

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

O USO DA ESTATÍSTICA

COMO FERRAMENTA AVANÇADA

DE

GARANTIA DA QUALIDADE

NA ENGENHARIA MECÂNICA

Roque Ehrhardt de Campos
CAMPOSRE@BRUSPSCE.BITNET

Apresentação

Esta coletânea de textos foi feita de anotações de aulas que foram agregadas a um artigo que comecei a escrever a partir de uma série de observações feitas em interações com engenheiros de uma forma geral e com os mecânicos, especialmente os de produção em particular. A isto foi acrescentada a oportunidade que tive de ministrar dois cursos sobre este assunto, que deu a dimensão atual do que está sendo discutido.

No programa desta Escola para o ensino de Qualidade, os alunos recebem as informações sobre Estatística no curso básico e o que poderia representar uma redundância no curso de Controle de Qualidade I, foi usado como uma oportunidade no sentido de atacar o assunto expandindo e objetivando os conceitos já aprendidos.

No curso Controle de Qualidade II o assunto é Gerência e no curso de Controle de Qualidade III, o assunto é Delineamento de Experimentos.

Não tive a oportunidade de dar o Curso sobre Delineamento no programa da EESC, porém como em outras circunstâncias me envolvi com o assunto, aproveito para anexar à presente coletânea um texto que em minha opinião seria ideal para um curso desta natureza.

Esta coletânea é extremamente útil para programas como o da EESC e foi compilada num único texto como forma de colaboração com aqueles que tiverem que resolver programas como este.

Desejo reconhecer publicamente o esforço dos alunos de graduação que frequentaram estes cursos que deram origem a estas anotações, pois que sobre eles recaiu em grande parte a tarefa da formatação do texto que ora permite que outros possam dele fazer uso.

São Carlos, Dezembro de 1995

Roque Ehrhardt de Campos

TÍTULO

O USO DA ESTATÍSTICA COMO FERRAMENTA AVANÇADA DE GARANTIA DA QUALIDADE NA ENGENHARIA MECÂNICA

Roque Ehrhardt de Campos

USP - EESC/SEM
CAMPOSRE@BRUSPSCE.BITNET

Palavras-Chave: CEP - Controle Estatístico de Processo, Estatística avançada/Delineamento de Experimentos. Garantia da qualidade. Um caso de aplicação em CEP e outro em de Delineamento de Experimentos.

Resumo

Existem aspectos da engenharia voltados para a obtenção de produtos usados pela sociedade, tais como automóveis, aviões, computadores, bem como serviços, tais como energia elétrica, transportes, saúde, etc. Dentre estes aspectos, a garantia da qualidade se aplica tanto para bens manufaturados como para serviços. A finalidade deste artigo é apresentar ferramentas estatísticas que consigam garantir a qualidade em manufatura e organizações de serviços, particularizando, porém, uma aplicação específica de engenharia mecânica. Existe uma certa tendência de se enfatizar a estatística em trabalhos em que ela aparece como ferramenta e isto cria uma certa dificuldade para os engenheiros. Uma intenção expressa deste trabalho é colocar em perspectiva a estatística do ponto de vista do engenheiro, procurando demonstrar em termos que lhe são comuns as vantagens, os porquês e o como de uma das ferramentas mais sofisticadas desta ciência matemática. Este trabalho visa também discutir porque a estatística se tornou o cerne da obtenção da qualidade nas tecnologias modernas. Como existe deficiência de informações em nosso idioma sobre a inserção da estatística na engenharia, particularmente de como exatamente a estatística se transformou na principal ferramenta para obtenção da qualidade, será feita uma introdução histórica explicando isto. As ferramentas mais comumente usadas serão indicadas e será explorado um exemplo particularizando Delineamento de Experimentos aplicado a um processo de furação de um material.

Abstract

There are aspects of engineering devoted to manufacturing products used by our society such as automobiles, airplanes, computers as well as services, such as electrical energy, public transportation and health care. Amongst these aspects, quality assurance principles apply to both manufactured services and goods. The purpose of this artigo is to introduce statistical tools that are able to achieve quality assurance in manufacturing and service organizations, particularly in a specific application of mechanical engineering. There is a tendency to emphasize statistics in artigos where it shows up as tool and this creates some difficulty to engineers. An express intention of this artigo is to put into perspective statistics from the point of view of the engineer, trying to demonstrate in engineerign household terms the advantages, the why's and the how's of one of the most sophisticated tools of this mathematical science. This artigo aims also to discuss

why statistics has become the core of the quality achievement of modern technology. As there is deficiency of information in our idiom about the insertion of statistics in engineering, specially how exactly statistics has become the main tool to obtain quality, an historical introduction will be made, explaining how this has happened. Most commonly used tools in statistics will be all indicated and it will be explored an example particularly dedicated to design of experiments applied to a cutting of a material

Conteúdo

- I Introdução e objetivos**
- II Perspectiva histórica: Os Estados Unidos**
- III Perspectiva histórica: O Japão**
- IV Fase I - Projeto - Delineamento de experimentos**
- V Fase II - Produção - Controle Estatístico de Processo**

I. Introdução e objetivos

A estatística pode ser definida limitadamente como:

**Coleta,
Análise e
Interpretação de
Dados.**

Ou, talvez um pouco mais amplamente como:

"Tomada de decisão sob incerteza."

Para quem usa a estatística, ou melhor, para quem a pratica, ela pode ser imaginada como

"Uma caixa de ferramentas."

O Manual de Contrôlo de Qualidade do Juran, em sua quarta edição apresenta a seguinte lista de ferramentas estatísticas para uma determinada lista de problemas a serem resolvidos:

Problema	Ferramenta Estatística
Planejamento de uma investigação estatística	Planejamento e análise de dados para resolução de problemas específicos
Sumarização de dados	Distribuições de frequência, histogramas e índices
Previsão de resultados futuros de uma amostra	Distribuições de probabilidade
Determinação de uma probabilidade envolvendo diversos eventos	Teoremas básicos de probabilidade
Previsão de desempenho sem falhas (confiabilidade)	Análise e previsão de probabilidade
Determinação da significância da diferença entre dois conjuntos de dados ou entre um conjunto de dados e um valor padrão	Teste de hipóteses
Determinação do tamanho da amostra requerida para teste de hipóteses	Determinação do tamanho da amostra para teste de hipótese
Determinação da habilidade do resultado de uma amostra para estimar o valor verdadeiro	Limite de confiança
Determinação do tamanho da amostra requerida para estimar o valor verdadeiro	Determinação do tamanho da amostra para estimativa
Determinando os limites de tolerância para características simples	Limites de tolerância estatística
Determinando os limites de tolerância para interação de dimensões	Limites de tolerância para interação de dimensões
Incorporação de informação passada para previsão de futuros eventos	Teorema de Bayes

Nosso objetivo é saber como estas ferramentas foram colocadas nesta caixa e particularizar o uso de uma ferramenta que apresenta uma das maiores potencialidades de ganho para a engenharia mecânica e que apresenta uma certa dificuldade de entendimento. Esta ferramenta é o Delineamento de Experimentos. Em adição, ou melhor, como complemento às nossas definições apresentadas acima, para nossa platéia de engenheiros, é necessário ainda que acrescentemos um modelo para solução e uma plataforma de "hardware", ou computação, com seu respectivo "software" e, tanto quanto possível, um conjunto de dados com um análise correta para verificação da plataforma e do "software" escolhidos.

Voltando à nossa caixa de ferramentas, se quizessemos agrupá-las de forma a organizá-las numa bancada de trabalho, teríamos ferramentas aplicadas à duas fases da obtenção dos produtos ou serviços mencionados na introdução deste artigo:

Fase I: Projeto

Fase II: Produção

Na caixa de ferramentas mencionada acima, as ferramentas mencionadas para a fase II, encarando-a como um processo, no qual o nosso produto ou serviço tem atingir especificações, teremos de forma geral dois inimigos da qualidade combatidos com:

Ferramentas usadas quando existem desvios de especificações

Ferramentas usadas quando há excessiva variabilidade em torno de especificações

Para a fase I, onde se aplica a ferramenta que é o centro de nossas atenções neste artigo, o Delineamento de Experimentos, a aplicação se dará durante os estágios que precedem à instalação de um processo de fabricação ou serviço, quando estas atividades são projetadas.

Ora, se verificarmos a lista de ferramentas para que o Juran propõe para a fase II, vamos identificar conceitos que são amplamente examinados em nossos currículos de graduação e que qualquer engenheiro teve oportunidade de exercitar. Por outro lado, as ferramentas para a fase I, da qual salientamos o Delineamento de Experimentos, e que tem o poder de minimizar, reduzindo drasticamente a necessidade das ferramentas da fase II, praticamente não é visto na graduação. Quando o delineamento é visto na graduação, deixa muito a desejar, pelas limitações naturais que um ambiente de um curso de graduação está sujeito. Este foi o fato que me motivou a escrever este artigo

II-Perspectiva historica: Os Estados Unidos¹

O contrôle da qualidade é tão antigo como a indústria. Desde a época em que a humanidade começou a fabricar algo, existiu um interesse na qualidade do produto obtido. Tão antigamente como na Idade Média, as corporações ou "guilds" exigiam um longo período de treinamento para os aprendizes e requeria daqueles que queriam se tornar mestres artesões uma evidência de sua habilidade. Estas regras eram em parte orientadas para manutenção da qualidade. Nos tempos mais modernos, a inspeção e a pesquisa, as leis de exigências para colocação de produtos no comércio, as atividades das sociedades profissionais tais como as de engenheiros e

¹Este capítulo é praticamente uma transcrição da introdução do livro "Quality control and industrial statistics", por Acheson J.Duncan, em sua quinta edição pela editora Irwin.

as de normalização, tem buscado assegurar a qualidade do produto. Desta forma, o controle da qualidade tem uma história muito longa.

Por outro lado, o controle estatístico da qualidade é algo novo. A ciência da estatística data de dois ou três séculos, tendo seu grande e verdadeiro desenvolvimento praticamente apenas no século vinte. Houveram aplicações iniciais feitas na astronomia, na física e nas ciências sociais e biológicas, mas foi apenas após 1920 que a teoria estatística começou a ser efetivamente aplicada para controle de qualidade. Um dos fatores determinantes no nascimento do controle estatístico de qualidade nos anos 20 foi o aparecimento de uma teoria de amostragem exata um pouco antes disto.

A primeira pessoa que se tem notícia a aplicar os novos métodos estatísticos aplicados à problemas de controle de qualidade foi Walter A. Shewhart do Bell Telephone Laboratories. Num memorandum de 16 de Maio de 1924, Shewhart desenhou um esquema de um moderno "gráfico de controle"² Esta nova técnica foi subsequentemente desenvolvida em vários memorandos e artigos³ e, em 1931, Shewhart publicou um livro sobre controle estatístico da qualidade intitulado "Economic Control of Quality of Manufactured Product".⁴ Este livro estabeleceu o padrão para as aplicações que se seguiram para os métodos estatísticos para o controle de processo. Dois outros pesquisadores do Bell Labs, H.F. Dodge e H.G. Romig, assumiram a liderança no desenvolvimento da aplicação da teoria estatística aplicada à inspeção por amostragem,⁵ sendo que a culminação do trabalho deles são as conhecidas "Sampling Inspection Tables" ou, tabelas de inspeção por amostragem. O trabalho de Shewhart, Dodge e Romig constituem muito do que hoje abrange a teoria do controle estatístico de qualidade.

No início dos anos 30, estes pesquisadores dos Laboratórios Bell, em colaboração conjunta com a ASTM - American Society for Testing and Materials, a ASA - American Standards Association e a ASME - American Society for Mechanical Engineers, assumiram a tarefa de popularizar os novos métodos estatísticos nos Estados Unidos. Shewhart também visitou Londres, encontrando-se com proeminentes estatísticos e engenheiros ingleses.⁶

Nos Estados Unidos, apesar da publicidade dada aos novos métodos, a velocidade da adoção foi lenta a princípio. O Professor H.A. Freeman, que estava promovendo o controle estatístico da qualidade no MIT - Massachusetts Institute of Technology, explicou esta resposta lenta nos anos iniciais devido a: (1) "Uma convicção muito forte da parte dos engenheiros de produção americanos que sua função principal é a de melhorar métodos técnicos de forma que não fiquem variações de qualidade significativas e que de qualquer modo, as leis da chance não tem um lugar próprio nos 'métodos científicos' de produção e (2) "a dificuldade em obter estatísticos industriais que sejam treinados adequadamente neste campo relativamente complicado".⁷ Em

²Ver a revista "Industrial Quality Control", de julho de 1947

³Ver o artigo de W.A. Shewhart "Finding Causes of Quality Variations", na publicação "Manufacturing Industries", de fevereiro de 1926, pp. 126-128; "Quality Control Charts", no "Bell Systems Technical Journal", de outubro de 1926, pp. 593-603 e "Quality Control", ibid., outubro de 1927, pp. 722-35. Ver também W.L. Robertson, no artigo "Quality Control by Sampling", na publicação "Factory and Industrial Management", de setembro de 1928, p.503 e naquele jornal, p.725

⁴Editado pela D. Van Nostrand Co., Inc. em N. York em 1931

⁵Ver, por exemplo, o artigo de H.F. Dodge "Using Inspection Data to Control Quality", na "Manufacturing Industries", v.16 (1928), pp.517-19, 613-15; e o artigo de H.F. Dodge e H.G. Romig "A Method of Sampling Inspection" no "Bell System Technical Journal", de outubro de 1929, pp.613-31; H.F. Dodge, "Statistical Aspects of Sampling Inspection Plans," em "Mechanical Engineering", de Outubro de 1935, pp.645-46; H.F. Dodge e H.G. Romig, "Single Sampling and Double Sampling Inspection Tables", no "Bell System Technical Journal", de janeiro de 1941, pp.1-61

⁶ver referência mais abaixo no texto

⁷H.A. Freeman, "Statistical Methods for Quality Control", em "Mechanical Engineering", abril de 1937, p.261

1937, provavelmente não mais que uma dúzia de empresas americanas de produção em massa tinham introduzido esta nova técnica em suas operações normais.⁸

Esta frieza inicial da indústria americana com relação ao controle estatístico da qualidade foi rapidamente ultrapassada durante a segunda guerra mundial. A abertura do conflito em 1939 obrigou os Estados Unidos a pensar na defesa nacional. Isto significava um aumento do efetivo militar em termos de gente e material de guerra. As forças armadas começaram a entrar no mercado como grandes consumidores do produto americano e, como tal, começaram a ter uma influência cada vez maior nos padrões da qualidade.

A influência dos militares na adoção do controle estatístico da qualidade foi de duas formas. Primeiramente, passaram eles mesmos a adotar procedimentos de inspeção por amostragem cientificamente projetados. O passo inicial neste desenvolvimento de procedimentos de inspeção por amostragem militares foi adotado logo após a entrada dos Estados Unidos na guerra, quando, a convite do governo americano⁹ um grupo de notáveis engenheiros do Bell Labs foram trazidos a Washington para desenvolver um programa de inspeção por amostragem para o Almoxarifado do Exército.¹⁰ As tabelas de inspeção por amostragem do Almoxarifado do Exército e do Serviço das Forças Armadas que surgiram em 1942 e 1943 foram largamente trabalho destes homens. Estes mesmos homens também participaram de um extensivo programa para tornar o pessoal do governo familiarizado com o uso das tabelas e dos novos procedimentos.

A segunda linha de influência dos militares foi o estabelecimento de um programa educacional amplo para a indústria e outras organizações.¹¹ Já em dezembro de 1940, A American Standards Association iniciou a pedido do Departamento da Guerra americano um projeto que culminou nos "American War Standard Z1.3-1941" e "Z1.2-1941", bem como o guia "Guide for Quality Control and Control Chart Method of Analyzing Data," e o "American War Standard Z1.3-1942," bem como o artigo "Control Chart Method of Controlling Quality During Production".¹²¹³

Estes dois trabalhos deram afirmações concisas das práticas das cartas de controle americanas e serviram como material de texto para os cursos de treinamento subsequentes. Em Julho de 1942 um curso intensivo de dez dias em controle estatístico de qualidade foi oferecido na Universidade de Stanford para representantes das indústrias envolvidas no esforço de guerra e para agências de compras por procuração das forças armadas.¹⁴ Posteriormente este curso foi

⁸Ver referência na mesma publicação acima.

⁹A pessoa responsável por este convite foi o General Leslie E.Simon, que com o conselho e a orientação de Shewhart tinha iniciado trabalhos sobre controle estatístico de qualidade no Picatinny Arsenal já em 1934. Seu livro, "**An Engineer's Manual of Statistical Methods**", foi editado em N.York em 1941 pela John Wiley & Sons. Ver também as observações do prof. S.B.Littauer na pg. 50 onde menciona que foi instrutor durante o programa de treinamento em controle de qualidade durante a guerra e as observações dos professores A.C.Cohen e Simon, p.71, sendo que o prof.A.C.Cohen serviu no Picatinny Arsenal de 1941 a 1944.

¹⁰O grupo consistia principalmente de George W.Edwards, diretor da Garantia da Qualidade do Bell Labs, H.F.Dodge do Bell Labs e G.R.Gause, na época do almoxarifado do exército. H.G.Romigo do Bell Labs, assistiu a operação

¹¹Este parágrafo foi baseado numa carta de H.F.Dodge e no artigo de Holbrook Working e Edwin G.Ols, "Organizations Concerned with Statistical Quality Control", em "**OPRD, Quality Control Reports**", no.2

¹²A ASA nos dias de hoje foi substituída pela ANSI - American National Standards Institute.

¹³Os membros da American Standards Association do Comitê Técnico de Emergência Z1 sobre Controle de Qualidade foram: A.G.Ashcroft; W.E.Deming, H.F.Dodge, presidente, J.Coullard, secretário, L.E.Simon e R.E.Wareham. H.F.Dodge do Bell Labs foi o principal autor da organização e redação do material técnico com forte e ativa cooperação de W.Edwards Deming do U.S.Census Bureau. Estas normas em 1985 estavam publicadas como ANSI Z1.1-1985, ANSI Z1.2-1985 e ANSI Z1.3-1985 editadas num único documento.

¹⁴Estes cursos foram planejadas pelos professores Eugene L.Grand e Holbrook Working da Universidade de Stanford e por W.Edwards Deming.

encurtado para oito dias e oferecido em Los Angeles, California. Estes cursos se tornaram possíveis pelo financiamento do Engineering, Science and Management War Training Program do United States Office of Education. O sucesso des program educacional inicial levou o Office of Production Research and Development of the War Production Board a estabelecer cursos similares em todo o pais.¹⁵ Consoantemente, de 1943 a 1945, 810 organizações de 35 diferentes estados mandaram representantes para participar de um ou mais dos 33 cursos intensivos sobre controle estatístico da qualidade que foram oferecidos pelo OPRD. Dentre ests 810 organizações estavam 43 diferentes instituições educacionais, a maioria das quais representadas por professores que foram ao curso para se preparar para dar aulas sobre controle da qualidade.

Seria correto mencionar que durante a guerra foram feitas pesquisas sôbre controle estatístico da qualidade em especial o Statistical Research Group da Universidade de Columbia. Foi formado um comite especial chamado Painel de Matemática Aplicada e o Escritório de Pesquisa e Desenvolvimento. Este grupo de pesquisa foi organizado em Julho de 1942 e continuou a existir até Setembro de 1945. Os membros do grupo foram selecionados das universidades e organizações de pesquisa do pais todo.¹⁶ Este grupo aconselhou e assistiu a Marinha, o Exército e o Escritório de Pesquisa Científica e Desenvolvimento nos aspectos estatísticos dos problemas que surgiram de suas atividades. Eles investigaram certos problemas de característica predominantemente estatística ou probabilística e desenvolveram, revisaram e interpretaram tecnicas estatísticas. Em suas contribuições para o controle estatístico da qualidade está a preparação do manual da marinha sobre inspeção de atributos por amostragem, que foi posteriormente expandido e seus principios básicos explicados no livro "Sampling inspection", publicado pela McGraw-Hill em 1948. Outra contribuição para a estatística industrial foi o volume sobre "Selected Techniques of Statistical Analysis for Scientific and Industrial Research and Production and Management Engineering", publicado pela McGraw-Hill em 1947. Uma das mais importantes contribuições para o controle estatístico da qualidade foi o desenvolvimento pelo Prof.A.Wald da amostragem sequencial. Na verdade, foi tão importante a amostragem sequencial que o governo americano seguiu a publicação do trabalho original de Wald até junho de 1945.

