas, tubos, etc).	Melhor aproveitamento das fôrmas. Rapidez na desforma. Ganhos de produtividade.
Fluido	Peças delgadas, de elevada taxa de armadura, concretagem de difícil acesso para a vibração.	Reduz a necessidade de adensamento (vibração). Rapidez na aplicação.
Pesado	Como lastro, contra-peso, barreira à radiação (câmaras de raios-X ou gama, paredes de reatores atômicos), lajes de subpressão.	Redução do volume de peças utilizadas como lastro ou contra-peso, substituição de painéis de chumbo (radiação).
Leve (600 kg/m ³ a 1200 kg/m ³)	Elementos de vedação (paredes, painéis, divisórias), rebaixos de lajes, isolante termo-acústico, nivelamento de pisos, etc.	Redução do peso próprio da estrutura. Isolante termo-acústico.
Leve Estrutural (10 MPa a 20 MPa)	Peças estruturais, enchimento de pisos e lajes, painéis pré-fabricados.	Redução do peso próprio da estrutura.
Pavimentos Rígidos	Pavimentos rodoviários e urbanos, pisos industriais, pátios de estocagem.	Maior durabilidade, menor custo de manutenção.
Alto Desempenho (CAD)	Elevada resistência (mecânica, física e química), pré-fabricados, peças protendidas.	Maior durabilidade, melhora a aderência entre o concreto e o aço.
Convencional (10 Mpa a 30 MPa)	Uso corrente na construção civil.	O concreto dosado em central possui controle de qualidade e propicia ao construtor maior produtividade e menor custo.
Submerso	Plataformas marítimas.	Resistência à agressão química.
Com fibras e aço, plásticas ou de polipropileno	Reduz a fissuração.	Maior resistência à abrasão, à tração e ao impacto.
Graute	Agregados de diâmetro máximo de 4,8mm.	Grande fluidez, auto-adensável.

Fonte: Manual do Concreto Dosado em Central – ABESC.

4.3 Amostragem do Concreto

Depois do concreto ser aceito por meio do ensaio de abatimento (*slump test*), deve-se coletar uma amostra que seja representativa para o ensaio de resistência que também deve seguir as especificações das normas brasileiras:

- não é permitido retirar amostras, tanto no princípio quanto no final da descarga da betoneira;
- a amostra deve ser colhida no terço médio do caminhão betoneira;

- a coleta deve ser feita cortando-se o fluxo de descarga do concreto, utilizando-se para isso um recipiente ou carrinho de mão;
- deve-se retirar uma quantidade suficiente, 50% maior que o volume necessário, e nunca menor que 30 litros.

Em seguida, a amostra deve ser homogeneizada para assegurar sua uniformidade, posteriormente sendo realizada a moldagem em fôrmas padronizadas, que após desmoldagem fornecerão os corpos de prova. A moldagem deve respeitar as seguintes orientações:

- preencher os moldes cilíndricos (150mm x 300mm) em quatro camadas iguais e sucessivas, conforme Figura 12, aplicando 30 golpes em cada camada, distribuídos uniformemente. A última conterà um excesso de concreto; retire-o com régua metálica;
- deixar os corpos de prova nos moldes, sem sofrer perturbações e em temperatura ambiente por 24 horas;
- após este período deve-se identificar os corpos de prova e transferi-los para o laboratório, onde serão rompidos para testar sua resistência.



FIGURA 12 – Procedimento de moldagem dos corpos de prova.

4.4 Bombeamento: Uma Grande Solução no Transporte de Concreto

No modo de lançamento convencional o concreto é transportado até as formas por meio de carrinhos de mão, giricas, caçambas, calhas e guas. O rendimento nesse tipo de transporte é de 4 a 6 metros cúbicos por hora. No modo bombeável são utilizados bombas de concreto. Elas transportam o concreto através de uma tubulação metálica, desde o caminhão betoneira até a peça a ser concretada, conforme Figura 13. Com o sistema, pode-se vencer grandes alturas ou grandes distâncias horizontais, obtendo-se uma produção média de 35 a 45 metros cúbicos por hora. Há equipamentos que têm capacidade para bombear até 100 metros cúbicos por hora.



FIGURA 13 – Autobomba dotada de lança de distribuição para lançamento do concreto em grandes quantidades e a grandes distâncias.

O concreto bombeável é ideal para todo tipo e tamanho de obra, porém a preferência por seu uso se dá quando trabalhamos com grandes alturas, áreas de difícil acesso, barragens, concreto submerso, centrais nucleares, longas distâncias e túneis. O sistema de bombeamento é a melhor solução para se trabalhar com grandes volumes em curtos espaços de tempo. Principalmente no caso de grandes fundações, lajes de edifícios e tubulações.

Devido à sua plasticidade, trabalhabilidade e quantidade de finos, o concreto bombeável é ideal para obras em concreto aparente. O método de bombeamento apresenta muitas vantagens. As principais são:

- maior velocidade de transporte e na aplicação do concreto;

- racionalização da mão de obra permite maior volume concretado por operário;
- redução da quantidade de equipamentos de transporte, como guinchos, gruas, elevadores e giricas;
- menor necessidade de vibração por se tratar de um concreto mais plástico e com uma granulometria contínua.

O uso da técnica de bombeamento permite a concretagem contínua, evitando paralisações e as problemáticas juntas de concretagem. A rapidez faz com que o trabalho seja mais homogêneo.

Para que o bombeamento tenha êxito, são imprescindíveis o entrosamento da obra com a central dosadora de concreto. O resultado geral para o construtor é a redução de custos para a obra, aumento da produtividade com uma redução significativa na quantidade de equipamentos. Como a concretagem é feita rapidamente com o bombeamento de concreto, o construtor deve observar alguns cuidados: O concreto bombeável é colocado quase que de uma vez na fôrma e exerce uma pressão maior sobre o escoramento lateral que o lançamento convencional. Dessa forma, o sistema de escoramento deve ser reforçado. Para a aplicação de concreto, é importante manter pessoal restrito e bem dimensionado e não se esquecer de ter sempre vibradores de reserva (ABESC, 2000).

4.5 Rompimento dos Corpos de Prova e Análise dos Resultados

Conforme Isaia (1988) a dosagem de um concreto é sempre feita com margem de segurança especificada em norma (NBR 12655). Enquanto o calculista especifica a resistência característica do concreto – f_{ck} – a concreteira dosa o concreto de forma a atingir uma determinada resistência média (f_{cj}), segundo:

$$f_{cj} = f_{ck} + 1,65 \cdot S_d \quad (40)$$

Na equação (40), a resistência média do concreto a "j" dias inclui a resistência especificada pelo calculista (f_{ck}) mais um coeficiente t de *student*, para o qual 95% dos valores sejam superiores ao f_{ck} (1,65) multiplicado pelo desvio padrão (S_d) da central de concreto, definido em Norma e ajustado pelo controle do processo de produção.

Após a concretagem deve-se saber se o concreto atingiu a resistência especificada em projeto pelo calculista. Para isso, rompem-se os corpos de prova moldados no local da obra, em prensas especiais nos laboratórios credenciados. Após a ruptura dos corpos de prova e, de posse dos resultados é realizado o "controle estatístico da resistência do concreto", segundo a NBR 7212.

A NBR 12655 especifica como deve ser calculada a aceitação da estrutura. Como regra geral podemos afirmar que se faz o caminho inverso da dosagem do concreto. Ou seja, de posse dos resultados dos rompimentos dos corpos de prova, podemos calcular o valor médio dos rompimentos (f_{cj}) e também o desvio padrão, obtendo-se o valor da f_{ck} da equação (40) expressa anteriormente. Este controle é importante como testemunho da segurança da estrutura que será futuramente utilizada.

4.6 Controle da Qualidade

O controle do concreto no seu estado fresco é de vital importância para garantir suas propriedades no estado endurecido. Um dos grandes desafios dos tecnologistas de concreto é compatibilizar o desempenho do concreto desenvolvido em laboratório com aquele entregue na obra. Isto porque estes concretos estão sujeitos a formas diferentes de manuseio, transporte, lançamento, adensamento e cura. Logo, a garantia da qualidade do concreto depende diretamente de uma aplicação efetuada de acordo com práticas recomendadas e com a normalização técnica vigente.