Os cursos de treinamento e programas de pesquisa patrocinados pelo governo federal dos Estados Unidos produziu em varios centros industriais núcleos de pessoal interessado e treinado. Subsequentemente ao completamento dos cursos introdutórios, sociedades de controle de qualidade foram formadas em várias localidades, em cujas reuniões foram oferecidas oportunidades para troca de ideias e a educação de novos membros. Em Buffalo, NY, a Society of Quality Control Engineers em cooperação com a Universidade de Buffalo começou em julho de 1944 a publicação "Industrial Quality Control", sob o comando de Martin Brumbaugh. A

¹⁵O prof.Holbrook Working foi emprestado pela Universidade de Stanford para desenvolver este program. Este trabalho foi posteriormente transformado na principal atividade de um segmento especial da OPRD em em março de 1945, sua séde foi transferida para o Carnegie Institute of technology.

¹⁶Este grupo foi organizado pleo prof.Harold Hotelling da Universidade de Columbia sob os auspícios de Warren Weaver, chefe do Painel de Matemática aplicada. Os membros do corpo admnistrativo senior incluíam Kenneth J.Arnold, da Universidade do Wisconsin, Rolling F.Bennet da Universidade de Columbia, Julian H.Bigelow, do Instituto de Estudos Avançados, Albert H.Bowker, da Universidade de Stanford, Churchill Eisenhart, do National Bureau of Standards (afastado temporariamente da Universidade do Wisconsin), H.A.Freeman, do MIT, Milton Friedman, da Universidade de Chicago, M.A.Girschick, do U.S.Bureau of the Census, Mikllard W.Hastay, do National Bureau of Economic Research; harold hotellign da Universidade de Columbia, Edward paulson da Universidade de North Carolina, L.J.Savage, da Universidade de Chicago, Herbert Solomon, da Universidade de Stanford, George J.Stigler, da Brown University, A.Wald, da Universidad e de Columbia, W.Allen Wallis, da Universidade de Chicago e J.Wolfwitz, da Universidade de Columbia. Ver "Statistical Research Group", na publ.da Universidade de Columbia "Techniques of Statistical Analysis", McGraw-Hill, 1947, N.Y., p.ix.

nova publicação rapidamente atingiu circulação nacional. Tudo isto levou a um uso crescente do controle estatístico da qualidade nos anos finais da guerra. Logo após a guerra, surgiu um interesse suficientemente desenvolvido para a formação da ASQC - American Society for Quality Control. George D. Edwards, diretor da Garantia da Qualidade do Bell Labs foi o primeiro presidente da nova organização e Walter A. Shewhart tornou-se seu primeiro membro honorário. Nascida em 16 de fevereiro de 1946, a ASQC atingiu em 1985 198 seções locais e 13 divisões,¹⁷ com um total de mais de 39000 membros. A ASQC encampou a publicação "Industrial Quality Control" e se tornou a força líder na promoção do uso da estatística para o controle da qualidade no continente americano. Uma seção também foi estabelecida no Japão. Na Inglaterra o desenvolvimento do controle estatístico da qualidade foi paralelo e acabou se misturando com o dos Estados Unidos. Análises estatísticas relativas à variação da qualidade do produto foram feitas já em 1920 por Bernard Dudding da General Electric da Inglaterra em seus laboratórios em Wembley. A necessidade de estudar variações em amostras pequenas em médias contra um cenário de probabilidade foi enfatizada em sua publicação de 1929 na GE. Uma vez que referências são feitas aos artigos de Shewhart e outros no "The Bell System Technical Journal"¹⁸ não é claro se a aplicação da teoria de amostragem como um controle para valores medios ocorreu a Dudding antes que ele tivesse visto estes artigos. Em 1925, L.H.C. Tippett, um estatístico da industria da seda da Inglaterra, publicou um artigo sobre a distribuição de faixas de amostragem de um universo normal que foi usada por Shewhart no seu livro "Economic Control of Quality of Manufactured Product."

Em 1931 Egon S. Pearson da University College, de Londres, visitou os Estados Unidos onde esteve alguns dias com Shewhart. Como resultado, Shewhart foi convidado a ir até a Inglaterra em maio de 1932 para dar tres aulas no University College sobre "O papel do método estatístico na padronização industrial". Após isto, as coisas se moveram rapidamente na Inglaterra. Pearson apresentou um artigo " sobre "Um levantamento sobre o uso de métodos estatísticos no controle e padronização da qualidade de produtos manufaturados" na reunião de Dezembro de 1932 da Royal Statistical Society. Logo após este evento, esta sociedade estabeleceu uma seção de pesquisa para a industria e para a agricultura e autorizou um suplemento no jornal regular para publicação de artigos pertinente ao novo campo de aplicação. É interessante notar que o comitê provisório para criar esta nova seção tinha representantes da Imperial Chemical Industries, da London School of Hygiene, da Boot Trade Research Association, do Departamento de Estatística Aplicada do University of College, de Londres e da Escola de Agricultura de Cambridge,¹⁹ e em sua primeira reunião, o trabalho de abertura foi lido por R.H. Pickard, diretor da Associação Britânica da Indústria da Seda. Em seguida às aulas de Shewhart a BSI - British Standards Institution organizou um pequeno comite sobre Métodos Estatísticos na Normalização e em Especificações, incluindo Egon Pearson, Dudding e representantes de várias indústrias britânicas. Um produto foi a norma BS 600-1935 "The Application of Statistical Methods to Industrial Standardization and Quality Control", que levou o nome de Egon Pearson.²⁰ Outro guia subsequentemente editado foi o BS 2564 em 1955 "Control chart technique shen manufacturing to a specification", por B.P. Dudding e W.J. Jennett (originalmente preparado para a G.E. da Inglaterra em 1944). Uma excelente revisitação sobre estes começos

¹⁷As 13 divisões da ASQC são: Aplicações Administrativas, Aeroespaciais e da Defesa, Automotiva, Biomédica, das Indústrias Químicas e de Processo, Eletrônica, Energia, Alimentos, Drogas e Cosméticos, Recursos Humanos, Inspeção, Confiabilidade, Estatística e Atividades Textéis e da Costura.

¹⁸Como por ex. o artigo de W.A. Shewhart, "Quality Control Charts", na ed.no.5 de 1926, pp. 593-606 e "Quality Control", na ed.no.6 de 1927, pp. 722-35.

¹⁹"Supplement to the Journal of the Royal Statistical Society", 1, no.1 (1934), p.2.

²⁰Infelizmente estas normas não são mais impressas, pois as placas de impressão originais foram destruídas durante a segunda guerra mundial num bombardeio de Londres.

do controle estatístico da qualidade na Inglaterra está no artigo" de E.G.Pearson na publicação "The Statistician", vol.22 (1973), pp.165-78.

A resposta da indústria britânica para os novos métodos estatísticos foi rápida e ampla. Em 1937 elas estavam sendo aplicadas a produtos tais como carvão coque, fios de seda, tecidos de seda, tecidos de lã, lentes de óculos, lampadas, materiais de construção e fabricação de componentes químicos.²¹ Estas aplicações foram posteriormente estimuladas ainda mais pela Segunda Guerra Mundial e em 1952, a Royal Statistical Society acrescentou um jornal de "Applied Statistics" à sua série de publicações.

Dos Estados Unidos e da Inglaterra as técnicas de controle de qualidade se espalharam para outros países. Sob a orientação do Dr.W.Edwards Deming, o controle de qualidade no Japão se tornou um dos mais sofisticados sistemas do mundo.²² Na Europa foi formado a EOQC - European Organization for Quality Control.²³ Na ISO - International Organization for Standardization foi formado o TC - Technical Committee 69 foi formado sobre *Aplicações de métodos estatísticos* chamando para si a tarefa de editar normas sobre planos de amostragem e gráficos de controle e hoje tôdas as nações industrializadas usam métodos estatísticos para controle de qualidade.

Depois dos gráficos de contrôle e planos de amostragem, outras técnicas, tais como correlação, análises de variância e Delineamento de Experimento, encontraram aplicação nos laboratórios industriais e departamentos de pesquisas. O uso destas ferramentas foi recomendado com forte ênfase desde os primeiros momentos juntamente com os mais conhecidos gráficos de contrôles e planos de amostragem.²⁴ Uma vez que estes dois últimos já eram técnicas estabelecidas, sua iniciação no uso industrial não foi acompanhada pela fanfarra e a publicidade que aconteceu com a introdução das técnicas que caracterizam de forma peculiar o controle de qualidade em si. O fato que estas outras ferramentas eram primariamente dedicadas à pesquisa ao invés de controle de processo ou inspeção também devem ter influido para mantê-las fora das luzes da notoriedade. Contudo, pode-se afirmar que estas poderosas ferramentas estatísticas estão hoje fazendo tanto pela pesquisa industrial como elas o fizeram para a pesquisa nas areas biológicas, da agricultura e social.

Mais recentemente aconteceram várias linhas de desenvolvimento. Uma destas foi a técnica de *análise de superfície de resposta*, geralmente associada com o Prof.George E.P.Box..²⁵Esta técnica exploratória encontrou pronta acolhida na indústria química juntamente com seu procedimento *operação evolucionária*, que é parecida e próxima dela.

Na área de teoria estatística e probabilidade tem aumentado o interesse em processos estocásticos²⁶ e no campo industrial isto tem levado ao desenvolvimento de cartas de controle cumulativas por soma e um procedimento conhecido como controle de qualidade adaptativo e que tem sido promovida pelos autores G.E.P.Box e G.M.Jenkins.²⁷

²¹H.A.Freeman, "Statistical Methods for Quality Control", em "Mechanical Engineering", de abril de 1937, p.261

²²Este desenvolvimento é revisto em um artigo" editado por J.M.Juran na publicação "Reports of Statistical Application Research", vol.22, de 1975, pp. 66-72, editado pela JUSE - Japan Union of Scientists and Engineers.

²³EOQC Secretariat, P.O.Box 2613, CH-3001, Berne, Switzerland. Fundada em Paris em 1956, primeiro presidente W.Masing, da Alemanha.

²⁴Já em 1927, como por exemplo o artigo de A.E.R.Westman, "Statistical Methods in Ceramic Research", **Journal of the American Ceramic Society**, Março de 1927, pag.133

²⁵Ver meu artigo sôbre um problema dentro desta técnica quando cursava o mestrado de qualidade do IMECC.

²⁶Um processo estocástico é uma família de variáveis randômicas indexadas por algum outro conjunto e que tem a propriedade de ter, para cada subconjunto finito do conjunto de index a coleção das variáveis randômicas desta forma indexada, uma distribuição de probabilidades conjugadas.

²⁷As tres técnicas mencionadas e associadas com G.E.P.Box tem tido sucesso relativamente pequeno.

Um terceiro e grande desenvolvimento tem sido a engenharia de confiabilidade. Por ser seu âmbito mais amplo esta técnica não foi apenas desenvolvida pela ASQC - American Society for Quality Control, como também por tais organizações como o IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers. Uma das áreas de engenharia de confiabilidade muito importante é "teste de vida". Uma norma importante neste assunto é a norma militar Mil.Std.781C *Reliability Design Qualification and Production Acceptance Tests: Exponential Distribution* editada pelo Comando Naval de Sistemas Eletrônicos, da Marinha Americana. A norma 781D *Reliability Testing for Engineering Development, Qualification and Production*, que substituiu a 781C, foi editada em 1986 juntamente com o Military Handbook 781, *Reliability Test Methods, Plans and Environments for Engineering Development, Qualification and Production*. Os padrões extremamente elevados geralmente requeridos pela engenharia de confiabilidade, especialmente no desenvolvimento de mísseis, criaram uma dimensão inteiramente nova para o problema da qualidade. Numa tentativa de motivar trabalhadores a produzirem uma qualidade perto da perfeição, programas "zero defeitos" foram criados. Em 1966 estas atividades nesta área deram origem a American Society for Zero Defects. Em 1985 seu nome foi mudado para American Society for Performance Improvement.

De forma geral, existe um reconhecimento cada vez maior que a participação do trabalhador na direção de um programa de controle de qualidade é altamente desejável. Não somente o trabalhador frequentemente tem sugestões valiosas para a melhoria, mas também a participação lhe dá um interesse pessoal na melhoria da qualidade. No Japão, a participação dos trabalhadores tem sido efetivada através de *Círculos de Qualidade*; nos Estados Unidos vem sendo desenvolvida através do que é conhecido como solução de problemas participativa.

Nos Estados Unidos, após o início da década de 70 o aumento do consumismo levou o governo federal a editar normas regulatórias relativas principalmente à segurança do produto. Um desenvolvimento especialmente significativo foi a criação em 1972 da Consumer Product Safety Commission com o poder de promulgar normas de segurança para todos os tipos de produtos de consumo. Um desenvolvimento paralelo foi o aumento do interesse na padronização e a promoção de programas de certificação de produtos às expensas do fabricante. A culminância de tudo isto se deu com a ampla aceitação no mundo e nos Estados Unidos da certificação pelas normas ISO 9000.

O quadro das tendências dentro dos Estados Unidos pode ser bem visualizado pelos livros: "Quality, Productivity and Competitive Position" em 1982 pelo MIT e "Out of the Crisis", em 1986.²⁸

A cooperação entre a ASQC e a American Statistical Association tem sido efetivada pela publicação da "Technometrics" e a ASQC em 1968 deixou de publicar a "Industrial Quality Control" e iniciou a publicação de dois periódicos de grande aceitação que são a "Quality Progress" e o "Journal of Quality Technology".

III-Perspectiva histórica: O Japão²⁹

Quando as forças de ocupação dos Estados Unidos desembarcaram no Japão, encontraram imediatamente um grande obstáculo: a falha do sistema telefônico, que impossibilitava o uso deste aparelho. As forças de ocupação ordenaram o uso da estatística para melhorar a qualidade de todo o sistema e, assim, em 1946, começava o uso da estatística para o controle da qualidade.

²⁸O segundo está traduzido para o Português sob o título "Qualidade: A revolução da administração" pela Ed. Marques Saraiva e o primeiro também pode ser encontrado em Português.

²⁹As informações que se seguem foram compiladas a partir do livro do Dr. Ishikawa "What is Total Quality Control? The Japanese Way" Prentice Hall, 1985

JIS & JSA³⁰

Foram formados, respectivamente em 1945 e 1946, sendo seguidos pela Industrial Standardization Law (Lei da padronização industrial) em 1949. As JAS (Japan Agricultural Laws) - Leis japonesas para agricultura- seguiram-se em 1950 ao mesmo tempo que o símbolo JIS foi instituído baseado na lei de padronização. Este símbolo certifica o fabricante como usuário de padrões e controle de qualidade. Este sistema é singular no sentido que sua adoção é voluntária.

JUSE³¹

Foi criada em 1946 e em 1949 estabeleceu o QCRG (QualityControl Research Group) - Grupo de Pesquisa do Controle deQualidade com seus membros saídos das Universidades, Industria e Governo. Seu objetivo era pesquisar e disseminar conhecimento do controle de qualidade. Seus membros buscavam meios de racionalizar as indústrias, de exportar bens e aumentar o nível de vida do povo japonês. Eles esperavam obter isto do controle de qualidade. O primeiro curso básico de controle de qualidade foi conduzido em Setembro de 1949, organizado através de encontros de três dias por mês durante um ano, totalizando 36 dias. Sua audiência básica constituída de engenheiros das indústrias. No segundo curso, mudou-se para encontros de seis dias por mês por seis meses. Atualmente ainda roda por seis meses, cinco dias por mês. O trabalho da JUSE na adaptação cultural dos textos americanos e ingleses, principalmente eliminado o "Control", foi notável.

Dr.W.E.Deming

Em 1950 a JUSE ofereceu um seminário com o Dr.W.E.Deming que durou 8 dias. A apresentação deste seminário dizia:

1. Como usar o ciclo PDCA (Plan, Do, Check, Action) ou o ciclo de Deming, ou seja Planeje, Faça, Confira e Aja para melhorar a qualidade
2. A importância de ter uma idéia de dispersão em estatística
3. O controle de processo através do uso de gráficos de controle e como usá-las Estas aulas foram claras e incisivas e beneficiaram quem as ouviu e quem as patrocinou. Foram mantidos seminários especiais para presidentes de empresas e gerentes executivos em Hakone e estes reconheceram a importância do controle de qualidade em suas companhias.

Quem efetivamente introduziu Controle de Qualidade no Japão foi o Dr.Deming.

O Prêmio Demming

As aulas do Dr.W.Edwards Deming dadas em 1950 foram transformadas em livro e os royalties foram usados pela JUSE para estabelecer o Prêmio que leva seu nome. A aplicação para candidatura ao prêmio leva os aplicantes a um exercício que traz enorme progresso e o Dr.Ishikawa aconselhava fortemente a todas companhias se candidatarem.

O primeiro prêmio Deming foi conferido em Setembro de 1951 em Osaka. Uma conferência sobre Controle de Qualidade aconteceu nesta ocasião e é reconhecida como a primeira Conferência Anual de Controle de Qualidade no Japão. Dr.Kaoru Ishikawa em 1952 era diretor

³⁰Japanese Industrial Standards Committee e Japanese Standards Association

³¹Japan Union for Scientists and Engineers

da Sociedade Química do Japão articulou um comitê executivo para conferências de Controle de Qualidade e em particular para patrocinar esta conferência anual junto com o prêmio Deming. A JUSE foi chamada para organizar estas conferências que ocorrem todos os anos em Novembro desde então. Em 1962 iniciaram-se as Conferências anuais para os encarregados de fábricas e para os consumidores. Em 1963 começaram as conferências para os gerentes de alto nível. Nenhum país no mundo tem tantas conferências de tantos grupos como o Japão.

Mês da Qualidade e Q Flag

Para celebrar o 10o. aniversário da publicação do jornal "Statistical Quality Control" foi instituído este movimento. Foi criada uma bandeira num projeto dirigido pelo Sr. Haruko Mitsuaki que encarregou o Sr. Yoji Yamawaki da Universidade de Belas Artes de Tóquio, num concurso promovido entre seus estudantes. Curiosamente a cor original, azul, desbotava e passaram a usar a cor vermelha da bandeira do Japão, que tem tintas indesbotáveis.

Em 1950 foi publicado pela JUSE o jornal SQC ou Statistical Quality Control que disseminava Controle de Qualidade e Total Quality Control. Em abril de 1962 iniciou-se a publicação do jornal FQC ou Foreman Quality Control (Controle de Qualidade do Encarregado) Dr. Ishikawa foi sempre grande colaborador destes jornais e em suas palavras: "O Japão não poderia ter tido sucesso sem estes jornais".

O Dr. Ishikawa estabeleceu para o Setor de Minas um grupo de estudo em 1952, com o auxílio da JUSE, para determinar um procedimento estatisticamente correto de amostragem. Este grupo foi dividido em outros subgrupos e baseados em seus trabalhos foram estabelecidas as normas JIS (Japanese Industrial Standards) para muitas indústrias e referentes a estes assuntos. A experiência destes grupos deu base para definição do Estudo de Amostragem para a Proteção Ambiental estabelecido dentro da JUSE em 1971.

Dr. Kaoru Ishikawa

O Dr. Ishikawa foi um dos grandes pioneiros e um dos primeiros a perceber o potencial da estatística. Posteriormente ele também percebeu a ideia que se desenvolveu no que é conhecido hoje como TQC ou TQM - Total Quality Management ou Total Quality Control. Nas normas JIS mencionadas acima, o Dr. Ishikawa teve papel preponderante nas seguintes áreas:

A-Estudos sobre amostragem:

- 1-Métodos de amostragem
- 2-Métodos de divisão
- 3-Métodos de análise

B-Comitês sobre assuntos relativos a controle de qualidade

C-Comitê para racionalização de Normas (1956)

- 1-1952 O Japão se torna "Member" da ISO (International Standards Organization)
- 2-1961 O ISO TC 102 foi escolhido para o Japão
- 3-1969 Associou-se ao ISO Chapter do Japão
- 4-1977 Dr. Ishikawa torna-se Chairman do TC 102
- 5-1981 Torna-se membro do Comitê executivo da ISO

A figura do Dr. Ishikawa está mais associada aos círculos de qualidade e ao TQM, que ele ajudou a difundir pelo mundo todo.

Problemas iniciais pelo uso exagerado da estatística

Após esta breve perspectiva histórica, examinando as origens e os lugares onde a estatística contribuiu mais para obtenção da qualidade, vamos tentar estabelecer uma dialética sobre o assunto, listando, na opinião do Dr. Ishikawa, os problemas que o Japão encontrou pelo uso exagerado pelo uso da estatística. Estes problemas foram:

1. Trabalhadores experientes que sempre se basearam em sua experiência e senso comum se queixavam que não podiam usar métodos estatísticos. Argumentaram, às vezes emocionalmente, que estes métodos eram inúteis
2. Para gerenciar fabricas, as companhias tinham necessidade de ter padrões para níveis de tecnologia, trabalho e inspeção. Eles não eram disponíveis. Mesmo que alguém tentasse estabelecer padrões, as pessoas se queixavam que "existiam muitos fatores a considerar" ou que "poderiam gerenciar as fabricas de qualquer maneira".
3. Eram necessários dados para implementar controle de qualidade. Mas eles eram simplesmente inexistentes.
4. A coleta de dados, o método de amostragem e o método da divisão não eram seguidos adequadamente. Desta forma, não eram úteis.
5. Afim de coletar dados, equipamentos de medição e registradores automáticos foram às vezes instalados. Algumas vezes, os trabalhadores suspeitavam destes monitores e os destruíam.

Lições da experiência

1. Métodos estatísticos são efetivos na verdade, mas enfatizamos excessivamente sua importância. Como resultado, as pessoas ou temiam ou desgostavam deles, e consideravam controle de qualidade como algo muito difícil. Na verdade, houve excesso de sofisticação, quando na verdade métodos simples bastavam.
2. A padronização progrediu na area de padrões de produtos, matérias primas, normas técnicas e de trabalho, mas apenas pro forma. Criamos os padrões mas não os usamos. Muitas pessoas sentiam que a padronização significava regulamentos para amarrar pessoas.
3. O controle de qualidade permaneceu um movimento de engenheiros e trabalhadores nas fabricas. A gerência media e superior não mostrava interesse. Supunha-se que isto custaria dinheiro. Dizia-se "quem irá colocar o patrão sob arreios?" Os membros do QCRG (Quality Control Research Group) tentavam convencer os gerentes a participar, mas sem sucesso.

Visita do Dr. Juran

O Dr. J.M. Juran visitou o Japão nesta época (1954) e seus seminários e sua personalidade persuasiva foi fator primordial o convencimento dos gerentes médios e executivos, demonstrando-lhes seus papéis na promoção das atividades de Controle de Qualidade. Esta visita marcou a transição das atividades de Controle de Qualidade no Japão do manuseio estrito da tecnologia baseado nas fabricas para uma preocupação geral com a gerência completa. Existe uma limitação quando apenas engenheiros usam Controle Estatístico e são seus principais promotores. A visita de Juran criou uma atmosfera que estas ferramentas passaram a ser encaradas como ferramentas de gerência, criando uma abertura para o estabelecimento do Total Quality Control como conhecemos hoje.

Círculos de Qualidade

A irradiação pela NHK (Japan Broadcasting Corporation) de um curso por correspondência para encarregados em 1956 em ondas curtas e a oferta de continuidade nos seus programas educacionais em 1957 foi a chave que faltava para iniciar-se verdadeiramente a revolução que se seguiu. Neste início 110.000 cópias do texto foram vendidas e excederam de longe a expectativa. A JUSE passou a publicar seu "Text on Quality Control for the Foreman (A and B)" em 1960 e até hoje continua a ter procura.

EXPERIÊNCIA JAPONESA VERSUS A EXPERIÊNCIA OCIDENTAL

Existem muitas diferenças entre as atividades de Controle de Qualidade no Japão, nos Estados Unidos e Na Europa Ocidental. Isto se deve em parte às características singulares de cada sociedade e cultura. Seguem abaixo uma lista dos fatores que, na opinião do Dr. Ishikawa são diferenciados e ajudam a entender as atividades japonesas:

1 Profissionalismo

Os europeus e americanos dão grande ênfase no profissionalismo transformando os assuntos de Controle de Qualidade em exclusividade de especialistas, impedindo as pessoas comuns de se sentirem co-responsáveis pelo assunto. As estruturas contemplam um quadro com divisão, secção, subsecção com especialistas chefiando, o que nutre os especialistas mas do ponto de vista da organização como um todo isto produz pessoas com visão muito limitada.

2. A sociedade do Japão é vertical

As relações de quem está em cima e quem está em baixo no Japão são muito fortes. Contudo, em proporção a esta forte relação está a fraqueza das relações horizontais, isto é, quem está ao lado. No sistema japonês, as áreas de manufatura, projeto, marketing e compras são normalmente fortes e divisões como Controle de Qualidade são de assessoria e fracas. Os trabalhadores normalmente farão ouvidos surdos a grupos de assessoria, o que obrigou os executivos, posição "de cima" a assumir o papel.

3. Sindicatos

Nos Estados Unidos e na Europa, os sindicatos são organizados funcionalmente. Por exemplo, na Inglaterra, num estaleiro podemos encontrar 45 sindicatos, tais como de soldados, de encanadores, etc. Se os soldados ficam em greve, tudo para, embora os outros 44 sindicatos não se encontrem em greve. Este sistema é um legado dos "guilds" que congregavam artesões antigamente. No Japão, em contraste, os sindicatos são formados por empregados de uma empresa como um todo e os trabalhadores recebem treinamento multifuncional, o que seria impossível na Europa e Estados Unidos

4. Taylorismo e Absenteísmo

Frederick W. Taylor é tido como o pai do gerenciamento científico e seu método ainda é muito usado nos Estados Unidos, na Europa Ocidental e na Rússia (URSS). O método preconiza o uso de especialistas. Engenheiros e especialistas formulam padrões técnicos e de trabalho. Os trabalhadores simplesmente seguem o que lhes é pedido e padrões para fazê-lo. Talvez há 50 anos fosse bom, mas não é mais aplicável hoje. Havia poucos engenheiros e a educação dos trabalhadores era pequena, situação muito diferente hoje, com muitos engenheiros e um aumento constante do grau educacional do trabalhador. Os métodos de Taylor não reconhecem as habilidades escondidas em cada ser humano, ignorando sua humanidade e os tratando como máquinas. Isto redundava em um baixo nível de interesse da parte do trabalhador e quando uma pessoa trabalha apenas porque precisa, o absenteísmo toma conta. Sem motivação dos trabalhadores é impossível produzir bens confiáveis e de alta qualidade.

5. Elitismo e Consciência de Classe

Na Europa, especialmente na Inglaterra e na França, existe uma forte consciência de classe da parte dos graduados de certas universidades que chegam à discriminação daqueles menos afortunados que eles. Na França, quando Dr. Ishikawa perguntou, visitando uma fábrica, qual era o percentual dos encarregados que se tornavam gerentes, os chefes de divisão e de seção hesitaram e não responderam. Perguntando ao gerente da fábrica, ele foi informado que nenhum encarregado atingia a posição de gerente. Esta atitude espalhou pelas colônias e numa visita que Dr. Ishikawa fez à Indonésia ele descobriu que companhias japonesas que faziam sucesso lá não contratavam engenheiros formados pela Universidade de Jakarta, uma das melhores do país. A razão apontada era que os engenheiros recém formados queriam imediatamente posições de gerência.

6. Sistema de pagamento

Nos Estados Unidos e Europa, o pagamento é feito por mérito. Premia os mais eficientes sem considerar a idade. Embora o Japão esteja introduzindo também fatores de mérito, sistema de pagamento é fundamentalmente baseado em senioridade e classificação. Dr. Ishikawa acredita que o pagamento por mérito dá a noção para as pessoas que eles podem trabalhar por dinheiro. Se motivarmos as pessoas apenas a trabalharem por dinheiro, como faremos para satisfazê-los quando não tiverem motivação para trabalhar? A alegria, o desejo e o prazer tem dimensões que precisam ser melhor compreendidas e se quisermos mudar as atitudes das pessoas. Temos que ter uma ideia clara destes fatores. Uma breve análise dos dois sistemas se segue:

Fatores fundamentais para o sistema baseado em dinheiro:

- a. Procura-se condições mínimas de sobrevivência
- b. O homem tem afeição eterna por posse
- c. A satisfação tende a ser material (ex. posse de automóvel, etc.)

Fatores fundamentais para o sistema baseado em motivação:

- a. Procura-se a alegria de completar um projeto
- b. Procura-se a alegria de atingir um objetivo
- c. Procura-se viver em sociedade, através de:
 - 1) Ser capaz de trabalhar em grupo
 - 2) Reconhecimento do próximo
 - 3) Procura do respeito e dignidade
 - 4) Procura do orgulho de cidadania e do grupo a que pertence
- d. Aumenta a ênfase no crescimento pessoal, através de:
 - 1) Experiência de satisfação no uso das próprias habilidades

- 2) Aumento de auto confiança
- 3) Usar o próprio cérebro e completar-se
- 4) Trabalhar voluntariamente

7. "Turnover Rate", garantia de emprego, "Layoff"

"Turnover Rate" significa a quantidade de pessoas que saem e entram em uma organização. Por exemplo, num quadro de 1000 trabalhadores, se mensalmente troca-se 10 pessoas, o "turnover rate" é 1%. Garantia de emprego é a pessoa não ser mandada embora, isto é, não perde o emprego. "Layoff" é a despedida do emprego. Quando flutua a produção, os trabalhadores são despedidos. Nos Estados Unidos e na Europa, o "turnover" é muito alto e o "Layoff" é uma pratica comum, sendo raro o caso de garantia de emprego. Qualquer trabalho requer experiência e quanto mais complexo, mais experiência demanda. Quando o "turnover" ocorre em postos que precisam experiência, não podemos esperar eficiência ou qualidade. No Japão o padrão é familiar e a pratica do pleno emprego, para toda vida é muito difundida. Com a ênfase que é dada em educação, o trabalhador acumula valor ao longo do tempo e representa um recurso da companhia.

8. Diferenças no sistema de escrita

O sistema de escrita japonês veio do Kanji e é o mais difícil que existe na face da terra. São caracteres de origem chinesa que tem natureza hieroglífica e ideográfica. Países que usam este sistema de escrita são mais solicitados o que faz com que eles se interessem mais por educação. A necessidade de estudo intenso para adquirir proficiência na leitura e interpretação faz dos nacionais desta forma de escrita estudantes naturais e isto facilita a introdução da ideia de Controle de Qualidade, que também requer estudo constante.

9. Raça, homogeneidade e trabalhadores estrangeiros

O Japão tem uma só raça e uma só linguagem. Não existe no mundo nenhuma raça que exceda mais de 100 milhões de habitantes. Nos Estados Unidos existem muitas raças e até mesmo pessoas que não falam Inglês. Na Europa as fabricas tem muitos estrangeiros. Numa visita a uma fabrica alemã, Dr. Ishikawa viu boletins escritos em sete idiomas, que eram os trabalhadores a quem a comunicação se destinava. Isto cria complicações para estabelecer padrões de trabalho e no dimensionamento do mercado domestico.

10. Educação

Como pais, talvez o Japão apresente o mais alto grau de alfabetização do mundo, num sistema notoriamente complicado. Alto grau de conhecimento em ciências matemáticas, por exemplo, é considerado normal entre os japoneses. O nível geral de boa educação entre os trabalhadores japoneses é um fator de sucesso do Controle de Qualidade. Noventa por cento das crianças completam o grupo escolar, que são nove anos e 90 por cento dos que completam o grupo escolar, atingem o segundo grau com sucesso.

11. Religião

O Dr. Ishikawa faz apreciações polêmicas em torno da ideia que ele acredita que o cristianismo passa e as ideias que o confucionismo prega. Na ideia dele, o cristianismo parte do conceito de um homem essencialmente mau, com natureza ruim a ser contornada, enquanto que o confucionismo contempla naturezas boas e ruins, sendo que o Dr. Ishikawa crê que o estudo leva qualquer pessoa a ficar boa. A influencia no estilo gerencial, segundo este princípio, se fez sentir no mundo ocidental, na opinião do Dr. Ishikawa. Neste caso, a base da relação é a desconfiança

que geraria necessidade de inspeção. Porém, quando as pessoas são consideradas boas, confiáveis, desaparece a necessidade de inspeção.

12. Relação com fornecedores

Já nos anos 60 cerca de 70% do custo da produção de uma companhia média japonesa vinha de fornecedores em contraste com uma tendência inversa nos Estados Unidos. O Dr. Ishikawa defende ardentemente que fabricantes se especializem em campos próprios e passem a fornecer a um grande número de indústrias.

13. Democratização do capital

O capitalismo em suas formas mais antigas ainda existe em larga escala no mundo ocidental., isto é, alguns capitalistas são os maiores acionistas de algumas companhias. Nestes casos, os donos operam estas companhias. No Japão, nenhum dono opera sua companhia e sim, gerentes de carreira, vindo das fileiras por merecimento e por capacidade. No ocidente o que se espera do presidente de uma companhia é o lucro a curto prazo e seu desempenho é medido por isto, sendo dispensado se não apresenta lucros a curto prazo. Isto é complicado ainda mais pelo fato que a Securities and Exchange Commission requerer balancete a cada três meses.³² Isto inviabiliza estratégias de longo prazo. Talvez o principal fator de sucesso da indústria automobilística e do aço japonesas foi a capacidade de implementar estratégias de longo prazo. A dissolução das Zaibatsu (conglomerados) pelas forças de ocupação após a guerra foi benéfica ao Japão, pois introduziu o liberalismo e uma distribuição de rendas mais equitativa. Dr. Ishikawa sugere um período mínimo de três anos para avaliar desempenho de executivos.

14. O papel do governo

A burocracia é um fenômeno universal e todo burocrata adora controle. Esta tendência é maior nos países comunistas onde os oficiais executivos nunca são removidos. Embora o Japão não esteja livre deste problema, de forma geral isto foi minimizado a níveis que o Dr. Ishikawa considera muito bons. Dr. Ishikawa aponta o fato que a carne e o arroz mais caro do mundo são consumidos no Japão principalmente pelo protecionismo dado pelo governo para o setor de alimentação, que eliminou a competição.

CARACTERÍSTICAS DE CONTROLE DE QUALIDADE JAPONÊS

Em Dezembro de 1967, no sétimo simpósio sobre Controle de Qualidade, foram selecionadas as seguintes características que distinguem o sistema japonês do ocidental:

1. Controle de Qualidade a nível de toda a organização,³³ com participação de todos os membros
2. Educação e treinamento em Controle de Qualidade
3. Atividades de Círculos de Qualidade
4. Auditorias de Controle de Qualidade, incluindo o Prêmio Deming e auditorias presidenciais
5. Uso de métodos estatísticos
6. Atividades a nível nacional de promoção de Controle de Qualidade

³²No Brasil é anual

³³ Recentemente, e principalmente após a morte do Dr. Ishikawa, esta tendência começou a seguir a dos japoneses.

IV-Fase I - Projeto

Delineamento de experimentos

O objetivo de um delineamento é ou **explorar as relações entre os fatores que afetam um processo** ou **confirmar alguma hipótese**.

Normalmente é mais eficiente estimar os efeitos de diversas variáveis simultaneamente. Cada delineamento conterá um grupo de rodadas experimentais. Um novo delineamento não é necessariamente empregado para cada ciclo iterativo. Algumas vezes uma sequência de ciclos ocorrerão nos quais os mesmos dados são confrontados pro sucessivas hipóteses. Contudo, quando não é claro qual modificação deveria ser feita para uma hipótese insatisfatória, ou alternativamente, quando confirmação posterior ou uma hipótese aparentemente satisfatória é necessária, dados adicionais serão requeridos. Neste caso, estes são gerados por rodadas experimentais posteriores arrumadas num novo delineamento experimental.

Delineamentos na Ciência e na Indústria

Os métodos experimentais são amplamente usados em pesquisa e na indústria, contudo, para finalidades diferentes. Na pesquisa científica, normalmente o objetivo principal é mostrar a significância estatística de um efeito que um fator particular exerce em uma variável dependente de interesse. No ambiente industrial, o objetivo principal é normalmente extrair o máximo de informação não polarizada em relação a fatores que afetam um processo de produção de uma quantidade o menor possível de observações feitas.

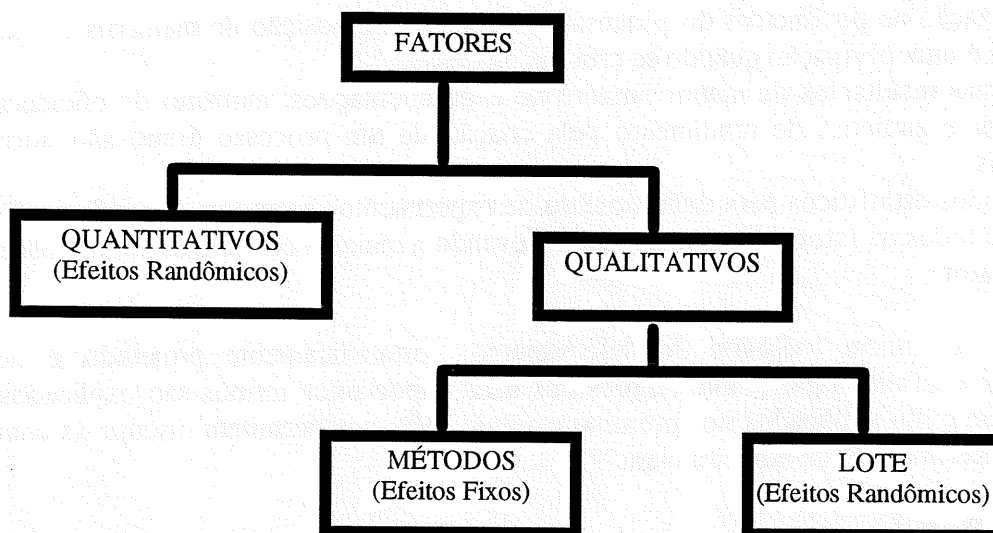
Enquanto que no caso da ciência a ANOVA (Analysis of variance - Análise de variância) é usada para descobrir a natureza interativa da realidade, na forma que se manifesta pela interação de fatores de ordem mais alta. No ambiente industrial os efeitos de interação são geralmente vistos como ruído, não sendo de interesse, sendo somente complicadores dos efeitos principais que são os verdadeiramente importantes para aquele processo em particular.

Os autores distinguem diferenças entre as duas condições, porém no texto que selecionei, a estrutura é para ciência e os problemas são de indústria e do ponto de vista do engenheiro, me parece que isto pode ser misturado sem maiores problemas .

PAPEL DO DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS NO PROCESSO DE MELHORIA³⁴

Tipos de Fatores

O quadro geral dos fatores que afetam um Projeto de Delineamento Experimentos apresenta a seguinte variedade:



O Delineamento de Experimento normalmente significa:

Matrizes Experimentais de Variáveis Múltiplas.

A razão básica para o uso de delineamento de experimentos estatisticamente estruturados é obter uma quantidade máxima de informações com um mínimo de despesas. A finalidade fundamental de um delineamento de experimentos é determinar o

³⁴Este guia é tradução do capítulo 11 da publicação IBM "Process Control, Capability and Improvement" (Controle de Processo, Capacidade e Melhoria), publicado pelo Quality Institute da IBM, em Southbury, Connecticut, CEP 06488 - USA, na primavera de 1985.