Segundo Neville (1997), mesmo que o concreto especificado seja entregue segundo todos os requisitos expressos no pedido, a aplicação inadequada pode afetar de forma irreversível a qualidade do concreto endurecido. O controle do concreto dosado em central é exercido pela central dosadora de acordo com a NBR 7212 –

Execução de Concreto Dosado em Central, que inclui as operações de armazenamento dos materiais, dosagem, mistura, transporte, recebimento, controle da qualidade, inspeção, aceitação e rejeição. A essência do controle interno da qualidade é a utilização de ensaios que caracterizem os materiais, equipamentos, concreto fresco e endurecido para garantir a qualidade do processo de produção de acordo com as normas técnicas.

A resistência do concreto endurecido, para o controle de produção (NBR 7212), é feita por critérios diferentes dos de recebimento (NBR 12655), devido à grande quantidade de resultados disponíveis numa central dosadora. Desta forma, o controle da qualidade do concreto, como destacado anteriormente, tem de abranger as diversas fases do serviço de concretagem e não se basear apenas no controle de sua resistência. Disto resulta a viabilidade técnica e econômica do concreto dosado em central. A aceitação ou rejeição do concreto será baseada nas verificações e ensaios efetuados pelo contratante com o objetivo de comprovar as características do concreto e o atendimento às exigências constantes do pedido (ABESC, 2000).

4.7 Análise dos Gráficos de Controle Estatístico

Para a aplicação dos gráficos de controle supôs-se que todos os pontos selecionados no processo eram idênticos e normalmente distribuídos.

Neste item, avalia-se a característica de qualidade Resistência à Compressão (f_c), em megapascal (MPa) dos quatro tipos de concreto bombeado mais produzidos na empresa, de traços (misturas) denominados MB1/4, MB2/4, MB1/6 e MB1/7, com misturas apresentadas na Tabela 3. Esta avaliação foi realizada por meio dos gráficos de controle X-barra e EWMA a fim de investigar sua estabilidade e caracteriza-los quanto seu estado de controle estatístico.

TABELA 3 – Misturas usadas para confeccionar cada traço utilizado na avaliação dos produtos.

<i>R</i>
<i>e</i>
<i>si</i>
<i>st</i>
<i>ê</i>
<i>n</i>
<i>c</i>
<i>i</i>
<i>a</i>
<i>(</i>
<i>M</i>
<i>P</i>
<i>a</i>
<i>)</i>
<i>1</i>
<i>5</i>
<i>,</i>
<i>0</i>

1
5
,

1
8
,

2
0
,

Na análise do gráfico X-barra, serão utilizados testes de seqüência, os mesmos servem para apontar a ocorrência de padrões especiais (sistemáticos ou não-aleatórios), que podem existir e, desta forma servem para sinalizar que alguma fonte de variação está influenciando no resultado do processo, caracterizando o sistema quanto ao seu estado de controle e assim podendo ser identificadas e reduzidas.

No gráfico EWMA, segue-se a escolha dos parâmetros sugeridos por Crowder (1987), utilizando-se as combinações de (λ, L) igual a $(0,05; 2,50)$. Souza (2000) afirma que com esses valores, pode-se atingir um valor comparável de um ARL formado por 370 observações nos gráficos X-barra quando eles estão sob controle.

Nos gráficos X-barra e EWMA, os pontos distinguidos em vermelho representarão a instabilidade que está sucedendo no processo.

- Análise gráfica da resistência à compressão do concreto bombeável denominado MB1/4 (resistência característica = 15,0 MPa).

Calcularam-se os limites de controle para o gráfico X-barra apresentado na Figura 14, conforme pode ser visto a seguir:

$$LSC = 27,36 \text{ MPa e LIC} = 15,68 \text{ MPa}$$

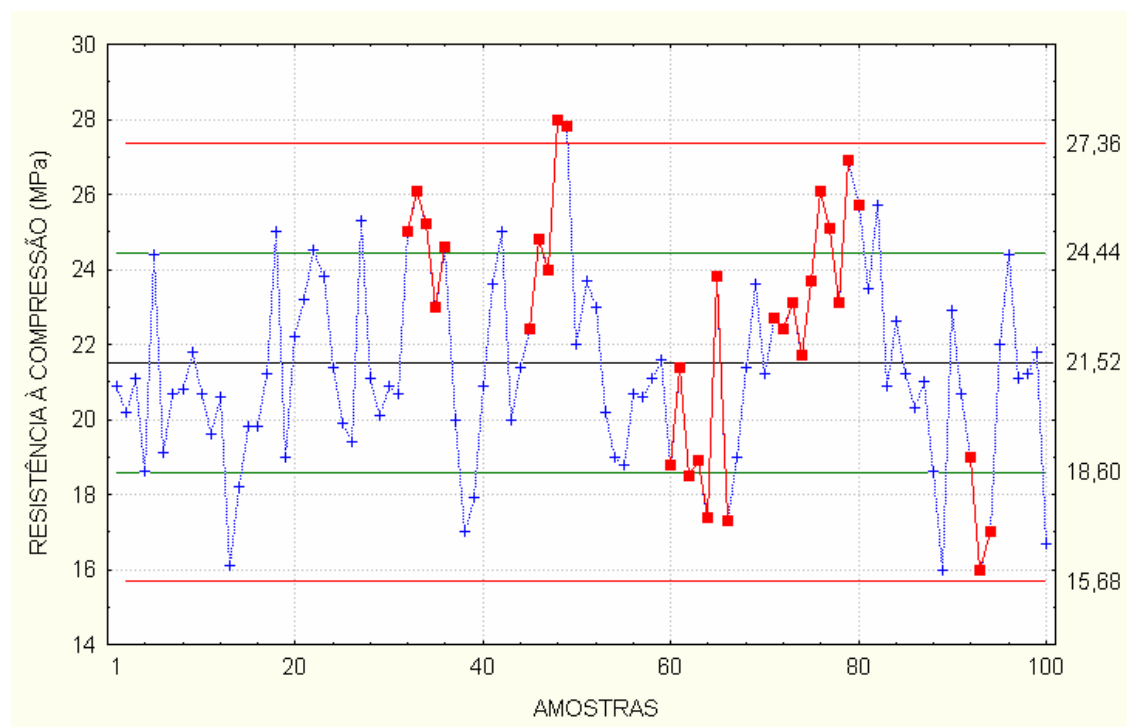


FIGURA 14 – Gráfico X-barra para concreto bombeável de resistência característica = 15,0 MPa (MB1/4).

Nos resultados apresentados na Figura 14, observam-se dois pontos discrepantes, ou seja, que estão além dos limites de três desvios padrões. Em relação aos testes de seqüência aplicados ao gráfico *X-barra*, observa-se uma seqüência de nove amostras de um mesmo lado do valor central, sendo representadas pelo conjunto de amostras iniciada na amostra 71. Constata-se também que há quatro grupos de amostras em que duas de três amostras sucessivas estão na zona A ou além dela, que correspondem às observações com início na amostras 47, 64, 78 e 92. E ainda apareceram quatro de cada cinco amostras sucessivas, situadas na zona B ou além dela, de um mesmo lado do gráfico, correspondendo às amostras 32, 45, 60 e 75.

Desta maneira, constatou-se que através dos testes de seqüência é possível identificar um padrão não aleatório, revelando a instabilidade do sistema quando há grandes variações que são relevantes e analisadas pelo gráfico *X-barra*. Como efetuado na revisão da literatura, a existência de pequenas variações no sistema são analisadas através do gráfico de *EWMA*, que é apresentado na Figura 15.