A Ford Motor Company permitiu o uso de partes do material contido no seu manual, que é coberto por direitos autorais, intitulado: "Continuing Process Control and Process Capability Improvement... A guide to the use of control charts for improving quality and productivity for company, supplier and dealer activities." (Controle de Processo Contínuo e melhoria de Capacidade...Um guia para o uso de cartas de controle para melhorar a qualidade e a produtividade para as atividades de companhias, fornecedores e revendedores autorizados).

O Sr.Rober G.Langevin da Argyle Associates Incorporated, de New Canaan, Connecticut, assistiu a IBM no desenvolvimento de material para este livro, preparando, atualizando o material e ajudando no suporte editorial.O Sr.Ernest F.Chace do Departamento de Garantia de Qualidade dos Fornecedores, da IBM de Poughkeepsie, desenvolveu os exemplos, definições e fluxo da matéria para o capítulo em questão, isto é, Delineamento de Experimento.

O Sr.William J.Schultz do Instituto de Qualidade da IBM em Southbury, Connecticut, concebeu e coordenou a produção deste documento com a criação de textos complementares.

O material aqui apresentado é coberto por direitos autorais pela IBM International Business Machines. A cópia em matéria impressa para uso privado é permitida sem o pagamento de royalties desde que cada reprodução seja feita sem alteração e a referência ao direito autoral da IBM seja mencionada na primeira página.

Permissão para republicar qualquer porção tem que ser obtida da IBM

Curso da ação:

Esta ação resulta de conclusões tiradas do delineamento. Muitos aspectos do desenho do projeto e a otimização de um processo bem sucedido requerem delineamentos eficientes com acuidade e precisão, que tem que considerar:

1. O método científico, e portanto toda a investigação científica, é construído em torno da experimentação.
2. A otimização de parâmetros do processo, tais como composição de materiais ou parâmetros ambientais é uma obrigação quando se cria um processo.
3. Economias resultantes de menor número de experimentações, aumento de eficiência para o investigador e aumento de rendimento pela criação de um processo ótimo são normalmente substanciais.
4. Os métodos estatísticos para delineamento de experimentos permitem que informações sejam colhidas de todos os fatores simultaneamente, levando a maiores economias sobre delineamentos de um só fator.

A fim de se aplicar métodos de delineamento estatisticamente projetado é necessário uniformizar a terminologia usada. Alguns dos mais importantes termos são explicados na lista que se segue e são explicados no próximo capítulo. Eles nos permitem discutir as complicadas matrizes experimentais de maneira clara.³⁵

TERMINOLOGIA

1. Delineamento ("Experiment")

Um conjunto de operações planejadas que leva a um conjunto de observações correspondentes.

2. Resposta (Response) ou Variável Dependente (Dependent Variable)

O resultado numérico de uma tentativa baseada num dado tratamento é chamado uma resposta.

3. Fator ou Variável Independente

Uma característica da condição experimental que pode ser variada de uma observação para outra. Pode ser: (Veja diagrama introdutório):

a. Qualitativo:

- 1) Fixo
- 2) Randômico

b. Quantitativo:

- 1) Randômico

³⁵ A terminologia aqui usada foi tradução literal do original em Inglês. Não tenho conhecimento sobre uniformização formal ou não em Português sobre terminologia para delineamento de experimentos.

Fatores Qualitativos seriam itens tais como boa ou má agitação (no caso de misturas líquidas), que poderiam estar ou não acionados (com uma chave de liga-desliga) ou conjugações que ocorreriam naturalmente.

4. Níveis de um Fator (Levels of a Factor)

Os vários valores de um fator considerado em um delineamento são chamados níveis.

5. Combinação de Tratamento (Treatment Combination)

O conjunto de níveis de um fator considerado em um delineamento é chamado de tratamento ou combinação de tratamento.

6. Resposta (Response)

O resultado numérico de uma tentativa baseada numa dada combinação de tratamento.

7. Efeito de um Fator (Effect of a Factor)

O efeito de um fator é a mudança de resposta produzido pela mudança no nível do Fator. (Aplicável somente para fatores a dois níveis cada).

8. Efeito Principal (Main Effect)

O efeito médio de um fator é chamado de efeito principal do fator.

9. Delineamentos comparativos (Comparative Experiments)

Um delineamento cujo objetivo é comparar os tratamentos ao invés de determinar os valores absolutos.

10. Delineamentos não-comparativos (Non-Comparative Experiments)

Um delineamento cujo objetivo é a determinação das propriedades ou características de uma população.

11. Unidade Experimental (Experimental Unit)

Uma unidade experimental é um item para o qual um tratamento simples é aplicado em uma replicação do delineamento básico.

12. Bloco (Block)

Um bloco é uma parte do material experimental que é mais provável de ser homogênea que o total.

ETAPAS EM UM DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS

Uma vez que se esteja confortável com estes termos usados em projetos de delineamento de experimentos, especialmente os itens definidos acima em 3, 4, 5, 7, 9 e 12, que incorporam noções muito especializadas, a condução de um delineamento pode ser considerada. Um procedimento de oito estágios formalmente detalha as etapas que tem que ser tomadas para a execução de um delineamento de experimentos, a saber:

1. Proposição do problema
2. Formulação de hipóteses
3. Planejamento do delineamento:
 - a. Escolha de técnica experimental apropriada
 - b. Exame dos possíveis efeitos para ter certeza que o delineamento prove a informação requerida
 - c. Consideração dos possíveis resultados do ponto de vista da análise estatística
4. Coleta de dados (executar o delineamento conforme o plano)
5. Análise estatística dos dados
6. Tirar conclusões com níveis apropriados de significância
7. Verificação ou avaliação dos resultados (conclusões)
8. Tirar conclusões finais e fazer recomendações

Estes oito passos estão presentes em um delineamento estando ou não efetivamente projetados. Eles indicam somente uma estrutura lógica para qualquer processo experimental. Para ir um passo adiante, um bom delineamento tem vários pré-requisitos. Precisa levar também em consideração:

1. Não possuir erros sistemáticos
2. Ter um erro padrão pequeno (Devido a aleatoriedade inerente)
3. Ter um erro experimental pequeno (Devido a acuidade/acuracidade)
4. Ter uma larga faixa de validade
5. Permitir aplicação de análise estatística adequada

O erro padrão e os erros sistemáticos que nós desejamos minimizar podem ser causados por:

1. Tolerâncias no ato da experimentação
2. Observação das respostas
3. Medições
4. Variações nos materiais experimentais
5. Variações motivadas por fatores estranhos ao delineamento

Um bom delineamento minimiza tudo isto através de:

1. Uso de materiais mais homogêneos
2. Uso de informações providas por variáveis relacionadas
3. Experimentação cuidadosa
4. Uso de projeto mais eficiente

Nossa matriz de delineamento, uma vez que tendem a ser grandes empreendimentos, demanda aderência à estas normas gerais de práticas experimentais.

PRINCÍPIOS DE UM DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS

Uma lista de pré-requisitos para um bom delineamento portanto inclui medições cuja acuidade e precisão são maximizadas pela aplicação de normas corretas de metrologia, engenharia adequada e habilidade em projetar nossa investigação eficientemente. No desenho estatístico da matriz do delineamento, os seguintes princípios gerais também são essenciais:

1. Randomização

Se rodadas separadas são feitas em sequência randômica, sem nenhum padrão quanto a organização dos fatores, a análise estatística das respostas pode ser conduzida sem perigo de qualquer polarização em relação à unidade experimental.

O perigo se isto não for feito poderia ser exemplificado considerando-se uma corrida experimental em uma fundição. Suponha-se que o experimentador não considerou a temperatura como um fator, embora na realidade ela faça parte. Se um nível de material fosse corrido totalmente em primeiro lugar e outro totalmente depois, (ao invés de executar dois níveis randomicamente), quaisquer efeitos dos materiais poderia ser polarizado pelo lento aquecimento do forno.

2. Repetição

Repetição é uma repetição do delineamento total a fim de se estimar o erro experimental, aumentar a precisão (detetar mudanças pequenas), e aumentar a sensibilidade.

A repetição provê um meio de estimar o erro experimental, que por sua vez, provê um meio de testar interações. Fatores significativos no processo produzirão grandes mudanças comparados com as diferenças entre replicações.

Erro experimental

Erro experimental - é o fato de duas unidades experimentais tratadas identicamente falharem em dar o mesmo valor. Erro experimental também é definido como a variação nas respostas causadas por variáveis outras que não os fatores ou os blocos, e que confere um certo grau de incerteza à variável reposta.

3. Controles Locais

Controles locais significam planejamento experimental, quanto à quantidade de blocos ou o equilíbrio de rodadas experimentais agrupadas dentre várias conjugações de variáveis sendo estudadas. A finalidade dos controles locais é fazer o projeto experimental mais eficiente, e proteger contra surpresas imprevistas que anulam ajustes experimentais.

Resumo:

Em suma, podemos afirmar que:

1. A randomização torna os testes estatísticos válidos
2. A repetição faz os testes estatísticos possíveis
3. Os controles locais fazem o delineamento mais eficiente

Juntos estes princípios podem ser aplicados para produzirem bons delineamento que podem ser analisados usando métodos de análise estatística de variância. Nós vamos completar nossos conceitos fundamentais com uma breve introdução a estes métodos, e então estudar os processos de projeto experimental matricial em várias formas através de exemplos.

METODOLOGIA DE ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA)

As quatro proposições básicas da Análise de Variância (ANOVA) de dados de delineamento estatisticamente projetados são as seguintes:

1. Normalidade da variável de resposta
2. Aditividade dos efeitos
3. Homogeneidade das variâncias
4. Independência estatística de cada valor de resposta

A proposição de normalidade requer que a distribuição que constitui os efeitos de variação como resposta tenham uma distribuição em curva normalizada. Contudo, a análise de variância é um teste "robusto". Isto significa que falsas conclusões experimentais não são geradas a partir de desvio da normalidade. Desta maneira a normalidade da variável de resposta não é um pré-requisito estritamente necessário. A proposição da aditividade dos efeitos significa que cada valor de resposta é compreendido pela soma de uma média geral mais a soma de todos os efeitos devidos a cada fator e os efeitos devidos ao erro experimental.:

A homogeneidade das proposições de variância requer que as distribuições que constituem as leituras repetidas tenham cada uma a mesma variância. Isto é um pré-requisito muito restrito. A análise do teste de variância não se aplica caso esta proposição não se efetive. Finalmente, a independência estatística das proposições resultantes da variável de resposta afirma que cada valor de resposta é independente de todos os valores anteriores. Isto é garantido pela randomização da combinação dos tratamentos dos espécimens de teste.

Quando estas proposições são seguidas, os resultados de uma matriz de rodadas experimentais podem ser economicamente analisados conjuntamente usando um teste estatístico conhecido como F-Ratio (Relação F). Este teste compara a variação (no resultado final) causado pela variável matriz em relação ao "ruído" normal.

A quantidade de variação (em resposta experimental) contida numa matriz experimental completa é antes calculada pela soma dos quadrados de cada observação e depois subtraindo-se o fator de correção para o nível de resposta médio total. Isto não é diferente do cálculo executado para achar desvio padrão. Assim teremos:

$$S^2 = \sum \frac{(x - \bar{x})^2}{n - 1} = \frac{1}{n - 1} \left(\sum x^2 - n \bar{x}^2 \right) = \frac{1}{n - 1} \left(\sum x^2 - \text{fator de correcao} \right)$$

A quantidade de variação para cada variável no delineamento pode ser similarmente dimensionada pela elevação ao quadrado dos totais de cada nível desta variável, e subtraindo-se o mesmo fator de correção para a média total. Esta variação é distribuída proporcionalmente por tamanho de amostra dividindo-se o nosso dimensionamento por n-1 no caso da variância da amostra.)

O número de medições em qualquer dimensionamento é mantido pelo divisor chamado "graus de liberdade". Para nossas finalidades isto pode ser considerado o número de medições (no grupo total) que se pode tomar diferentemente enquanto que se mantenha o mesmo nível médio de resposta.

Consoantemente, graus de liberdade podem ser calculados como um a menos que o número de leituras elevadas ao quadrado na obtenção da variação total. Isto é necessário uma vez que a variação dos dimensionamentos baseados em poucos dados são menos seguras do que estas baseadas em estudos extensos e isto precisa ser levado em conta na nossa avaliação estatística.

Uma vez que todas as variações de dimensionamentos deste tipo precisam ser matematicamente somadas ao total da variação experimental, a variação devido a erro experimental pode ser encontrada pela subtração das variações dos dimensionamentos para variáveis individuais da variação total do delineamento.

A Análise de Variância, ou teste de relação F (F-ratio), consiste na comparação da variação causada por qualquer variável específica em relação à variação devida ao erro experimental. Se uma variável particular causa uma grande variação no resultado final (comparada com a flutuação normal vista no erro experimental), ela se determina como um impedimento expressivo do processo. Estes impedimentos expressivos podem ser cuidadosamente especificados através de uma preparação do processo otimizada.

Teste quantificado para significância é conduzido pelo cálculo de uma amostra de F ratio que é a comparação entre os componentes de variância da variável e o erro experimental (como veremos em exemplos). Este valor é comparado com valores críticos de F tendo as mesmas conjunções de graus de liberdade que os da amostra de F ratio, e uma chance de exposição à erro (α) apropriada ao texto, que é denominado nível de significância.

Amostras de valores de F que excederem este valor crítico no apêndice A anexo, indicam que uma variação no resultado final é significativamente grande para a variável estudada quando comparada com a variação randômica devido à erro visto no delineamento. Portanto, esta variação no resultado final não poder ser explicada apenas pela aleatoriedade inerente ao processo, o que caracteriza que a variável estudada apresenta influência na resposta do delineamento.

Como mencionamos anteriormente, a técnica de análise de variância é razoavelmente confiável mesmo quando as proposições não são 100% válidas. Uma vez que o método de análise nos permite re-utilizar as mesmas variações experimentais e uma vez que as mesmas rodadas experimentais podem ser re-utilizadas no cálculo das variâncias para diversas variáveis, estes delineamentos matriciais são extremamente econômicos e uma maneira eficiente de estudar diversas variáveis ao mesmo tempo.

ANOVA (ANALYSIS OF VARIATION) DE UM E DE DOIS FATORES

ANOVA de um fator

Vamos considerar um exemplo do caso mais simples de um delineamento de um só fator:

$$SST = SSA + SSE$$

Onde:

$$SST = \text{Soma total dos quadrados da matriz experimental inteira ou}$$

$$= \text{Soma total dos quadrados de todos itens menos o fator de correção}$$

$$SSA \text{ (ou } SSB) = \text{Tratamento da soma dos quadrados ou } F$$

$$= \text{Soma dos quadrados para o fator A (ou B) } F$$

$$SSE = \text{Soma do erro dos quadrados ("ruído") ou } F$$

$$= \text{Soma total dos quadrados menos o tratamento da soma dos quadrados}$$

No caso mais complicado de um delineamento com dois fatores e repetição, nos teremos:

$$SST = SSA + SSB + SSAB + SSE$$

Onde: (além dos já vistos)

$$SSAB = \text{Soma dos quadrados para interação entre A e B ou } F$$

$$= \text{Total das células elevadas ao quadrado menos } SSA \text{ e } SSB$$

Também usaremos posteriormente:

$$CF = \text{Fator de Correção (para a média) ou}$$

$$= \text{Total final elevado ao quadrado - número de itens final somado}$$

Observe que nós quebramos a variação total (nos nossos resultados experimentais) em pedaços atribuíveis para cada variável experimental, mais "ruído" (que é constituído de variações de erro experimental normal).

EXEMPLO DE DELINEAMENTO DE DELINEAMENTO DE UM FATOR

O exemplo que se segue contém dados de uma matriz experimental real que estuda diversos processos de aplicação de pinturas com tinta condutiva. O número de resposta é a condutividade da pintura medida em mho's (mho é ohm soletado ao contrário), unidade prática de condutancia igual ao inverso do ohm.

O fator simples é o processo de pintura.

Os cinco níveis são os cinco diferentes processos de pintura.
Existem cinco replicações por cada nível.
O cálculo é convenientemente arranjado numa tabela de ANOVA.

Delineamento de Pintura Condutiva

Condutividade da Pintura					
	I	II	III	IV	V
	58	60	49	59	52
	55	58	42	64	49
	63	60	48	64	58
	60	55	46	63	50
	59	56	46	69	52
TOTAL	295	289	231	319	261
GRAND TOTAL =	295 + 289 + 231 + 319 + 261 = 1395				
X'	59.0	57.8	46.2	63.8	52.2

$$X'' = (59.0 + 57.8 + 46.2 + 63.8 + 52.2) / 5 = 279 / 5 = 55.8$$

Análise de Variância

a. Somatória Total dos Quadrados (SST ou SS total)

$$\begin{aligned} \text{SS total} &= \sum (\text{cada medida})^2 / 1 - (\sum \text{todas as medidas})^2 / \text{número total de medidas} = \\ &= \text{somatória das leituras quadráticas} - \text{fator de correção} = \\ &= 58^2 + 55^2 + 63^2 + \dots + 52^2 - ((1395)^2 / 25) = 78.941 - 77.841 = 1100.00 \end{aligned}$$

b. Somatória dos Quadrados para o Tipo Total de Capa (SSA ou SS type)

$$\begin{aligned} \text{SS type} &= \sum (\text{total de tipos})^2 / \text{tamanho do tipo de amostra} - (\sum \text{todas as medidas})^2 / n^{\circ} \\ &\quad \text{total de medidas} \\ &= ((295^2 + 289^2 + \dots + 261^2) / 5) - ((1395)^2 / 25) = 78757.8 - 77841 = 916.8 \end{aligned}$$

Tabela da Análise de Variância (ANOVA)

Tipo de Variação	Som. dos Quadrados (SS)	Graus de Liberdade	Variância	Taxa F
Entre 5 tipos (tratamento)	916.8	5 - 1 = 4	916.8 / 4 = 229.2	$F_{\text{calc}} = 229.2 / 9.16$ $F_{\text{calc}} = 25.02$
Dentro do tipo (erro)	183.2	25 - 5 = 20	9.16	$F_{05} = 2.87$
Total	1100	25 - 1 = 24		

Como F calculado é maior que $F_{.05} \left(\begin{smallmatrix} 20 \\ 4 \end{smallmatrix} \right)$, nós rejeitamos a hipótese que os tipos de capa são iguais.

I.D.	Average	1 .	2 .	3 .	4 .	5 .
IV	63,8	0,0	4,8	6,0	11,6	17,6
I	59,0		0,0	1,2	6,8	12,8
II	57,8			0,0	5,6	11,6
V	52,2				0,0	6,0
III	46,2					0,0

GENERALIZAÇÃO DA TABELA DE ANOVA

Tabela ANOVA						
Fonte	DF	SS	MS	F _{calc}	F _{tab}	
Total	N-1	SST				
Tratamentos	K-1	SSA	<u>SSA</u>	<u>MSA</u>	F _α (K-1, N-K)	
			K-1	MSE		
Erro	N-K	SSE	<u>SSE</u>			
			N-K			

Onde:

N = Número total de medições MSA = Medida da variação dentre as K médias das amostras das diferentes variáveis (no exemplo, o K = Número de níveis de um fator número de pinturas)

MSE = é a medida da variação que é

SS = Soma dos quadrados apropriados devida à chance (sorte).

A fonte, uma estimativa de variância - Significa em Inglês: Mean Square Error

F = é a relação (razão) entre a média da amostra e as variações

DF = Graus de liberdade, uma conta índice determinada pelo número de leituras usadas na estimativa da variância devido à chance. Se F é grande, então a média das amostras varia bastante e desta maneira carrega a significancia do resultado. Dito de outra maneira, processos diferem significativamente. Se F é pequena, então as diferenças entre as médias das amostras podem ser atribuídas à chance.

$$S = \text{Média dos quadrados} = SS/DF$$

Devemos observar que os graus de liberdade e a soma total dos quadrados são divididos em pedaços apropriados para tratamentos para nossos tratamentos e erro. Compare isto com o exemplo das tintas condutivas anterior e se não ficar claro, releia os conceitos introdutórios do capítulo 5.

GENERALIZAÇÃO DO CÁLCULO DE F RATIO (RAZÃO F)

Uma vez que a razão F (F ratio) é significativa, nós gostaríamos de ir um pouco adiante e determinar onde as distribuições separadas estão localizadas. Isto pode ser conseguido pelo uso do método LSD (Least Significant Difference - Diferença de Menor Significância), para separar as distribuições do processo. Primeiramente devemos calcular as diferenças críticas:

$$LSD := t_{\frac{\alpha}{2}, DF = N - K} \cdot \sqrt{2} \cdot SEM$$

Para esta fórmula onde: t = valor que vai assegurar as á-areas desejadas na tabela de distribuição t (ver anexo A)

$$SEM = \sqrt{\frac{MSE}{n}}$$

Em seguida, calcule a média do tratamento em ordem crescente e compute as diferenças positivas (par a par), e então arrange-as numa tabela como se segue, onde:

MSE = Mean Square due to Error ("noise"- "ruído")

n = número de replicações

k = número de populações sendo comparadas

	1	2	3	4	5
X1	0	X1-X2	X1-X3	X1-X4	X1-X5
X2		0	X2-X3	X2-X4	X2-X5
X3			0	X3-X4	X3-X5
X4				0	X4-X5
X5					0

Conforme indicado anteriormente, a análise do nosso exemplo mostra que o processo IV produz uma condutividade maior do que os processos I e II, que em seu turno foram maiores do que V seguido do III.

ANOVA de dois fatores

Quando dois fatores são envolvidos nós estamos preocupados com os principais efeitos de cada um dos dois fatores e o efeito das suas interações. Se o delineamento foi repetido, então nós temos uma estimativa independente de erro experimental e podemos desta formatestar o efeito de interação. O exemplo que se segue ilustra estas idéias. Observe que esta interação poderia ser estudada se nos executássemos delineamento simples em cada variável individualmente.

Neste delineamento, quatro diferentes fornecedores potenciais de plásticos apresentaram cada um amostras de três diferentes polímeros para avaliação. A resistência ao rasgamento de duas amostras de cada material de cada fornecedor foram randomicamente testadas com os resultados que são mostrados. O delineamento nos permitirá descobrir se materiais diferentes ou fornecedores diferentes produzem materiais mais fortes. Além disto, nós poderemos perceber as interações existentes entre os fornecedores e os materiais, se elas forem significativas, isto é, se certos fornecedores são melhores com certos materiais.

Como vai ser mostrado no exemplo, a variação total na matriz experimental foi encontrada da mesma forma que anteriormente já mostramos. A porção desta variação devido a erro pode ser encontrada pela subtração da estimativa de variação de todas as células no delineamento (que inclui ambas variáveis e suas interações) da variação total. Variação devida a cada variável pode ser encontrada usando-se os níveis totais desta variável como anteriormente. Uma vez que a variação da célula foi devida à variação causada pela variável mais a interação, nós podemos encontrá-la por subtração.

Graus de liberdade (usados para escolher limites de significancia para testes de razão (F ratio)) podem ser calculados usando-se a definição básica dada anteriormente mais os métodos de subtração similares aos que acabamos de usar em estimativas de variância.

Uma vez que 24 quadrados foram usados para obter a variação total, deve existir um total de:

$$24 - 1 = 23 \text{ graus de liberdade.}$$

Três diferentes níveis de materiais e um total de quatro fornecedores (usados nestas estimativas de variância), dão 2 e 3 graus de liberdade para estas variáveis. Uma vez que existem 12 totais de células e desta forma $12 - 1 = 11$ graus de liberdade para variáveis mais interação, tem que existir $11 - 2 - 3 = 6$ graus de liberdade para erro. Tudo isto posto em tabela vai produzir a análise que se seguira.

DELINEAMENTO DE RESISTÊNCIA AO RASGAMENTO DE UM POLÍMERO

material	Forneced- dor				Totals
	A	B	C	D	
I	96	28	106	88	
	78	36	88	104	
	174	64	194	192	624
II	57	62	71	78	
	69	50	89	68	
	126	112	160	146	544
III	82	38	88	102	
	98	32	110	82	
	180	70	198	184	632
Totals	480	246	552	522	1800

1-Soma total dos quadrados

$$SS_{total} = \sum_{(cada\ medida)}^2 - \frac{(\sum_{todas\ as\ medidas})^2}{no.\ total\ de\ medidas} =$$
$$96^2 + 78^2 + 57^2 + \dots + 82^2 - \frac{(1800)^2}{24} = 148.712 - 135000 = 13.712$$

2-Soma dos quadrados de 12 células

$$SS_{12\ células} = \frac{\sum(\text{total de células})^2}{\text{total da amostra da célula}} - \frac{(\sum \text{todas as medidas})^2}{\text{numero total de medidas}}$$
$$= \frac{174^2}{2} + \frac{126^2}{2} + \dots + \frac{184^2}{2} - \frac{(1800)^2}{24} = 147284 - 135000 = 12284$$

3-Soma dos quadrados dentro das células (erro)

$$SS_{dentro} = SS_{total} - SS_{célula} = 13712 - 12284 = 1428$$

4-Soma dos quadrados para materiais

$$SS_m = \frac{\sum(\text{total do material})^2}{\text{tamanho da amostra do material}} - \frac{(\sum \text{todas as medidas})^2}{\text{numero total de medidas}}$$
$$= \frac{624^2}{8} + \frac{544^2}{8} + \frac{632^2}{8} - \frac{(1800)^2}{24} = 135592 - 135000 = 592$$

5-Soma dos quadrados para fornecedores

$$SS_v = \frac{\sum(\text{total dos fornecedores})^2}{\text{tamanho da amostra do fornecedor}} - \frac{(\sum \text{todas as medidas})^2}{\text{no. total de medidas}}$$
$$= \frac{480^2}{6} + \frac{246^2}{6} + \frac{552^2}{6} - \frac{(1800)^2}{24} = 144684 - 135000 = 9684$$

6-Soma dos quadrados para interação

$$SS_1 = SS_{12\ células} - [SS_m + SS_v] = 12284 - [592 + 9684] = 2008$$

TABELA DE ANOVA DA RESISTÊNCIA AO RASGAMENTO DE UM POLÍMERO

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Media dos Quadrados	Razão F Calculada	Nível de Significância do teste / Graus de liberdade
			296	2	
Materiais	592	2	296	--- = 2,49	F.05() = 3.89
			119	12	
Fornecedores	9.684	3	3.228	---- = 27,1	F.05() = 3.49
			119	12	
Interação	2.008	6	334,67	----- = 2,81	F.05() = 3.00
			119	12	
Erro	1.428	12	119		
Total	13.712	23			

Existe uma diferença significativa entre os fornecedores a nível de confiança de 95%. Para Alfa = .05, não existe evidência de diferença significativa entre materiais ou de significância da relação de interação entre material e fornecedor. Da mesma forma, a escolha do fornecedor é uma consideração importante na resistência ao rasgamento do material a ser recebido. O tipo do material não deverá ser impacto, nem a habilidade de qualquer fornecedor em particular com relação a um material em especial.

A técnica de LSD (Least Significant Difference - Menor Diferença Significativa) poderia ser aplicada em seguida ao valor das médias do fornecedor para separar as contribuições significativas em categorias significativamente diferentes ou mais ou menos iguais. Você pode ter observado que nossa estimativa de variação de erro teve um triplo papel como padrão de comparação para materiais e fornecedores, individualmente, bem como suas interações. Indo nas células, o total da célula para o material I e para o fornecedor A, por exemplo, ajudou a estimar a variação para materiais, foi novamente usada para estimar a variação do fornecedor e ajudou a avaliação da interação. Estas economias possibilitaram ambas variáveis e suas combinações serem examinadas de perto com somente 24 rodadas bem escolhidas.

PROJETO FATORIAL

De maneira geral, se dois ou mais fatores tem que ser mudados em um delineamento, um projeto fatorial é o método mais eficiente para análise. Isto vai ocasionar a criação de uma matriz multidimensional.

A eficiência deste método é baseada na obtenção de informação que se precisa com a precisão requerida e um gasto minimizado de esforços.

Um número grande de fatores pode ser estudado imediatamente, com os mais importantes sendo rapidamente e de forma acurada selecionados. Por esta razão, os projetos fatoriais são frequentemente usados como um método de proposta prévia e para filtragem de proposta de delineamento, sendo seguida por um experimentação mais profunda posterior nas variáveis importantes para a otimização do processo. O exemplo que se segue contém um exemplo de uma experimentação fatorial de 2 elevado a quarta demonstrando a informação que pode ser obtida com tal análise. Uma vez que este exemplo contém uma leitura por combinação de

tratamento, nós precisamos agrupar interações de 3 e 4 fatores e graus de liberdade para formar uma estimativa do erro experimental. Isto significa que nós vamos combinar suas estimativas de variação como parte da variação do erro (uma vez que tantas variáveis estão envolvidas). Uma notação especial é usada para distinguir cada célula na distribuição experimental. Os fatores são rodados cada um a dois níveis, um "baixo" ou "1" e outro "alto", associado com uma letra, de a até d. Para obter a notação de uma célula em particular, todas as notações do nível do fator para esta célula são multiplicados juntos. Assim que as células sejam identificadas desta maneira, (Chamada notação Yates), uma técnica especial, chamada método de Yates é usado para computar a tabela de ANOVA.

Delineamento para determinar o nível de impureza em liga metálica

Na investigação de um nível de impureza num produto, quatro fatores foram escolhidos, cada um para ser testado em dois níveis. Os quatro fatores foram o seguinte:

1. Variação do Fluxo (a)
2. Pressão (b)
3. Excesso de ar (c)
4. Agitação (d)

Da tabela de dados resultantes seguintes para a repetição do delineamento, obtenha a análise da tabela de variância e encontre aqueles efeitos principais e as interações de dois fatores que são estatisticamente significativas no nível de 5%.

Tabela de Dados				
Taxa de Fluxo (ft 3/min)	Pressão (lbs/in ²)	Excesso de Ar	Agitação	
			Baixa	Alta
1000	60	10 %	10.8 (1)	6.3 d
		20 %	9.7 c	2.8 cd
	80	10 %	8.4 b	4.0 dd
		20 %	10.5 bc	3.0 bcd
1200	60	10 %	6.2 a	4.0 ad
		20 %	5.4 ac	1.5 acd
	80	10 %	1.2 ab	3.2 abd
		20 %	5.0 abc	3.9 abcd

TABELA DE ANOTAÇÕES PELO MÉTODO YATES

Trata- mento	Resposta	1	2	3	4	Efeito	Soma dos Quadrados
(1)	> 10.8	17.0	26.6	57.2	85.9	5.37	461.18
a	6.2	9.6	30.6	28.7	-25.1	-3.14	39.38
b	> 8.4	15.1	17.5	-21.6	-7.5	-0.94	3.52
ab	1.2	15.5	11.2	-3.5	-0.1	-0.01	0.00
c	> 9.7	10.3	-11.8	-7.0	-2.3	-0.29	0.33
ac	5.4	7.2	-9.8	-0.5	4.7	0.59	1.38
bc	> 10.5	4.3	-3.1	3.8	13.5	1.69	11.39
abc	5.0	6.9	-0.4	3.7	2.1	0.26	0.28
d	6.3	-4.6	-7.4	4.0	-28.5	-3.56	50.77
ad	4.0	-7.2	0.4	-6.3	18.1	2.26	20.48
bd	4.0	-4.3	-3.1	2.0	6.5	0.81	2.64
abd	3.2	-5.5	2.6	2.7	7.5	0.94	3.52
cd	2.8	-2.3	-2.6	7.8	-10.3	-1.29	6.63
acd	1.5	-0.8	-1.2	5.7	0.7	0.09	0.03
bcd	3.0	-1.3	1.5	1.4	-2.1	-0.26	0.28
abcd	3.9	0.9	2.2	0.7	-0.7	-0.09	0.03
Total					2.43	601.84	

TABELA DE ANOVA

Agora podemos construir a tabela de ANOVA. Uma vez que todas as fontes de variação tem um único grau de liberdade exceto quanto a soma total dos quadrados (que tem 15 graus de liberdade), nós podemos simplesmente eliminar a coluna da soma dos quadrados na análise da tabela de variância, porque as médias dos quadrados e a soma dos quadrados são iguais. Uma vez que o delineamento de exemplo não foi replicado, nos não temos uma estimativa independente interna do erro da média dos quadrados. Nós precisamos agrupar as interações de 3 e 4 fatores para formar a estimativa do erro da média dos quadrados. O valor simples com asterístico representa este erro. Uma vez que a interação AB não existiu, isto também foi agrupado para adicionar mais um grau de liberdade para a estimativa da média dos quadrados. O valor de dois asterísticos 0.69 é a estimativa de erro da média dos quadrados com seis graus de liberdade. Os valores com asterístico na coluna F da Tabela abaixo são aqueles que são significativamente diferentes de zero a um nível de 5%.

Avançando um pouco mais, nós podemos graficamente determinar fatos significativos para exame detalhado. A resposta média de todas as células rodadas na regulagem de fluxo baixa foi 6.94. A média de todas as células na regulagem alta (1200) foi 3.80. Elevando-se o fluxo

produz-se um efeito de $3.80 - 6.94 = - 3.14$ na resposta. Observe que este é o valor entrado na tabela de anotações pelo método Yates, na coluna "a"/Efeito.

O efeito das interações, como os significativos do nosso problema exemplo, podem ser encontrados das tabelas numéricas tais como as mostradas no exemplo.

Médias apropriadas podem ser encontradas referenciando-se a tabela original dos dados nas células apropriadas.

No nosso exemplo, níveis baixos de agitação e fluxos se aplicam às células (1), c, e e bc, assinaladas com >. Tirando-se a média das respostas nestas células, teremos:

$$\frac{10.8 + 9.7 + 8.4 + 10.5}{4} = 9.85$$

Uma vez que estas médias foram computadas para todas as quatro possíveis combinações a dois fatores de alta/baixa, elas podem ser tabuladas como é mostrado no exemplo. Nós podemos observar, por exemplo, que $9.85 + 3.15 = 13.0$, enquanto que combinando as outras duas células opostas na nossa tabulação irá dar $4.45 + 4.02 = 8.47$. Esta diferença, $13.0 - 8.47 = 4.53$, é o resultado do efeito de interação da aplicação de ambos altos níveis, que se eleva a $4.53/2 = 2.26$ por célula. Isto esta na folha Yates na coluna "ad"/Efeito.

Tabela de ANOVA para Delineamento de experimentos Fatorial

TABELA ANOVA				
FONTE	DF	MS	F	F0.05(1.6)
Total	15	140,66		
A	1	39,38	57,07	5,99
B	1	3,51	5,09	
**AB	1	0	-----	
C	1	0,33	0,48	
AC	1	1,37	1,99	
BC	1	11,39	16.51*	
*ABC	1	0,27	-----	
D	1	50,77	73.58*	
AD	1	20,47	29.67*	
BD	1	2,64	3,38	
*ABD	1	3,52	-----	
CD	1	6,63	9.61*	
*ACD	1	0,03	-----	
*BCD	1	0,28	-----	
*ABCD	1	0,03	-----	
*Erro	5(4.13)0.8 3			
**Erro	6(4.13)0.6 9			

Tabelas de interações significativas

		A		Efeito
		(Significante)		
D	1000	1200		
Baixo	9,85	4,45		.+2.26
Alto	4,02	3,15		
B				
C	60	80		
10%	6,82	4,2		.+1.69
20%	4,85	5,6		
C				
D	10%	20%		
Baixo	6,65	7,65		--1.29
Alto	4,38	2,8		

Efeitos Principais			
		Média	Efeito
A	1000	6,94	
	1200	3,80	---3.14
B	60	5,84	
	80	4,90	---0.94
C	10%	5,51	
	20%	5,22	---0.29
D	Baixo	7,15	
	Alto	3,59	---3.56

DESCRIÇÕES GRÁFICAS

Além de serem descritas numericamente em tabelas (tais como as que nós acabamos de ver), as interações podem ser descritas graficamente pela construção de um gráfico com as médias tabuladas. Estes gráficos são mostrados logo em seguida para três interações significativas no nosso exemplo. Isto é muito útil para finalidade de fazermos apresentações.

GRÁFICO DA INTERAÇÃO AD

Nível médio de impureza no produto

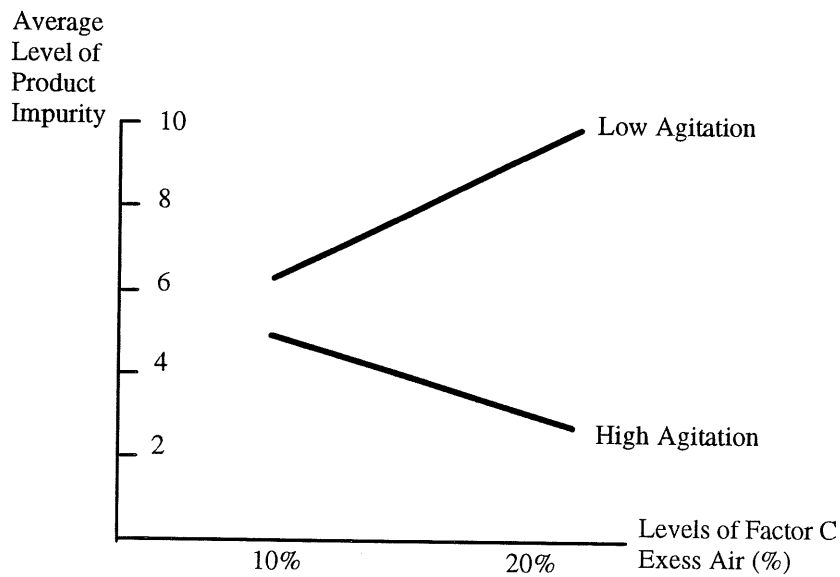


GRÁFICO DA INTERAÇÃO AU

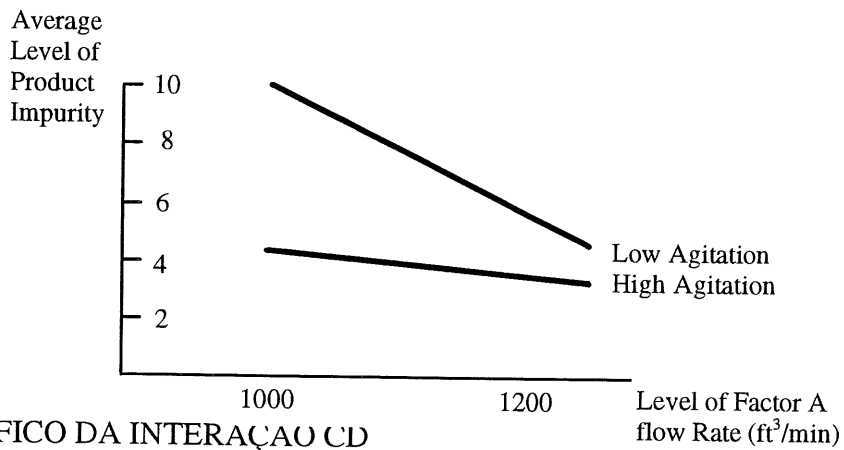
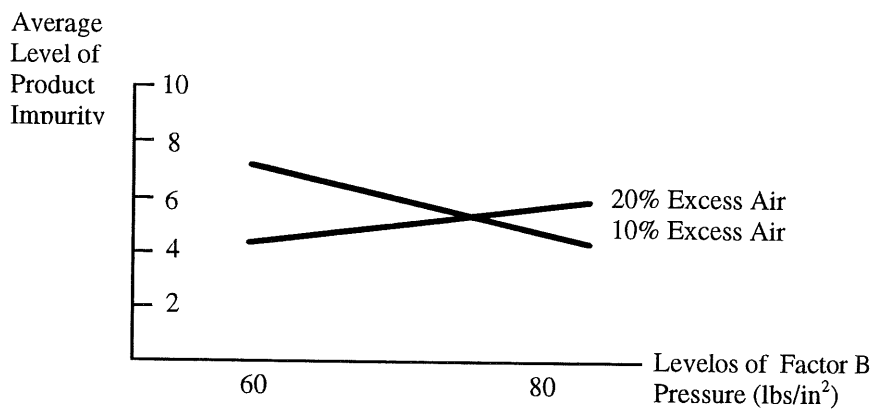


GRÁFICO DA INTERAÇÃO CD



Conclusões com relação ao delineamento problema

Finalmente as conclusões obtidas da análise dos principais efeitos significativos e as interações podem ser formulados. Afim de minimizar o nível médio de impurezas, nós devemos regular o forno para:

1. Fluxo: 1200 pés cub./min.
2. Pressão: 80 lbs / pol. quadr.
3. Excesso de ar: 10%
4. Agitação: Alta

Quatro variáveis e suas interações com seus pares equivalentes foram examinadas (para acuidade na regulagem de montagem) com somente 16 observações. Além disto, podemos dizer que todas estas variáveis foram razoavelmente bem estudadas uma vez que nossas 16 leituras se aplicam para cada variável. Com efeito negativo, nos temos que admitir a análise e a condução na vida real do delineamento, especialmente se nos lembrarmos que o princípio de randomização em células ativas, é desafiante.