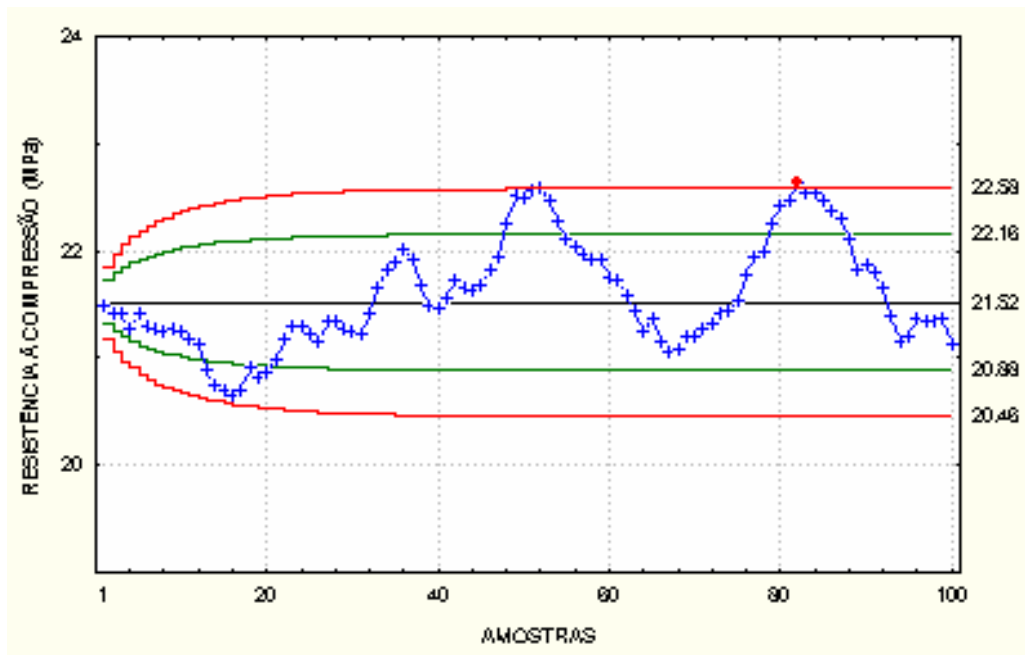


FIGURA 15 – Gráfico EWMA para concreto bombeável de resistência característica = 15,0 MPa (MB1/4), sendo $\lambda = 0,05$ e $L = 2,50$.

De acordo com o exposto na Figura 15, observa-se que no gráfico *EWMA* existe apenas uma amostra fora dos limites de controle (amostra 82) e assim o gráfico nos diz que o processo também é muito afetado por pequenas variações, isto é, o processo de produção do concreto bombeável com resistência característica de 15,0 MPa é estável.

- Análise gráfica da resistência à compressão do concreto bombeável denominado MB2/4 (resistência característica = 15,0 MPa).

Os limites de controle encontram-se logo abaixo, seguidos do gráfico

X-barra, visualizado na Figura 16.

LSC = 27,22 MPa e LIC = 15,39 MPa

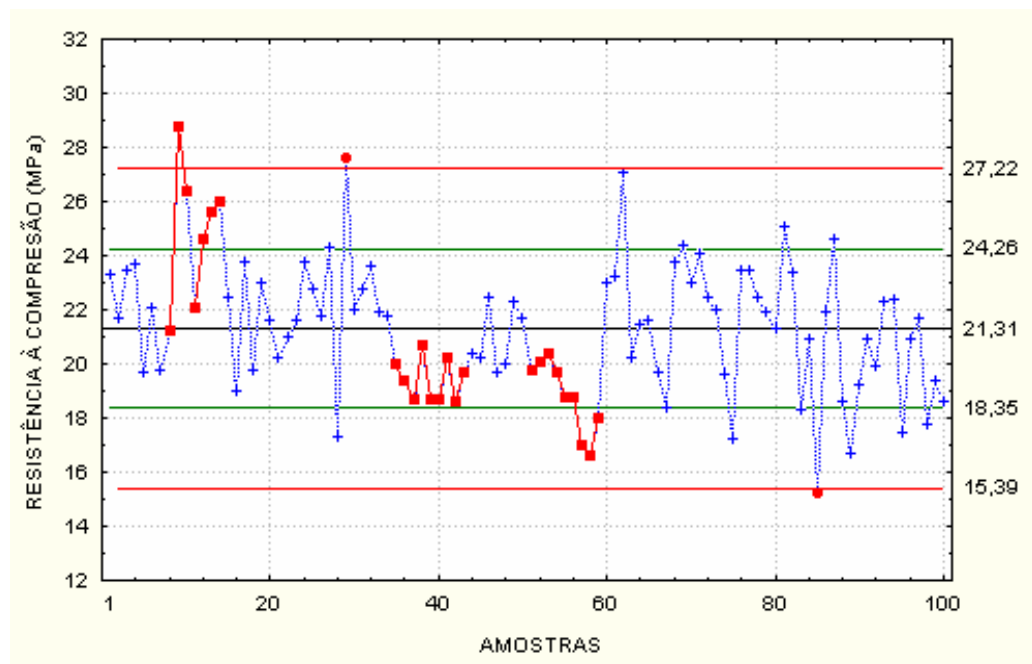


FIGURA 16 – Gráfico X-barra para concreto bombeável de resistência característica = 15,0 MPa (MB2/4).

Na análise realizada no gráfico *X-barra*, da Figura 16, verifica-se que há três pontos fora dos limites de controle. Encontram-se também dois conjuntos de amostras em que nove amostras sucessivas estão num mesmo lado da linha central, nos casos citados, estas estão situadas abaixo da linha central, iniciando pelas amostras 35 e 41. Há três conjuntos de amostras em que aparecem duas de três amostras sucessivas na mesma zona A ou além dela iniciando pelas amostras 8, 12 e 56. Existem ainda dois conjuntos de amostras em que quatro de cinco pontos sucessivos, situados na zona B, ou além dela, de um mesmo lado do gráfico, que no caso estão abaixo da linha central, correspondem estas as amostras que tem início em 9 e 54. Observam-se também 3 níveis diferenciados, um acima da linha central, da amostra 1 a 32, apresentando boa resistência, outra da amostra 33 a 60, com baixa resistência e, o restante da amostras concordando com

a média geral. A Figura 17 apresenta o gráfico *EWMA* para o referido concreto.

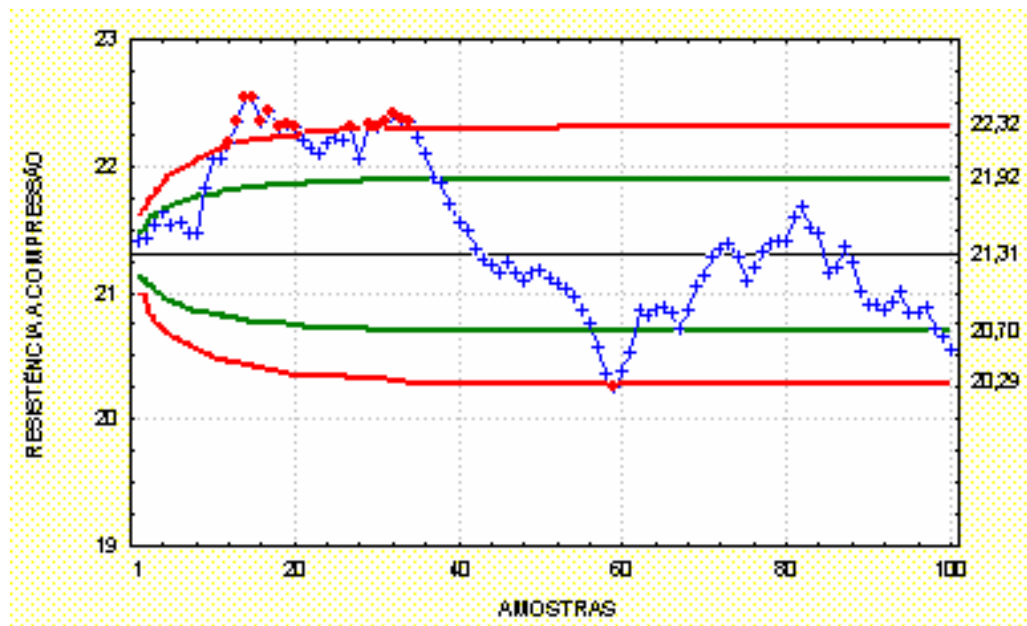


FIGURA 17 – Gráfico *EWMA* para concreto bombeável de resistência característica = 15,0 MPa (MB2/4), sendo $\lambda = 0,05$ e $L = 2,50$.

Por meio do gráfico *EWMA* mostrado na Figura 17, constatam-se alguns pontos fora dos limites de controle, esses correspondem a um grupo de 17 pontos fora de controle. Assim, pode-se afirmar que o processo não é afetado apenas por grandes variações, que foram detectadas na Figura 16, mas também é afetado por pequenas variações que estão destacadas no gráfico *EWMA* com parâmetros (λ , L) iguais a (0,05, 2,50). Com isso, o processo investigativo mostra que a medida que a variabilidade for diminuindo, a resistência do concreto revela menos pontos fora de controle.

- Análise gráfica da resistência à compressão do concreto bombeável denominado MB1/6 (resistência característica = 18,0 MPa).