Conclusões com relação à Técnica Fatorial

Revendo-se toda a disposição experimental de um projeto de delineamento fatorial com sua análise, teremos várias vantagens e desvantagens significativas.

VANTAGENS DE FATORIAIS

1. Maior eficiência.
2. A informação é obtida sobre várias interações.;

Quando a interação existe, um delineamento fatorial é necessário para evitar conclusões erradas.

3. Estimativa do fator a vários níveis.

O efeito de um fator é estimado a vários níveis dos outros fatores. Desta maneira os resultados experimentais são aplicáveis sobre uma gama de condições mais ampla.

4. Uma vez identificados os fatores relevantes, o delineamento pode ser repetido com outros níveis dos mesmos.

DESVANTAGENS DE FATORIAIS

1. Complexidade

A montagem experimental e a análise estatística dos resultados são mais complexas

2. Homogeneidade

Com um grande número de combinações de tratamentos a seleção de material experimental homogêneo se torna mais difícil.

3. Desperdício

Certeza quanto as combinações do tratamento podem não ser de muito interesse. Conseqüentemente, o material de experimentação pode ser desperdiçado.

FATORIAIS FRACIONÁRIAS E OUTROS TÓPICOS AVANÇADOS

A eficiência em ganhos de experimentações fatoriais pode ser ampliada ainda mais, usando-se Fatoriais Fracionárias. Algumas vezes isto é necessário, uma vez que a dificuldade com delineamento fatoriais é que o número de combinações de tratamento aumenta rapidamente com o número de fatores e níveis. Desta forma, mesmo uma rodada simples de uma matriz experimental completa pode ser muito grande para os blocos disponíveis e desta forma o projeto completamente randomizado que é relativamente menos sensível teria que ser usado. Uma limitação posterior poderia ser somente insuficiência de tempo ou material para um número limitado de células. Como o número de possíveis variáveis de processo significativas aumenta, podemos nos encontrar diante de alguns ou todos estes problemas.

Usando métodos de análises ainda mais complexos, é possível haver confusão ou combinação de alguns dos efeitos de significância prática relativamente menor com os blocos.

A distribuição do lay out do delineamento fatorial fracionado, juntamente com as complicações da análise, é para estatísticos muito experientes e fora do âmbito deste manual. Confinaremos nossa discussão a um sumário das economias potenciais envolvidas e uma ilustração de um tratamento fatorial fracionado do nosso exemplo desenvolvido anteriormente. Usando-se a experiência que desenvolvemos, os serviços de um profissional estatístico experiente podem ser eficientemente empregados nos nossos processos, quando necessário.

Considerações gerais

De uma maneira geral, um delineamento fatorial de 2^n elevado a n que é uma repetição de:

$$\frac{1}{2^p}$$

tem um número total de observações igual a :

$$2^{n-p} \text{ e } 2^{n-p-1}$$

observações em alto ou baixo nível de qualquer efeito. Temos então:

$$\text{Algum Efeito} = \frac{1}{2^{n-p-1}} \left\{ \left[\sum \text{ de } 2^{n-p-1} \text{ observações de alto nível} \right] - \left[\sum \text{ de } 2^{n-p-1} \text{ observações de baixo nível} \right] \right\}$$

Existem 2^{n-p} observações no bloco principal, que é o bloco de células incluindo a célula (1) no sistema de notação Yates. Isto traduzido nas possibilidades últimas de economias como se segue (para um estudo de "n" variáveis), teremos o seguinte:

1. Se $n \leq 4$

é requerido uma experimentação fatorial completa para estimativa dos efeitos principais e da interação de dois fatores.

2. Se $n = 5, 6, 7$

Meia repetição será satisfatória para este requisito, desta maneira 50% de todas as células avaliarão as interações principais e as de dois fatores.

3. Se $n > 7$

Um quarto de repetição será suficiente para avaliar todos os efeitos primários e suas interações, desta maneira, 75% de economia será possível.

EXEMPLO FATORIAL REPETIDO FRACIONARIAMENTE

Como um exemplo de projeto de delineamento por fatorial repetido fracionariamente, nós podemos usar os dados do delineamento anterior. Suponhamos que nós quizessemos rodar uma meia repetição do delineamento fatorial de 2^4 . Nós escolheríamos primeiramente um dos dois blocos seguintes:

Bloco 1: ab, ac, ad, bc, bd, cd, abcd

Bloco 2: a, b, c, d, abc, abd, acd, bcd

Vamos assumir que o bloco 1 fosse escolhido e que os dados para estas células ficassem exatamente como antes. A tabela ANOVA que mostramos a seguir poderia ser calculada por um estatístico especializado. Uma vez que há $n = 4$ fatores aqui, este delineamento fatorial meio fracionado iria requerer um conhecimento separado da média dos quadrados devidos a erro experimental (do trabalho anterior com estes produtos). As conclusões seriam tiradas deste delineamento como está indicado. Observe que as respostas essencialmente equivalem àquelas dadas pelo delineamento completo, porém com a metade do custo em recursos e tempo.

TABELA DE ANOVA PARA FATORIAL REPETIDO FRACIONARIAMENTE

Fonte	DF	SS	MS	F	F
-------	----	----	----	---	---

0.05(1.6)

Total	7	85.69			
A	1	23.12	23.12	33.51	5.99
B	1	1.44	1.44	2.09	
C	1	0.84	0.84	1.22	
D	1	21.78	21.78	31.56*	
AB	1	3.38	3.38	4.90	
AC	1	3.92	3.92	5.69	
AD	1	31.21	31.21	45.23*	
* Erro	6	4.14	0.69		

O erro foi obtido de um delineamento anterior

Conclusões:

1. O efeito A é significativo
2. O efeito D é significativo
3. A interação AD é significativa

Sumário Final

Podemos afirmar, resumindo-se tudo que foi dito, que:

1. Projetos experimentais repetidos fracionariamente produzem benefícios de economia de custos enormes;
2. Eles dão uma grande quantidade de informação por uma pequena despesa em tempo e dinheiro.

Contudo, eles devem ser feitos com consultoria de profissionais estatísticos experientes.

Para finalizarmos, devemos mencionar que existem ainda outras duas maneiras interessantes para projeto experimental que são descritas na literatura que são:

1. Métodos de análise pela resposta por superfície
2. Projetos de delineamento EVOP

Estes tópicos, bem como tratamentos mais acadêmicos do assunto discutido neste manual, podem ser obtidos através da literatura referenciada na bibliografia. Os métodos de análise pela resposta de superfície são semelhantes a curvas de nível. obtenção.

EVOP significa "Evolutionary Operation" e é um método que envolve a introdução de pequenas e planejadas mudanças nas condições operacionais. Os resultados são analisados e quando a direção para melhoria foi estabelecida, novas condições de processo são adotadas. Uma vez que pequenas mudanças continuam a ser usadas na operação rotineira, melhorias posteriores podem ser detectadas.

Quando o influxo de melhorias cessa ou diminui, as pequenas mudanças podem ser aplicadas para uma seleção de diferentes variáveis para obter-se mais melhorias nos resultados.

BIBLIOGRAFIA

American National Standards Institute (ANSI) Z1.3-1958, revised 1975: Control Chart Method of Controlling Quality During Production.

American Society for Quality Control (ASQC) B3-1958, revised 1975: Control Chart Method of Controlling Quality During Production. Disponível da ASQC, 230 West Wells, Milwaukee WI 53203 por US\$7.75.

ANSI Reliability Division.: Guide for Quality Control and ControlQC 1971 chart methods of Analysing Data (ASQC Standards B1-1958, rev.1975/ANSI 80 Z1.1-1958 e Z1.2-1958, rev. 1975). Disponíveis no endereço acima por us \$7.00.

American Society for Testing and Materials (ASTM) Hill 71: Manual on Presentation of Data and Control Chart Analysis (STP-15D, 1976. Disponível da ASTM, 1916 Race Street, Philadelphia, PA, 19103 por us\$ 9.75.

Box, George E.P., William G.Hunter & Stuart J.Hunter.: Statistics for Experimenters, N.Y., John Wiley & Sons, Inc. 1978

Charbonneau, Harvey C. and Gordon L.Webster: Industrial Quality Control. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, Inc 1978

Davies, Owen L.: Design and Analysis of Industrial Experiments. London: Oliver and Boyd, 1954.

Deming, W.Edwards.: Quality, Productivity and Competitive Position. M.I.T. Center for Advanced Engineering Study, 1982

Diamond, William J.: Practical Experiment Designs for Engineers & Scientists. Belmont, CA: Lifetime Learning Publications, A div.of Wadsworth, Inc.

Duncan, Acheson J.: Quality Controls and Industrial Statistics. Homewood, Il: Richard D.Irwin Inc. Fourth Edition, 1974

Farago, Francis T Handbook of Dimensional Measurement. New York:Industrial Press, Inc. 1982

Grant, Eugene L., and Richard S. Leaveworth: Statistical Quality Control. New York: McGraw-Hill Book Co., Fifth Edition, 1980

Hahn, Gerald J., and Samuel S.Shapiro: Statistical Models in Engineering. New York: John Wiley & Sons,Inc 1968.

Harris, Forest K.:Electrical Measurements. New York: John Wiley & Sons,Inc 1962

Hicks, Charles R.: "Fundamentals of Analysis of Variance, Parts I,II and III" Industrial Quality Control, August, September and October, 1956

Ishikawa, Kaouru: Guide do Quality Control.Tokyo: Asian Productivity Organization, Revised Edition, 1976

Juran, J.M. and Frank M.Gryna, Jr.: Quality Planning and Analysis. New York: McGraw-Hill Book Co.1980

Juran, J.M., Frank M.Gryna, Jr. and R.S. Bingham, Jr.: Quality Control Handbook. New york: McGraw-Hill Book Co.3rd.ed.1979

MIL-C-45662A. Military Specification: California System Requirements.US Government Printing Office 1962

Montgomery, Douglas C.: Design & Analysis of Experiments: New York: John Wiley & Sons, Inc. 1976

Natrella, Mary G.: Experimental Statistics, NBS Handbook 91. US Government Printing Office, October 1966

Ott, Ellis R.: Process Quality Control. New York, McGraw-Hill Book Co., 1975

Plackett, R.L. and J.P. Burman.: "The Design of Multifactorial Experiments." Biometrika, 33, pp 305-32, 1946

Statistical Engineering Laboratory: "Fractional Factorial Experiment Designs for Factors at Two Levels" NBS Applied Mathematics Series 48, April 1957

Western Electric Co., Inc.: Statistical Quality Control Handbook, 1956. Available from: IDC Commercial Sales, Western Electric Co., P.O. Box 26205, Indianapolis, IN 46226

Referências

- [1] ACHESON J. DUNCAN, "Quality Control and Industrial Statistics" IRWIN, 1986.
- [2] GEORGE E.P. BOX, WILLIAM G. HUNTER, J. STUART HUNTER. "Statistics for Experimenters", WILEY, INTERSCIENCE, 1978.
- [3] DOUGLAS C. MONTGOMERY, "Statistical Quality Control", JOHN WILEY & SONS, 1985
- [4] DOUGLAS C. MONTGOMERY, "Design and Analysis of Experiments", JOHN WILEY & SONS, 1980.
- [5] VIRGIL L. ANDERSON AND ROBERT A. MCLEAN, "Design of Experiments", DEKKER, 1974.
- [6] WILLIAM W. HINES, DOUGLAS C. MONTGOMERY, "Probability and Statistics in Engineering and Management Science", JOHN WILEY & SONS, 1980.
- [7] J.J. JURAN, FRANK M. GRYNA, "Juran's Quality Control Handbook", MCGRAW HILL, 1988.
- [8] KAORU ISHIKAWA, "What Is Total Quality Control? The Japanese Way", PRENTICE HALL, 1985
- [9] CSS: STATISTICA, "STATSOFT", 1991.
- [10] R.E. CAMPOS, "Delineamento de Delineamento s Básico", tradução do capítulo 11 da publicação "Process Control, Capability and Improvement", THE QUALITY INSTITUTE, IBM, 1986
- [11] R.E. CAMPOS "Problema de otimização de produção", IMECC, 1991.

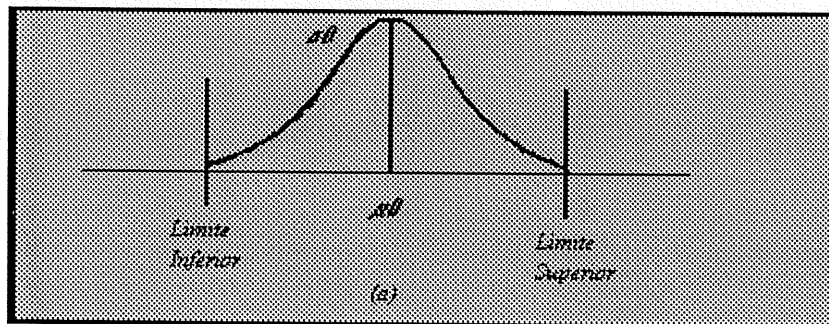
CAPÍTULO IV: GRÁFICOS DE CONTROLE PARA VARIÁVEIS

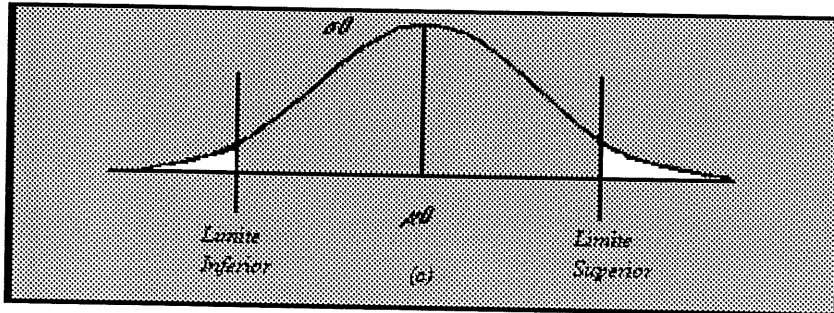
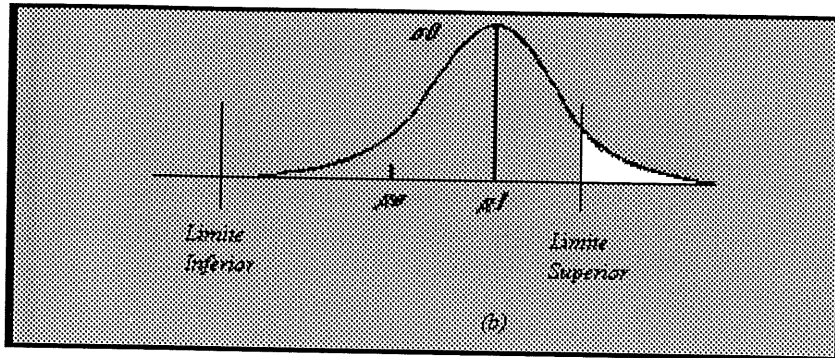
Introdução

Muitas das características de qualidade podem ser expressas em termos de medidas numéricas. Por exemplo, o diâmetro de uma esfera pode ser medido com um micrômetro e expresso em milímetros. Uma medida simples da característica de qualidade, tal como dimensão, peso, volume, é chamada de variável. Os gráficos de controle para variáveis são usados amplamente. Eles normalmente geram controle de procedimentos mais eficientes e provêm mais informação sobre o desempenho do processo do que gráficos de controle para atributos.

Quando estivermos lidando com uma característica de qualidade, que é uma variável, é uma prática padrão controlar tanto o valor da média da característica da qualidade, quanto sua variabilidade. O controle da média do processo, ou o nível médio de qualidade, é normalmente feito com gráficos de controle para médias — gráfico \bar{x} . A variabilidade do processo ou a dispersão podem ser controladas tanto com o gráfico de controle para desvio-padrão, chamado de gráfico S, quanto com o gráfico de controle para a faixa, chamado de gráfico R (o gráfico R é mais utilizado). Normalmente nos deparamos com os gráficos \bar{x} e R para cada característica de controle de nosso interesse (contudo, se a característica de controle for analisada de uma forma minuciosa, isto algumas vezes pode causar resultados enganadores; verificar neste livro a Seção 7-4). Os gráficos \bar{x} e R (ou S) estão dentre os mais importantes e úteis para as técnicas de controle estatístico do processo em situações em andamento.

Perceba que é importante manter o controle tanto sobre a média do processo, quanto sobre sua variabilidade. A figura 4.1 ilustra a saída de um processo de produção. Na figura 4.1a tanto a média, μ , quanto o desvio-padrão, σ , estão dentro do controle em seus valores nominais (digamos μ_{\square} e σ_0); conseqüentemente, a maioria das saídas do processo cai dentro dos limites especificados. Contudo, na fig. 4.1b a média mudou para um valor $\mu_{\ominus} \text{ (} \downarrow \text{)} \mu_{\square}$ resultando numa fração mais alta de não-conformidade do produto. Na figura 4.1c o desvio-padrão do processo mudou para um valor $\sigma_{\ominus} \text{ (} \downarrow \text{)} \sigma_{\square}$, resultando também num desvio maior do processo, embora a média do processo ainda esteja dentro do valor nominal.





Figuras 4.1

Gráficos de controle para \bar{x} e R

Conceito estatístico dos gráficos de controle

Suponha que uma característica de qualidade é normalmente distribuída com média μ e desvio-padrão σ , onde ambos são conhecidos. Se x_1, x_2, \dots, x_n é uma amostra de tamanho n , então a média dessa amostra é :

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}$$

Sabemos que \bar{x} é normalmente distribuída com média μ e desvio-padrão dado por:

$$\sigma_{\bar{x}} = \sigma / \sqrt{n}.$$

Além disso, a probabilidade é $(1-\alpha)$ de que qualquer amostra média caia entre :

$$\mu + z_{\alpha/2} \sigma_{\bar{x}} = \mu + z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (4.1a)$$

$$\mu - z_{\alpha/2} \sigma_{\bar{x}} = \mu - z_{\alpha/2} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (4.1b)$$

Desta forma, se μ e σ são conhecidos, as equações (4.1a) e (4.1b) podem ser usadas como os limites superior e inferior num gráfico de controle para médias de amostra. Como foi

observado anteriormente, é uso normal substituir $Z_{\alpha/2}$ por 3, de tal maneira que limites de 3-sigma sejam empregados. Se uma média de amostra cair fora desses limites é uma indicação de que a média do processo não é mais equivalente a μ .

Assumimos que a distribuição da característica de qualidade é normal. Contudo, os resultados acima são ainda aproximadamente corretos mesmo que a distribuição que esteja subjacente seja não-normal, devido ao Teorema do Limite Central.

Na prática, não sabemos nem μ nem σ . Desta forma, precisam ser estimados por amostras preliminares, tomadas quando o processo está supostamente dentro do controle. Tais estimativas devem ser baseadas em torno de 20 a 25 amostras. Suponhamos que m amostras estejam disponíveis, cada uma contendo n observações de características de qualidade. Tipicamente, n será menor, frequentemente 4, 5 ou 4. Estes tamanhos pequenos de amostras normalmente resultam de uma construção de subgrupos racionais e do fato de que a amostragem e os custos de inspeção associados à medida de variável são normalmente elevados. Deixamos então que $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m$ sejam a média de cada amostra. Então, o melhor estimador de μ , a média do processo, é a grande média, digamos :

$$\bar{\bar{x}} = \frac{\bar{x}_1 + \bar{x}_2 + \dots + \bar{x}_m}{m} \quad (4.2)$$

Desta forma, $\bar{\bar{x}}$ seria usado como a linha central do gráfico de controle \bar{x} .

Para construir os limites de controle precisamos de um estimador do desvio-padrão σ . Podemos estimar σ tanto dos desvios-padrão como das variações das m amostras. Neste nosso caso nós nos concentraremos no método de faixa. Se x_1, x_2, \dots, x_n é uma amostra de tamanho n , então a faixa da amostra é a diferença entre as observações maiores e menores, isto é:

$$R = x_{\text{máx}} - x_{\text{min}}$$

Existe uma relação muito conhecida entre a distância de uma amostra em relação a uma distribuição normal e o desvio-padrão dessa distribuição. A variável randômica $W = R/\sigma$ é chamada de distância relativa. Os parâmetros da distribuição de W são uma função do tamanho da amostra n . A média de W é d_2 . Conseqüentemente, um estimador de σ é $\hat{\sigma} = R/d_2$.

Sejam então as medidas R_1, R_2, \dots, R_m as distâncias de m amostras. A média da distância é :

$$\bar{R} = \frac{R_1 + R_2 + \dots + R_m}{m} \quad (4.3)$$

Então um estimador de σ seria computado como:

$$\hat{\sigma} = \frac{\bar{R}}{d_2} \quad (4.4)$$

Se o tamanho da amostra é relativamente pequeno, o método da distância permite um estimador tão bom quanto o da variância e o estimador normal (a variância da amostra S^2). A

eficiência relativa do método da distância em relação a S^2 é mostrada abaixo, para vários tamanhos de amostra:

n	<u>Eficiência Relativa</u>
2	1.000
3	0.992
4	0.975
5	0.955
6	0.930
10	0.850

Para valores moderados de n , digamos $n \approx 10$, a distância perde a eficiência rapidamente, porque ignora as informações nas amostras entre x_{\max} e x_{\min} . Contudo, para tamanhos pequenos de amostra, frequentemente empregados em gráficos de controle de variáveis ($n = 4, 5$ ou 6), o método da distância é inteiramente satisfatório.

Se usarmos \bar{x} como um estimador de μ , e R/d_2 como um estimador para σ , então os parâmetros do gráfico de \bar{x} são :

$$UCL = \bar{x} + \frac{3}{d_2 \sqrt{n}} \bar{R}$$

$$UCL = \text{Linha de Centro Superior} \quad (4.5)$$

$$\text{Linha de Centro} = \bar{x}$$

$$LCL = \bar{x} - \frac{3}{d_2 \sqrt{n}} \bar{R}$$

$$LCL = \text{Linha de Centro Inferior}$$

Notamos que a quantidade

$$A_2 = \frac{3}{d_2 \sqrt{n}} \quad (4.6)$$

é uma constante que depende apenas do tamanho da amostra, de tal forma que é possível reescrever (4.5) como:

$$UCL = \bar{x} + A_2 \bar{R}$$

$$\text{Linha de Centro} = \bar{x} \quad (4.7)$$

$$LCL = \bar{x} - A_2 \bar{R}$$

Vimos que a distância da amostra é relativa ao desvio-padrão do processo. Dessa forma, a variabilidade do processo pode ser controlada quando nos lançamos num gráfico de controle de valores de R para amostras sucessivas. Tal gráfico de controle seria chamado de gráfico R . Os parâmetros deste gráfico podem ser facilmente determinados. A linha central será \bar{R} . Para

determinar os limites de controle, precisamos de uma estimativa de σ_R . Assumindo que a característica de qualidade é normalmente distribuída, $\hat{\sigma}_R$ pode ser achado a partir da distribuição da distância relativa $W = R/\sigma$. O desvio-padrão de W , digamos d_3 , é uma função conhecida de n . Desta forma, desde que:

$$R = W\sigma$$

o desvio-padrão de R é:

$$\sigma_R = d_3\sigma$$

Uma vez que σ é desconhecido, estimamos σ_R como:

$$\hat{\sigma}_R = d_3 \frac{\bar{R}}{d_2} \quad (4.8)$$

Consequentemente, os parâmetros do gráfico de controle R com os limites de controle 3-sigma são :

$$\begin{aligned} \text{UCL} &= \bar{R} + 3\hat{\sigma}_R = \bar{R} + 3d_3 \frac{\bar{R}}{d_2} \\ \text{Center Line} &= \bar{R} \\ \text{LCL} &= \bar{R} - 3\hat{\sigma}_R = \bar{R} - 3d_3 \frac{\bar{R}}{d_2} \end{aligned} \quad (4.9)$$

Podemos, pois, redefinir os parâmetros do gráfico R como:

$$\begin{aligned} D_3 &= 1 - 3(d_3/d_2) \\ D_4 &= 1 + 3(d_3/d_2) \\ \text{UCL} &= \bar{R}D_4 \\ \text{Center Line} &= \bar{R} \\ \text{LCL} &= \bar{R}D_3 \end{aligned} \quad (4.10)$$

Quando amostras preliminares são usadas para construir gráficos de controle \bar{x} e R , é normal tratar os limites de controle como valores de tentativa. Então, a amostra de média m e as faixas devem ser plotadas nos gráficos e quaisquer pontos que excedam os limites de controle deverão ser investigados. Se causas perceptíveis forem a explicação para esses pontos, eles devem ser descartados e novos limites de controle devem ser testados.

Desenvolvimento e uso dos gráficos \bar{x} e R

Mostramos na seção anterior o fundamento estatístico dos gráficos de controle \bar{x} e R . Ilustraremos agora a construção e aplicação desses gráficos.

EXEMPLO 4.1:

Anéis de pistão para motores de automóveis são produzidos por processos de forjamento. Queremos estabelecer um controle desse processo, usando gráficos \bar{x} e R. Vinte e cinco amostras, cada uma agrupada no tamanho de 5, foram tomadas quando o processo estava sob controle. Os dados são mostrados na Tabela 4.1 :

Tabela 6.1 Dados sobre Anéis de Pistão Forjados - Exemplo 6.1

Amostra número						Xi	Ri
1	74.030	74.002	74.019	73.992	74.008	74,010	0,038
2	73.995	73.992	74.001	74.011	74.004	74,001	0,019
3	73.988	74.024	74.021	74.005	74.002	74,008	0,036
4	74.002	73.996	73.993	74.015	74.009	74,003	0,022
5	73.992	74.007	74.015	73.989	74.014	74,003	0,026
6	74.009	73.994	73.997	73.985	73.993	73,996	0,024
7	73.995	74.006	73.994	74.000	74.005	74,000	0,012
8	73.985	74.003	73.993	74.015	73.988	73,997	0,03
9	74.008	73.995	74.009	74.005	74.004	74,004	0,014
10	73.998	74.000	73.990	74.007	73.995	73,998	0,017
11	73.994	73.988	73.994	73.995	73.990	73,992	0,008
12	74.004	74.000	74.007	74.000	73.996	74,001	0,011
13	73.983	74.002	73.998	73.997	74.012	73,998	0,029
14	74.006	73.967	73.994	74.000	73.984	73,990	0,039
15	74.012	74.014	73.998	73.999	74.007	74,006	0,016
16	74.000	73.984	74.005	73.998	73.996	73,997	0,021
17	73.994	74.012	73.986	74.005	74.007	74,001	0,026
18	74.006	74.010	74.018	74.003	74.000	74,007	0,018
19	73.984	74.002	74.003	74.005	73.997	73,998	0,021
20	74.000	74.010	74.013	74.020	74.003	74,009	0,02
21	73.988	74.001	74.009	74.005	73.996	74,000	0,033
22	74.004	73.999	73.990	74.006	74.009	74,002	0,019
23	74.010	73.989	73.990	74.009	74.014	74,002	0,025
24	74.015	74.008	73.993	74.000	74.010	74,005	0,022
25	73.982	73.984	73.995	74.017	74.013	73,998	0,035
					soma	1850,024	0,581
					média	74.001	R=0.023

Após estabelecermos os gráficos de controle \bar{x} e R, começaremos pelo gráfico R. Pelo fato dos limites de controle do gráfico \bar{x} dependerem da variabilidade do processo, a menos que a variabilidade do processo esteja controlada, estes limites não terão muito significado. Usando os dados da Tabela 4.1, determinamos que a linha central para o gráfico R é :

$$\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^{25} R_i}{25} = \frac{0,581}{25} = 0,023$$

Para amostras com $n = 5$, encontraremos na Tabela VI do Apêndice que $D_3 = 0$ e $D_4 = 2,115$. Desta forma, os limites de controle para o gráfico de R são: [usando (4.10)]

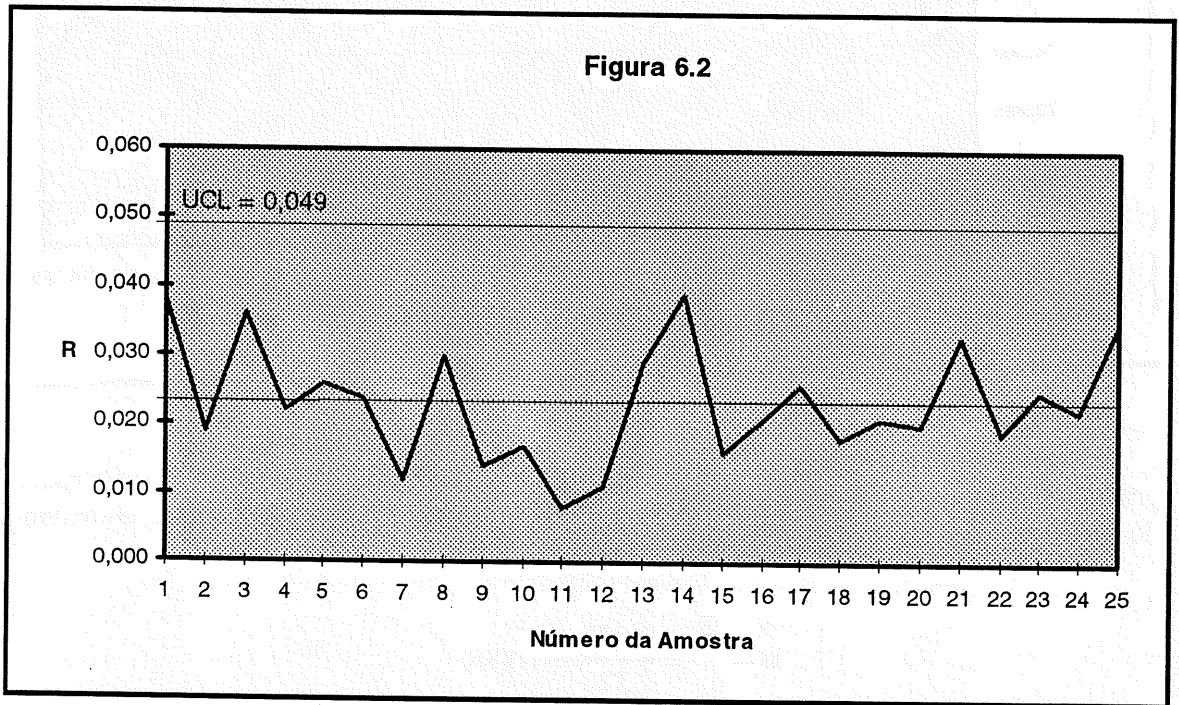
$$LCL = \bar{R}D_3 = 0,023(0) = 0$$

$$UCL = \bar{R}D_4 = 0,023(2,115) = 0,049$$

O gráfico R é mostrado na Figura 4.2. Quando as faixas de distância entre as 25 amostras são plotadas no gráfico não existe uma indicação de condição fora-de-controle. Uma vez que o gráfico R indica que a variabilidade do processo está controlada, podemos construir o gráfico \bar{x} .

A linha de centro é:

$$\bar{\bar{x}} = \frac{\sum_{i=1}^{25} \bar{x}_i}{25} = \frac{1850,024}{25} = 74,001$$



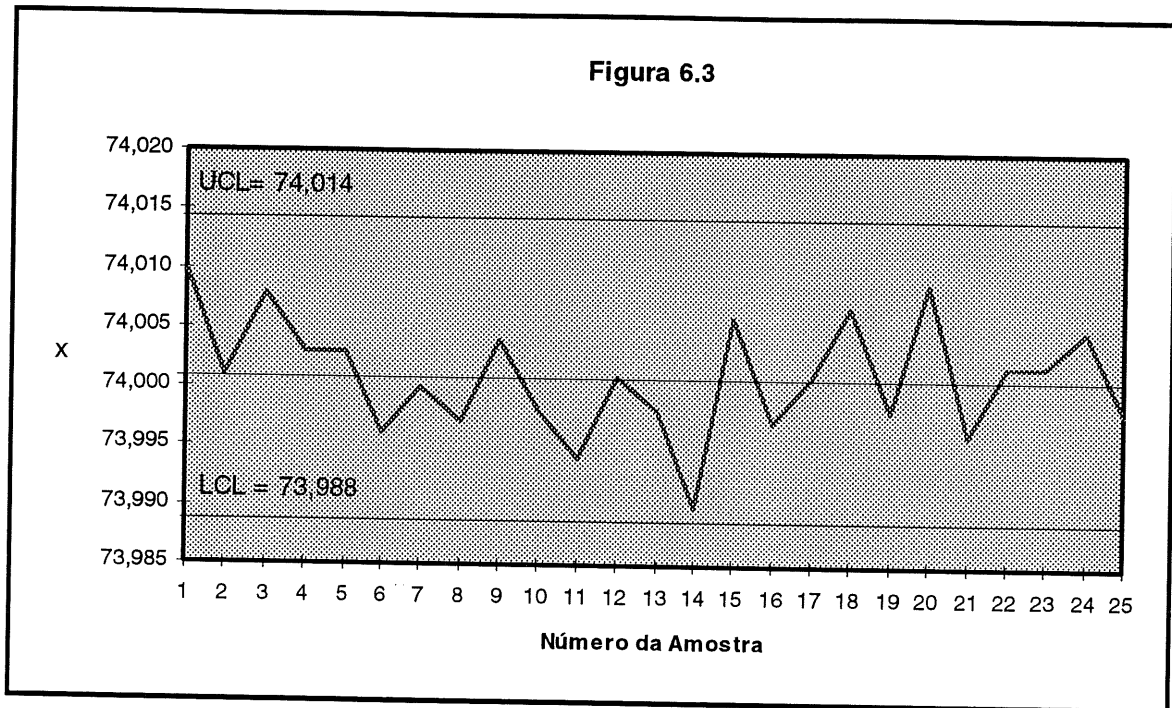
Para encontrar os limites de controle no gráfico \bar{x} , usaremos $A_2 = 0,577$ (Tabela VI do Apêndice, para $n=5$) e pela equação (4.7) encontramos:

$$UCL = \bar{\bar{x}} + A_2 \bar{R} = 74,001 + (0,577)(0,023) = 74,014$$

$$LCL = \bar{\bar{x}} - A_4 \bar{R} = 74,001 - (0,577)(0,023) = 73,988$$

O gráfico de controle \bar{x} é mostrado na Figura 4.3. Quando nas amostras preliminares as médias são plotadas nesse gráfico, não há indicação de situação fora-de-controle. Dessa forma, uma vez que os gráficos \bar{x} e R mostram que a situação está controlada, podemos concluir que o processo está sob controle e que os níveis afirmados e adotados nos limites de tentativa para uso no processo "on - line" são controlados.

Figura 6.3



Os gráficos \bar{x} e R provêm informações sobre a performance do processo. Para o gráfico \bar{x} , podemos estimar que o diâmetro médio do pistão é $\bar{x} = 74,001$ mm. O desvio-padrão do processo pode ser estimado usando a equação (4.4):

$$\hat{\sigma} = \frac{\bar{R}}{d_2} = \frac{0,023}{2,326} = 0,0099$$

onde o valor de d_2 , para amostras de tamanho cinco, é achado na Tabela VI do Apêndice. Os limites de especificação dos anéis de pistão são $74,000 \pm 0,03$ mm. Os dados do gráfico de controle podem ser usados para descrever a capacidade do processo em produzir anéis de pistão dentro das especificações. Assumindo que o diâmetro do anel de pistão é normalmente distribuído de forma randômica, com média 74,001 e desvio-padrão 0,0099, podemos estimar a fração de não-conformidade dos anéis de pistão produzidos, como:

$$\begin{aligned} \hat{\rho} &= P\{x < 73,970\} + P\{x > 74,030\} \\ &= \Phi\left(\frac{73,970 - 74,001}{0,0099}\right) + 1 - \Phi\left(\frac{74,030 - 74,001}{0,0099}\right) \\ &= \Phi(-3,13) + 1 - \Phi(2,93) \\ &= 0,00087 + 1 - 0,99831 \\ \therefore \hat{\rho} &= 0,00256 \end{aligned}$$

Isto é, cerca de 0,256% dos anéis de pistão produzidos estarão fora das especificações. Ou seja, para cada 390 anéis produzidos 1 estará fora das especificações.

Outra maneira de expressar a capacidade do processo é em termos da relação entre a capacidade do processo (process-capability ratio = PCR), que usa a qualidade característica dos limites de especificação, tanto superiores quanto inferiores, designadas por USL e LSL, respectivamente:

$$PCR = \frac{USL - LSL}{6\sigma}$$

Observe que a variação 6σ no processo é a definição básica da capacidade do processo. Para o processo de anéis de pistão, vamos encontrar que:

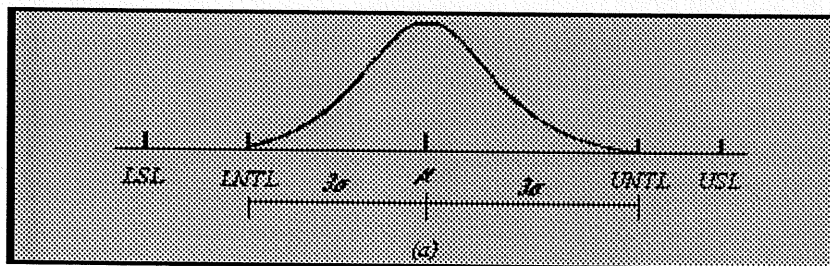
$$PCR = \frac{74,03 - 73,97}{6(0,0099)}$$

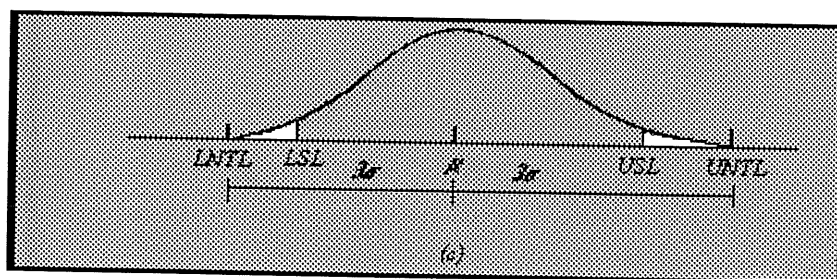
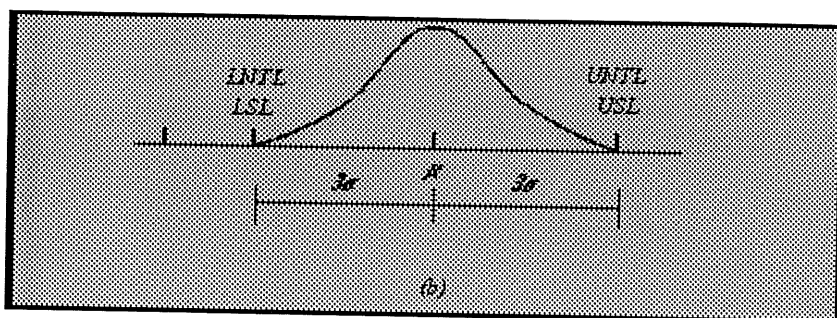
$$PCR = \frac{0,06}{0,0594}$$

$$PCR = 1,01$$

Isto implica que a tolerância "natural" nos limites do processo (3-sigma acima e abaixo da média) está quase coincidente com as especificações de limites superior e inferior. Consequentemente, um número relativamente baixo fora do processo será produzido.