Os limites de controle para o concreto de resistência característica de 18,0 MPa podem ser definidos abaixo, seguidos pela Figura 18, que mostra o gráfico X-barra.

$$LSC = 29,74 \text{ MPa e LIC} = 18,33 \text{ MPa}$$

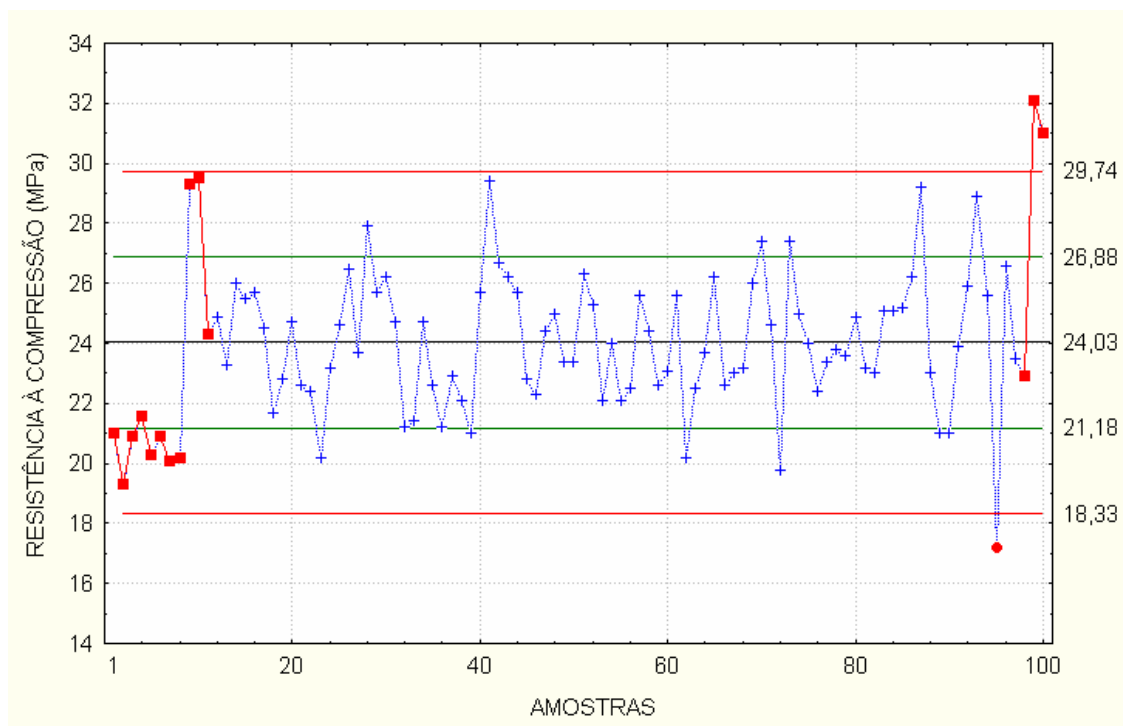


FIGURA 18 – Gráfico X-barra para concreto bombeável de resistência característica = 18,0 MPa (MB1/6).

Na análise realizada no gráfico *X-barra* da Figura 18 revela que existem três pontos fora dos limites de controle. Encontram-se três conjuntos de amostras, onde duas de cada três amostras sucessivas estão na mesma zona A, ou além dela, iniciando nas amostras 6, 9 e 98. Também se encontram quatro de cinco amostras sucessivas, situadas na zona B, ou além dela, de um mesmo lado da linha central que inicia na amostra 1. Há também, um conjunto de oito amostras sucessivas localizadas de um mesmo lado da linha central, fora da zona C, no caso, abaixo da linha central e que tem seu início também na amostra 1.

Agora se analisa a existência de pequenas variações no processo de produção do concreto bombeável de resistência característica de 18,0 MPa (MB1/6), com auxílio do gráfico *EWMA*, mostrado na Figura 19.

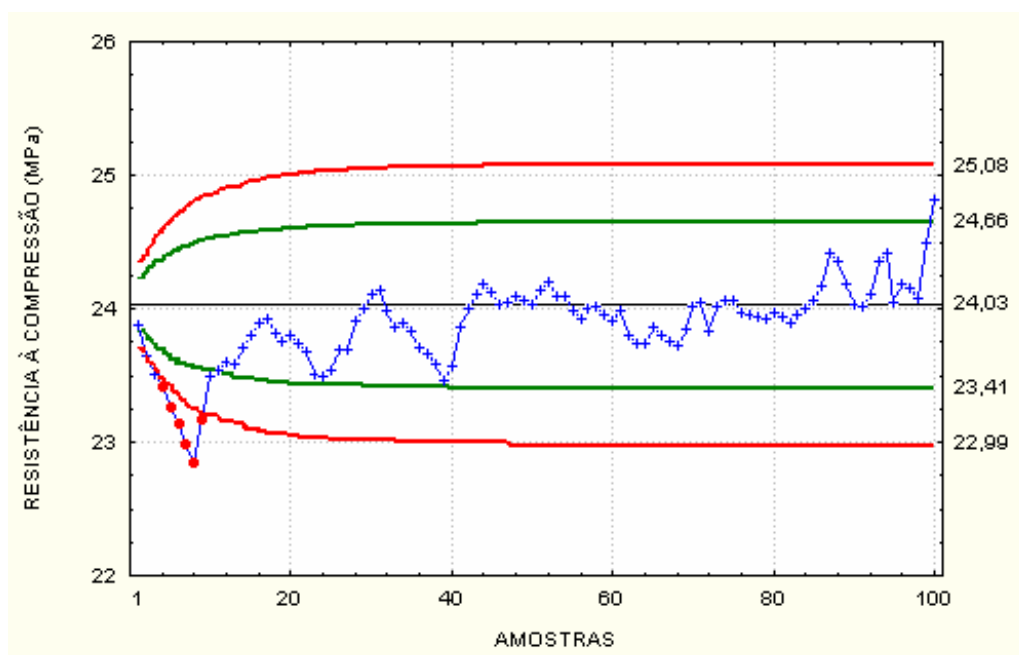


FIGURA 19 – Gráfico EWMA para concreto bombeável de resistência característica = 18,0 MPa (MB1/6), sendo $\lambda = 0,05$ e $L = 2,50$.

A análise investigativa do gráfico EWMA representado na Figura 19, apenas no começo do processo é que aparecem cinco pontos fora dos limites de controle, mostrando que o processo é pouco afetado por pequenas variações, podendo ser considerado estável.

- Análise gráfica da resistência à compressão do concreto bombeável denominado MB1/7 (resistência característica = 20,0 MPa).

Os limites de controle para a construção do gráfico X-barra estão dispostos a seguir:

$$LSC = 33,79 \text{ MPa e } LIC = 17,93 \text{ MPa}$$

A partir da Figura 20, apresentam-se as observações do concreto bombeável de resistência característica igual a 20,0 MPa.

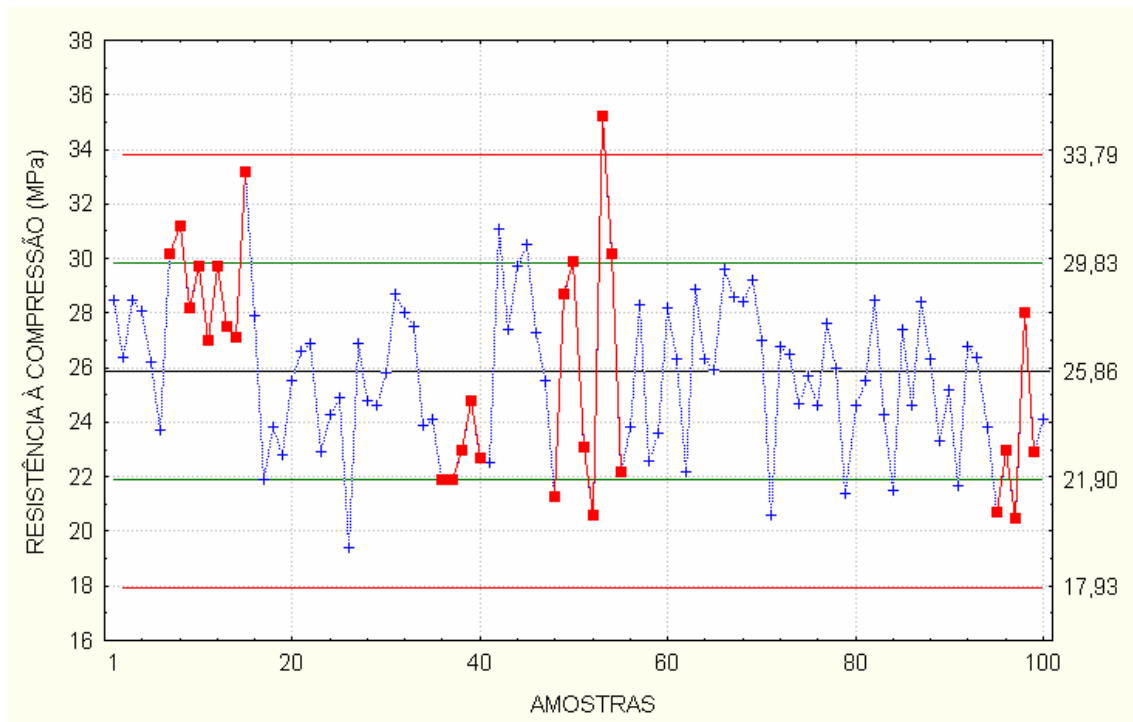


FIGURA 20 – Gráfico X-barra para concreto bombeável de resistência característica = 20,0 MPa (MB1/7).

Nos resultados que a Figura 20 apresenta, observa-se que neste gráfico aparece apenas um ponto fora dos limites de controle e que um grupo de amostras sucessivas estão acima da linha central, iniciando pela amostra 7 e, dois grupos de cinco amostras sucessivas, das quais quatro amostras estão situadas na zona B, ou além dela, de um mesmo lado do gráfico, ou seja, acima da linha central com início nas amostras 36 e 95. Também se encontra um conjunto de oito amostras sucessivas de ambos lados da linha central fora da zona C. Na Figura 21 apresenta-se o gráfico *EWMA* para o mesmo concreto a fim de se detectar pequenas variações no processo.

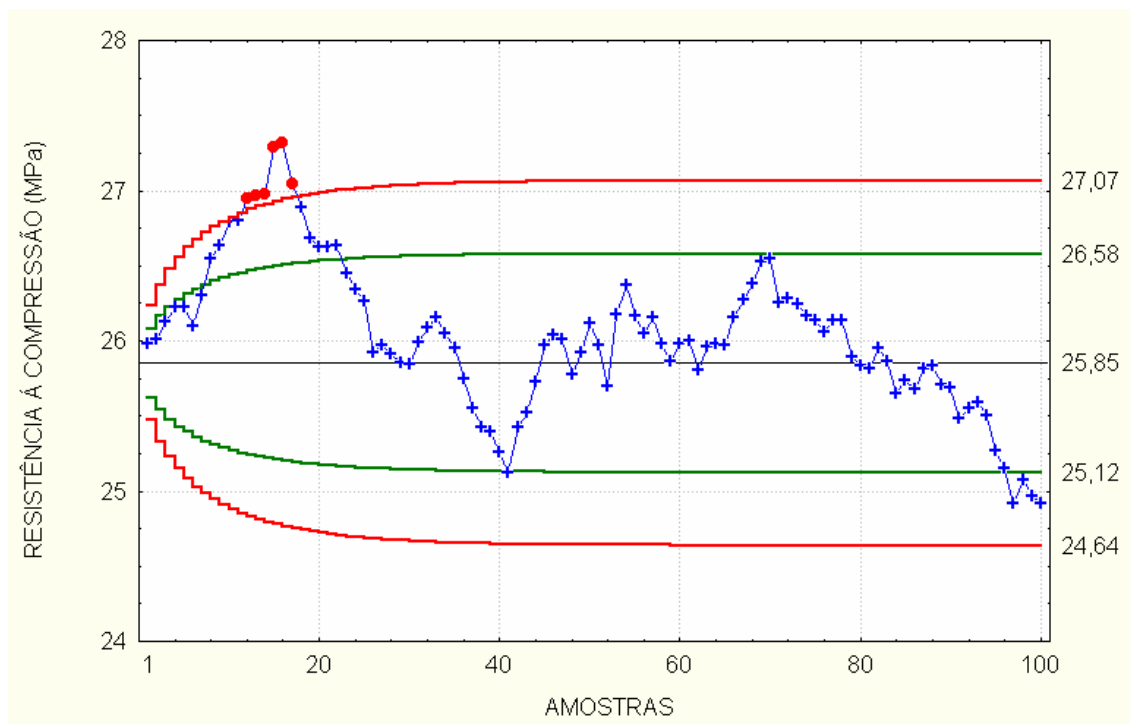


FIGURA 21 – Gráfico EWMA para concreto bombeável de resistência característica = 20,0 MPa (MB1/7), sendo $\lambda = 0,05$ e $L = 2,50$.

Pode-se afirmar que da análise do gráfico *EWMA* representado na Figura 21, aparecem apenas seis pontos fora dos limites de controle, constatando-se assim, novamente, que o processo é pouco afetado por pequenas variações, mas no final do processo uma causa especial deve estar atuando, pois há um decréscimo na resistência.

- Síntese dos resultados

O concreto, por ser um material heterogêneo, possui muitas influências externas ao seu comportamento. O ensaio de resistência à compressão apenas enumera a resistência potencial daquele concreto amostrado, considerando ideais todas as etapas de sua produção, ou

seja, desde sua mistura até o processo de ensaio não ocorrem fatores intervenientes que levem a resultados anômalos. Entretanto, devido o processo sofrer intervenção humana e do próprio meio ambiente, não se pode considerar que todos resultados obtidos sejam sempre os mesmos, o que se pode, certamente, é controlar ao máximo que tais fatores não venham a prejudicar o cliente quanto ao fornecimento de um material estrutural tão usado e de grande responsabilidade na confecção da edificação.

Analisando todos gráficos de controle, tanto *X-barra* ou *EWMA*, conjuntamente com as tabelas que lhes deram origem, não foi possível detectar uma influência significativa por esse ou aquele fator que foi anotada na planilha de moldagem, ou seja: água adicionada, abatimento, tempo de descarga, moldador etc. O controle estatístico desse material é realizado de acordo com a NBR 7212, que elege faixas de controle para o desvio padrão da produção e para o coeficiente da variação dos ensaios, observando a produção anual da empresa, observa-se que quanto ao parâmetro produção o desvio padrão de controle sempre ficou inferior ao limite considerado excelente da norma ($s = 3,0$ MPa), entretanto quanto ao controle do coeficiente de variação observa-se uma elevada flutuação dos valores, indo da faixa considerada ruim até a muito boa, porém é nesse controle que se verifica melhor a disparidade de resultados que ocorre, pois ele é muito sensível a amplitude dos valores de resistência à compressão determinados em laboratório (f_{cj}). Assim, constata-se que existem problemas de produção, mesmo que não

prejudiquem os clientes, eles tornam o processo antieconômico, desta forma existe a necessidade de buscar solucioná-los, logo há necessidade de uma intervenção maior no processo usando os modelos de controle aqui evidenciados. Em trabalho mais abrangente a empresa se propôs a realizar alterações significativas no processo, através do uso de aditivos mais potentes, redução do consumo de água, alteração dos traços elaborados e maior controle das etapas de produção. Desta forma o mesmo produto pode ser elaborado com um custo de produção inferior, mantendo as mesmas características de resistência.

CAPÍTULO V

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusões

Nos dias atuais percebe-se que as empresas cada vez mais buscam ser altamente inovadoras, responsáveis e eficientes em termos de custos. Uma vez que poucas empresas dispõem de capacitações e dos recursos para demonstrar esse comportamento o tempo todo, cresce cada vez mais o número daquelas que buscam o contínuo aperfeiçoamento dos seus processos de produção, a fim de adquirir vantagem competitiva. Sabe-se que uma das competências que pode auxiliar as empresas a melhorar o seu resultado final é o Controle de Qualidade.

Assim, o principal objetivo desta pesquisa foi a utilização do Controle Estatístico do Processo (CEP) na indústria do concreto dosado em central por meio de uma análise dos gráficos de controle X-barra e EWMA, de modo a identificar a variável ou conjunto de variáveis que seriam as possíveis causadoras de problemas que por ventura

existissem no processo produtivo da empresa. Sendo que as principais ferramentas para a aplicação do CEP são diversos gráficos de controle, criados de acordo com o tipo de variável a ser controlada.

Procurou-se então, na revisão da literatura tratar da utilização e do emprego de gráficos de controle X-barra e EWMA. A escolha dos gráficos utilizados para a característica de qualidade selecionada, Resistência a Compressão (MPa), dos quatro tipos de concreto mais vendidos, denominados MB1/4, MB2/4, MB1/6 e MB1/7, baseou-se no tipo de processo investigado, bem como unidade de medida das variáveis e o grau de desvio apresentado pelo conjunto de dados. Estes gráficos foram muito eficientes na detecção de problemas no processo investigado, uma vez que o gráfico X-barra tem o objetivo de detectar grandes variações da média do processo, enquanto que o gráfico EWMA, objetiva detectar pequenos desvios dessa mesma média..

Na maioria dos gráficos de controle detectou-se falhas nas etapas do processo produtivo. A análise realizada pelos gráficos apontou diversos problemas de causas especiais que sempre ocorriam. Pelos resultados fica claro que em nenhum momento o consumidor é lesado por um dos produtos fornecidos e aqui analisado apresentar problemas estruturais por deficiência na resistência à compressão,

mas pode-se observar que uma adequação das misturas precisa ser realizada, de forma a tornar menores os desvios da média do processo, bem como buscar uma redução significativa dos custos de produção.

5.2 Recomendações

Logo, é necessário repensar a forma de funcionamento das nossas organizações, tornando-as mais flexíveis, ágeis, respondendo rápida e adequadamente as solicitações do mercado. Contudo, é importante salientar que os gráficos de controle , assim como qualquer outra forma de mecanismo aplicado, não resolve todos os problemas, e o pior, quando são mal aplicados tendem a causar sérios estragos na estrutura organizacional da empresa.

Assim, coloca-se que cada dia, se torna mais importante que as empresas concentrem seus esforços em processos de mudanças que sejam realmente capazes de alcançar o aumento da produtividade com a requerida qualidade necessária para assegurar sua sobrevivência no mercado.

E quando, corretamente aplicados podem contribuir muito para que isso ocorra. Indubitavelmente as empresas devem fazer a relação custo/benefício ser satisfatória, logo este estudo deve ser conduzido em uma pesquisa futura.

BIBLIOGRAFIA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE SERVIÇOS DE CONCRETAGEM (ABESC). **Manual do concreto dosado em central**. São Paulo: Park Color, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 6118 – Projeto e execução de obras de concreto armado**. Rio de Janeiro: ABNT, 1980.

-----, **NBR 7212 – Execução do concreto dosado em central**. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

-----, **NBR 12655 – Concreto - Preparo, controle e recebimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 1996.

MESENGUER, Álvaro G. **Controle e garantia da qualidade na construção**. São Paulo: Projeto/SINDUSCON-SP, 1991.

FUSCO, Péricles B. **Estruturas de concreto: Fundamentos estatísticos da segurança das estruturas**. São Paulo: PINI, 1980.

ISAIA, Geraldo C. **Controle de qualidade das estruturas de concreto armado**. Santa Maria: Editora da UFSM, 1988.

ALVES, José D. **Manual de tecnologia de concreto**. Goiânia: Editora da UFG, 1993.

NEVILLE, Adam M. **Propriedades do concreto**. Tradução de Salvador E. Giannusso. São Paulo: PINI/ABCP, 1997.

LAGO NETO, João Caldas do. **O efeito da autocorrelação em gráficos de controle para variável contínua: Um estudo de caso**. Dissertação de Mestrado pela Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação do Curso de Engenharia de Produção. Florianópolis, 1999.

MONTGOMERY, Douglas C. **Introduction to statistical quality control**. Canadá: John Wiley & Sons, 3rd Edition, 1997.

KUME, Hitoshi. **Métodos estatísticos para melhoria da qualidade**. Tradução: Dário Ikuo Miyake, São Paulo: Editora Gente, 11^a ed, 1993.

SILVA, Luciana S. C. V. da. **Aplicação do controle estatístico de processos na indústria de laticínios LACTOPLASA: Um estudo de caso**. Dissertação de Mestrado pela Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação do Curso de Engenharia de Produção. Florianópolis, 1999.

SCHISSATTI, Márcio. .Dissertação de Mestrado pela Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação do Curso de Engenharia de Produção. Florianópolis, 1998.

EPPRECHT, Eugenio, et al. Projeto ótimo de gráficos de médias móveis ponderadas exponencialmente (EWMA) para controle estatístico de processo. **Pesquisa operacional**, São Paulo, v. 18, nº 2, p. 109-130, dez. 1998.

WERKEMA, Maria C. C. **Ferramentas estatísticas básicas para o gerenciamento de processos**. Belo Horizonte: Fundação Christiano Ottoni, Escola de Engenharia, v. 2, 1995.

SIQUEIRA, Luiz G. P. **Controle estatístico do processo**. São Paulo: Pioneira – Equipe GRIFO, 1997.

BRAVO, Paulo C. **Elementos de controle estatístico de qualidade**. In: 6º SIMPÓSIO NACIONAL DE PROBABILIDADE E ESTATÍSTICA. Rio de Janeiro: COPPE, 1984.

BARTMANN, Flávio C. **Idéias básicas do controle moderno de qualidade**. In: 7º SIMPÓSIO NACIONAL DE PROBABILIDADE E ESTATÍSTICA. Campinas: UNCAMP/IMECC - ABE, 1986.

TECNOMÉTRICA. **Técnicas para detecção acelerada de perturbações em processos**. Campinas: UNICAMP.

AMORIM, S. de & COSTA, Antônio F. B. **Procedimentos para a detecção acelerada de perturbações num processo.** In: 11º SIMPÓSIO NACIONAL DE PROBABILIDADE E ESTATÍSTICA. Belo Horizonte: Mini Curso, 1994.

RAMOS, Alberto W. **Controle estatístico de processo para pequenos lotes.** São Paulo: Fundação Vanzolini, Edgard Blücher Editora, 1995.

IATROS – Estatística e Pesquisa Científica para Profissionais de Saúde. **Medidas de dispersão.** Disponível em: <<http://www.vademecum.com.br/iatros/disp.htm>>. Acesso em: 15 jul. 2001.

CROWDER, Stephen V. **A simple method for studying run-length distributions of exponentially weighted moving average charts.** In: TECHNOMETRICS, v. 29, nº. 4, November 1987.

MONTGOMERY, Douglas C. **Introduction to statistical quality control.** 3rd Edition, New York: John Wiley & Sons, Inc., 1996.

LIN, Winnie S. & ADAMS, Benjamin M. **Combined control charts for forest-based monitoring schemes.** In: Journal of Quality Technology, v. 28, nº. 3, July 1996.

LUCAS, James M. **Combined Shewhart-CUSUM quality control schemes**. In: Journal of Quality Technology, v. 14, n°. 2, April 1982.

LUCAS, James M. & SACCUCCI, Michael S. **Exponentially weighted moving average control schemes: Properties and enhancements**. In: TECHNOMETRICS, v. 32, n°. 1, February 1990.

WASSERMAN, G. S. **An adaptation of the EWMA chart for short run SPC**. In: Int. J. Prod. Res., v. 33, n°. 10, p.2821-2833, 1995.

BOX, George & LUCENÑO, Alberto. **Statistical control by monitoring and feedback adjustment**. Wiley Series in Probability and Statistics Wiley Interscience, John Wiley & Sons, Inc. (NY), 1997.

AMARAL, Daniel C. & ROZENFELD, Henrique. **Índices de capacidade do processo (Cp, CpK)**. Disponível em: <<http://www.numa.org.br/conhecimentos/capabilidadev4.html>>.

Acesso em: 04 fev. 2001.

SYTSMA, Sid. **EWMA charts**. Disponível em: <<http://www.sytsma.com/tqmttools/ewma.htm>>. Acesso em: 30 nov. 1998.

NIST/SEMATECH. **Engineering statistics internet handbook.**

Disponível em:

<<http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/index.htm>>. Acesso em: 23 dez. 2000.

INSTITUTE OF INFORMATION SCIENCES AND TECHNOLOGY.

Statistical process control. Disponível em: <<http://www-ist.massey.ac.nz/61325/sg/chap3-2.htm>>. Acesso em: 4 ago. 2001.

REYES André E. L.& VICINO, Silvana R. **Controle de qualidade**

usando o Excel. Disponível em:

<<http://pointer.ciagri.usp.br/qualidade/mode4>>. Acesso em: 02 jun. 2001.

FIGUEIREDO, Ana Paula S. & FERREIRA, Newton A. **O gráfico de**

controle EWMA: Um enfoque dinâmico para o CEP. Disponível

em: <>. Acesso em:

INTERNET. **Statistical Process Control – Chapter 3.** Disponível

em: <> Acesso em:

NUNES, J. P. **Gráficos de Controle do processo.** Disponível em:

<<http://www.geocities.com/Eureka/Plaza/6813>>. Acesso em: 22 jul. 2001.

_____. **Modelos de controle estatístico do processo**. Disponível em:
<<http://www.geocities.com/Eureka/Plaza/6813>>. Acesso em: 22 jul.
2001.

Anexo A – Fatores para o cálculo dos limites de controle (3σ) para os gráficos: \bar{X} , R e S .

n	Gráfico para a Média			Gráfico para o Desvio Padrão						Gráfico para a Amplitude						
	Fatores para os Limites de Controle			Fatores para a Linha Central		Fatores para os Limites de Controle				Fatores para a Linha Central		Fatores para os Limites de Controle				
	A	A_2	A_3	c_4	$1/c_4$	B_3	B_4	B_5	B_6	d_2	$1/d_2$	d_3	D_1	D_2	D_3	D_4
2	2,12	1,88	2,65	0,797	1,253	0	3,62	0	2,60	1,12	0,886	0,95	0	3,68	0	3,26
	1	0	9	9	3	0	7	0	6	8	5	3	0	6	0	7
3	1,73	1,02	1,95	0,886	1,128	0	2,56	0	2,27	1,69	0,590	0,88	0	4,35	0	2,57
	2	3	4	2	4	0	8	0	6	3	7	8	0	8	0	5
4	1,50	0,72	1,62	0,921	1,085	0	2,26	0	2,08	2,05	0,485	0,88	0	4,69	0	2,28
	0	9	8	3	4	0	6	0	8	9	7	0	0	8	0	2
5	1,34	0,57	1,42	0,940	1,063	0	2,08	0	1,96	2,32	0,429	0,86	0	4,91	0	2,11
	2	7	7	0	8	0	9	0	4	6	9	4	0	8	0	5
6	1,22	0,48	1,28	0,951	1,051	0,03	1,97	0,02	1,87	2,53	0,394	0,84	0	5,07	0	2,00
	5	3	7	5	0	0	0	9	4	4	6	8	0	8	0	4
7	1,13	0,41	1,18	0,959	1,042	0,11	1,88	0,11	1,80	2,70	0,369	0,83	0,20	5,20	0,07	1,92
	4	9	2	4	3	8	2	3	6	4	8	3	4	4	6	4
8	1,06	0,37	1,09	0,965	1,036	0,18	1,81	0,17	1,75	2,84	0,351	0,82	0,38	5,30	0,13	1,86
	1	3	9	0	3	5	5	9	1	7	2	0	8	6	6	4
9	1,00	0,33	1,03	0,969	1,031	0,23	1,76	0,23	1,70	2,97	0,336	0,80	0,54	5,39	0,18	1,81
	0	7	2	3	7	9	1	2	7	0	7	8	7	3	4	6
10	0,94	0,30	0,97	0,972	1,028	0,28	1,71	0,27	1,66	3,07	0,324	0,79	0,68	5,46	0,22	1,77
	9	8	5	7	1	4	6	6	9	8	9	7	7	9	3	7
11	0,90	0,28	0,92	0,975	1,025	0,32	1,67	0,31	1,63	3,17	0,315	0,78	0,81	5,53	0,25	1,74
	5	5	7	4	2	1	9	3	7	3	2	7	1	5	6	4
12	0,86	0,26	0,88	0,977	1,022	0,35	1,64	0,34	1,61	3,25	0,306	0,77	0,92	5,59	0,28	1,71
	6	6	6	6	9	4	6	6	0	8	9	8	2	4	3	7
13	0,83	0,24	0,85	0,979	1,021	0,38	1,61	0,37	1,58	3,33	0,299	0,77	1,02	5,64	0,30	1,69
	2	9	0	4	0	2	8	4	5	6	8	0	5	7	7	3
14	0,80	0,23	0,81	0,981	1,019	0,40	1,59	0,39	1,56	3,40	0,293	0,76	1,11	5,69	0,32	1,67
	2	5	7	0	4	6	4	9	3	7	5	3	8	6	8	2
15	0,77	0,22	0,78	0,982	1,018	0,42	1,57	0,42	1,54	3,47	0,288	0,75	1,20	5,74	0,34	1,65
	5	3	9	3	0	8	2	1	4	2	0	6	3	1	7	3
16	0,75	0,21	0,76	0,983	1,016	0,44	1,55	0,44	1,52	3,53	0,283	0,75	1,28	5,78	0,36	1,63
	0	2	3	5	8	8	2	0	6	2	1	0	2	2	3	7
17	0,72	0,20	0,73	0,984	1,015	0,46	1,53	0,45	1,51	3,58	0,278	0,74	1,35	5,82	0,37	1,62
	8	3	9	5	7	6	4	8	1	8	7	4	6	0	8	2
18	0,70	0,19	0,71	0,985	1,014	0,48	1,51	0,47	1,49	3,64	0,274	0,73	1,42	5,85	0,39	1,60
	7	4	8	4	8	2	8	5	6	0	7	9	4	6	1	8
19	0,68	0,18	0,69	0,986	1,014	0,49	1,50	0,49	1,48	3,68	0,271	0,73	1,48	5,89	0,40	1,59
	8	7	8	2	0	7	3	0	3	9	1	4	7	1	3	7
20	0,67	0,18	0,68	0,986	1,013	0,51	1,49	0,50	1,47	3,73	0,267	0,72	1,54	5,92	0,41	1,58

	1	0	0	9	3	0	0	4	0	5	7	9	9	1	5	5
21	0,65 5	0,17 3	0,66 3	0,987 6	1,012 6	0,52 3	1,47 7	0,51 6	1,45 9	3,77 8	0,264 7	0,72 4	1,60 5	5,95 1	0,42 5	1,57 5
22	0,64 0	0,16 7	0,64 7	0,988 2	1,011 9	0,53 4	1,46 6	0,52 8	1,44 8	3,81 9	0,261 8	0,72 0	1,65 9	5,97 9	0,43 4	1,56 6
23	0,62 6	0,16 2	0,63 3	0,988 7	1,011 4	0,54 5	1,45 5	0,53 9	1,43 8	3,85 8	0,259 2	0,71 6	1,71 0	6,00 6	0,44 3	1,55 7
24	0,61 2	0,15 7	0,61 9	0,989 2	1,010 9	0,55 5	1,44 5	0,54 9	1,42 9	3,89 5	0,256 7	0,71 2	1,75 9	6,03 1	0,45 1	1,54 8
25	0,60 0	0,15 3	0,60 6	0,989 6	1,010 5	0,56 5	1,43 5	0,559 0	1,42 0	3,93 1	0,254 4	0,70 8	1,80 6	6,05 6	0,45 9	1,54 1

Para $n > 25$

$$A = \frac{3}{\sqrt{n}}, \quad A_3 = \frac{3}{c_4 \sqrt{n}}, \quad c_4 \cong \frac{4(n-1)}{4n-3}, \quad B_3 = 1 - \frac{3}{c_4 \sqrt{2(n-1)}},$$

$$B_4 = 1 + \frac{3}{c_4 \sqrt{2(n-1)}}, \quad B_5 = c_4 - \frac{3}{\sqrt{2(n-1)}}, \quad B_6 = c_4 + \frac{3}{\sqrt{2(n-1)}}$$

Anexo B – Valores de ARL combinado para diversos valores de L , λ e deslocamentos da média em termos de desvios padrões para o gráfico *EWMA*.

$\sqrt{n}\mu/\sigma$	λ					
	1,00	0,75	0,50	0,25	0,10	0,05
L = 2,0						
0,00	21,98	22,88	26,45	38,56	73,28	127,53
0,25	19,13	18,86	20,12	24,83	34,49	43,94
0,50	13,70	12,34	11,89	12,74	15,53	18,97
0,75	9,21	7,86	7,29	7,62	9,36	11,64
1,00	6,25	5,26	4,91	5,24	6,62	8,38
1,25	4,40	3,76	3,95	3,59	5,13	6,56
1,50	3,24	2,84	2,80	3,19	4,20	5,41
1,75	2,49	2,26	2,29	2,68	3,57	4,62
2,00	2,00	1,88	1,95	2,32	3,12	4,04
2,25	1,67	1,61	1,70	2,06	2,78	3,61
2,50	1,45	1,42	1,51	1,85	2,52	3,26
2,75	1,29	1,29	1,37	1,69	2,32	2,99
3,00	1,19	1,19	1,26	1,55	2,16	2,76
3,25	1,12	1,13	1,18	1,43	2,03	2,56
3,50	1,07	1,08	1,12	1,32	1,93	2,39
3,75	1,04	1,05	1,08	1,24	1,83	2,26
4,00	1,02	1,03	1,05	1,17	1,73	2,15

Continuação...

$\sqrt{n}\mu/\sigma$	λ					
	1,00	0,75	0,50	0,25	0,10	0,05
L = 2,25						
0,00	40,90	42,25	47,48	67,46	125,10	215,39
0,25	34,53	33,07	33,48	37,86	47,50	56,78
0,50	23,23	19,78	17,62	17,03	19,12	22,52
0,75	14,67	11,64	9,93	9,49	11,02	13,44
1,00	9,41	7,31	6,30	6,27	7,63	9,55
1,25	6,29	4,95	4,42	4,62	5,84	7,42
1,50	4,41	3,58	3,34	3,66	4,74	6,08
1,75	3,24	2,75	2,68	3,04	4,01	5,17
2,00	2,49	2,21	2,23	2,61	3,48	4,51
2,25	2,00	1,85	1,92	2,30	3,09	4,02
2,50	1,67	1,60	1,69	2,07	2,79	3,63

2,75	1,45	1,42	1,51	1,88	2,55	3,32
3,00	1,29	1,29	1,38	1,73	2,36	3,06
3,25	1,19	1,19	1,27	1,59	2,21	2,85
3,50	1,12	1,13	1,19	1,48	2,09	2,66
3,75	1,07	1,08	1,13	1,37	1,99	2,49
4,00	1,04	1,05	1,08	1,28	1,91	2,34

Continuação...

$\sqrt{n}\mu/\sigma$	λ					
	1,00	0,75	0,50	0,25	0,10	0,05
L = 2,50						
0,00	80,52	82,49	91,17	124,18	223,35	379,40
0,25	65,77	61,07	58,33	59,66	66,59	73,98
0,50	41,49	33,26	27,16	23,28	23,63	26,64
0,75	24,61	18,05	13,96	11,96	12,95	15,41
1,00	14,92	10,57	8,27	7,52	8,75	10,79
1,25	9,46	6,75	5,52	5,39	6,60	8,31
1,50	6,30	4,65	4,03	4,18	5,31	6,78
1,75	4,41	3,43	3,14	3,43	4,46	5,75
2,00	3,24	2,67	2,57	2,93	3,86	5,00
2,25	2,49	2,17	2,18	2,56	3,42	4,43
2,50	2,00	1,83	1,90	2,29	3,07	4,00
2,75	1,67	1,59	1,69	2,08	2,80	3,64
3,00	1,45	1,41	1,52	1,91	2,57	3,36
3,25	1,29	1,29	1,39	1,77	2,39	3,12
3,50	1,19	1,19	1,28	1,64	2,24	2,98
3,75	1,12	1,13	1,20	1,52	2,13	2,74
4,00	1,07	1,08	1,13	1,42	2,04	2,58

Continuação...

$\sqrt{n}\mu/\sigma$	λ					
	1,00	0,75	0,50	0,25	0,10	0,05
L = 2,75						
0,00	167,80	170,64	184,56	242,20	420,78	702,19
0,25	132,28	119,08	107,13	98,32	96,17	98,23
0,50	78,12	59,04	43,97	32,89	29,50	31,50
0,75	43,51	29,47	20,44	15,34	15,20	17,56
1,00	24,91	16,03	11,19	9,11	9,99	12,11
1,25	14,96	9,58	7,04	6,29	7,42	9,25
1,50	9,46	6,24	4,92	4,78	5,92	7,51

1,75	6,30	4,39	3,72	3,86	4,94	6,34
2,00	4,41	3,28	2,98	3,25	4,26	5,49
2,25	3,24	2,59	2,49	2,82	3,75	4,86
2,50	2,49	2,13	2,14	2,51	3,37	4,37
2,75	2,00	1,81	1,88	2,27	3,06	3,98
3,00	1,67	1,58	1,68	2,09	2,81	3,66
3,25	1,45	1,41	1,53	1,93	2,60	3,39
3,50	1,29	1,29	1,40	1,80	2,42	3,17
3,75	1,19	1,20	1,29	1,69	2,27	2,99
4,00	1,12	1,13	1,21	1,57	2,16	2,82

Continuação...

$\sqrt{n}\mu/\sigma$	λ					
	1,00	0,75	0,50	0,25	0,10	0,05
L = 3,00						
0,00	340,40	374,50	397,56	502,90	842,15	1379,35
0,25	281,15	245,76	208,54	171,09	144,74	134,86
0,50	155,22	110,95	75,35	48,45	37,41	37,37
0,75	81,22	50,92	31,46	20,16	19,90	19,95
1,00	43,89	25,64	15,74	11,15	11,38	13,51
1,25	24,96	14,26	9,21	7,39	8,32	10,23
1,50	14,97	8,72	6,11	5,47	6,57	8,26
1,75	9,47	5,80	4,45	4,34	5,45	6,94
2,00	6,30	4,15	3,47	3,62	4,67	6,00
2,25	4,41	3,16	2,84	3,11	4,10	5,30
2,50	3,24	2,52	2,41	2,75	3,67	4,76
2,75	2,49	2,09	2,10	2,47	3,32	4,32
3,00	2,00	1,79	1,87	2,26	3,05	3,97
3,25	1,67	1,57	1,69	2,09	2,82	3,67
3,50	1,45	1,41	1,53	1,95	2,62	3,42
3,75	1,29	1,29	1,41	1,84	2,45	3,22
4,00	1,19	1,20	1,31	1,73	2,30	3,04

Continuação...

$\sqrt{n}\mu/\sigma$	λ					
	1,00	0,75	0,50	0,25	0,10	0,05
L = 3,50						
0,00	2149,34	2157,99	2227,34	2640,16	4106,29	6464,60

0,25	1502,76	1245,90	951,18	624,78	385,49	281,09
0,50	723,81	468,68	267,36	123,43	64,72	54,56
0,75	334,40	182,12	88,70	38,68	25,33	25,63
1,00	160,95	18,05	35,97	17,71	14,79	16,60
1,25	81,80	37,15	17,64	10,48	10,37	12,32
1,50	43,96	19,63	10,19	7,25	8,00	9,84
1,75	24,96	11,46	6,70	5,52	6,54	8,21
2,00	14,97	7,33	4,86	4,47	5,55	7,06
2,25	9,47	5,08	3,78	3,77	4,83	6,21
2,50	6,30	3,76	3,10	3,28	4,29	5,56
2,75	4,41	2,94	2,63	2,91	3,87	5,03
3,00	3,24	2,40	2,30	2,63	3,54	4,60
3,25	2,49	2,03	2,05	2,41	3,26	4,25
3,50	2,00	1,76	1,85	2,23	3,03	3,95
3,75	1,67	1,56	1,69	2,10	2,84	3,69
4,00	1,45	1,40	1,55	1,99	2,66	3,47

Continuação...

$\sqrt{n} \mu / \sigma$	λ					
	1,00	0,75	0,50	0,25	0,10	0,05
L = 2,25						
0,00	15787,2	15806,3	16051,3	18069,9	26240,4	39725,0
0,25	10,090,2	7984,40	5576,65	2998,63	1330,23	1058,61
0,50	4,236,81	2520,47	1233,62	406,11	130,08	82,07
0,75	1,729,98	833,01	324,04	90,06	37,73	33,42
1,00	740,64	303,84	104,22	31,65	19,44	19,99
1,25	335,59	122,96	41,15	15,81	12,90	14,45
1,50	161,04	55,31	19,74	9,90	9,67	11,44
1,75	81,80	27,67	11,23	7,11	7,77	9,52
2,00	43,96	15,36	7,31	5,55	6,51	8,17
2,25	24,96	9,40	5,27	4,57	5,63	7,16
2,50	14,97	6,27	4,08	3,90	4,96	6,39
2,75	9,47	4,51	3,34	3,42	4,45	5,78
3,00	6,30	3,45	2,84	3,05	4,05	2,28
3,25	4,41	2,76	2,48	2,77	3,72	4,86
3,50	3,24	2,30	2,22	2,54	3,44	4,49
3,75	2,49	1,97	2,01	2,36	3,22	4,18
4,00	2,00	1,73	1,84	2,21	3,03	3,92