Na Figura 4.4a é mostrado o processo, para o qual $PCR \approx 1$. Observe que os limites de especificação estão fora dos limites inferior e superior naturais de tolerância ($UNTL = \mu - 3\sigma$; $LNTL = \mu + 3\sigma$). Consequentemente, não existe virtualmente nenhum produto fora das especificações. Isto é, das 125 amostras, nenhuma delas estava fora. A Figura 4.4b mostra o processo para o qual $PCR = 1$. Para uma distribuição normal, isso implica que cerca de 27 unidades estão fora de limite para cada 10.000 produzidas. Finalmente, a Figura 4.4c apresenta o processo para o $PCR \ll 1$. Quando as tolerâncias naturais ficam dentro das especificações, o processo é muito sensível ao rendimento e um grande número de unidades fora do padrão serão produzidas.





Figuras 4.4

Quinze amostras adicionais do processo de manufatura do anel de pistão foram coletadas depois que foi estabelecido o sistema de gráfico de controle. Os dados dessas amostras estão mostrados na Tabela 4.2 e as continuações do gráfico de controle \bar{x} e R são mostradas na Figura 4.5. Os gráficos de controle indicam que o processo está sob controle até que o valor de \bar{x} da décima segunda amostra foi plotado. Uma vez que esse ponto e os três subseqüentes estão acima do limite superior de controle, deveríamos suspeitar que existe uma causa para explicar porque isso ocorreu. O padrão geral dos pontos do gráfico \bar{x} a partir do subgrupo 9, ou 10 em diante, indica que houve uma mudança na meta do processo. Num controle “on-line”, a mudança provavelmente seria detectada na amostra 10, particularmente se limites de aviso ou qualquer outra regra de decisão para interpretação do gráfico de controle estão sendo usados.

Ao examinarmos os dados do gráfico de controle, eles podem nos ajudar a construir gráficos de observações individuais em cada amostra. Tais gráficos são chamados de gráficos de tolerância. Isso pode revelar algum padrão nos dados ou pode mostrar que um valor particular de \bar{x} ou de R foi produzido por uma ou duas observações não-usuais na amostra. Um gráfico de observações individuais das últimas quinze amostras é mostrado na Figura 4.6. Esse gráfico não indica que os sinais de fora de controle foram gerados por observações individuais não-usuais; mas, pelo contrário, eles resultam provavelmente da mudança da média em torno do período em que a nona ou décima amostras foram tomadas.

Tabela 6.2

Amostra	Número					Xi	Ri
1	74,012	74,015	74,030	73,986	74,000	74,009	0,044
2	73,995	74,010	73,990	74,015	74,001	74,002	0,025
3	73,987	73,999	73,985	74,000	73,990	73,992	0,015
4	74,008	74,010	74,003	73,991	74,006	74,004	0,019
5	74,003	74,000	74,001	73,986	73,997	73,997	0,017
6	73,994	74,003	74,015	74,020	74,004	74,007	0,026
7	74,008	74,002	74,018	73,995	74,005	74,006	0,023
8	74,001	74,004	73,990	73,996	73,998	73,998	0,014
9	74,015	74,000	74,016	74,025	74,000	74,011	0,025
10	74,030	74,005	74,000	74,016	74,012	74,013	0,030
11	74,001	73,990	73,995	74,010	74,024	74,004	0,034
12	74,015	74,020	74,024	74,005	74,019	74,017	0,019
13	74,035	74,010	74,012	74,015	74,026	74,020	0,025
14	74,017	74,013	74,036	74,025	74,026	74,023	0,023
15	74,010	74,005	74,029	74,000	74,020	74,013	0,029

A média das médias das amostras de 9 até 15 é 74,015 mm. Os limites de especificação de $74,0000 \pm 03$ mm são plotados na Figura 4.5 junto com o esquema da distribuição normal que representa a saída do processo, quando a média do processo coincide com o valor estabelecido pelo controle, ou seja, igual a 74,001 mm. Um esquema de distribuição normal representando a saída do processo na nova média aparente do diâmetro de 74,015 mm é também mostrado na Figura 4.6. É óbvio que existe uma porcentagem alta de anéis de pistão que não estão em conformidade e que serão produzidos com essa nova média de diâmetro; na realidade, cerca de 6,43% da saída do processo está fora de conformidade. Uma pesquisa para investigar a causa de tal mudança na média deve ser conduzida. Frequentemente, a entrada de dados feita por operadores, engenheiros de manufatura, gerência e pelo pessoal da engenharia de qualidade é necessária para encontrar e eliminar as causas dessa ocorrência.

Limites de Controle, Limites de Especificação e Limites de Tolerância Natural

Um ponto que deve ser enfatizado é que não existe conexão ou relação entre os *limites de controle* dos gráficos \bar{x} e R e os *limites de especificação* no processo. Os limites de controle são dirigidos pela variabilidade natural do processo (medidos pelo desvio-padrão do processo, σ), isto é, pelos *limites de tolerância natural* do processo. Os limites de especificação, por outro lado, são determinados externamente. Eles podem ser estabelecidos pela gerência, pelos engenheiros de manufatura, pelo cliente, ou pelos projetistas do produto. Temos que ter em mente o conhecimento da variabilidade inerente ao processo quando estabelecemos especificações, *lembrando que não existe relação matemática ou estatística entre os limites de controle e os limites de especificação*. A situação é resumida na Figura 4.7. Temos encontrado praticantes que têm plotado os limites de especificação no gráfico de controle \bar{x} . Tal prática é completamente incorreta e não deve ser feita

Figura 6.5

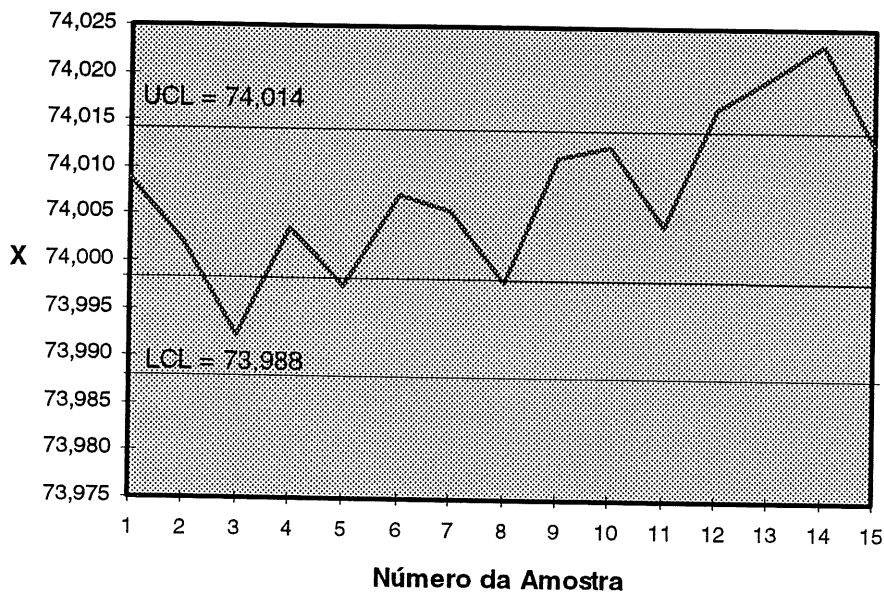
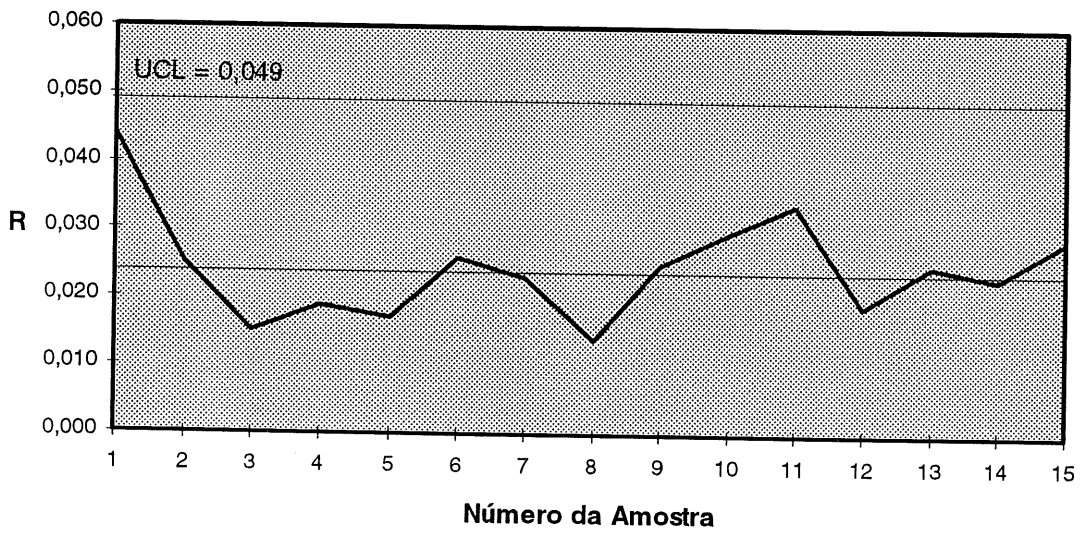


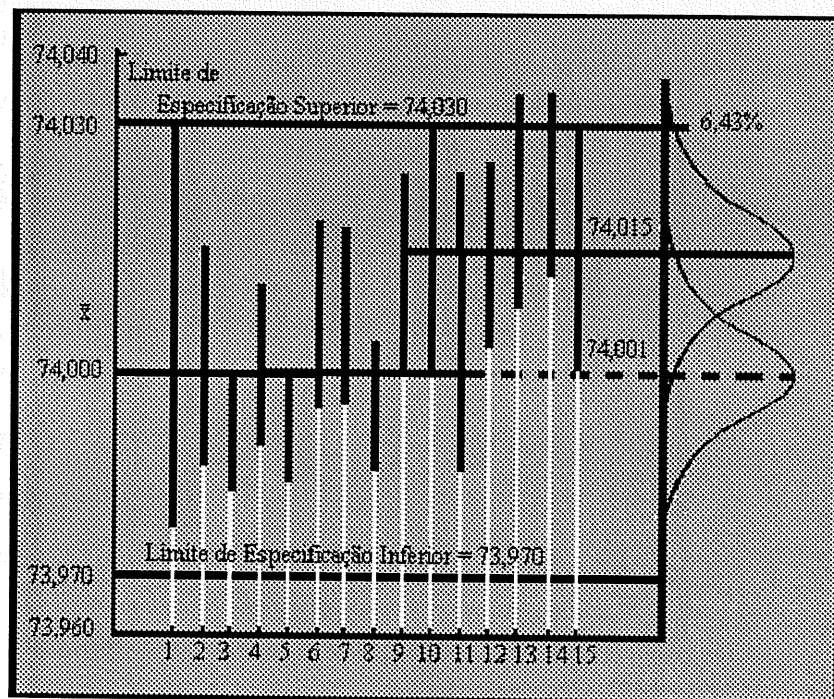
Figura 6.5 (continuação)



Quando não estamos lidando com gráficos de observações individuais (não-médias), como na Figura 4.6, ajuda muito plotar os limites de especificação no gráfico.

Subgrupos Racionais

O conceito de subgrupo racional tem um importante papel no uso dos gráficos de controle \bar{x} e R. A definição de um subgrupo racional na prática deve ser mais fácil se tivermos um entendimento claro das funções dos dois tipos de gráficos de controle. O gráfico de controle \bar{x} monitora a média do nível de qualidade no processo. Por isso, as amostras devem ser selecionadas visando à maximização das chances de ocorrer uma diferença entre suas médias



Por outro lado, o gráfico de controle R mede a variabilidade dentro da amostra. Desta forma, as amostras devem ser selecionadas de tal forma que as diferenças dentro das amostras seja maximizada. Outra maneira de dizer isso é que o gráfico de controle \bar{x} monitora a variabilidade entre as amostras (variabilidade no processo ao longo do tempo) e o gráfico de controle R mede a variabilidade dentro das amostras (a variabilidade instantânea do processo em dado momento).

Um importante aspecto disso é evidente através de um cuidadoso exame de como os limites de controle para os gráficos de controle \bar{x} e R são determinados a partir de dados anteriores. A estimativa do desvio-padrão do processo σ , usada na construção de limites de controle, é calculada a partir da variabilidade dentro de cada amostra (isto é, de cada faixa de amostra individual). Conseqüentemente, a estimativa de σ reflete somente a variabilidade dentro da amostra. Não é correto estimar σ baseado no estimador quadrático usual, como, por exemplo:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{\bar{x}})^2}{mn - 1}}$$

onde x_{ij} é a j -ésima observação na i -ésima amostra, porque se a média da amostra difere, então isto fará com que S seja grande. Consequentemente, σ será superestimado. Examinando os dados preliminares, estimar σ dessa maneira torna-se então perigoso, visto que tal forma combina potencialmente tanto a variabilidade entre as amostras, quanto dentro das amostras. Os limites de controle devem ser baseados somente na variabilidade dentro das amostras.

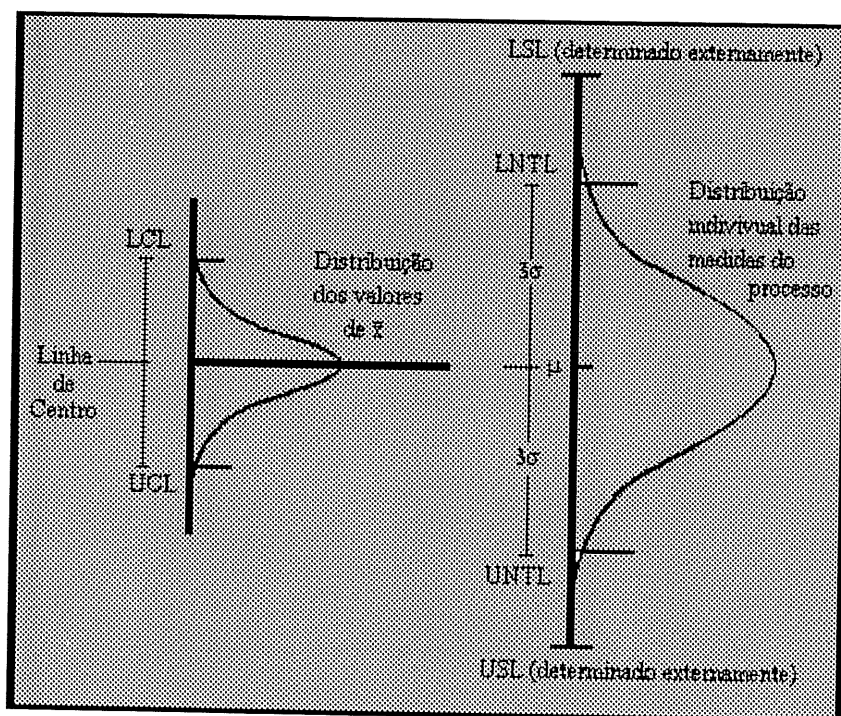
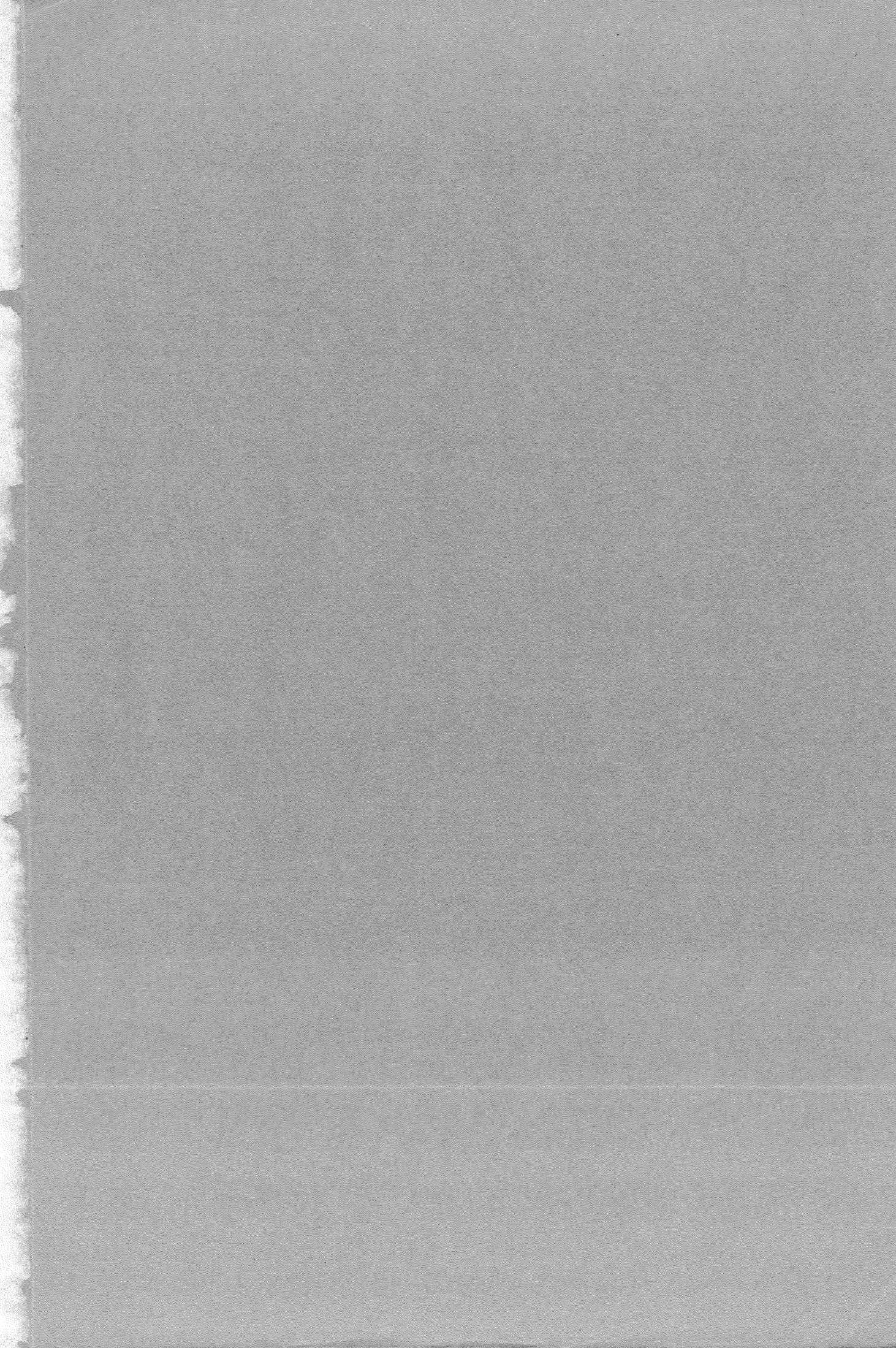


Figura 4.7





UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ÁREA DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO