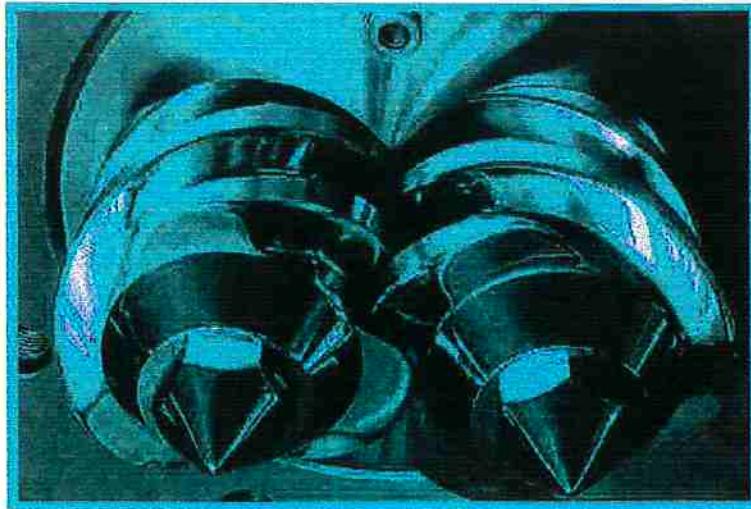


MARCO ANTONIO CAPOZZIELLI



O PROCESSO DE EXTRUSÃO POLIMÉRICA, UM ESTUDO ESTATÍSTICO

PMT 554 – Relatório Final
Trabalho de formatura
apresentado à Escola
Politécnica da Universidade
de São Paulo para obtenção
da graduação em Engenharia
Metalúrgica

**São Paulo
1999**

MARCO ANTONIO CAPOZZIELLI

**O PROCESSO DE EXTRUSÃO POLIMÉRICA,
UM ESTUDO ESTATÍSTICO**

PMT 554 – Relatório Final

**Trabalho de formatura apresentado à
Escola Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção da graduação em
Engenharia Metalúrgica**

**Área de Concentração: Controle de
Qualidade**

Orientador: Prof. Stephan Wolynech

Co-orientador: Prof. Julio Roberto Bartoli

**São Paulo
1999**

Agradecimentos

Ao Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da USP, pela excelência no ensino tecnológico e científico.

Aos amigos e Orientadores Prof. Stephan Wolynech e Prof. Julio Bartoli, pelo apoio e paciência.

A todos que direta ou indiretamente colaboraram na execução deste trabalho.

SUMARIO

Lista de Símbolos

Lista de Figuras e Gráficos

Lista de Tabelas

Lista de Gráficos de Controle

Resumo

“Abstract”

1.	Introdução	1
2.	Revisão Bibliográfica	2
2.1.	<i>Processo de Extrusão Polimérica</i>	2
2.1.1.	Breve histórico do processo	2
2.1.2.	Linha de Produção	3
2.1.3.	Extrusora	4
2.1.4.	Matriz	7
2.1.5.	Calibração	9
2.1.6.	Balanço Energético	10
2.2.	Materiais Poliméricos	12
2.2.1.	Propriedades Reológicas	12
2.2.2.	PVC - Cloreto de polivinila	15
2.3.	<i>Métodos Estatísticos</i>	17
2.3.1.	Teoria do CEP	18
2.3.2.	Os Elementos do Processo	18
2.3.3.	Gráficos de Controle	21
2.3.4.	Pré-Controle	27
2.3.5.	Capacidade do Processo (Process Capability)	29
2.3.6.	Sistemas de medição	32
3.	Material e Método	34
3.1.	<i>A empresa</i>	34
3.2.	<i>O Produto</i>	38
3.3.	<i>Estudo dos sistemas de medição</i>	39
3.3.1.	Parâmetro L	41
3.3.2.	Parâmetro a	43

3.3.3.	Parâmetros m e f	47
3.3.4.	Parâmetro p	50
3.3.5.	Parâmetros Vp, BAR e Amp	51
3.4.	<i>Avaliação das alterações introduzidas no processo</i>	52
4.	Discussões e Resultados	54
4.1.	<i>Primeiro Estudo estatístico do processo</i>	54
4.1.1.	Pré-Controle	54
4.1.2.	Capacidade e estabilidade do processo	56
4.2.	<i>Segundo Estudo estatístico do processo</i>	83
4.2.1.	Pré-Controle	83
4.2.2.	Estudo do processo sob novas condições	83
5.	Conclusão	104
6.	Referências Bibliográficas	106

Apêndice A - Tabelas e Dados Estatísticos

Apêndice B - Catálogo de equipamentos de controle

Apêndice C - Método das Operações Evolucionárias (EVOP)

Lista de Símbolos

Parâmetros Físicos

z	potência mecânica
q	potência elétrica
C	calor específico
Q	vazão ou taxa volumétrica de extrusão
ΔT	variação de temperatura
ΔP	variação de pressão
H	taxa de dissipação de calor
η	viscosidade
$\dot{\gamma}$	taxa de cisalhamento
D	diâmetro do cilindro de extrusão
N	velocidade de rotação
h	profundidade
σ	tensão de cisalhamento
K	força de cisalhamento
A	área
γ	deformação
G	módulo de cisalhamento
ρ	densidade
V	velocidade

Parâmetros Estatísticos

\bar{x}	médias
R	amplitudes
x	medidas
σ	desvio-padrão
C_p	índice de capacidade
C_{pK}	índice de capacidade

LCS _____ limite de controle superior
LCI _____ limite de controle inferior
 χ^2 _____ estatística qui-quadrado
O,E _____ frequência

Parâmetros do processo

Vp _____ velocidade de produção
BAR _____ pressão
Amp _____ corrente
L, m, f, a , p _____ medidas dimensionais

Lista de Figuras

Figura 1 - esquema de uma linha de produção de extrusão de perfis.	3
Figura 2 - soma de velocidades na região de contato entre roscas de contra-rotação.	6
Figura 3 - Plate die	9
Figura 4 - strealined-entry die	9
Figura 5 - matriz de perfil rígido	9
Fonte: Referência Bibliográfica 1	9
Figura 6 - monômero cloreto de vinila	16
Figura 7 -Exemplo de diagrama causa e efeito	20
Figura 8 - diagrama de Pareto	21
Figura 9 - exemplo de gráfico de controle.	22
Figura 10 - padrões de instabilidade.	23
Figura 11 - linha de pré-controle para tolerância bilateral	28
Figura 12 - linha de pré-controle para tolerância unilateral , mínimo e máximo	28
Figura 13 - linha de pré-controle para tolerância unilateral , leitura de indicador total	28
Figura 14 - Planta da fábrica	35
Figura 15 - seção transversal do extrudado	38
Figura 16 -perfil extrudado	39
Figura 17 - instalação com o produto aplicado	39
Figura 18 - parâmetros dimensionais do forro	40
Figura 19 - Esquema de alimentação da extrusora	53

Lista de Gráficos

Gráfico 1 - Curva característica do material e da extrusora.	4
Gráfico 2 - $\log(\eta) \times \log(\dot{\gamma})$.	12
Gráfico 3 - $\sigma \times \dot{\gamma}$	14
Gráfico 4 - $\eta \times \dot{\gamma}$	14
Gráfico 5 - gráfico de controle esquemático	24
Gráfico 6 - curva normal	70
Gráfico 7 - comparação das normais, parâmetro BAR	90

Lista de Tabelas

Tabela 1 - propriedades do PVC rígido	Fonte: Referência Bibliográfica 13	16
Tabela 2 - parâmetros de observação		40
Tabela 3 - teste de medição parâmetro L		41
Tabela 4 - teste de medição parâmetro a		43
Tabela 5 - teste de medição parâmetro a, médias e amplitudes		44
Tabela 6 – Teste de medição, parâmetro a		45
Tabela 7 – médias e amplitudes, parâmetro a		46
Tabela 8 – teste de medição, parâmetro m		47
Tabela 9 – teste de medição, parâmetro f		48
Tabela 10 – Teste de medição, parâmetro p		50
Tabela 11 – medidas do parâmetro Vp		58
Tabela 12 – médias e amplitudes, parâmetro Vp		58
Tabela 13 – medidas, parâmetro Vp		60
Tabela 14 – teste de normalidade para Vp		62
Tabela 15 – índices de capacidade, Vp		63
Tabela 16 - medidas, parâmetro BAR		64
Tabela 17 - teste de normalidade, BAR		65
Tabela 18 - índices de capacidade, BAR		66
Tabela 19 - médias e amplitudes, parâmetro Amp		66
Tabela 20 - teste de normalidade, Amp		68
Tabela 21 - índices de capacidade, Amp		68
Tabela 22 - médias e amplitudes, parâmetro L		68
Tabela 23 - teste de normalidade, L		71
Tabela 24 - índices de capacidade, L		71
Tabela 25 - médias e amplitudes, parâmetro m		72
Tabela 26 - teste de normalidade, m		73
Tabela 27 - índices de capacidade, m		74
Tabela 28 - médias e amplitudes, parâmetro a		74
Tabela 29 - teste de normalidade, a		76
Tabela 30 - índices de capacidade, a		76
Tabela 31 - médias e amplitudes, parâmetro p		76

Tabela 32 - médias e amplitudes, parâmetro Vp	84
Tabela 33 - teste de normalidade, Vp	86
Tabela 34 - índices de capacidade, Vp	86
Tabela 35 - médias e amplitudes, parâmetro BAR	87
Tabela 36 - teste de normalidade, BAR	89
Tabela 37 - índices de capacidade, BAR	89
Tabela 38 - médias e amplitudes, parâmetro Amp	90
Tabela 39 - teste de normalidade, Amp	92
Tabela 40 - índices de capacidade, Amp	92
Tabela 41 - médias e amplitudes, parâmetro L	93
Tabela 42 - teste de normalidade, L	94
Tabela 43 - índices de capacidade, L	95
Tabela 44 - médias e amplitudes, parâmetro m	95
Tabela 45 - teste de normalidade, m	97
Tabela 46 - índices de capacidade, m	97
Tabela 47 - médias e amplitudes, parâmetro a	98
Tabela 48 - teste de normalidade, a	99
Tabela 49 - índices de capacidade, a	99
Tabela 50 - médias e amplitudes, parâmetro p	100
Tabela 51 - teste de normalidade, p	102
Tabela 52 - índices de capacidade, p	102
Tabela 53 - parâmetros do Estudo 1	103
Tabela 54 -- parâmetros do Estudo 2	103

Lista de Gráficos de Controle

Gráfico de Controle 1 – médias, parâmetro L	42
Gráfico de Controle 2 – amplitudes, parâmetro L	42
Gráfico de Controle 3 – médias, parâmetro a	44
Gráfico de Controle 4 – amplitudes, parâmetro a	45
Gráfico de Controle 5 – médias, parâmetro a	46
Gráfico de Controle 6 – amplitudes, parâmetro a	46
Gráfico de Controle 7 – médias, parâmetro m	48
Gráfico de Controle 8 – amplitudes, parâmetro m	48
Gráfico de Controle 9 – médias, parâmetro f	49
Gráfico de Controle 10 – amplitudes, parâmetro f	49
Gráfico de Controle 11 – médias, parâmetro p	51
Gráfico de Controle 12 – amplitudes, parâmetro p	51
Gráfico de Controle 13 – médias, parâmetro Vp	59
Gráfico de Controle 14 – amplitudes, parâmetro Vp	59
Gráfico de Controle 15 – medidas, parâmetro Vp	61
Gráfico de Controle 16 – amplitudes, parâmetro Vp	61
Gráfico de Controle 17 – medidas, parâmetro BAR	64
Gráfico de Controle 18 – amplitudes, parâmetro BAR	65
Gráfico de Controle 19 - medidas, parâmetro Amp	67
Gráfico de Controle 20 - amplitudes, parâmetro Amp	67
Gráfico de Controle 21 - medidas, parâmetro L	69
Gráfico de Controle 22 - amplitudes, parâmetro L	69
Gráfico de Controle 23 - amplitudes, parâmetro m	72
Gráfico de Controle 24 - amplitude, parâmetro m	73
Gráfico de Controle 25 - medidas, parâmetro a	75
Gráfico de Controle 26 - amplitudes, parâmetro a	75
Gráfico de Controle 27 - medidas, parâmetro p	77
Gráfico de Controle 28 - amplitudes, parâmetro p	78
Gráfico de Controle 29 - medidas, parâmetro Vp	85
Gráfico de Controle 30 - amplitudes, parâmetro Vp	85
Gráfico de Controle 31 - medidas, parâmetro BAR	88
Gráfico de Controle 32 – amplitudes, parâmetro BAR	88

Gráfico de Controle 33 - medidas, parâmetro Amp	91
Gráfico de Controle 34 - amplitudes, Amp	91
Gráfico de Controle 35 - medidas, parâmetro L	93
Gráfico de Controle 36 - amplitudes, parâmetro L	94
Gráfico de Controle 37 - medidas, parâmetro m	96
Gráfico de Controle 38 - amplitudes, parâmetro m	96
Gráfico de Controle 39 - medidas, parâmetro a	98
Gráfico de Controle 40 - amplitudes, parâmetro a	99
Gráfico de Controle 41 - medidas, parâmetro p	101
Gráfico de Controle 42 - amplitudes, parâmetro p	101

RESUMO

A busca por competitividade, palavra de ordem deste final de século, leva as pequenas empresas nacionais a procurar novos métodos produtivos, visando o alcance de níveis mais elevados de qualidade, na tentativa de reduzir custos e maximizar a produtividade.

O presente trabalho apresenta um projeto de engenharia onde faz-se um delineamento do processo de fabricação por extrusão de forro de PVC, um perfil rígido utilizado na construção civil. Este estudo utiliza métodos estatísticos de análise, afim de averiguar a viabilidade de implantação de um programa de controle estatístico de processo (CEP) na empresa onde foi realizado. Durante o andamento do trabalho, algumas características importantes do processo foram alteradas, de forma que pode-se então acrescentar um estudo comparativo dessas novas condições. São discutidos aqui os aspectos mais importantes da extrusão polimérica, apresentadas algumas características peculiares do processo na empresa onde foi realizado o trabalho e, finalmente, estudada uma linha real de produção, que foi avaliada quanto a sua eficiência e capacidade.

De maneira geral a empresa se mostrou em condições para evoluir em sua sistemática de controle do processo. Apesar de existirem correções técnicas a serem feitas, o maior desafio a ser vencido está nas barreiras culturais estabelecidas.

Abstract

The fetching for competitiveness, word of order of this end of century, takes the small brasilian companies to look for new productive methods, aiming at reaches higher levels of quality, in the attempt to reduce costs and to maximize the productivity. This work presents a process delineation of manufacture for extrusion PVC roll shutters, an used rigid profile in the civil construction. This study uses statistical analysis methods, in order to inquire the implantation viability of a statistical process control program (SPC) in the company where it was carried through. During the course of the work, some important process features have been modified, of form that could be added a comparative study of these new conditions. The most important aspects of the polymer extrusion are argued here, presented some peculiar features of the process in the company where the work was carried through and, finally, studied a real production line, that was evaluated on its efficiency and capability.

The company showed in conditions to evolve in its process control systematics. Although some correction in the production has to be done, the biggest challenge is to break up the established cultural barriers.

1. Introdução

A extrusão polimérica é um dos mais importantes processos usados na indústria de materiais plásticos. Aproximadamente 60% de todo produto plástico passou por um processo de extrusão durante seu processamento. Este processo é utilizado para a preparação dos compostos poliméricos, granulação, coloração, assim como para a produção de produtos acabados ou semi-acabados como filmes, tubos, barras, perfis, cabos, etc.

É um processo contínuo que consiste basicamente em aquecer o material plástico a partir do estado sólido até que fique susceptível a moldagem plástica, força-lo através de uma matriz que lhe de forma e resfria-lo, obtendo um produto de seção transversal constante.

As linhas de produção para este processo constituem uma sequência lógica de equipamentos e instrumentos de medição e controle, constituída basicamente de uma extrusora, com instrumentos que medem pressões e temperaturas, matriz, unidade de refrigeração, tração, corte e armazenagem do produto (1) .

Os métodos empregados para a avaliação este processo visam gerar dados confiáveis, cuja interpretação estatística possa avaliar sua produtividade e a qualidade do produto gerado. Estes métodos partem do princípio da existência de uma variação natural nas medidas de parâmetros do processo e que seu estudo reverte nas informações objetivadas acima.

O controle estatístico de processo (CEP) é uma filosofia de produção que visa analisar continuamente o processo de forma a assegurar a eficiência e a qualidade do mesmo, garantindo a qualidade dos produtos gerados (3).

Este trabalho tem por objetivos descrever os principais aspectos do processo de extrusão polimérica e estudar estatisticamente este processo numa linha de produção real. Esta será avaliada quanto à sua capacidade e estabilidade, de forma que possam ser apontados caminhos para um programa de controle estatístico e de otimização.

2. Revisão Bibliográfica

2.1. *Processo de Extrusão Polimérica*

2.1.1. Breve histórico do processo

A primeira máquina de extrusão de termoplásticos foi concebida na Alemanha, por volta de 1935 por Paul Troester e seu projeto derivava das máquinas de extrusão de borracha que eram utilizadas na época. Estas primeiras máquinas eram extrusoras a pistão com aquecimento a vapor ou extrusoras de rosca, cuja relação entre o comprimento e o diâmetro (L/D) era baixa, da ordem de três a cinco. Após 1935 estas máquinas evoluíram para sistemas de aquecimento elétrico e aumento da relação L/D . Nesta época foram desenvolvidos os princípios básicos de funcionamento da extrusora dupla-rosca, por Roberto Colombo e Carlo Pasquetti, na Itália. Colombo adquiriu patente sobre a extrusora de dupla-rosca de co-rotação em vários países e muitas empresas adquiriram o direito de uso sobre estas patentes. Pasquetti seguiu um conceito diferente, desenvolveu e patenteou a extrusora dupla-rosca de contra-rotação.

As primeiras análises detalhadas do processo se concentravam no transporte de material. Por volta de 1950 começaram a surgir estudos teóricos do processo com alguma frequência. Nesta época os primeiros estudos quantitativos em transporte de sólidos foram publicados por Darnell e Mol. Uma importante conferência para o desenvolvimento das idéias teóricas sobre extrusão polimérica aconteceu em 1953 na 122^ª conferência da ACS (American Chemical Society). Foi só a partir de 1965 que todo o processo de extrusão polimérica pode ser descrito quantitativamente. Os esforços teóricos desde então concentram-se em estender e generalizar a teoria de extrusão e desenvolver técnicas numéricas e computacionais para resolver equações as quais não podem ser resolvidas por métodos analíticos (2).

2.1.2. Linha de Produção

A linha de produção tem papel primordial na qualidade do produto final assim como na eficiência do processo produtivo. A configuração da linha pode variar muito de acordo com o produto extrudado. Uma linha de produção de perfis rígidos conta com os seguintes elementos:

- extrusora
- matriz
- calibrador
- puxador
- serra
- unidade de coleta de peças acabadas

Este conjunto de equipamentos foi montado levando-se em conta a forma do perfil, seu peso, espessuras de paredes e tipo de material.

A forma do perfil determina o projeto da matriz e do calibrador, o tipo de material indica o tipo de extrusora. Por exemplo, uma dupla-rosca pode ser alimentada com composto na forma de pó ou granulado, enquanto uma mono-rosca só processa eficientemente o composto granulado. O puxador e a serra também dependem da forma e das dimensões do perfil, porém estes tendem a se ajustar a uma variedade maior de perfis (1). A linha estudada foi planejada especificamente para um único produto, o que assegura uma adequação do projeto da linha ao produto extrudado. O esquema básico de uma linha de extrusão de perfis é mostrado abaixo.

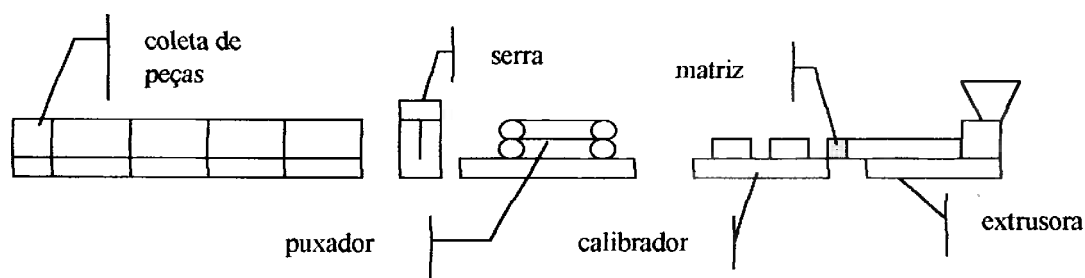


Figura 1 - esquema de uma linha de produção de extrusão de perfis.

2.1.3. Extrusora

A extrusora utilizada no processo é um equipamento de dupla-rosca e contra-rotação. Este tipo de extrusora é comumente encontrada na indústria de perfis de materiais termicamente sensíveis como o PVC e algumas operações especiais como composição, remoção de umidade e voláteis, pigmentação e para reações químicas (2).

Esta extrusora é constituída de um cilindro em cujo interior giram duas roscas. O material polimérico, neste caso, é transportado através do cilindro pelo movimento das roscas entre o espaço dos canais de seus filetes. O transporte de material na direção da saída da extrusora é resultado das forças de contato entre o material e o cilindro da extrusora. As forças entre o material polimérico e a rosca promovem apenas rotação do material e agem de forma contrária ao movimento do material.

Já o transporte através da matriz se dá por diferença de pressão entre a entrada e a saída da matriz. A saída está a pressão atmosférica enquanto a entrada se encontra a pressão gerada pela rosca na zona de calibragem. A saída de material é, portanto, controlada pela interação entre a extrusora e a matriz (8). O gráfico 1 abaixo representa as curvas características da extrusora e da matriz, que relacionam a vazão de material com a pressão necessária para produzir tal vazão.

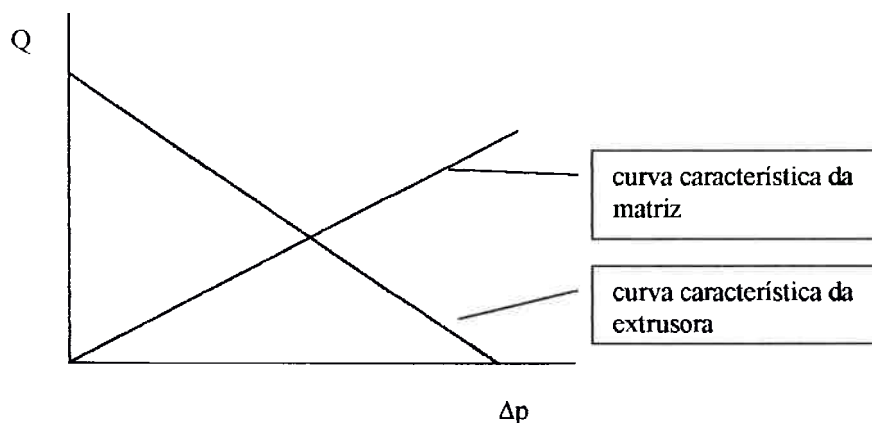


Gráfico 1 - Curva característica do material e da extrusora.

A curva característica do sistema é determinada por muitos fatores entre os quais sua geometria, velocidade de rosca, temperatura, e a profundidade dos canais da rosca, assim como a viscosidade do material fundido e a pressão. Para velocidades constantes de

rotação da rosca o fluxo de material que sai da extrusora decresce a partir de um máximo, quando não é oferecida nenhuma resistência, no caso da ausência da matriz, até zero, para um bloqueio completo. O fluxo de material pela matriz tem comportamento contrário e depende da diferença de pressão entre a entrada e a saída da matriz. A diferença de pressão na matriz irá aumentar com o aumento da resistência ao fluxo na matriz ou pelo aumento da viscosidade aparente do material (11).

O transporte de material é feito em três estágios que além de deslocar a massa de material promove seu aquecimento, plastificação, compressão e o força contra a saída do cilindro onde esta a matriz que dará forma ao material. No cilindro da extrusora existem diferentes zonas, que se distinguem pelos diferentes formatos da rosca. Na zona de alimentação, onde o material apresenta uma densidade aparente reduzida, os canais são mais profundos. A zona de compressão tem os canais progressivamente mais rasos, é nela que ocorre a plastificação devido ao calor fornecido pelas resistências e ao trabalho mecânico de rotação da rosca. A zona de calibragem tem a função de controlar a vazão da máquina, gerar a pressão necessária para vencer a resistência da matriz e promover uma boa homogeneização do material fundido.

O cilindro deve ter sua temperatura controlada em cada uma de suas zonas, para que o material se comporte da forma desejada em cada etapa de seu processamento dentro da extrusora. Isto é, na entrada do material, na zona de alimentação, deve ser promovido o aquecimento do material sem que haja amolecimento ou fusão dos sólidos, para só depois, na zona de compressão, ocorrer a plastificação do material com o aumento da temperatura. Na zona de calibragem o material deve estar todo fundido e a temperatura deve ser ajustada de forma a garantir um boa pressão no material. Este aquecimento é geralmente produzido por resistências elétricas envolta do cilindro e do cabeçote e pode ser controlado por ventaneiras ou um sistema de refrigeração à água ou óleo, para que se mantenha sempre a temperatura de cada região dentro de faixas muito estreitas.

Este controle é feito por intermédio de termopares acoplados a sensores eletrônicos microprocessados que verificam a temperatura e acionam o aquecimento ou resfriamento da zona afim de manter estável a temperatura. Este controle é necessário uma vez que o próprio processo de extrusão gera calor, denominado “aquecimento viscoso”, pelo cisalhamento do material no interior da extrusora e o contato deste com a rosca e o cilindro. Assim, os controladores tem que ajustar a potência enviada a resistência de cada uma das zonas, assim como determinar o acionamento e desligamento da refrigeração, afim de compensar esse aumento de temperatura, além das perdas de

calor para o ambiente, para que o sistema funcione em condições aproximadamente adiabáticas.

A rosca necessita de um motor que é geralmente de corrente contínua e elevada potência, porém novas tecnologias possibilitaram a aplicação de motores de corrente alternada de menor potência conjugados com dispositivos eletrônicos de ajuste e sistemas mecânicos que produzem elevação do torque gerado pelo motor e transmitido à rosca. Este torque, além de um mancal robusto são necessários para vencer a pressão de retorno do material (8).

A velocidade das roscas na região de contato tem a mesma direção, como pode ser visto na figura 2, abaixo:

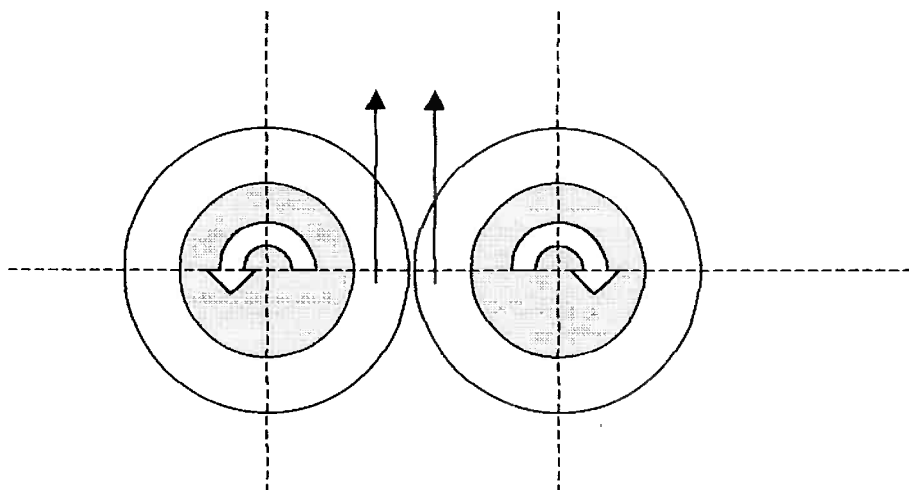


Figura 2 - soma de velocidades na região de contato entre roscas de contra-rotação.

Com isto o material tende a passar mais rapidamente por esta região do que nas zonas não em contato. Quanto menor a distância entre as roscas mais acentuado será este efeito, que pode causar um acúmulo de material na entrada da zona de contato, causando uma leve flexão das roscas. O aumento da velocidade da rosca também agrava este efeito.

A velocidade de saída máxima teórica para este tipo de extrusora é dado por:

$$V_{\max} = 2pNV$$

segundo a referência (2), onde p é o número de filetes paralelos, N a velocidade da rosca e V o volume dos canais. Esta equação só é válida assumindo-se que os canais

estejam totalmente preenchidos. A velocidade axial V_a é dada, segundo a mesma referência, por:

$$V_a = \pi D n \tan \phi$$

onde D é o diâmetro da rosca e ϕ é o ângulo de hélice (2).

As variáveis mais importantes no processo de extrusão podem ser classificadas em: pressão, temperatura, potência e velocidade. Especificamente, são de grande importância para o monitoramento do processo:

- pressão na entrada da matriz, que é a pressão máxima no corpo da extrusora quando operando em condições normais.
- pressão de retorno, que é a pressão que o mancal da rosca suporta.
- velocidade de rotação da rosca.
- perfil de temperaturas do material ao longo do cilindro.
- perfil de temperaturas do cilindro, na planta estudada este é o único perfil de temperaturas disponível. Ele é uma aproximação razoável da temperatura do material.
- Consumo de energia do motor, medido através de um amperímetro.

É através da observação dessas variáveis somadas aos valores dimensionais do produto, que o operador faz correções no processo quando julga necessário. Algumas variáveis como a velocidade de rotação da rosca ou as temperaturas do cilindro, podem ser alteradas diretamente pelo operador, as demais acima citadas, assim como o aspecto dimensional do produto apenas fornecem respostas às alterações efetuadas. Outras variáveis podem ser controladas pelo operador no caso específico da planta estudada, como a velocidade da linha, que varia alterando-se a velocidade do puxador.

2.1.4. Matriz

A matriz de extrusão tem por finalidade distribuir o material polimérico pelos seus canais de fluxo, que darão a forma do produto, de forma a manter a velocidade uniforme

em diferentes regiões, a medida que o material sai da extrusora. Esta distribuição é influenciada pelas características do material, a geometria dos canais, a vazão de saída da matriz e da distribuição de temperaturas pela matriz. Todas estas variáveis são interdependentes, por exemplo, se a geometria dos canais for feita especificamente para um material em certas condições de vazão e temperatura, uma alteração num desses parâmetros fará com que a geometria adotada já não seja a ótima.

Diferente da extrusão de uma forma de geometria mais simples, um perfil extrudado traz dificuldades ainda maiores ao projeto da matriz no aspecto de que pode ser muito complicado prever o fluxo de material dentro dos canais para esta geometria complexa de perfil (2). Na extrusão de perfis existem duas classes distintas de matrizes: “plate dies” e “streamlined-entry dies”. As figuras 3 e 4 apresentam, respectivamente um esquema desses dois tipos de matrizes.

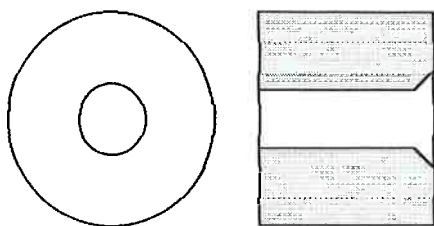


Figura 3 - Plate die

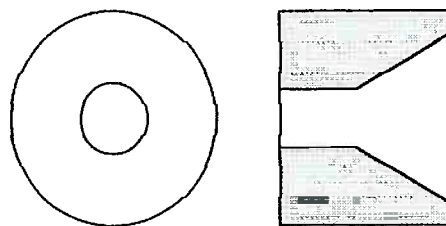


Figura 4 - streamlined-entry die

A diferença entre as duas é a maneira como conduzem o fluxo de material até a zona de conformação propriamente dita, o paralelo da matriz e o comprimento do paralelo. Para um material termicamente sensível como o PVC, o fluxo de material deve ser o mais contínuo possível e devem ser evitadas quaisquer regiões que favorecem a estagnação de material. Tais regiões promoveriam a degradação do polímero e comprometeriam a qualidade do produto. A matriz do processo estudado é semelhante a mostrada na figura 5, abaixo. É composta de várias partes que são justapostas e sua geometria cria canais com diferenças suaves de espessura, de forma a evitar a estagnação do material (11).

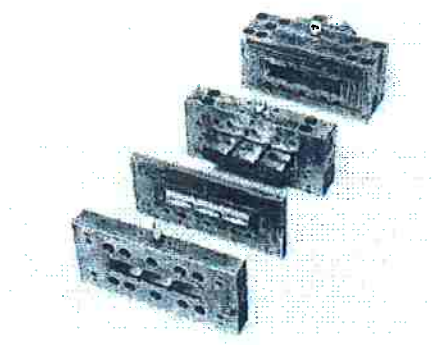


Figura 5 - matriz de perfil rígido
Fonte: Referência Bibliográfica 1

2.1.5. Calibração

A unidade de calibração confere as dimensões finais ao produto. A presença, forma e tipo de calibrador varia muito de acordo com o material e a geometria do perfil a ser extrudado. Na planta em estudo, o calibrador é uma peça por onde o perfil passa imediatamente após sair da matriz, é submetido a vácuo, sendo que as paredes do

calibrador tem o mesmo formato das paredes externas do perfil, logo existe contado entre o perfil e a parede do calibrador, que é refrigera com água, de forma que o perfil perde calor ao passar pelo calibrador, diminuindo sua temperatura. Esta queda de temperatura solidifica o material, com as dimensões estipuladas pela geometria do calibrador e a aplicação do vácuo.

2.1.6. Balanço Energético

A principal função da extrusora é aquecer o material a uma dada temperatura para depois conforma-lo. É fácil perceber que o maior gasto de energia é a parcela relativa ao aquecimento do material. Os principais fatores que influenciam no balanço energético de uma extrusora são:

- a potência mecânica transmitida à rosca, z (Nm/s)
- a potência elétrica consumida nas resistências, q (Nm/s)
- o calor específico médio do material plástico, C (Nm/m³°C)
- a taxa volumétrica de extrusão, Q (m³/s)
- a elevação de temperatura do plástico, ΔT (°C)
- o aumento de pressão do plástico, ΔP (N/m²)
- a taxa de dissipação de calor por radiação e condução, H (Nm/s)

Estes fatores estão relacionados pela seguinte equação:

$$z + q = CQ\Delta T + Q\Delta P + H$$

Se toda a perda de calor (H) fosse compensada pelo calor fornecido pelos aquecedores (q), o sistema seria adiabático. Porém estas condições são difíceis de ser observadas na prática uma vez que parte do calor gerado mecanicamente é dissipado por condução no cilindro ou radiação. Na realidade, porém, as resistências de aquecimento e mecanismos de controle de temperatura periodicamente acionados

permitem descrever aproximadamente o sistema como se fosse adiabático, logo a equação é reduzida a:

$$z = CQ\Delta T + Q\Delta P$$

O termo relativo a pressão é muito pequeno em comparação ao da energia térmica, em condições adiabáticas 90% da potência seria consumida na elevação de temperatura do material plástico.

Assim sendo pode-se estimar a potência necessária para extrudar um certo material com base na sua entalpia, calculada por $C\Delta T$. Pode-se ainda estabelecer uma relação entre a potência mecânica transmitida a rosca, z e a taxa volumétrica de extrusão, Q (m^3/s), viscosidade, η (Ns/m^2), e taxa de cisalhamento do material, $\dot{\gamma}$ (s^{-1}).

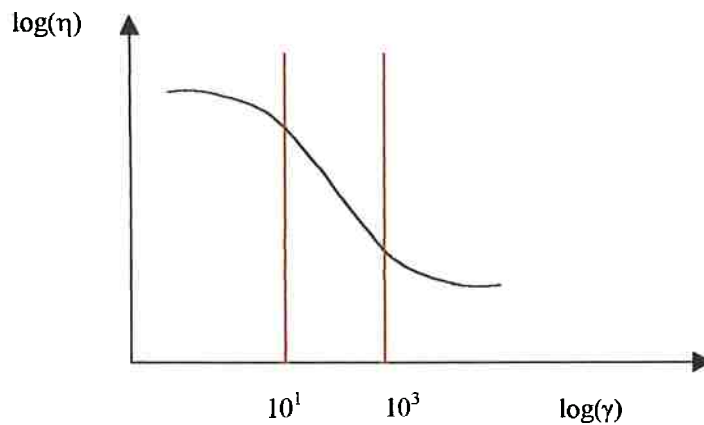
$$z = Q\eta\dot{\gamma}$$

Geralmente há uma relação linear entre o $\log(\eta)$ e $\log(\dot{\gamma})$ de forma que pode-se escrever:

$$\eta = m \cdot \dot{\gamma}^{(n-1)}$$

$$Z = Q \cdot m \cdot \dot{\gamma}^{(n-1)} \cdot \dot{\gamma} = Q \cdot m \cdot \dot{\gamma}^n$$

onde m é o índice de consistência. O índice de potência, n , é igual ao coeficiente linear da curva no gráfico $\log(\eta) \times \log(\dot{\gamma})$, esquematizado no gráfico abaixo:

Gráfico 2 - $\log(\eta) \times \log(\dot{\gamma})$.

Como,

$$\dot{\gamma} = \pi DN/h$$

Sendo D o diâmetro do cilindro (mm), N a velocidade da rosca (rpm), e h a profundidade do canal na zona de calibragem (mm), que é onde se dá a maior parte do trabalho mecânico. Portanto o trabalho mecânico pode ser dado por (8):

$$z/Q = (\pi DN/h)^n$$

2.2. Materiais Poliméricos

2.2.1. Propriedades Reológicas

Os materiais exibem comportamentos diferentes face a deformação. Os sólidos, como os metais, apresentam uma resistência à deformação, são capazes de voltar à sua forma originais quando as tensões não ultrapassam certos limites, isto é chamado de deformação elástica. Outros materiais, como os líquidos, podem escoar devido ao seu próprio peso e se deformar irreversivelmente, caracterizando um comportamento viscoso.

Os polímeros apresentam normalmente os dois tipos de comportamento e são por isso chamados de materiais viscoelásticos. Geralmente, quando sólidos, os polímeros apresentam comportamento viscoso para grandes deformações e elástico para pequenas deformações. A altas temperaturas os polímeros apresentam viscosidade extremamente

elevada, enquanto a viscosidade da água é 10^{-3} Pa a viscosidade de polímeros varia entre 10^2 a 10^8 Pa. Esta viscosidade pode ainda depender da taxa de deformação. A viscosidade em polímeros é especialmente sensível às tensões de cisalhamento. A tensão de cisalhamento é, por definição, igual a força de cisalhamento dividida pela área resistente, ou força tangencial por unidade de superfície

$$\sigma = K/A$$

que provoca uma certa deformação γ , então o módulo de cisalhamento fica definido por,

$$G = \sigma/\gamma$$

Um fluido movendo-se entre duas superfícies paralelas separadas por uma distância y irá apresentar um gradiente de velocidade $\dot{\gamma}$. Pela lei de Newton a viscosidade é igual ao quociente da tensão de cisalhamento por este gradiente.

$$\eta = \sigma/\dot{\gamma}$$

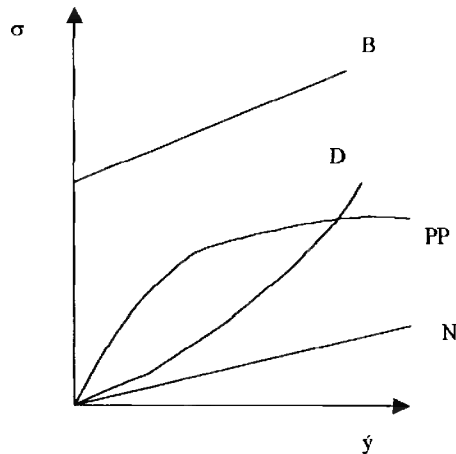
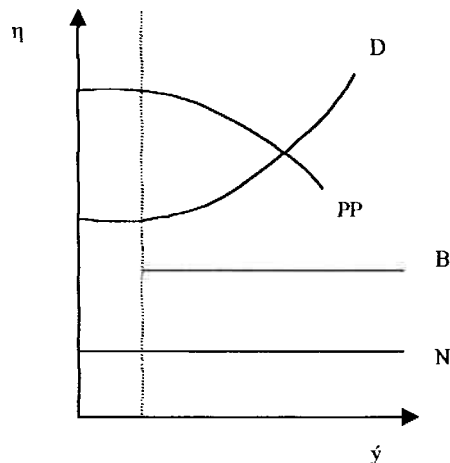
Os sistemas que obedecem a lei de Newton são conhecidos como fluidos Newtonianos. O inverso da viscosidade é a fluidez, $1/\eta$. Dividindo-se a viscosidade pela densidade (ρ) define-se outra grandeza, a viscosidade cinética.

$$\nu = \eta/\rho$$

A água é um exemplo de fluido newtoniano, assim como os polímeros a baixas taxas de deformação. Neste caso a tensão de cisalhamento é diretamente proporcional ao gradiente de deformação.

Porém, durante o processamento, os polímeros podem sofrer altas taxas de deformação e passam a se comportar como fluidos não-Newtonianos, onde a tensão e a taxa de deformação deixam de ser proporcionais, e portanto a viscosidade pode variar em instantes distintos com a taxa de cisalhamento.

Existem vários tipos de dependência entre taxa de cisalhamento e viscosidade para fluidos não-newtonianos. Os gráficos 3 e 4, abaixo, apresentam alguns tipos de comportamentos distintos.

Gráfico 3 - $\sigma \times \dot{\gamma}$ Gráfico 4 - $\eta \times \dot{\gamma}$

Nos gráficos, N representa as curvas para um material newtoniano, PP para um pseudoplástico, B para um plástico de Bingham e D para um material dilatante.

Se a viscosidade é decrescente com a taxa de cisalhamento o material se diz pseudoplástico e se a viscosidade é crescente é chamado dilatante.

Os plásticos são materiais intermediários entre um sólido e um líquido no que diz respeito a sua curva $\sigma \times \dot{\gamma}$. Um exemplo é o plástico de Bingham. Submetido a uma tensão σ abaixo de um valor σ_y ($\sigma < \sigma_y$) o plástico se comporta como um sólido e para σ maior do que σ_y se comporta como um fluido que escoar sob ação de $\sigma - \sigma_y$. Os materiais pseudoplásticos, dilatantes e os plásticos com $\sigma > \sigma_y$ são materiais não-newtonianos independentes do tempo, para os quais a tensão de cisalhamento admite um valor único para uma dada taxa de cisalhamento, através de uma função não linear do tipo $\dot{\gamma} = f(\delta V_x / \delta y)$. Os materiais não-newtonianos dependentes do tempo não admitem um valor único da taxa de cisalhamento para uma dada tensão, apresentando uma relação funcional bem mais complexa que a dos materiais anteriormente citados. Nesta categoria situam-se os materiais tixotrópicos e reopéticos, sob condições isotérmicas, a viscosidade dos primeiros diminui com o tempo e a dos segundos aumenta. É o caso de tintas e alguns produtos alimentícios (13)(14).

2.2.2. PVC – Cloreto de Polivinila

As resinas vinílicas fazem parte do grupo das poliolefinas e caracterizam-se por serem polímeros derivados do acetato de vinila. O monômero cloreto de vinila é obtido pela reação de acetileno com ácido clorídrico. A sigla PVC vem do inglês “polyvinyl chloride”. A polimerização ocorre em recipiente fechado sob pressão e aquecimento, a partir de uma emulsão aquosa de cloreto de vinila, utilizando peróxido de benzoíla como catalisador. A polimerização pode ainda ser feita por suspensão.

O policloreto de vinila e seus copolímeros podem variar de forma, peso, tamanho e distribuição de partículas. Acrescentando-se plastificantes, como o di-butil ftalato, di-cresil fosfato ou di-octil ftalato, suas propriedades se alteram radicalmente. Os produtos extrudados de PVC plastificado na forma de tubo, barras ou perfis são utilizados como substitutos de materiais não ferrosos. O PVC decompõe-se se superaquecido, liberando ácido clorídrico. Para contornar este problema deve-se acrescentar à formulação estabilizadores, geralmente silicato de chumbo e o estearato de chumbo, que se combinam com o ácido clorídrico. Durante o processamento, porém, deve-se tomar cuidado com a temperatura do material. Quanto maior a temperatura maior o risco de decomposição. Além de prejudicar o produto o ácido clorídrico também ataca o equipamento. A rosca que trabalha o PVC deve ser de aço inoxidável, para maior resistência a esse ataque. Na máquina estudada, até mesmo o cilindro é de aço inoxidável.

O monômero, cloreto de vinila, foi obtido em 1835 mas apenas em 1872 é que pode ser polimerizado. Foi apenas em 1912 que Klatte, na Alemanha e Ostromislensky na Rússia, independentemente patentearam métodos de produção do cloreto de polivinila. Porém o PVC não foi explorado comercialmente até 1930. Hoje em dia, devido a sua grande variedades de propriedades e baixo custo, é talvez o mais versátil dos plásticos (9).

O cloreto de polivinila tem estrutura similar ao polietileno, porém apresenta um átomo de cloro substituindo um átomo de hidrogênio em um de cada dois carbonos alternadamente, figura 6. Devido ao tamanho dos átomos de cloro a estrutura é pouco compacta e o polímero tende a ser quase totalmente amorfo com índice de cristalinidade ao redor de 11%.

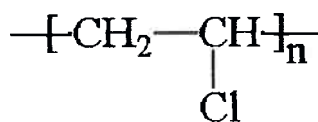


Figura 6 - monômero cloreto de vinila

2.2.2.1. Propriedades

Mesmo não tendo um valor único de ponto de amolecimento, e começando a amolecer em baixas temperaturas, o efeito do átomo de cloro faz com que haja um aumento na atração intermolecular aumentando a dureza do material, comparando-o com o polietileno, fazendo-o resistente ao escoamento sob pressão a temperaturas bem abaixo de 160°C; em tais temperaturas é difícil evitar a decomposição, descoloração ou perda de resistência mecânica. O átomo de cloro também é responsável pelo caráter bipolar da molécula de PVC. Isto limita o uso desse material em aplicações onde se envolva alta frequência, porém, ele pode ser soldado por técnicas de radio frequência. Outra característica relativa ao átomo de cloro é o caráter auto-extinguível do PVC, propriedade rara dentre os termoplásticos.

Como já foi discutido as propriedades do PVC variam muito com a composição ou o tipo de plastificação envolvido, a tabela 1 a seguir mostra valores típicos para PVC rígido, que é o material em estudo neste trabalho.

Propriedade	unidade	Valor típico
Densidade	g/cm ³	1,39
zona de amolecimento	°C	75-85
coeficiente linear de expansão térmica	1/°C	7 x 10 ⁻⁵
Condutividade térmica	cal/cm.s.°C	3,8 x 10 ⁻⁵
Calor específico	cal/g.°C	4,5 x 10 ⁻⁴
Flamabilidade		auto-extinguível

Tabela 1 - propriedades do PVC rígido
Fonte: Referência Bibliográfica 13

2.2.2.2. Aplicações

Graças a sua versatilidade e ao baixo custo, o PVC é intensamente utilizado em uma grande variedade de aplicações que necessitam de boa resistência química e a abrasão e boa tenacidade dentro dos limites dos materiais plásticos a temperatura ambiente. Abaixo algumas utilizações do PVC, segundo o processo de conformação:

- Por extrusão

Rígido: Tubos de água potável ou não potável, instalações da indústria química, sistemas de drenagem e irrigação, forro, piso, etc.

Flexível: isolamento de cabos elétricos, faixas decorativas, etc.

- Por injeção

Rígido: Conexões para tubos, conduites elétricos, caixas de junção, ferramentas leves, carcaça de aparelhos eletrônicos, cadeiras, etc.

Flexível: Brinquedos, pulseiras de relógio, calçados, etc.

2.3. Métodos Estatísticos

O controle estatístico do processo consiste no uso de ferramentas estatísticas para o monitoramento e controle de processos de produção. O objetivo do CEP é assegurar e melhorar a qualidade dos produtos, qualidade esta, determinada pelo quão próximo uma certa característica do produto está em relação ao valor especificado. Por exemplo, quanto mais próximo for o diâmetro interno de um cilindro do seu valor desejado, tanto melhor será a qualidade deste cilindro neste aspecto.

Para se chegar a este objetivo o CEP deve prevenir defeitos. Aqui esta uma diferença sutil, mas muito importante entre o CEP e processos tradicionais de controle de qualidade que tem seu foco no produto. A meta de um controle de produto é garantir que a variação de uma característica do produto esteja dentro dos padrões especificados. Este tipo de controle falha ao analisar peças cuja característica avaliada esteja muito próxima dos limites especificados, por exemplo, se o diâmetro interno nominal de um cilindro deve ser 1,000 com tolerância de 0,01, uma peça com 1,009 seria considerada boa, enquanto uma peça com 1,011 seria rejeitada. Observa-se que embora a primeira peça

esteja dentro da tolerância e a segunda não, suas dimensões são muito próximas e ambas distantes do valor nominal. O CEP envolve controle de qualidade em cada etapa da produção. Os padrões e tolerâncias são especificados para cada etapa de produção. Quando uma tolerância é ultrapassada ou observa-se uma tendência disso ocorrer a etapa é freada e pode-se efetuar as medidas de ajuste cabíveis (3).

2.3.1. Teoria do CEP

A teoria do CEP foi desenvolvida na metade dos anos vinte, por Dr. Shewhart, do Bell Telephone Laboratories, onde analisou vários processos deferentes e pode constatar que, de alguma forma, todos os processos de fabricação apresentam algum nível de variação. A idéia por trás desse conceito é de que os produtos e seus processos de manufatura variam segundo leis naturais e que a origem dessa variação é a mesma que controla o mundo em que vivemos. Esta lei de variação natural é experimentada por nós a todo tempo, por exemplo: o tempo que gastamos para ir ao trabalho todos os dias, a altura das pessoas de um certo grupo, o número de nascimentos e portes em uma cidade por ano, etc.

Shewhart pode concluir que existem dois tipos de variação, uma estável inerente ao processo, chamada variações aleatórias, e outra instável ou variação intermitente como a chamou, que poderia ser modificada ou alterada com pequenos ajustes ou modificações no processo (4).

2.3.2. Os Elementos do Processo

Para entender melhor a natureza da variação do processo convém separa-lo em quatro elementos distintos. A variação do processo é parte desses elementos ou da interação entre eles.

Estes elementos são:

- Equipamento
- Matéria Prima
- Método
- Pessoal

A variação provocada pelo equipamento ocorre devido ao próprio desgaste das peças, flutuação em velocidades, temperaturas e vibrações. A própria voltagem da rede, 220 volts, pode variar numa faixa de dez por cento; esta variação normal irá, de alguma forma refletir-se nas características do produto.

A matéria prima introduz variações pois não há como garantir uma homogeneidade perfeita no material que constantemente é processado. Todos os itens do composto vêm com suas propriedades especificadas, apontando valores de parâmetros, como composição e dureza, dentro de uma faixa de tolerância. Apenas com as variações possíveis dentro dessas faixas é introduzida uma variação que deve ser refletida no produto.

Os métodos de produção são geralmente mantidos, baseados nos métodos consagrados de produção. Por exemplo, a inicialização de uma máquina segue alguns procedimentos padrões como aquecer o canhão antes da matriz, ou imprimir ventilação forçada antes que o vácuo seja ligado no calibrador. Estes entre outros procedimentos são resultados de muitos anos de experiência, mas são tão susceptíveis a variações quanto a matéria prima ou o equipamento. O tempo exato de aquecimento varia, as velocidades iniciais variam, o comprimento de corte varia e assim por diante. Durante o processamento também existem muitos métodos de trabalho que geram variações no produto.

Finalmente o último elemento que introduz variações no processo: pessoas. Mesmo que os operadores sigam normas rígidas de operação, a própria forma de execução dessas regras variam de um operador para outro, ou para instantes diferentes num mesmo operador. Mesmas pessoas com o mesmo nível de treinamento e experiência introduzem variações no processo (5).

A implantação do CEP é realizada através de etapas ou passos definidos, num total de sete:

1. Criar condições que permitam a solução de problemas
2. Treinamento em CEP e tecnologia de processo
3. Determinar os problemas do processo e variáveis
4. Usar CEP para trazer o processo sob controle
5. Determinar a capacidade do processo
6. Implementar um plano para melhora do processo
7. Identificar próximo problema

A resolução de problemas pode ser feita com o auxílio de técnicas de diagnósticos, que empregam vários diagramas como os diagramas de causa e efeito, desenvolvidos pelo Dr. Kaoru Ishikawa. O diagrama causa e efeito básico lista causas prováveis para o problema. Derivam desse tipo de diagrama outros dois, diagramas de análise de variação, que analisam as causas da variabilidade em um processo, e o diagrama de análise do processo, que organiza as várias etapas estudadas num processo. Nos diagramas de causa e efeito uma breve descrição do problema é colocado no final de uma linha reta, como mostra a figura 7.

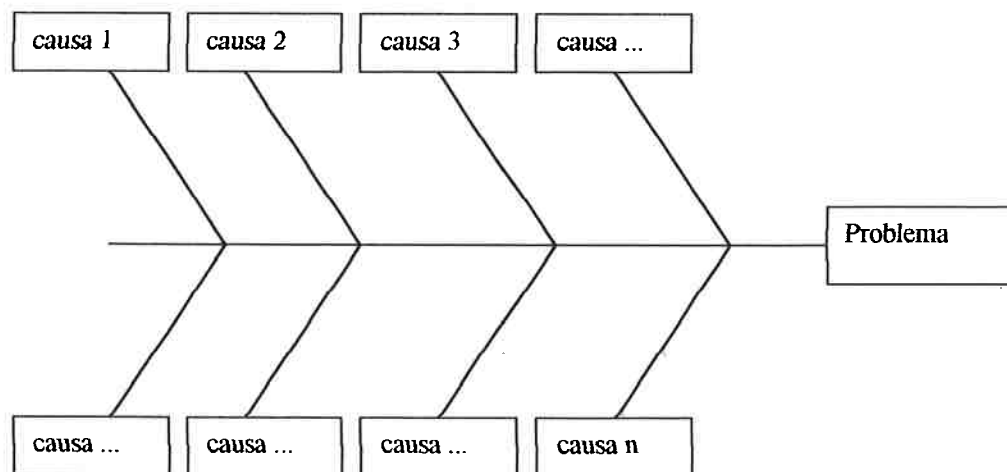


Figura 7 –Exemplo de diagrama causa e efeito

Lista-se uma série de possíveis causas que são unidas por linhas oblíquas à linha central. É importante fazer a lista a mais completa possível; o ideal é que se realize

reuniões entre todos os envolvidos no problema para que o maior número de causas possam ser levantadas (3).

Outra técnica de diagnóstico importante é o diagrama de Pareto. O princípio de Pareto nos diz que, se a variação descrita pela distribuição estatística de uma característica de qualidade tem muitas causas distintas, algumas dessas causas terão um efeito maior na variação total, outras menos efeito e finalmente a maioria terá pouco efeito. A figura 8 apresenta um diagrama esquemático (4).

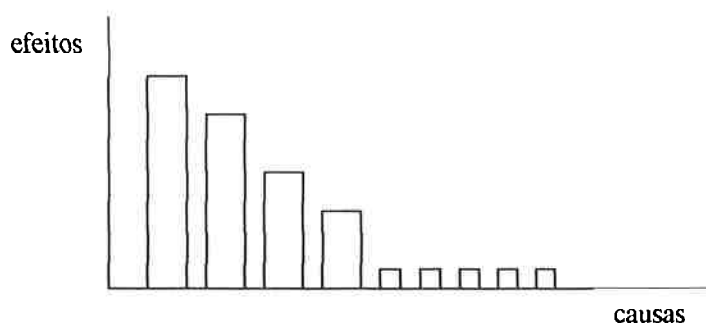


Figura 8 - diagrama de Pareto

2.3.3. Gráficos de Controle

Uma das ferramentas mais importantes no CEP são os gráficos de controle. Eles indicam como as variáveis de processo evoluem no tempo e permitem definir as oscilações naturais do processo. Assim é possível distinguir variações anormais, avaliar se mudanças introduzidas no processo alteram as oscilações naturais ou determinar qual a capacidade do processo em gerar uma faixa estreita de oscilação.

Existem vários tipos de gráficos de controle; os mais comuns são os de média (\bar{x}) e amplitude (R). Para se construir gráficos de controle, de maneira geral, é necessário definir o número de medidas ou amostras que formarão um subgrupo e com que frequência as medições serão realizadas. Deve-se então anotar as medições realizadas para cada subgrupo. Prossegue-se então calculando os parâmetros estatísticos relacionados, como somas, médias, amplitudes, desvios, etc, de cada subgrupo e posteriormente as linhas centrais dos gráficos. Com isto é possível calcular os limites superior e inferior de controle, respectivamente, LSC e LIC. Estes limites são baseados nas variações estatísticas do processo e podem ser estabelecidos através da média de três desvios padrão positivo e três desvios padrão negativo do parâmetro. Se o parâmetro é distribuído

normalmente, cerca de 99,73% de todos os valores cairão dentro dos limites de controle. Isto indica que se um ponto cai fora dos limites a chance de que a distribuição não tenha se alterado é de apenas 27 em mil. A partir desses dados pode-se construir os gráficos de controle, como os esquematizados abaixo. Percebe-se que todos os pontos permanecem dentro dos limites de controle (3)(4). Abaixo, figura 9, um exemplo de gráfico de controle \bar{x} & R.

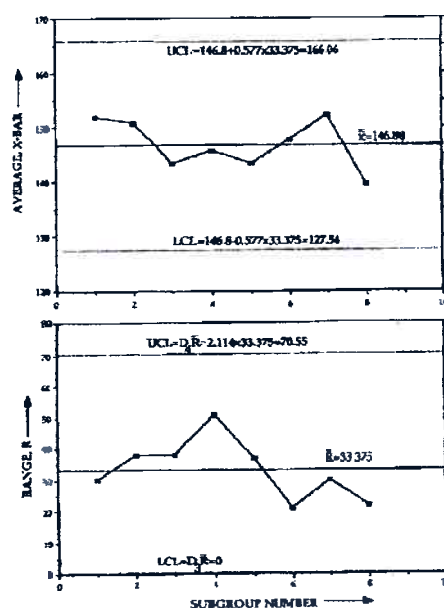


Figura 9 - exemplo de gráfico de controle.

Fonte: Referência Bibliográfica 3

A característica mais essencial de um processo estável é a maneira aleatória com que os dados se apresentam nos gráficos de controle, isto é, não são observados padrões em qualquer nível nos gráficos de controle. Além disso, processos estáveis também devem apresentar outras características como ter a maioria dos pontos próximos à linha central, ausência de modos tendenciosos e não possuir pontos fora dos limites de controle. Um processo instável pode ser detectado por diferentes comportamentos dos gráficos de controle, por exemplo, para gráficos \bar{x} & R são aplicadas regras como as que seguem:

- Um ou mais pontos fora dos limites de controle.
- Seis pontos consecutivos crescentes ou decrescentes.
- Padrões repetidos.

- Sete ou mais pontos acima ou abaixo da linha central.
- Alteração repentina na tendência central dos pontos.

Em um processo estável o gráfico \bar{x} não deve ter nenhuma relação com o gráfico R, uma falta de estabilidade pode fazer com que apareça uma interdependência entre os dois. O esquema abaixo, figura 7, mostra alguns casos de comportamento instável em gráficos \bar{x} & R.

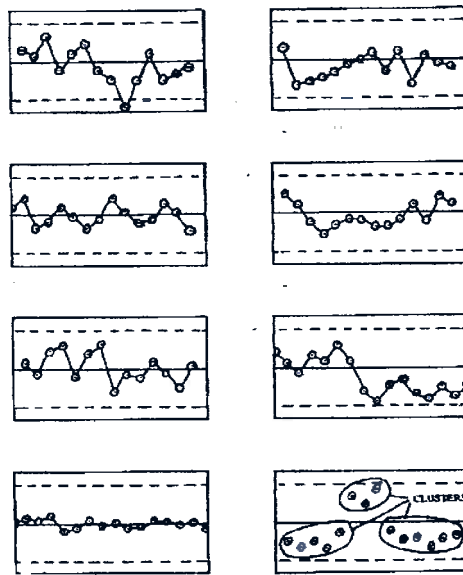


Figura 10 - padrões de instabilidade.

Fonte: referência bibliográfica 3

A utilização de gráficos de controle pode ser categorizada em três finalidades:

- Alcançar um estado de controle
- Monitorar um processo
- Determinar a aptidão de um processo

A utilização desses gráficos para se chegar a um estado de controle envolve a construção dos gráficos para o estado inicial, avaliação dos resultados, ajuste do processo, construção de novos gráficos sob as novas condições, reavaliação dos resultados e assim sucessivamente até que haja indicação de que o processo está sob controle. Os gráficos de controle podem monitorar um processo checando continuamente sua estabilidade. Esta

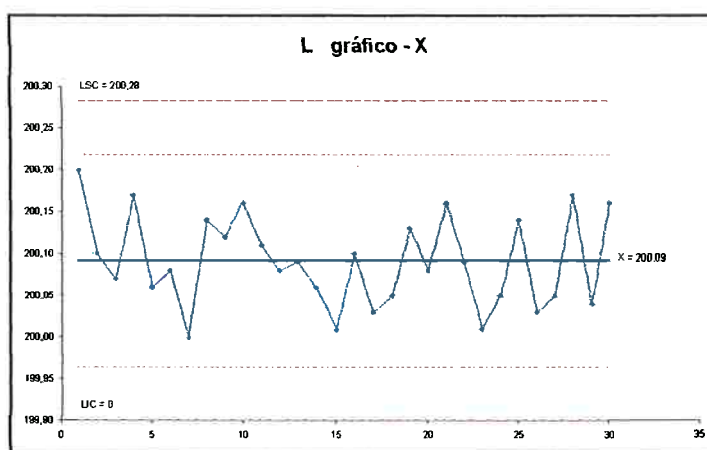
verificação ajuda a avaliar se a distribuição estatística da característica do produto segue as exigências de qualidade.

A aptidão de um processo pode ser avaliada se este estiver sob controle com base nos limites de controle estabelecidos e a tolerância empregada. Existem muitos tipos de gráficos de controle possíveis, construídos com diversos procedimentos estatísticos. Pode-se dividi-los em duas famílias: gráficos de variáveis e de atributos.

Dados variáveis são contínuos, como comprimento, peso ou PH. Atributos exigem somente medidas de classificação como boa ou má. Entre os tipos de gráficos de atributo, os principais são gráficos para fração não-conforme (p), que lida com a relação de itens não-conforme e o total de itens de um subgrupo e gráficos para número de unidades não-conforme, que tratam com a contagem direta do número de unidades não-conforme. Gráficos de atributo não são usados nesse estudo.

Os gráficos de variáveis fornecem mais informações do que gráficos de atributo para um mesmo tamanho de subgrupo (3)(4)(5).

Quanto a apresentação, os gráficos de controle neste trabalho trarão as linhas LCS e LCI em vermelho e os pontos em azul. Não serão inseridas legendas nos eixos x e y, uma vez que estão inequivocamente relacionados ao parâmetro apresentado, será ainda mencionado na região central superior o tipo de gráfico e o parâmetro apresentado. Abaixo, um gráfico de controle representando o padrão adotado.



2.3.3.1. *Gráfico de Controle para médias e Amplitudes.*

Recomenda-se a utilização de pelo menos 25 subgrupos de quatro ou cinco indivíduos (x). A média e a amplitude (R) de cada subgrupo é calculada e então a média desses valores. Os limites de controle 3s são calculados da seguinte forma:

$$\text{Linha central} = \text{média (média}(x)) = \bar{X}$$

$$\text{Limite superior de controle} = \bar{X} + A_2.(\text{média (R)})$$

$$\text{Limite inferior de controle} = \bar{X} - A_2.(\text{média (R)})$$

$$\text{Linha central} = \text{média (R)}$$

$$\text{Limite superior de controle} = D_4.(\text{média (R)})$$

$$\text{Limite inferior de controle} = D_3.(\text{média (R)})$$

Os valores dos fatores A_2 , D_3 e D_4 , dependem do tamanho do subgrupo e são fornecidos na Tabela A1, no Apêndice A.

Os gráficos para média e amplitude devem ser colocados um acima do outro, de forma que a média e a amplitude do subgrupo esteja na mesma linha vertical. Deve-se procurar por indicações de instabilidade, como as que foram apresentadas no item anterior (4).

2.3.3.2. *Gráficos de Controle para Medidas Individuais e Amplitudes*

Este gráfico não é tão sensível quanto o de médias, mas é útil quando apenas uma partida por observação está disponível ou, como neste trabalho, quando é esperado que exista mais variação entre os subgrupos do que dentro dos subgrupos, ou quando a variação entre subgrupos é mais importante do que a dentro do subgrupo. Num processo contínuo como a extrusão, que será avaliada nos capítulos seguintes, a tomada de uma medida consecutiva a outra trás pouca variação, o que determinará a estabilidade do processo é sua capacidade de manter essas medidas dentro das faixas de controle, por um período maior de tempo. Esta é uma diferença importante quando comparada a um processo que gera um certo número de peças por ciclo. Nestes processos cada peça pode ser avaliada como um indivíduo e a variação entre

esses indivíduos é uma boa avaliação da estabilidade do processo. Em um processo contínuo, há, na verdade uma única peça sendo produzida por um período muito longo de tempo. A instabilidade só pode ser convenientemente avaliada se as medidas forem tomadas com tempos suficientes para que os efeitos das variações possam ser percebidos.

Porém, por serem menos sensíveis é recomendado que se utilize os limites de dois desvios padrão. Estes limites podem ser comparados diretamente com a tolerância.

Sugere-se um mínimo de 30 indivíduos em subgrupos de 2. Os limites são calculados da seguinte forma:

Limites 3σ :

$$\text{Linha central} = \text{média}(x) = \bar{x}$$

$$\text{Limite superior de controle} = \bar{x} + E2.(\text{média}(R))$$

$$\text{Limite inferior de controle} = \bar{x} - E2.(\text{média}(R))$$

Limites 2σ :

$$\text{Linha central} = \text{média}(x) = \bar{x}$$

$$\text{Limite superior de controle} = \bar{x} + E2.(\text{média}(R))$$

$$\text{Limite inferior de controle} = \bar{x} - E2.(\text{média}(R))$$

$$\text{Linha central} = \text{média}(R)$$

$$\text{Limite superior de controle} = D4.(\text{média}(R))$$

$$\text{Limite inferior de controle} = D3.(\text{média}(R))$$

Os valores dos fatores E2, D3 e D4, dependem do tamanho do subgrupo e são fornecidos nas no Apêndice A: Tabela A2 para E2 e Tabela A1 para D3 e D4.

A detecção de instabilidade segue basicamente as mesmas dos gráficos de médias e amplitudes(4).

2.3.4. Pré-Controle

Pode-se fazer um controle simples do processo baseado nas tolerâncias, numa forma de pré-controle. Não é necessário avaliar a forma ou a estabilidade real da distribuição, simplesmente são fixadas zonas de atenção dentro de cada extremo da tolerância.

Toda vez que alguma característica é alterada, troca de operador, lote de material etc, é suposto um novo processo. Inicia-se tomando-se amostras consecutivas até que cinco sucessivas caiam dentro da zona central antes de que duas sucessivas caiam dentro da zona de atenção. Isto indica que a distribuição é limitada e próxima do centro o suficiente para produzir dentro dos limites de tolerância. Se o processo não fornece amostras nessas condições deve-se proceder com técnicas de diagnósticos imediatamente.

Uma vez qualificado, o processo é monitorado com medições periódicas de duas leituras, designado por (A,B). A intenção é proporcionar ao operador uma resposta muito rápida da tendência do processo. Os subgrupos de dois indivíduos garantem a base estatística baseado na regra dos produtos de probabilidades independentes:

$$P(A,B) = P(A).P(B)$$

Logo, a chance de uma medida ser incorreta é bruscamente reduzida pelo subgrupo de tamanho dois. As regras envolvidas com este tipo de abordagem foram desenvolvidas através de conceitos matemáticos e experiências operacionais. De fato, o tamanho da amostra dois é atribuído para maximizar a relação entre o risco de uma leitura errada e o tempo de resposta do teste, assim como a extensão das zonas de atenção é um compromisso entre a sensibilidade e a oscilação. Aqui a oscilação é uma indicação de que a distribuição real é maior que a tolerância. A frequência das medições leva em conta o custo e esforço de medições freqüentes contra o tempo e o risco de produzir um certo número de itens fora da tolerância. Recomenda-se que seis pares (A,B) sejam tomados entre cada ajuste para que não se tenha nenhum item fora da tolerância.

Qualquer processo onde o operador possa medir o parâmetro de interesse e fazer ajustes ao processo pode utilizar o pré-controle, mesmo sendo um processo contínuo. Não é se quer necessário qualquer restrição ou conhecimento da distribuição de frequências do

parâmetro estudado, isto é, a população não precisa ser normal nem o processo precisa estar sob controle estatístico.

Algumas considerações devem ser tomadas antes de se aplicar este controle. O pré-controle pode utilizar tolerância bilateral (a – figura 11), unilateral para leitura do indicador total (b – figura 12) ou unilateral com mínimo ou máximo (c – figura 13). Assim, deve-se fixar linhas de referência na metade da tolerância para (a) e (b) e a $\frac{3}{4}$ para (c), a área entre o valor nominal e esta referência é dito verde, delimitando a zona de segurança. Convém que se tenha no próprio instrumento ou próximo a ele este diagrama com as respectivas cores aplicadas. Entre a linha de referencia e os limites ou limite de tolerância, a área será amarela, é a zona de atenção. Abaixo as linhas de pré-controle.

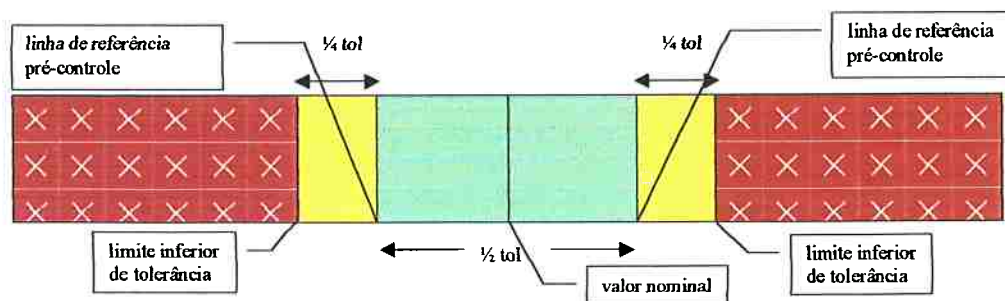


Figura 11 - linha de pré-controle para tolerância bilateral

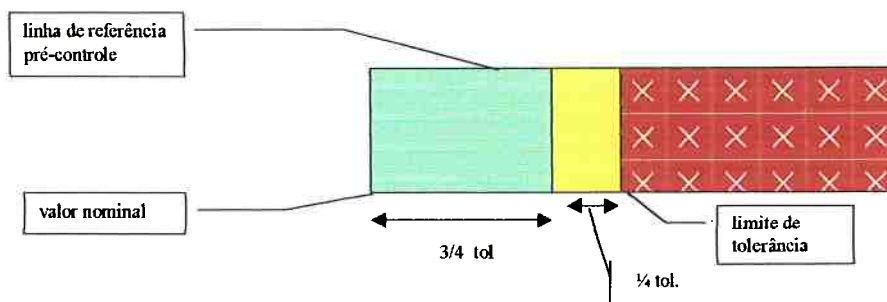


Figura 12 - linha de pré-controle para tolerância unilateral , mínimo e máximo

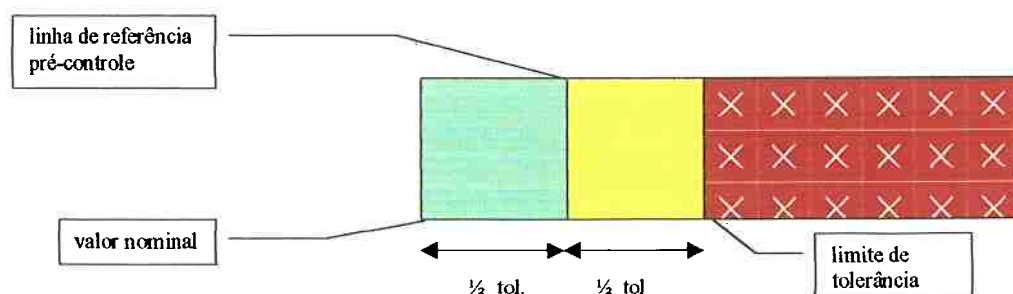


Figura 13 - linha de pré-controle para tolerância unilateral , leitura de indicador total

Antes do início do controle deve-se proceder a qualificação, tomando cinco leituras consecutivas, se uma amarela é encontrada, deve-se recomeçar a contagem se duas amarelas ou uma vermelha é encontrada deve-se fazer algum ajuste e recomeçar a contagem.

Após esta qualificação duas leituras são efetuadas periodicamente, se ambas são amarelas deve-se fazer um ajuste imediato, se uma leitura for vermelha deve-se descartar o trecho correspondente, no caso de um produto contínuo. A frequência de medição é tomada com base na seguinte regra prática: se o tempo entre ajuste for uma hora, o tempo entre medições deve ser dez minutos, se o tempo entre ajustes for duas horas então o tempo entre medições será vinte minutos e assim por diante(4).

2.3.5. Capacidade do Processo (Process Capability)

O que se conhece como a capacidade de um processo é a medida de quão eficiente um processo é em produzir peças dentro dos limites de especificações desejados. Esta medida só terá significado se o processo for estável. Para determinar a capacidade do processo deve-se observar a distribuição de peças dentro e fora de especificação e não a distribuição das médias. Esta medida dará uma pista do número de peças que se pode esperar dentro e fora de especificação.

Os índices mais comuns para determinar se um processo é capaz são os índices de potencial, CP e o índice de capacidade, CpK.

$$CP = (Tolerância) / 6\sigma$$

Aqui a tolerância pode ser tomada como a diferença entre os limites superior e inferior de controle quando calculados com base em medidas individuais. O termo 6σ corresponde a seis desvios padrões e, como foi visto, 99,73% das medidas cairão nesta faixa se a distribuição for normal (3). Isto é facilmente verificado:

Suponha a curva normal padronizada, de média zero e desvio padrão igual a um. Calculando a função probabilidade pela integração da função densidade de probabilidade que a descreve, ou simplesmente obtendo-se este valor numa tabela como a Tabela A3 do Apêndice A encontramos:

$$z_1 = +3s = 3 \dots\dots\dots P(z_1) = 0,4987$$

$$z_2 = -3s = -3 \dots\dots\dots P(z_2) = 0,4987$$

$$P(z_1 + z_2) = 0,9973 \text{ ou } 99,73\%$$

Portanto CP relaciona o número de indivíduos dentro da tolerância com o número de indivíduos dentro da faixa 6σ . Quando CP é igual a um temos que exatamente 99,73% das leituras estarão dentro da tolerância. É interessante notar que uma pequena mudança no valor de CP pode resultar num grande aumento do número de peças rejeitadas. Por exemplo, para CP igual a 1,15, na mesma distribuição normal reduzida teríamos:

$$\text{Tolerância} = 6,9$$

$$z_1 = 3,45 \dots\dots\dots P(z_1) = 0,4997$$

$$z_2 = -3,45 \dots\dots\dots P(z_2) = 0,4997$$

$$P(z_1 + z_2) = 0,9994 \text{ ou } 99,94\%$$

Note que agora ao invés de três a cada mil indivíduos fora dos limites de controle, teríamos menos e um (0,6) a cada mil fora dos limites de controle.

CP é uma medida de dispersão, isto é, não indica se os dados estão centrados no valor nominal. O CpK traz informações da dispersão e da posição dos dados.

$$CpK = (LCS - \bar{x}) / 3\sigma$$

ou

$$CpK = (\bar{x} - LCI) / 3\sigma$$

Toma-se o CpK o menor valor das duas fórmulas.

Existe ainda um outro índice, CR que é o inverso de CP. Estes índices supõe que haja uma distribuição normal dos dados. Existem alguns testes para determinar se a coleção de dados tem ou não distribuição normal. Caso não se confirme a distribuição

normal dos dados alguns ajustes são necessários para se medir os índices de capacidade do processo (3).

Para se verificar se uma amostra obedece ou não uma distribuição normal existem inúmeros testes. Neste trabalho será aplicado o teste não-paramétrico de aderência χ^2 .

Testes de aderência são uma classe de testes estatísticos que tem como hipótese a forma de distribuição da amostra. Admite-se que a amostra segue um certo modelo de distribuição estatística e testa-se este modelo. Diz-se que verifica-se a boa aderência dos dados da amostra ao modelo. A algumas formas de realizar estes teste, aqui utilizaremos os testes de aderência pelo χ^2 . Este teste foi desenvolvida por Karl Pearson e baseia-se na estatística

$$\chi^2 = \sum [(O - E)^2/E]$$

onde

χ^2 é a estatística de teste

O é a freqüência observada em uma classe de variáveis

E é a freqüência esperada, no caso, segundo o modelo de distribuição normal da mesma classe da variável.

A estatística χ^2 só fica definida quando determinado o numero de graus de liberdade, que é igual ao número de parcelas somadas menos o número de parâmetros do modelo estimados independentemente menos um. Como a distribuição normal tem dois parâmetros que podem ser estimados pela amostra, média e desvio padrão, o número de graus de liberdade será o número de parcelas menos três.

Se o modelo testado for verdadeiro e a freqüência esperada (E) for maior que cinco, terá aproximadamente distribuição χ^2 . O cálculo das freqüências esperadas é feito pela multiplicação da probabilidade de se obter um valor na classe considerada pelo número de elementos da amostra.

No caso de existir uma classe com E menor que cinco, deve-se junta-la a classe adjacente. Este teste foi conduzido com detalhes, na exposição dos resultados (7).

2.3.6. Sistemas de medição

Quando um processo é analisado a variação observada é, de maneira geral, assumida como a sendo igual à variação real. Porém, existe uma diferença, introduzida devido ao sistema de medição. Se a variação nas medições é muito grande, a variação observada no processo pode ser substancialmente diferente da variação real. Esta variação na medição pode ser tão grande que mascare a real variação do processo. Num processo de análise estatístico isto não pode ocorrer. Portanto, devem ser tomadas precauções que garantam que a variação introduzida pela medição seja apenas uma pequena parcela da variação total do sistema.

Os sistema de medição são em si próprios processos independentes e portanto também estão sujeitos as mesmas leis de variações que regem outros processos ou o cotidiano da pessoas., contando com todos os quatro elementos básico de qualquer outro processo: equipamento, matéria prima, método e pessoal. Num processo de medição o equipamento é o instrumento de medição, e a matéria prima os itens sendo medidos. Variações introduzidas pelo processo de medição podem afetar drasticamente a elaboração de gráficos de controle, conduzindo a avaliações completamente enganosas. Um bom processo de medição deve ter boa acuidade, reprodutibilidade e discernimento, isto é, o poder de apontar as diferenças entre várias amostras.

A acuidade é conseguida tendo-se sempre instrumentos bem calibrados e periodicamente confrontados com padrões. A reprodutibilidade está mais diretamente relacionada ao método e a pessoa que utiliza o instrumento de medição. O propósito do controle estatístico do processo é avaliar a variação do processo, logo, se os instrumentos de medição são incapazes de apontar esta variação eles são inúteis para este fim.

Para se avaliar o processo de medição com algum critério, pode-se utilizar das mesmas ferramentas estatísticas usadas no controle do processo como um todo, isto é, é possível construir gráficos de controle baseados em teste de medição de um mesmo grupo de amostras. Por exemplo, para um grupo de cinco amostras, é escolhido um parâmetro x , para ser avaliado. Este parâmetro teve ser medido em cada uma das cinco amostras e esses dados anotados, eles constituem o primeiro subgrupo da série. Novamente as mesma cinco amostras devem ser medidas com o mesmo aparelho, mesma pessoa e utilizando o mesmo método. Isto assegura que é o mesmo processo que irá fornecer os dados do

subgrupo seguinte. Repetindo-se este processo mais três ou quatro vezes, podemos construir um gráfico de controle de médias e amplitudes para avaliar o processo.

É exatamente nesta avaliação que reside a diferença entre um gráfico desse tipo para um processo de fabricação e uma medição. Num processo de fabricação procura-se avaliar a estabilidade, observando-se se existem pontos fora dos limites de controle. A distribuição dos pontos dentro dos limites de controle indicam que, a variação entre os subgrupos é menor do que um certo valor considerado crítico, calculado com base na amplitude média dos subgrupos.

Para um processo de medição ter boa reprodutibilidade é necessário que a variação entre os subgrupos, ou seja, entre a medição das mesmas amostras seja muito pequena. Assim a média das amplitudes da amplitude de cada subgrupo deve permanecer muito baixa, fazendo com que os limites de controle formem uma faixa muito estreita.

Logo, a existência de pontos fora dos limites de controle, num gráfico de médias e amplitudes é uma boa medida para avaliar se um certo procedimento de medição é suficientemente eficaz, para medir um certo parâmetro estudado, segundo a referência 5.

Além de se observar a ocorrência de pontos fora dos limites de controle, outro indicador, mais objetivo, da eficiência da medição é o desvio padrão. Para o conjunto das medições obtidas, pode-se calcular o desvio padrão da amostra. Quanto menor o desvio padrão mais precisa será a medição. Vale lembrar que precisão não significa que o valor medido está próximo do valor correto, o que seria a acuidade da medição; a precisão significa uma boa repetitividade das leituras oferecidas, isto é, não há grande variação entre as medidas.

Existem ainda vários outros métodos de se qualificar os sistemas de medição. Neste trabalho foi empregado o método acima descrito, utilizando gráficos de controle de médias e amplitudes (5).

3. Material e Método

3.1. A empresa

O estudo foi realizado integralmente na Plásticos TWB Ltda., empresa que atua na área de extrusão de perfis rígidos em PVC. No ano da realização deste trabalho (1999), a empresa completou três anos de existência, sendo portanto uma empresa muito jovem. Porém o grupo envolvido em sua administração e produção constituiu-se de pessoas com mais de vinte e cinco anos no setor, garantindo uma ampla experiência e agilidade na resolução de problemas do processo. A pouca idade da empresa é só refletida no maquinário, recém adquirido.

A linha que foi estudada contava com menos de cinco meses de uso, fato que contribuiu positivamente para os bons resultados obtidos, aliada a manutenção intensiva e à experiência dos gerentes de produção. A planta de produção da fábrica é ilustrada abaixo, figura 14, e foi concebida de forma a racionalizar o espaço e evitar movimentação desnecessária, tanto do produto quanto dos operários da produção.

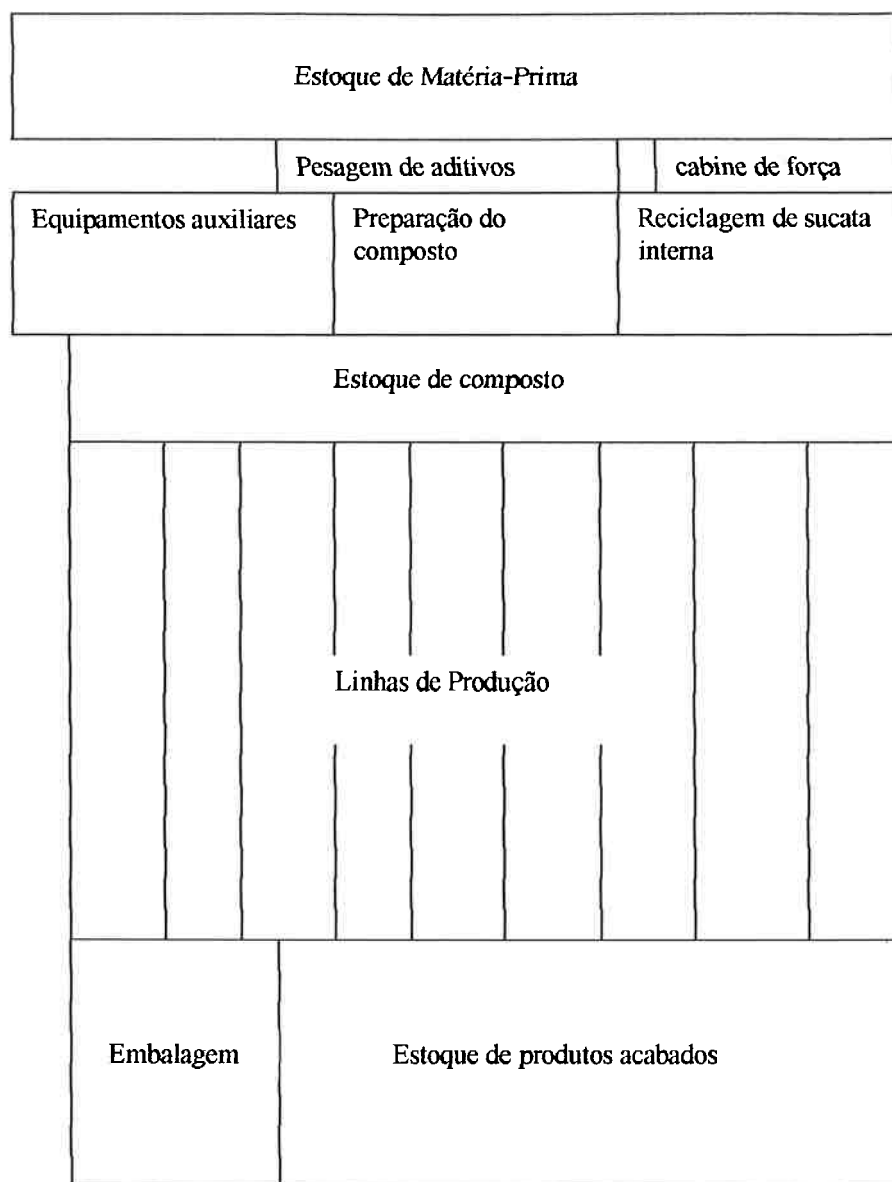


Figura 14 - Planta da fabrica

A matéria-prima pode ser dividida em duas classes: a resina de PVC propriamente dita e os aditivos, os quais integram: estabilizantes, cargas, lubrificantes e pigmentos. Estes aditivos são cuidadosamente pesados para entrar na proporção especificada no composto. Este é processado através da mistura da resina e estes aditivos em um equipamento próprio para este fim. Daí este composto está pronto para o uso e permanece por algum tempo estocado. Este estoque existe para regular o consumo pelas máquinas e o preparo desse composto. Como será explicado adiante neste capítulo, esse consumo é variável no tempo, em virtude da operação ou não de todas as linhas de produção da fábrica, quando a maior parte das linhas está em atividade, a produção de composto no mesmo período seria insuficiente para abastecê-la, porém, quando a fábrica opera menos

linhas, existe um excedente na produção de composto que pode ser preparado e armazenado. Desta forma, o estoque de composto funciona como barragem, garantindo suprimento constante para as linhas de produção.

Na área descrita como equipamentos auxiliares encontram-se compressores para o fornecimento de ar comprimido, estação de refrigeração de água e bombas que alimentam o circuito de água a temperatura ambiente e refrigerada. A sucata interna gerada na fábrica é moída e pode ser aproveitada novamente. No perfil estudado, não a adição deste tipo de material na composição, isto por que, apesar desse material ter plenas condições de ser utilizado, em certa proporção, sem perda de qualidade ou das características de processabilidade do composto, sua utilização causaria uma diferença no aspeto visual do produto, diferenças de tonalidade em sua cor, que não são permitidas para este tipo de produto.

O composto alimenta as linhas de produção, que fornecem o produto acabado já em suas dimensões finais. As linhas são específicas para a produção de perfis de PVC, produzidas pela BAUSANO Group., empresa italiana que projeta e produz equipamentos para a extrusão de termoplásticos. Existem máquinas mono-rosca e dupla-rosca, com diferentes capacidades, utilizadas na fabricação de diferentes perfis.

Em função do sistema de venda adotado, algumas peculiaridades tiveram de ser adotadas no sistema produtivo. O fato é que se estipulou que o produto extrudado pode ser vendido sob medida, isto é, no comprimento determinado pelo cliente. Assim cada cliente gera uma ordem de serviço (OS) única, com um número associado, que é mandada para a produção e só então fabricada. Desta forma são fabricadas apenas os perfis nas quantidades e comprimentos especificados. Ao término de uma OS, outra deve estar aguardando para ser fabricada, de forma que com um ajuste rápido no comando da serra outro comprimento é dado para os perfis. Isto explica por que a produção é variável. Para que uma máquina seja acionada é necessário que um mínimo de peças a ser produzidas. É tarefa dos gerentes de produção racionalizar o tempo de operação das máquinas avaliando a quantidade de material a ser produzida em cada data. Assim, calcula-se quando e por quanto tempo serão realizadas paradas para manutenção, quanto e quando produzir peças em comprimento padrão de seis metros de comprimento, quando iniciar uma máquina que não se encontre em operação ou quando parar uma que esteja operando. Estes entre outros procedimentos ajudam a racionalizar a utilização da planta.

Como existem vários perfis produzidos em máquinas diferentes, o nível de produção pode variar desde uma única linha em funcionamento até a plena capacidade da fábrica em função de razões de mercado.

Neste ponto convém detalhar qual o método de trabalho na linha de produção. Como foi explicado acima, a sequência de produção obedece à sucessão de ordens de serviço (OS). Ao entrarem na área de produção as OS são separadas quanto ao tipo e cor do produto e então encaminhadas para a linha de produção apropriada. Desta forma, toda linha de produção, a exemplo da linha estudada, produz continuamente na medida que forma-se uma lista de OS a serem executadas. Mesmo que a linha esteja parada por algum motivo, aguarda-se que um certo número de OS sejam acumuladas para garantir que, uma vez em funcionamento, a linha permaneça por um longo período.

Para descrever o processo é conveniente partir do momento em que a linha entra em funcionamento, aqui chamada de inicialização. Neste procedimento a primeira atividade é o aquecimento do canhão da máquina, após atingidas as temperaturas padronizadas para o produto em questão, é feito o carregamento da máquina com composto. É imprimida velocidade a rosca e a extrusora começa a processar o material. O operador avalia quanto do material inicial deverá ser descartado e então começa a puxar manualmente o perfil que vai saindo da extrusora. Depois de passa-lo pelo calibrador, o perfil é colocado no puxador, que irá manter constante a velocidade de saída do perfil. Neste momento é acionado o vácuo e a água de refrigeração no calibrador. O operador faz alguns ajustes para calibrar a peça, garantindo que toda sua superfície esteja em contado com o calibrador,

Então são ajustadas as velocidades do puxador, da rosca e da alimentação, as medidas do produto são avaliadas, se estiverem dentro da especificação a inicialização terminou, ao contrário alguns ajustes são feitos. Depois de inicializada a linha o operador checa alguns parâmetros como dimensões do forro e velocidade da linha periodicamente, e faz ajustes quando necessário. Este trabalho foi realizado com a autorização do diretor geral da empresa dentro do seguinte escopo:

- Toda coleta de dados devera ser realizada apenas pelo responsável do projeto ficando vedada o deslocamento, ainda que parcial, de qualquer funcionário da empresa para este fim.

- Não será permitida qualquer parada ou interrupção da produção. Podem, porém, ser retiradas amostras durante a produção, em qualquer momento.
- O projeto contará com uma linha para realizar os estudos necessários, ficando permitida a divulgação de todos dados obtidos para fins exclusivos deste trabalho.
- O operador deverá permanecer com total liberdade na operação da linha, qualquer disposição em contrário será negociada a parte.

Neste panorama fica claro que este projeto não se trata da implantação do CEP na empresa como um todo, mas de um estudo que possa provar a viabilidade de aplicação deste tipo de controle na empresa.

3.2. O Produto

O principal produto da empresa vem a ser o forro de PVC; foi uma de suas linhas de produção objeto de estudo neste trabalho. Este produto consiste em um extrudado de PVC rígido, com seção transversal assimétrica, mostrado na figura 15.

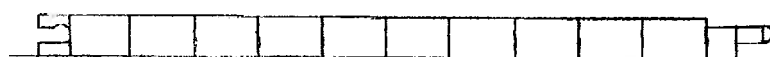


Figura 15 - seção transversal do extrudado

É um perfil com cerca de cinco milímetros de espessura de parede, altura e largura total de treze e duzentos e doze milímetros, respectivamente. Seu peso é tido como sendo dois quilos e meio por metro quadrado de área de superfície útil, esta é a unidade que deve ser especificada para projetos de construção, uma vez que o produto deverá ser mantido por uma estrutura capaz de sustentar este peso. Todo o equipamento de calibração e a matriz foram produzidos e projetados por uma empresa especializada em projetos de matrizaria para extrusão de termoplásticos, sendo todas as características e conceitos do projeto de responsabilidade da mesma.

Este perfil é utilizado na construção civil e tem por finalidade isolar e dar acabamento ao teto de uma construção. É largamente utilizado em postos de gasolina, que foram pioneiros na aplicação deste tipo de revestimento no país, hoje pode ser encontrado de residências a indústrias e estabelecimentos comerciais, tendo atualmente aumentado sua participação em hospitais, farmácias, indústrias alimentícias e salas limpas, devido às suas características como baixa aderência de partículas de poeira, fácil remoção de qualquer tipo de sujeira, devido à baixa reatividade do PVC, impossibilidade de desenvolvimento de mofo ou bolor em sua superfície, além de algum isolamento acústico e térmico. Abaixo um detalhe do perfil, figura 16 e uma instalação onde foi aplicado, figura 17.

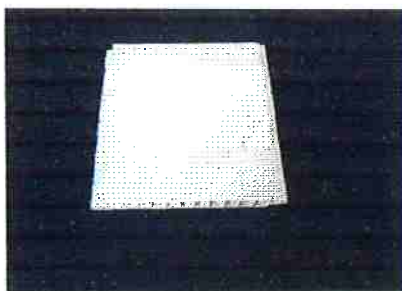


Figura 16 –perfil extrudado



Figura 17 – instalação com o produto aplicado

3.3. Estudo dos sistemas de medição

Como foi discutido na seção 3.2.6, antes mesmo que se possa avaliar se o processo é ou não estável e capaz é necessário averiguar se os sistemas de medição disponíveis são confiáveis ou se apenas introduzem erros na coleta de dados. Todas as variáveis de processo que possam ser medidas serão designadas como parâmetros. Estes parâmetros são obtidos através de dois métodos distintos: medições realizadas com o auxílio de paquímetros e da leitura de equipamentos acoplados a extrusora ou a linha. A tabela 2, abaixo, contém informações sobre os parâmetros estudados neste trabalho.

Parâmetro	Abreviação	Unidade	aparelho de medição ¹
Velocidade de produção	Vp	rpm	Tacômetro Gefran EG03
Pressão na entrada da matriz	BAR	bar	Transdutor de pressão Gefran SP830M
Corrente do motor	Amp	ampères	Multímetro de garra
Largura do forro	L	milímetros	paquímetro 300 mm
Altura do encaixe macho	m	milímetros	paquímetro Digimess
Folga no encaixe fêmea	f	milímetros	paquímetro Digimess
Comprimento da aba de fixação	a	milímetros	paquímetro Digimess
Espessura da parede interna	p	milímetros	paquímetro Digimess

Tabela 2 - parâmetros de observação

Os parâmetros L, a, m, f, e p, relacionados na tabela 2, são ilustrados na figura 18, abaixo, que representa um corte na seção transversal do perfil. Estes parâmetros caracterizam dimensionalmente o produto.

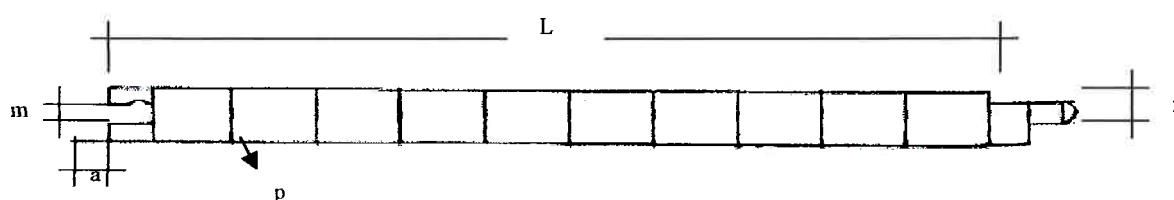


Figura 18 - parâmetros dimensionais do forro

Estes parâmetros foram escolhidos com base em sua importância para assegurar a qualidade do produto final ou garantir boa produtividade. O parâmetro Vp avalia a produtividade do processo, BAR indica se está se fazendo o uso apropriado do equipamento, pressões altas são prejudiciais à matriz e pressões baixas trazem defeitos às peças. Os outros parâmetros estão ligados às tolerâncias dimensionais do produto.

¹ Informações sobre estes equipamentos estão disponíveis no Apêndice B, com dados de catálogo do fabricante.

3.3.1. Parâmetro L

A largura nominal do forro é o principal parâmetro utilizado pelo operador para decidir a partir de que ponto, depois da inicialização da produção ou mesmo depois de uma falha, o produto é considerado aceitável. Isto por que uma variação de apenas 1 mm em cada lâmina do forro representaria uma variação da distancia coberta de 1 cm a cada 10 lâminas justapostas. Dada a importância deste parâmetro foi feito um ensaio para verificar a validade do processo de medição. Este processo consiste em, com uma amostra de 50 mm de comprimento, traçar uma linha perpendicular a borda lateral do forro e medi-la com o paquímetro de 300 mm de abertura máxima. Com cinco amostras padrão, consideradas aceitáveis pelo operador, foram realizadas seis medições do parâmetro L de cada amostra em intervalos de meia em meia hora, pela mesma pessoa, que não sabia se tratar das mesmas amostras. A tabela abaixo resume os resultados:

Parâmetro L						
Subgrupo	1	2	3	4	5	6
	200,06	200,12	200,02	200,15	200,12	200,08
	200,02	200,08	200,04	200,12	200,15	200,04
	200,00	200,10	200,02	200,16	200,12	200,04
	200,04	200,05	200,06	200,10	200,12	200,06
	200,02	200,12	200,09	200,10	200,15	200,03
\bar{x}	200,028	200,094	200,046	200,126	200,132	200,050
\hat{R}	0,06	0,07	0,07	0,06	0,03	0,05

Tabela 3 - teste de medição parâmetro L

O que resulta nos seguintes gráficos de controle:

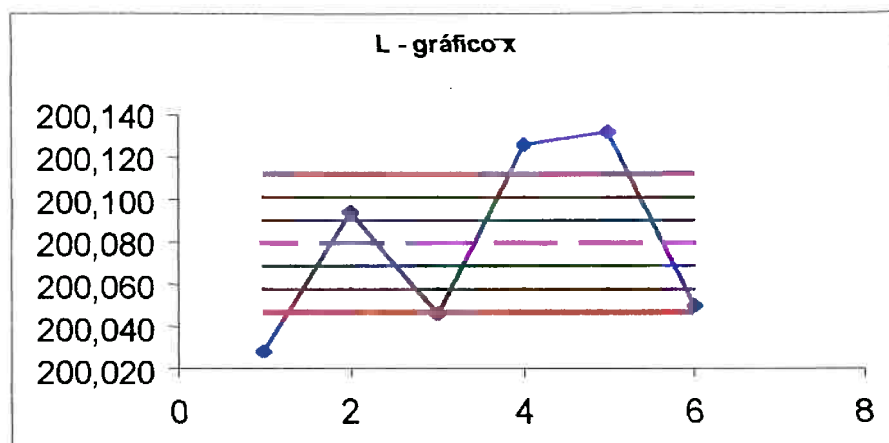


Gráfico de Controle 1 – médias, parâmetro L

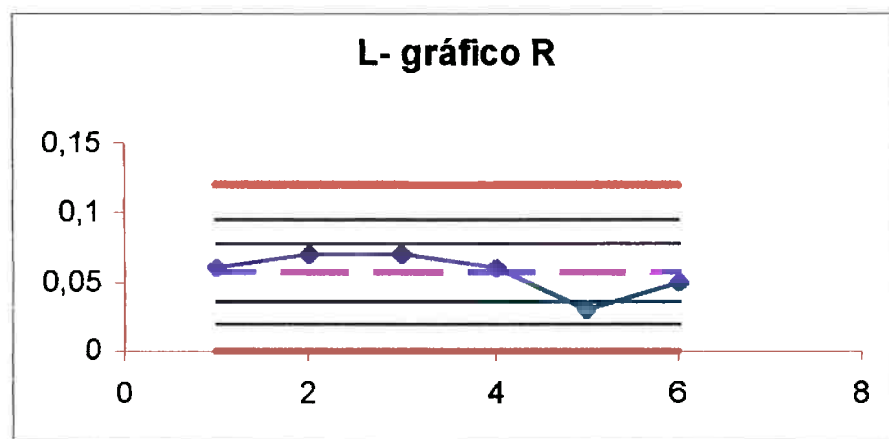


Gráfico de Controle 2 – amplitudes, parâmetro L

Como já havia sido explicado anteriormente, em um processo de medição eficiente, isto é, um processo com alta reprodutibilidade, onde possam ser extraídas leituras confiáveis a qualquer instante, é de se esperar que haja pouca diferença entre os dados obtidos a partir de uma mesma amostra. Devido a esta pequena amplitude entre medições de um mesmo subgrupo, os limites superior e inferior de controle tornam-se muito próximos, com isto, espera-se que em um processo de medição confiável poucos pontos caiam dentro dos limites de controle. O gráfico de amplitude, no entanto, mostra todos os pontos dentro dos limites de controle o que indica a estabilidade do processo de medição. O desvio padrão encontrado é de 0,024362.

3.3.2. Parâmetro a

A aba do forro é a parte que é fixada, através de um rebite, na armação que irá sustentar o forro. Este parâmetro tem sido motivo de reclamação por parte dos consumidores devido a sua largura. Quanto maior for a medida da “a”, mais espaço existira para a fixação do prego ou rebite, garantindo uma melhor instalação do forro. Este é um parâmetro importante de ser avaliado pois a otimização do processo certamente passa por encontrar um ponto de trabalho onde a medida desta aba seja satisfatória, ainda que se acredite que isto conflite com outra meta de otimização: a velocidade de produção. Por experiência dos operadores acredita-se que quanto maior a velocidade de produção, menor a medida da aba, porém não é conhecida nenhuma regra de proporcionalidade, apenas tem-se o fato como verdadeiro. A leitura desta medida é complicada pelo fato de que existe apenas um ponto de apoio para o paquímetro realizar a leitura. O processo de medição avaliado consiste em, com uma amostra de 50 mm de comprimento, apoiar a aste do paquímetro na parede logo abaixo da aba e abrir o paquímetro digital, até que a outra aste coincida com o final da aba. Devido a maior dificuldade na execução desta medida, foram tomadas quinze medidas de um mesmo conjunto de cinco amostras. Segue a tabela com os dados coletados:

Parâmetro a					
Subgrupo	1	2	3	4	5
	7,48	7,90	7,42	7,51	7,23
	7,32	7,25	7,22	7,75	7,68
	7,21	7,57	7,17	6,95	7,36
	7,61	7,5	7,66	7,79	6,99
	7,44	7,77	7,00	7,87	7,2
Subgrupo	6	7	8	9	10
	7,74	7,61	7,26	7,57	7,33
	7,18	7,42	7,08	7,48	7,46
	7,98	7,55	7,33	7,51	7,6
	7,20	7,45	7,93	7,13	7,43
	7,25	7,41	7,59	7,58	7,81
Subgrupo	11	12	13	14	15
	7,66	7,81	7,72	7,30	7,35
	7,64	7,57	7,61	7,67	7,22
	7,27	7,89	7,46	7,96	7,27
	7,25	7,57	7,8	7,88	7,56
	7,81	7,37	7,89	7,37	7,13

Tabela 4 - teste de medição parâmetro a

Subgrupo	média - \bar{x}	amplitude - \bar{R}
1	7,412	0,4
2	7,598	0,65
3	7,294	0,66
4	7,574	0,92
5	7,292	0,69
6	7,470	0,8
7	7,488	0,2
8	7,438	0,85
9	7,454	0,45
10	7,526	0,48
11	7,526	0,56
12	7,642	0,52
13	7,696	0,43
14	7,636	0,66
15	7,306	0,43

Tabela 5 - teste de medição parâmetro a, médias e amplitudes

Os gráficos de controle abaixo, obtidos com estes dados comprovam a falta de reprodutibilidade do processo de medição utilizado. Entre cada subgrupo a amplitude encontrada entre as medidas tal que nenhum ponto cai fora dos limites de controle, como seria esperado para um processo de medição confiável, embora no gráfico da amplitude nenhum ponto cai fora dos limites, percebemos o que o desvio padrão é de 0,262826, um valor muito alto para a ordem de grandeza das medições.

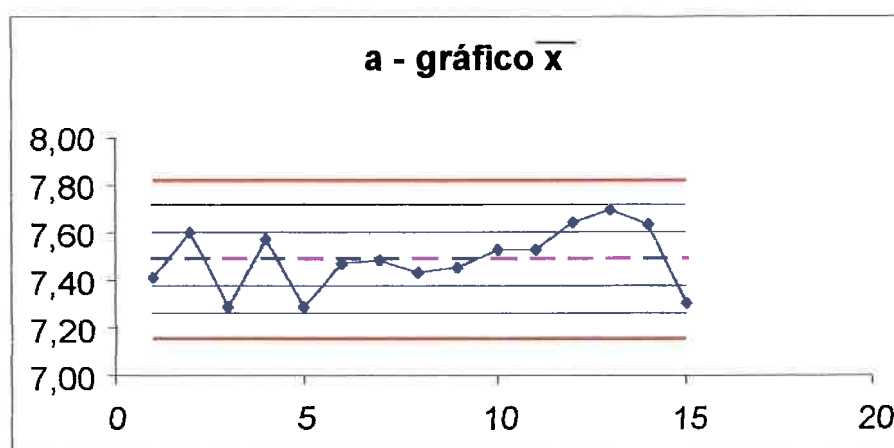


Gráfico de Controle 3 – médias, parâmetro a

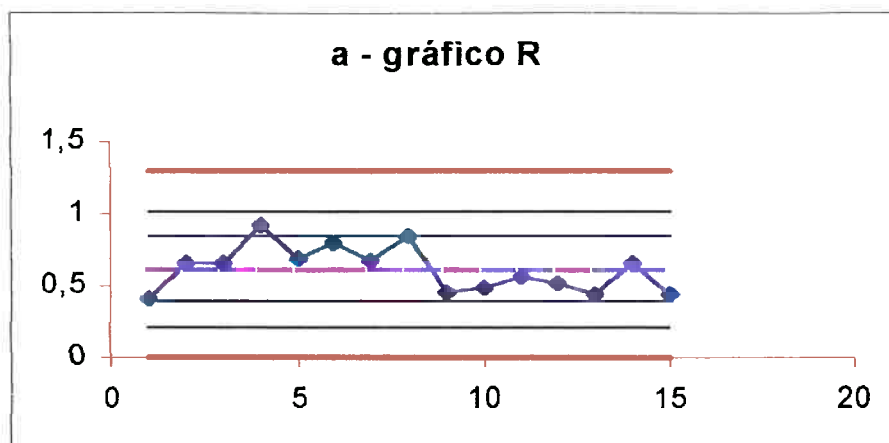


Gráfico de Controle 4 – amplitudes, parâmetro a

Portanto outro método deve ser adotado para se medir este parâmetro. Como a suspeita de que o problema esta na forma de se medir e não no equipamento utilizado, outra avaliação é feita alterando o processo de medição: com a amostra apoiada em um suporte que fica a noventa graus em relação a uma bancada e tocando esta bancada, é feita a medição do vão existente entre a superfície da mesa e a parede lateral do forro. Os resultados são expressos abaixo:

Parâmetro a					
Subgrupo	1	2	3	4	5
	7,56	7,47	7,46	7,51	7,55
	7,53	7,51	7,56	7,44	7,58
	7,47	7,56	7,54	7,43	7,56
	7,46	7,57	7,5	7,5	7,53
	7,51	7,53	7,56	7,47	7,57
Subgrupo	6	7	8	9	10
	7,58	7,55	7,51	7,57	7,55
	7,56	7,56	7,52	7,48	7,46
	7,55	7,55	7,57	7,51	7,5
	7,55	7,47	7,55	7,5	7,47
	7,51	7,56	7,57	7,58	7,49
Subgrupo	11	12	13	14	15
	7,61	7,61	7,55	7,49	7,47
	7,59	7,57	7,56	7,51	7,42
	7,57	7,55	7,52	7,58	7,49
	7,59	7,57	7,51	7,57	7,5
	7,55	7,55	7,48	7,48	7,47

Tabela 6 – Teste de medição, parâmetro a

Subgrupo	média - \bar{x}	amplitude - \hat{R}
1	7,506	0,1
2	7,528	0,1
3	7,524	0,1
4	7,470	0,08
5	7,558	0,05
6	7,550	0,07
7	7,538	0,09
8	7,544	0,06
9	7,528	0,1
10	7,494	0,09
11	7,582	0,06
12	7,570	0,06
13	7,524	0,08
14	7,526	0,1
15	7,470	0,08

Tabela 7 – médias e amplitudes, parâmetro a

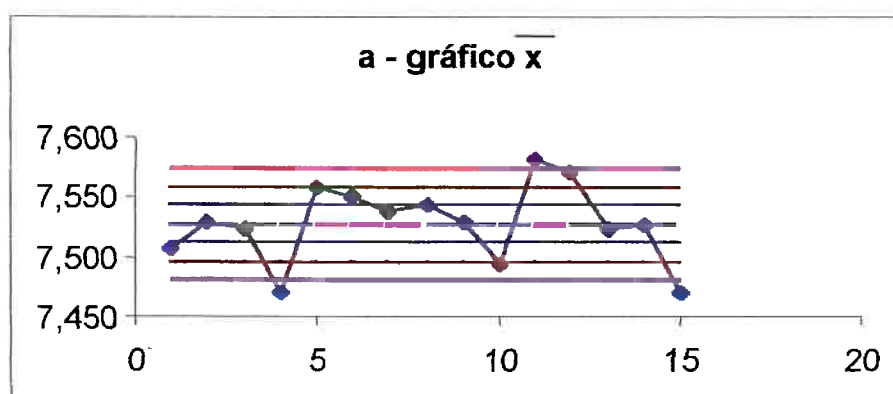


Gráfico de Controle 5 – médias, parâmetro a

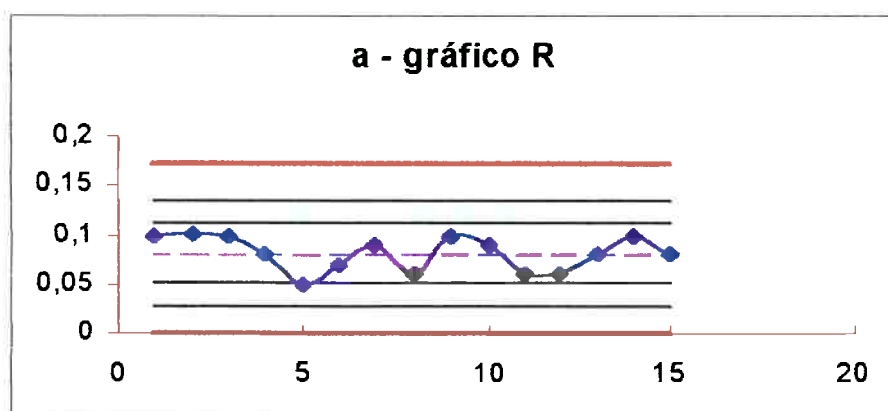


Gráfico de Controle 6 – amplitudes, parâmetro a

Dos gráficos acima conclui-se que este novo método de medida trás menor diferenças entre as leituras das amostras iguais e é, portanto melhor do que o anterior; isto fica claro analisando o desvio padrão que é de 0,034967 (O outro ensaio produziu um desvio padrão de 0,262826).

3.3.3. Parâmetros m e f

Estes dois parâmetros caracterizam o sistema de encaixe que deve unir uma lâmina de forro a outra; neste sistema é importante que o encaixe macho seja cerca de 0,5 mm maior do que o encaixe fêmea para que exista uma certa pressão no fechamento. Além disso, estes valores ajudam a detectar mal formação do produto, isto por que, nos dois encaixes, é onde existe maior quantidade de material por área em comparação com o resto da seção transversal. Isto faz com que a refrigeração nestas regiões deva ocorrer a taxas maiores do que no centro do perfil. Assim, quando por algum motivo, o fluxo de material é alterado (devido ao entupimento da tela através da qual o fluxo passa antes de entrar na matriz, ou devido a uma queda da temperatura do fluxo por algum motivo), as primeiras regiões a sentir o efeito da alteração são os encaixes m e f, que perdem suas dimensões originais. A medição desses parâmetros é feita com um paquímetro digital, com uma amostra de 50 mm de comprimento, mede-se a espessura entre a parte superior e inferior do encaixe macho, e a espessura entre as paredes superior e inferior do encaixe fêmea. Com cinco amostras padrão, foram realizadas seis medições do parâmetro m e do parâmetro f de cada amostra. A tabela abaixo trás estes dados:

Parâmetro m						
Subgrupo	1	2	3	4	5	6
	4,35	4,36	4,35	4,37	4,36	4,37
	4,34	4,35	4,36	4,39	4,37	4,37
	4,36	4,36	4,35	4,38	4,36	4,38
	4,35	4,38	4,36	4,37	4,38	4,39
	4,36	4,38	4,36	4,38	4,37	4,37
\bar{x}	4,352	4,366	4,356	4,378	4,368	4,376
\bar{R}	0,020	0,03	0,01	0,02	0,02	0,02

Tabela 8 – teste de medição, parâmetro m

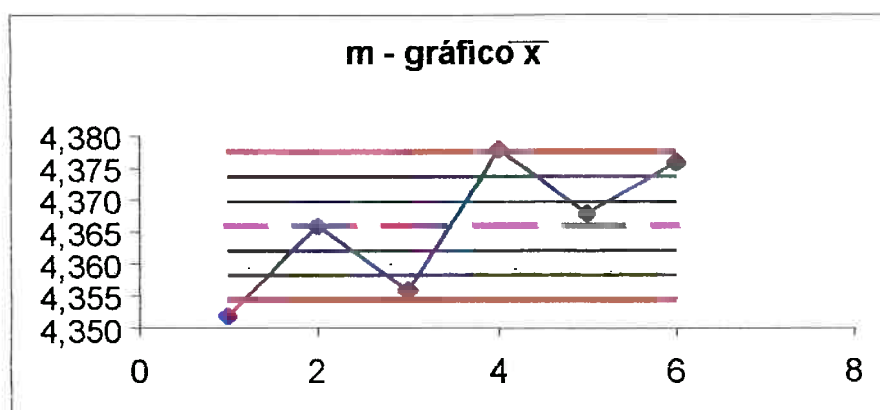


Gráfico de Controle 7 -- médias, parâmetro m

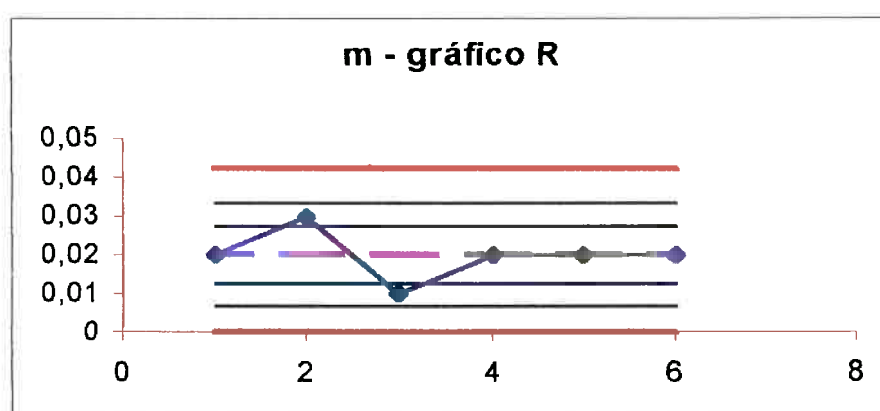


Gráfico de Controle 8 -- amplitudes, parâmetro m

O gráfico \bar{x} apresenta dois pontos fora dos limites de controle, o gráfico de R mostra que o processo de medição é estável. O desvio padrão encontrado é de 0,008598.

O mesmo procedimento é adotado para avaliar o processo de medição do parâmetro f. A seguir os resultados obtidos:

Parâmetro f						
Subgrupo	1	2	3	4	5	6
	3,68	3,79	3,96	3,71	3,65	3,87
	3,59	3,56	3,70	3,69	3,85	3,76
	3,44	3,61	3,84	3,70	3,80	3,82
	3,78	3,77	3,8	3,75	3,64	3,68
	3,52	3,81	3,7	3,76	3,74	3,47
\bar{x}	3,602	3,708	3,800	3,722	3,736	3,720
\bar{R}	0,340	0,250	0,260	0,070	0,210	0,400

Tabela 9 – teste de medição, parâmetro f

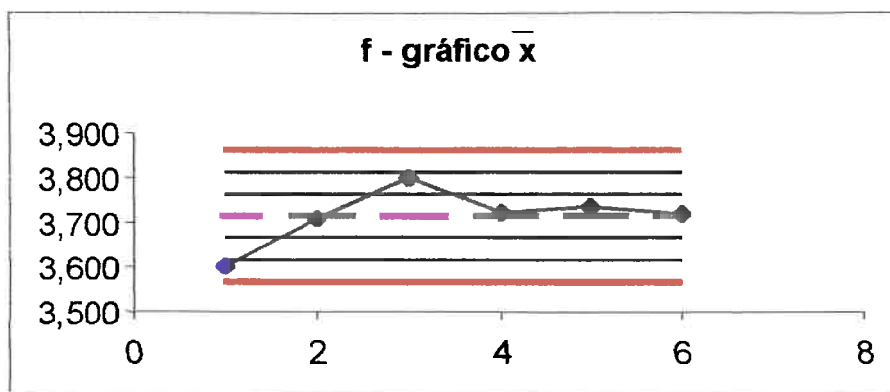


Gráfico de Controle 9 –médias, parâmetro f

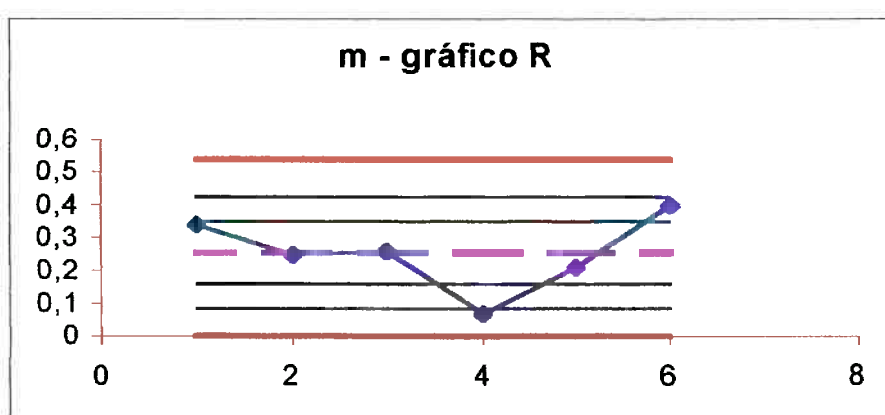


Gráfico de Controle 10 –amplitudes, parâmetro f

O fato de nenhum ponto cair fora dos limites de controle do gráfico \bar{x} , indica pouca repetibilidade das leituras obtidas, o que é comprovado pelo desvio padrão encontrado, que é igual a 0,10963.

Apesar dos parâmetros m e f possuírem uma relação dimensional, isto é, m é cerca de 0,5 mm maior do que f , o que é proposital para que o encaixe seja feito com alguma pressão, o processo de medição não responde de maneira igual para os dois parâmetros. A natureza do fato pode ser devida ao fato de m ser uma medida externa, ao fechar o paquímetro as paredes do encaixe resistem a pequena compressão e é exatamente nesta hora que a leitura é feita. O parâmetro f é uma medida interna, ao abrir o paquímetro para se realizar a medida, uma força é aplicada sobre o encaixe, o que pode ocasionar uma pequena abertura e fica difícil determinar qual o melhor instante para a leitura, e quando esta é feita nem sempre se faz com as paredes do encaixe totalmente paralelas. Esta é uma explicação provável para o comportamento distinto destes dois parâmetros.

Como eles acabam por caracterizar aspectos dimensionais semelhantes, para o presente estudo, descarta-se a medida do parâmetro f como variável de controle do processo.

3.3.4. Parâmetro p

As paredes internas do forro tem a função de sustentar o peso próprio do forro na estrutura, resistir contra pressões que possam vir a danificar o produto durante o manuseio e, principalmente, transporte. As paredes também são uma medida importante no controle do processo pois, tem por experiência, que sua espessura é fortemente influenciada pelas variáveis de processo como velocidade de produção, por exemplo.

Para se verificar o processo de medição basta verificar o processo para uma das paredes, assume-se que a variação na medição é a mesma para medidas realizadas em qualquer parede. Porém a medir a espessura da parede mostra-se uma tarefa ingrata uma vez que sua espessura não é a mesma ao longo da altura. A espessura é máxima nas extremidades junto às paredes internas do forro e mínima a meia altura. Para que as medidas sejam lidas de maneira padronizada, foi adotado o seguinte procedimento: o paquímetro é colocado sobre uma bancada, o corpo do paquímetro deve permanecer fixo por todo o ensaio, a amostra é colocada sobre a bancada na posição marcada, manipulando-se apenas a régua do paquímetro, o fechamos de forma que a leitura da espessura da parede possa ser feita. Com este procedimento, seis amostras foram testadas, sendo que cinco medidas de cada amostra foram tomadas. Os seguintes dados foram então obtidos:

Parâmetro p						
Subgrupo	1	2	3	4	5	6
	0,53	0,59	0,63	0,53	0,55	0,57
	0,57	0,59	0,6	0,57	0,58	0,54
	0,54	0,57	0,62	0,56	0,55	0,55
	0,55	0,59	0,59	0,56	0,58	0,55
	0,54	0,56	0,6	0,55	0,58	0,57
\bar{x}	0,546	0,580	0,608	0,554	0,568	0,556
\bar{R}	0,040	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03

Tabela 10 – Teste de medição, parâmetro p

Daí construídos os gráficos conclui-se que o processo de medição, embora lento e delicado, é capaz de fornecer medidas confiáveis, o desvio padrão encontrado foi de 0,015047.

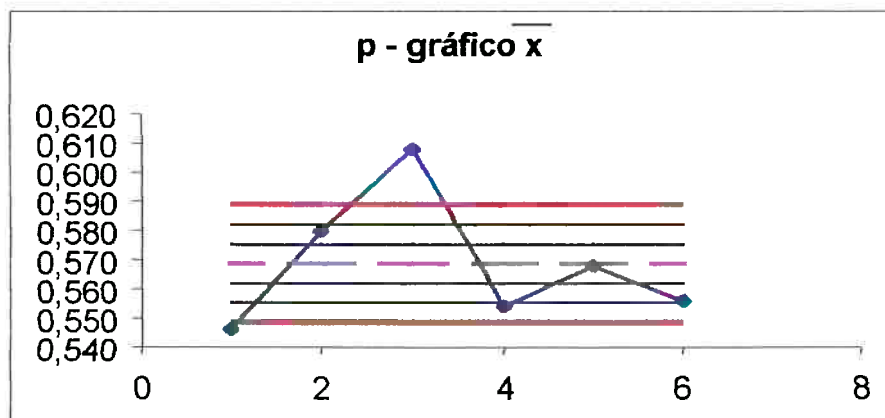


Gráfico de Controle 11 – médias, parâmetro p

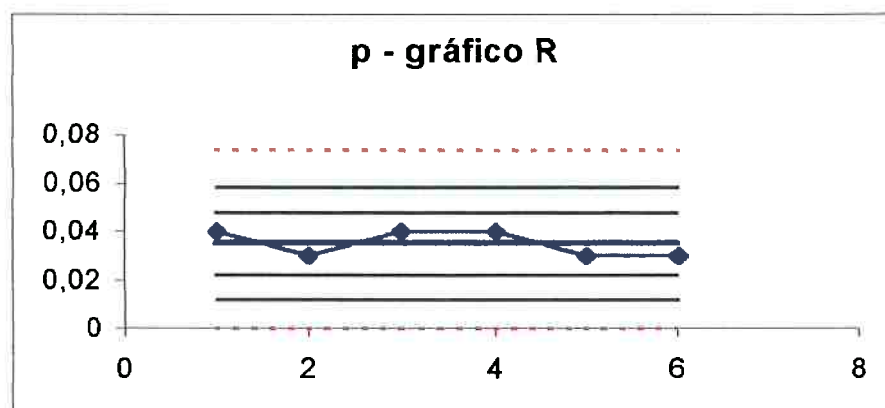


Gráfico de Controle 12 – amplitudes, parâmetro p

Assim fica completa a verificação de que os processos de medição serão, de fato, eficientes na leitura dos parâmetros dimensionais do produto.

3.3.5. Parâmetros Vp, BAR e Amp

As outras variáveis de processo que serão avaliadas dependem da leitura de aparelhos.

Para a execução do presente trabalho foi solicitada a recalibração destes aparelhos, de forma que fica assumido que os valores lidos nos aparelhos de medição da máquina são confiáveis, não introduzindo erro na avaliação do parâmetro envolvido.

O fato de que é um aparelho eletrônico que realiza a medição, onde a leitura é feita através de mostradores digitais que praticamente eliminam a possibilidade de erro de leitura pode mascarar o fato de que também nestas medições existe um processo envolvido passível das mesmas variações naturais que um processo mais simples de medição quanto um ler um comprimento numa régua. O que se assume aqui é que, da mesma forma que a leitura da medida do parâmetro L é confiável, reproduzível, graças a avaliação feita, os instrumentos calibrados também tem reprodutibilidade e confiabilidade assegurada, comparáveis as medidas de qualquer outro parâmetro já avaliado.

3.4. Avaliação das alterações introduzidas no processo

Depois de realizado o primeiro estudo do processo uma decisão por parte da diretoria da empresa resolveu alterar as condições de operação da máquina, afim de atingir maior produtividade. Isto ocorreu pois a empresa italiana que fabrica as linhas de produção montou uma nova fábrica no Brasil e resolveu oferecer um programa de treinamento em seus equipamentos para seus clientes. Técnicos dessa empresa passaram um período de uma semana trazendo as novas técnicas de operação.

Até esse momento a única maneira praticada de aumentar a velocidade de produção era aumentando a velocidade da rosca; a alimentação deveria simplesmente acompanhar essa mudança. O problema é que este procedimento causa um aumento abrupto na amperagem do motor, e de forma mais branda, mas substancialmente a pressão na entrada da matriz, deforma que a velocidade ficava limitada aos valores verificados no primeiro estudo.

A mudança ocorreu na relação mantida entre a velocidade de alimentação e a velocidade da rosca. É intuitivo que a relação entre essas duas velocidades varie a vazão de material que sai da extrusora. A velocidade de alimentação é medida em rpm e representa a velocidade com que gira a rosca de alimentação. Esta rosca, cerca de um terço do tamanho das roscas da extrusora, capta o composto do funil, que pode ser visto como um reservatório de suprimento infinito para esta rosca, uma vez que é mantido

sempre cheio por um sistema automático de carregamento. Pela ação de sua rotação, ela transporta o material para um ponto logo acima da zona 1 do cilindro, região final do mesmo. Por gravidade então, o material transportado passa para o canhão, onde, pela ação das roscas será transportados para as regiões subsequentes do cilindro e processado. O esquema abaixo ilustra o mecanismo:

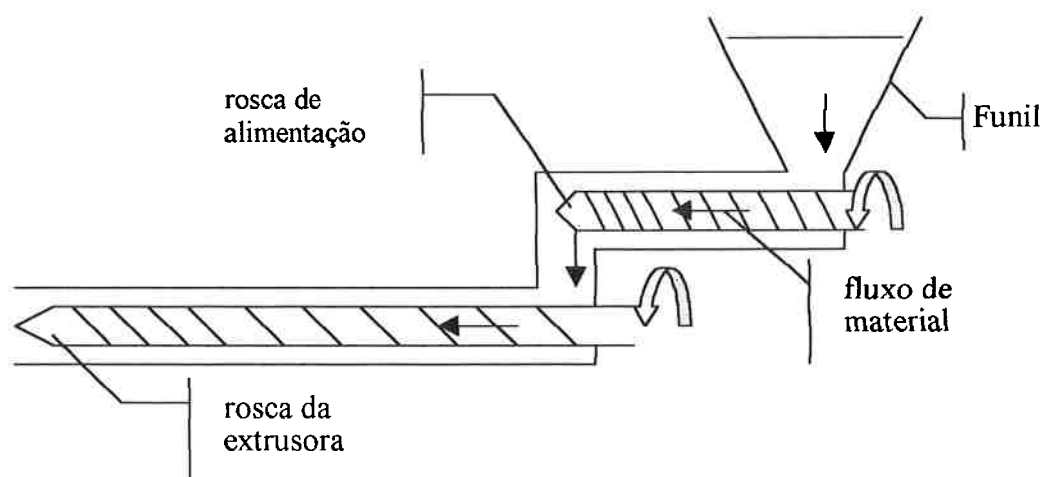


Figura 19 – Esquema de alimentação da extrusora

A prática usual de operação era com velocidades de rosca na faixa de 31 rpm e de alimentação ao redor de 16 rpm e foi alterada para 28 e 23, respectivamente.

Esta alteração foi feita em passos lentos, algumas vezes aumentava-se de uma a duas unidades a alimentação, outras diminuía-se da mesma forma a velocidade da rosca.

A velocidade de produção era corrigida pelo aumento da velocidade do puxador. Quando um valor ao redor de três metros por minuto foi alcançado não foram feitas mais alterações, devido ao aumento sofrido na amperagem e na pressão na entrada da matriz.

Desta forma essa alteração foi feita sem a aplicação de algoritmos de otimização.

4. Discussões e Resultados

4.1. *Primeiro Estudo estatístico do processo*

4.1.1. Pré-Controle

O ajuste do processo, tradicionalmente era feito pelo operador que checa periodicamente alguns dos parâmetros discutidos no capítulo 3.3.5:

- Velocidade de produção - VP
- Pressão na entrada da matriz - BAR
- Largura do forro - L

E faz as alterações quando julga necessário.

A altura do encaixe macho, m. A parede interna do forro e a aba não foram incluídas devido ao sistema de medição ser mais complicado, já altura do encaixe macho não foi incluída para não dificultar o controle uma vez que não era prática usual sua medição.

Um dos pontos importantes da implementação do pré-controle é torna-lo o mais simples possível para o operador; de forma que não foram produzidos nenhum tipo de gráfico durante o processo.

A implementação deu-se em apenas um turno, com um operador responsável. Os três parâmetros foram analisados ao mesmo tempo.

Para o parâmetro Vp utilizou-se um controle unilateral, uma vez que objetiva-se sempre a maior velocidade possível. Neste caso convém notar que, este controle, assim como o do parâmetro BAR, verificam apenas as condições do processo, não informando sobre a qualidade do produto. Para Vp esse efeito é bem evidente, uma vez que só existe limite inferior. Por este teste o produto poderia até estar saindo não conforme, e nenhum ajuste seria efetuado. Isto ocorre pois esse teste tem por objetivo manter o ritmo de produção, que, se não gera custos por peças não conforme, o gera por desperdício de hora/máquina. Assim fica evidente que o pré-controle deve ser efetuado para um conjunto

de parâmetros que assegure boa qualidade do produto e boa produtividade. Efetuar ajustes devido a um parâmetro pode levar a prejudicar um outro parâmetro. Este efeito não foi constatado para ajustes sutis do processo. Alguns exemplos desses ajuste são mostrados a seguir:

- velocidade do puxador
- velocidade da rosca
- velocidade de alimentação
- vazão de água na bomba de vácuo
- temperatura no região da matriz
- ajuste na posição do calibrador em relação a matriz

O parâmetro L possui valor nominal de 200 mm e tolerância de 0,5 mm, bilateral. Como não há valores nominais para Vp e Bar, foram atribuídos 2,8 m/min e tolerância de 0,8 para Vp e 250 Bar com tolerância 50. Estes valores foram atribuídos pelo que se conhecia do sistema. A velocidade de 2,8 m/min era tida como máxima pelos operadores e 2,0 m/min a menor velocidade de produção da fabrica, que é atingida como limite em uma outra máquina, mono-rosca. O valor de 250 para BAR é consistente com a observação dos operadores, embora a tolerância de 50 tenha sido considerada estreita. De fato, ao longo do tempo, pode-se constatar que o parâmetro L precisou de alguns reajustes até fornecer uma série longa de leituras fora da zona amarela, principalmente reajustes de posição do calibrador, nos primeiros dias do controle. No final das duas semanas de avaliação o numero de ajustes necessários tinha caído.

O parâmetro Vp mostrou requerer de muitos poucos ajustes , que foram feitos alterando principalmente a velocidade do puxador, mas também das velocidades de alimentação e da rosca. De maneira geral, não houve aumento ou diminuição do número de ajustes necessários durante o teste. De forma semelhante o parâmetro BAR necessitou de poucos ajustes durante o teste, feitos aumentando-se a velocidade da rosca ou diminuindo a alimentação, também não foi notado alteração do número de ajustes no decorrer do teste.

Desta forma estavam criadas as condições para o estudo de capacidade do processo e sua aptidão de resposta ao CEP.

4.1.2. Capacidade e estabilidade do processo

Como foi apresentado no capítulo 2.3 para se avaliar se um processo é ou não capaz de manter os parâmetros de processo dentro de valores especificados, é necessário conhecer qual a distribuição estatística por trás da variação natural do processo. Para isto serão avaliados os parâmetros apresentados no capítulo anterior. O processo será capaz e estável se os parâmetros considerados críticos para o processo estiverem controlados, isto é variando dentro de limites fixos de forma aleatória, sem que nenhuma causa externa esteja influenciando em suas características. O estudo da capacidade do processo, para cada parâmetro, ocorre nas sete etapas citadas no capítulo 3, pode-se resumi-las em:

1. Coleta de dados do parâmetro do processo em estudo
2. Análise dos dados em gráficos de controle apropriados
3. Confirmação ou não de que o processo é estável
4. Determinação dos índices de capacidade do processo
5. Confirmação ou não de que o é capaz

Para que este estudo possa ser realizado é importante que o processo não seja perturbado, isto é, o processo deve permanecer durante todo o estudo sem a intervenção do operador da extrusora em parâmetros de controle, sem alterações das características da matéria prima e sem alteração dos métodos de trabalho. Resumidamente, nenhum dos quatro fatores que agem sobre as causas naturais de variação do processo: equipamento, método, mão de obra e matéria prima, devem ser alterado.

Quanto ao equipamento não é esperado nenhuma variação durante o estudo, embora, com um pouco de critério, perceba-se que na verdade existe alguma variação durante a produção; os estreitos canais de vácuo do calibrador podem obstruir-se, a temperatura da água de refrigeração pode sofrer alguma alteração, etc. Porém, durante o espaço de tempo em que decorrerá o estudo fica assumido que estes fatores não causam distúrbios capazes de alterar significativamente a estabilidade do processo. O tempo total em que foram realizadas as medições e retiradas as amostras para o estudo foi de quinze horas consecutivas. Levando em conta que, em média, a máquina opera em ciclos de setenta e duas horas, entre as quais é realizado o trabalho de manutenção básico (limpeza do calibrador e da matriz, troca de tela, etc.), e que o estudo ocorreu logo nas primeiras

quinze horas após esta manutenção, justifica-se acreditar que o equipamento não proporcionará fontes de instabilidade. Se setenta e duas horas é o tempo médio em que alguma alteração no processo possa vir a aparecer em virtude de alteração no desempenho do equipamento, nas primeiras quinze, ou seja, nos primeiros vinte por cento desse tempo o equipamento não deverá sofrer apreciável mudança em sua atuação.

O método deve ser mantido igual ao usual na empresa, como ao procedimento de inicialização da máquina, forma de aquecer o canhão da extrusora, comprimento em que os perfis serão cortados, etc.

Para poder ter alguma garantia de que a matéria prima não apresentaria grandes variações durante o estudo, foi separado um lote específico de cada componente do composto de PVC a ser utilizado, de forma que se chegasse num total de uma tonelada e meia (1.500 Kg) de composto, este composto, produzido num processo de batelada, capaz de processar cem quilos (100 kg) por ciclo, foi preparado em quinze ciclos consecutivos, mantidos sob as mesmas condições de processamento.

A ultima condição necessária para o estudo seria então analisa-lo durante um certo período em que o processo pudesse ficar livre de intervenções do operador, consumindo apenas a matéria-prima especificada, cortando perfis sempre do mesmo comprimento, enfim, livre de qualquer causa de variação não natural ao processo.

Esta condição pode ser atendida com a autorização de uso da linha para este fim, durante um prazo máximo de dezesseis horas (tempo de dois turnos), durante a qual seriam produzidos apenas perfis com seis metros de comprimento, para fins de estoque.

O perfil de temperaturas, assim como as demais condições de processamento foram mantidas constantes.

Seguem os resultados obtidos para os diferentes parâmetros analisados.

4.1.2.1. Velocidade de produção - V_p

Foram realizadas cinco leituras de velocidade consecutivas, estas cinco medidas constituem um subgrupo. Um total de trinta subgrupos foram tomados, com intervalos de meia em meia hora entre as leituras, realizadas pela mesma pessoa. Os dados convertidos para metros por minuto (m/min) são apresentados na tabela abaixo:

Subgrupo	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	2,500	2,540	2,504	2,500	2,493	2,492	2,516	2,526	2,504	2,492
	2,592	2,532	2,580	2,582	2,580	2,680	2,656	2,752	2,692	2,580
	2,520	2,556	2,583	2,520	2,604	2,680	2,692	2,680	2,716	2,604
	2,604	2,508	2,785	2,583	2,619	2,668	2,692	2,776	2,716	2,614
	2,614	2,568	2,484	2,532	2,58	2,68	2,704	2,692	2,716	2,58
Subgrupo	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	2,500	2,480	2,495	2,500	2,468	2,468	2,497	2,528	2,540	2,504
	2,680	2,656	2,644	2,704	2,592	2,692	2,620	2,644	2,644	2,604
	2,680	2,692	2,740	2,680	2,580	2,680	2,632	2,632	2,740	2,580
	2,668	2,692	2,680	2,692	2,532	2,632	2,644	2,632	2,680	2,590
	2,680	2,704	2,668	2,680	2,580	2,680	2,644	2,632	2,668	2,580
Subgrupo	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
	2,495	2,500	2,524	2,500	2,500	2,494	2,527	2,528	2,515	2,492
	2,740	2,680	2,716	2,728	2,590	2,716	2,880	2,588	2,680	2,580
	2,704	2,716	2,752	2,680	2,604	2,704	2,916	2,564	2,716	2,520
	2,716	2,728	2,692	2,680	2,604	2,728	2,844	2,588	2,644	2,604
	2,704	2,716	2,740	2,680	2,580	2,728	2,880	2,564	2,680	2,616

Tabela 11 – medidas do parâmetro Vp

O cálculo das médias e amplitudes em cada subgrupo é apresentado na tabela a seguir:

Subgrupo	média - \bar{x}	amplitude - R	Subgrupo	média - \bar{x}	amplitude - R
1	2,566	0,234	16	2,630	0,224
2	2,5408	0,389	17	2,607	0,147
3	2,5872	0,060	18	2,614	0,116
4	2,5434	0,201	19	2,654	0,200
5	2,5752	0,124	20	2,572	0,100
6	2,640	0,188	21	2,672	0,245
7	2,652	0,188	22	2,668	0,228
8	2,685	0,250	23	2,685	0,228
9	2,669	0,212	24	2,654	0,228
10	2,574	0,122	25	2,576	0,104
11	2,642	0,180	26	2,674	0,234
12	2,645	0,224	27	2,809	0,389
13	2,645	0,245	28	2,566	0,060
14	2,651	0,204	29	2,647	0,201
15	2,550	0,124	30	2,562	0,124

Tabela 12 –médias e amplitudes, parâmetro Vp

Com isto foram construídos os gráficos de controle apresentados abaixo, a avaliação do gráfico - \bar{x} mostra que o processo não é estável, isto é, este parâmetro deve estar sendo afetado por causas outras que não as variações naturais do processo.

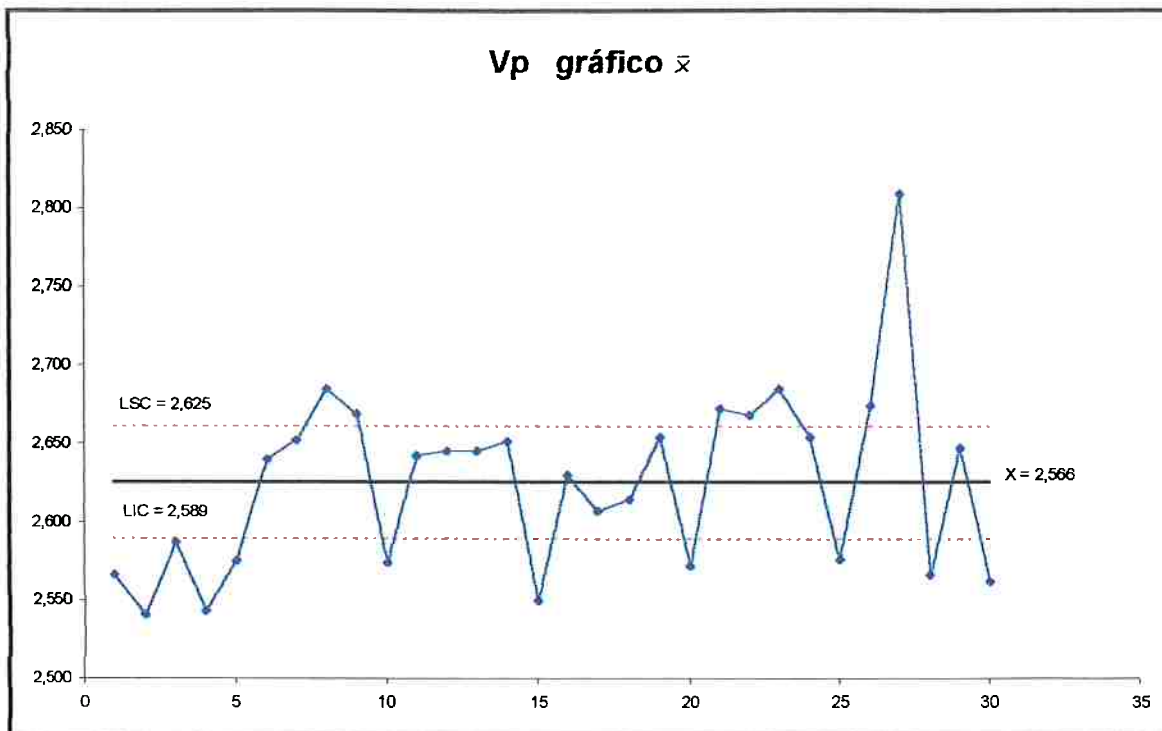


Gráfico de Controle 13 – médias, parâmetro Vp

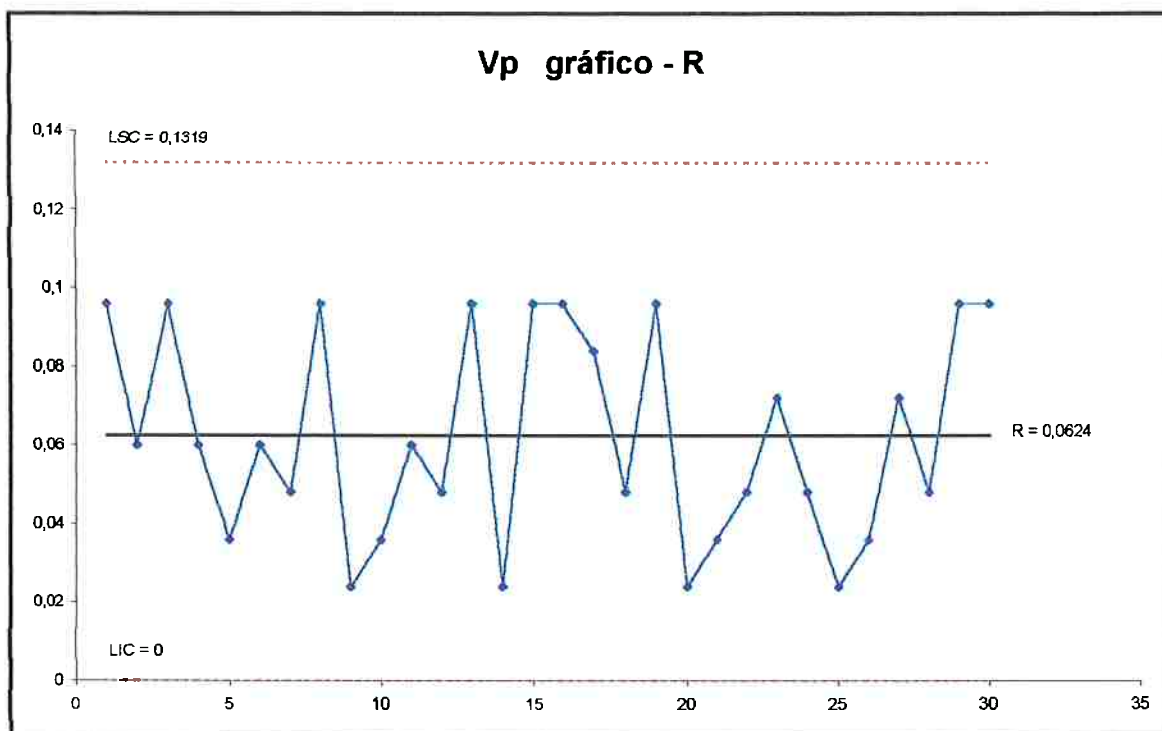


Gráfico de Controle 14 – amplitudes, parâmetro Vp

Porém uma análise no gráfico de amplitudes (R) mostra que não há pontos fora dos limites de controle. Embora os gráficos \bar{x} -R sejam os mais comumente empregados, como foi explicado no capítulo 3, eles não são indicados para este tipo de processo contínuo, onde a amplitude entre as cinco medidas de cada subgrupo é realmente muito baixa. Para uma correta avaliação é melhor considerar a amplitude entre subgrupos distintos, isto é, é mais importante levar em conta a amplitude existente a cada medição realizada de meia em meia hora, do que medições consecutivas. Esta amplitude trás mais informação das variações que sofrem as velocidades durante o processo contínuo.

Este estudo foi feito propositalmente com o objetivo de comprovar as expectativas trazidas no capítulo 3. Assim sendo, é construído um gráfico de controle para medidas individuais \bar{X} , que é indicado para o estudo de processos contínuos, com os valores das primeiras leituras de cada subgrupo. Estes valores foram agrupados em quinze subgrupos de dois elementos e assim foram calculas as amplitudes pela diferença entre eles. A tabela 13 a seguir apresenta estes dados:

subgrupo	x1	x2	R	subgrupo	x1	x2	R	subgrupo	x1	x2	R
1	2,50	2,46	0,032	6	2,49	2,49	0,003	11	2,50	2,49	0,006
2	2,54	2,49	0,043	7	2,51	2,50	0,016	12	2,48	2,52	0,047
3	2,50	2,52	0,024	8	2,52	2,52	0,002	13	2,49	2,52	0,033
4	2,50	2,54	0,040	9	2,50	2,50	0,004	14	2,50	2,51	0,015
5	2,49	2,50	0,011	10	2,49	2,50	0,008	15	2,46	2,49	0,024
		Total				75,122				0,308	
		Médias				2,5040				0,020	

Tabela 13 – medidas, parâmetro Vp

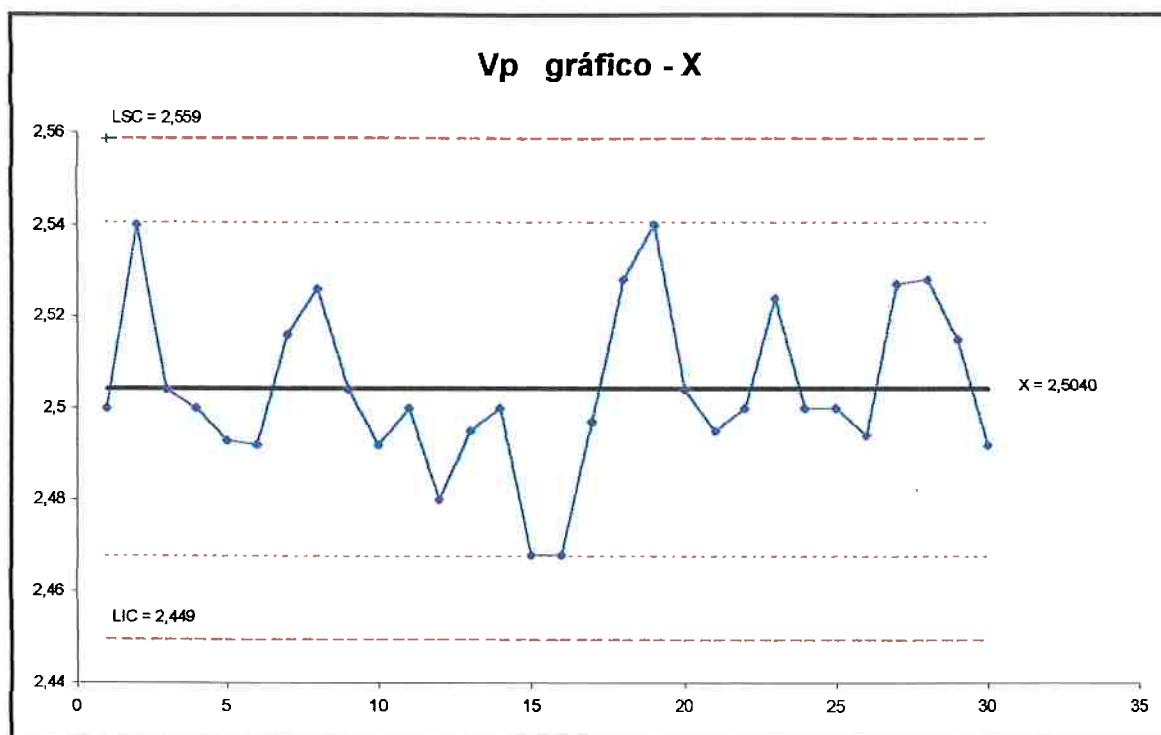


Gráfico de Controle 15 – medidas, parâmetro Vp

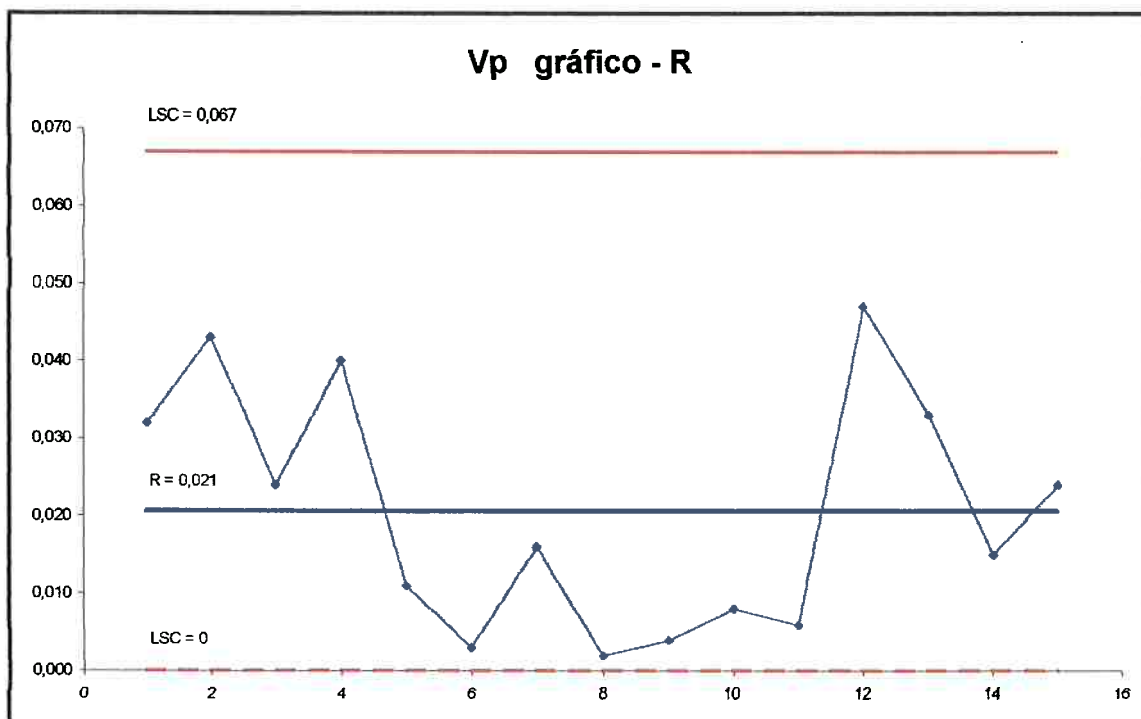


Gráfico de Controle 16 – amplitudes, parâmetro Vp

Acima os gráficos X e R através dos quais é identificado que o processo é estável segundo este parâmetro. O desvio padrão encontrado para estes dados é de 0,018.

O próximo passo é então verificar se o sistema é capaz, para isto serão utilizados os índices de capacidade apresentados no capítulo 2.3.5, para se utilizar estes índices, no entanto, é imprescindível verificar se os dados assumem uma distribuição normal, uma vez que estes só serão validos se tal distribuição estatística for presente. Para esta avaliação segue o teste χ^2 .

Hipóteses:

H_0 , a distribuição das velocidades é normal

H_1 , tal não ocorre

Para tal deve-se calcular χ^2 , que relaciona a frequência observada na amostra (O) e a frequência esperada numa distribuição normal (E). “E” é igual ao número de amostras, trinta, multiplicado pela probabilidade de se encontrar um ponto no respectivo intervalo. Esta probabilidade é “p”, sendo “ $p = p_1 + p_2$ ” e “ $p_i = P(z_i)$ ”. “ $P(z_i)$ ” é a probabilidade do ponto “ z_i ” na curva normal. Os dados amostrais foram divididos em intervalos, obedecendo a regra de frequência mínima de cinco unidades dentro de cada intervalo. Os símbolos “ \leftarrow ” e “ \rightarrow ” indicam os limites inferior e superior do intervalo, respectivamente. A frequência de pontos dentro desse intervalo é (O). Para se obter as probabilidades numa tabela normal padronizada (Apêndice A) equivalentes a normal com média e desvio padrão iguais a da amostragem, respectivamente 2,504 e 0,018; é preciso fazer a transformação linear apropriada dos limites do intervalo ($z = (\bar{x} - \text{limite})/E$).

Os cálculos são resumidos na tabela abaixo:

\leftarrow	\rightarrow	O	z1	z2	p1	p2	p	E	O - E	$(O - E)^2$	χ^2
2,46	2,49	7	-1,99	-0,77	0,476	0,279	0,197	5,919	1,081	0,197425	0,197425
2,49	2,50	10	-0,77	0,00	0,279	0,000	0,279	8,382	1,618	0,312327	0,312327
2,50	2,52	8	0,00	1,21	0,000	0,386	0,387	11,60	-3,607	1,120914	1,120914
2,52	2,54	5	1,21	1,98	0,386	0,476	0,089	2,676	2,324	2,018302	2,018302
		30						28,58	$\chi^2 =$	3,648968	

Tabela 14 – teste de normalidade para Vp

O valor calculado de χ^2 é menor do que o valor encontrado para $\chi^2_{0,95}$ crítico, na tabela de distribuição χ^2 (Apêndice A), que é 3,64.

$$\chi^2 < \chi^2_{\text{crítico}}$$

$$3,64 < 3,84$$

Com isto é aceita a hipótese H_0 , a distribuição das amostras segue o modelo de distribuição normal com um nível de confiança de noventa e cinco por cento (95%).

Logo, os índices de capacidade podem ser calculados, a tabela abaixo apresenta seus valores:

Tolerância	σ	CP	Cpk (LSC)	Cpk (LIC)
0,1092	0,0182	1,00	1,00	1,00

Tabela 15 – Índices de capacidade, Vp

A primeira observação importante é que $CpK_{(LSC)}$ é igual a $CpK_{(LIC)}$ que é igual a CP, portanto a distribuição das velocidades é simétrica em relação à média. Com estes valores é possível estimar que 99,74% das leituras realizadas estarão dentro dos limites de controle. Isto equivale a dizer que a cada mil leituras, apenas três estarão fora dos limites.

Fica assim constatado que o processo é estável e capaz segundo este parâmetro.

4.1.2.2. Pressão na entrada da matriz – BAR

Para o estudo do parâmetro BAR, da mesma forma que ocorreu para a velocidade de produção Vp, as amplitudes entre os subgrupos são mais importantes do que as amplitudes dentro dos subgrupos. Na verdade, devido a precisão do equipamento de medição, este efeito é muito mais drástico. Tomadas cinco medidas consecutivas para formar um subgrupo, depara-se com cinco valores iguais, isto é, amplitude zero dentro do subgrupo. Desta forma o estudo parte do gráfico de medidas individuais.

subgrupo	x1	x2	R	subgrupo	x1	x2	R	subgrupo	x1	x2	R
1	240	242	2	6	234	252	18	11	232	252	20
2	237	236	1	7	240	226	14	12	257	255	2
3	235	243	8	8	222	228	6	13	250	231	19
4	235	234	1	9	224	243	19	14	251	237	14
5	242	224	18	10	258	241	17	15	233	243	10
Total				7177		169					
Médias				239,233		11,2667					

Tabela 16 - medidas, parâmetro BAR

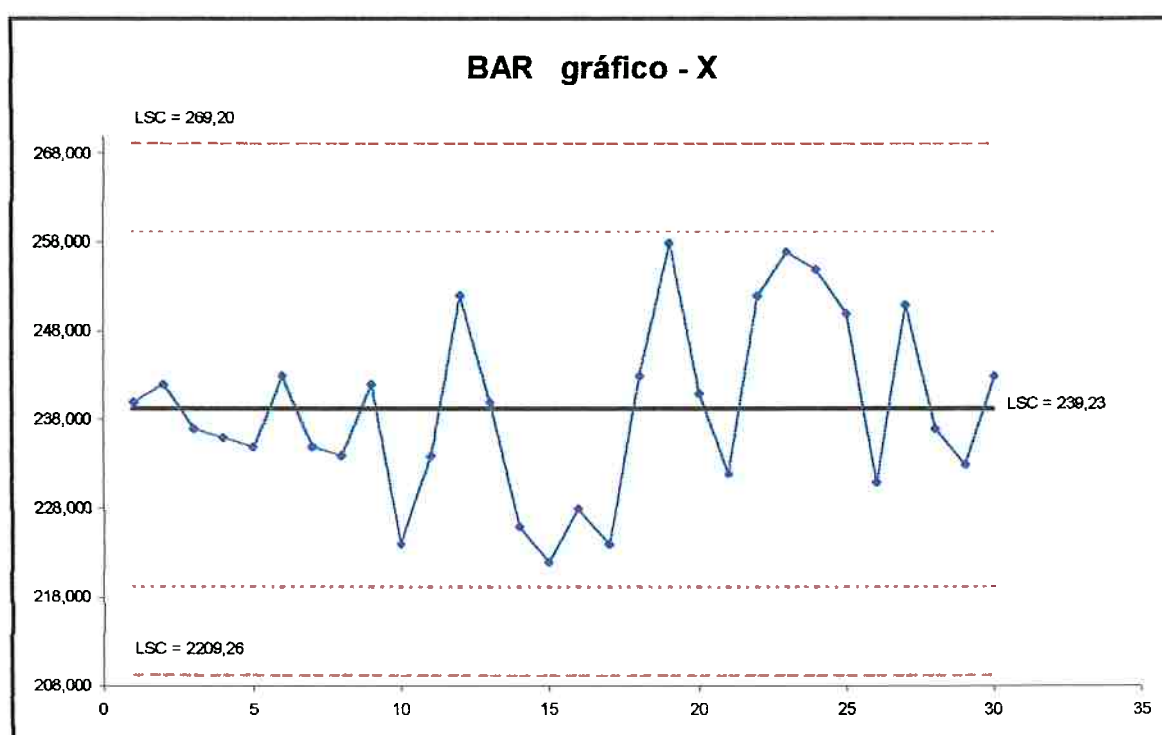


Gráfico de Controle 17 – medidas, parâmetro BAR

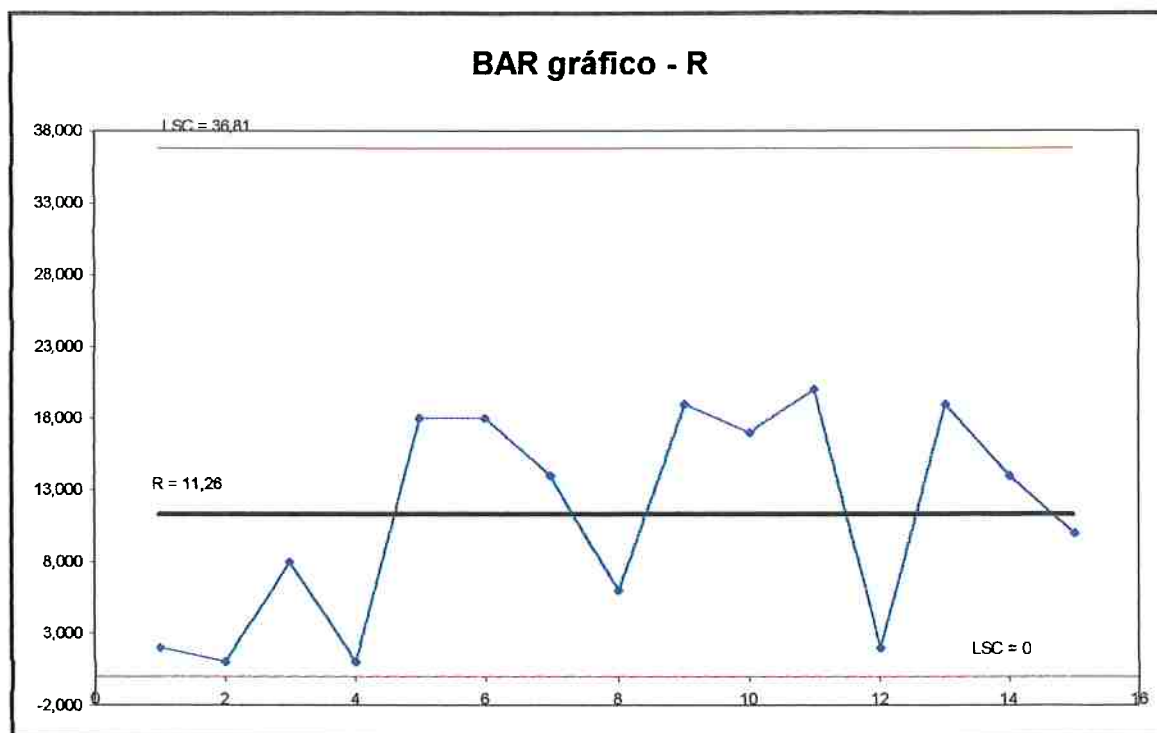


Gráfico de Controle 18 – amplitudes, parâmetro BAR

O gráfico acima não apresenta sinal de instabilidade. Assim, se dá a seguir a investigação da capacidade do processo. O desvio padrão das leituras é de 9,985104 e a média 239,23.

O teste χ^2 será empregado para determinar se a distribuição das leituras do parâmetro BAR segue o modelo de distribuição normal.

Os cálculos são resumidos na tabela abaixo:

←	→	O	z1	z2	p1	p2	p	E	O - E	(O - E)²	χ^2
269,00	276,6	5	-1,68	-0,91	0,45	0,32	0,130	3,9	1,1	1,21	0,310256
276,60	284,2	11	-0,91	-0,15	0,32	0,08	0,243	7,3	3,704	13,71962	1,88043
284,20	291,8	7	-0,15	0,62	0,08	0,20	0,288	8,7	-1,658	2,748964	0,317506
291,80	307,0	7	0,62	2,15	0,20	0,48	0,278	8,4	-1,352	1,827904	0,218858
		30						28,20	$\chi^2 =$	2,72705	

Tabela 17 - teste de normalidade, BAR

O valor calculado de χ^2 é menor do que o valor encontrado para $\chi^2_{0,95}$ crítico, de fato temos:

$$\chi^2 < \chi^2_{\text{crítico}}$$

$$2,73 < 3,84$$

A conclusão é que a distribuição das amostras segue o modelo de distribuição normal com um nível de confiança de noventa e cinco por cento (95%).

Prossegue uma tabela com o resumo dos cálculos dos índices de capacidade:

Tolerância	σ	CP	Cpk (LSC)	Cpk (LIC)
59,9387	9,9851	1,00	1,00	1,00

Tabela 18 - Índices de capacidade, BAR

Novamente a relação $CpK_{(LSC)}$ igual a $CpK_{(LIC)}$ igual a CP aparece, portanto a distribuição das pressões é simétrica em relação à média, tomadas em intervalos de tempo consecutivos. Com isto podemos estimar que 99,7% das leituras realizadas estão dentro dos limites de controle, ou seja a cada mil leituras, três estarão fora dos limites. É interessante notar que o índice CP difere para os parâmetros Vp e BAR, sendo respectivamente, 1,16 e 0,99, isto é, uma diferença de 0,1 ou 17%, porém as leituras fora dos limites aumentam de 0,05% para 0,6%, ou um aumento de 91%!

Fica assim constatado que o processo é estável e capaz segundo este parâmetro.

4.1.2.3. Parâmetro amperagem do motor – Amp

As leituras tomadas no amperímetro são apresentadas na tabela 19, a seguir:

subgrupo	x1	x2	R	subgrupo	x1	x2	R	subgrupo	x1	x2	R
1	17,66	17,81	0,15	6	17,29	17,44	0,15	11	17,86	17,60	0,26
2	17,42	17,33	0,09	7	17,63	17,53	0,1	12	17,84	17,65	0,19
3	17,28	17,55	0,27	8	17,48	17,23	0,25	13	17,40	17,82	0,42
4	17,70	17,64	0,06	9	17,69	17,82	0,13	14	17,36	17,50	0,14
5	17,37	17,51	0,14	10	17,44	17,35	0,09	15	17,44	17,87	0,43

Total	526,51	2,87
-------	--------	------

Médias	17,550	0,1913
--------	--------	--------

Tabela 19 - médias e amplitudes, parâmetro Amp

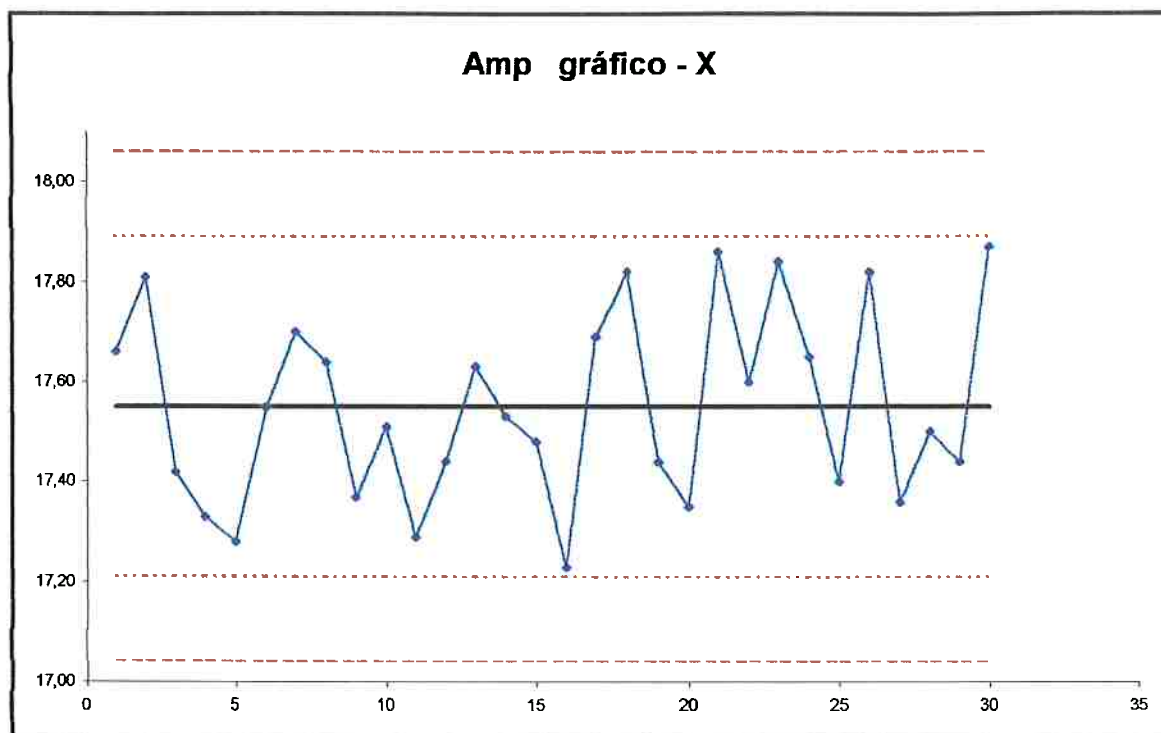


Gráfico de Controle 19 - medidas, parâmetro Amp

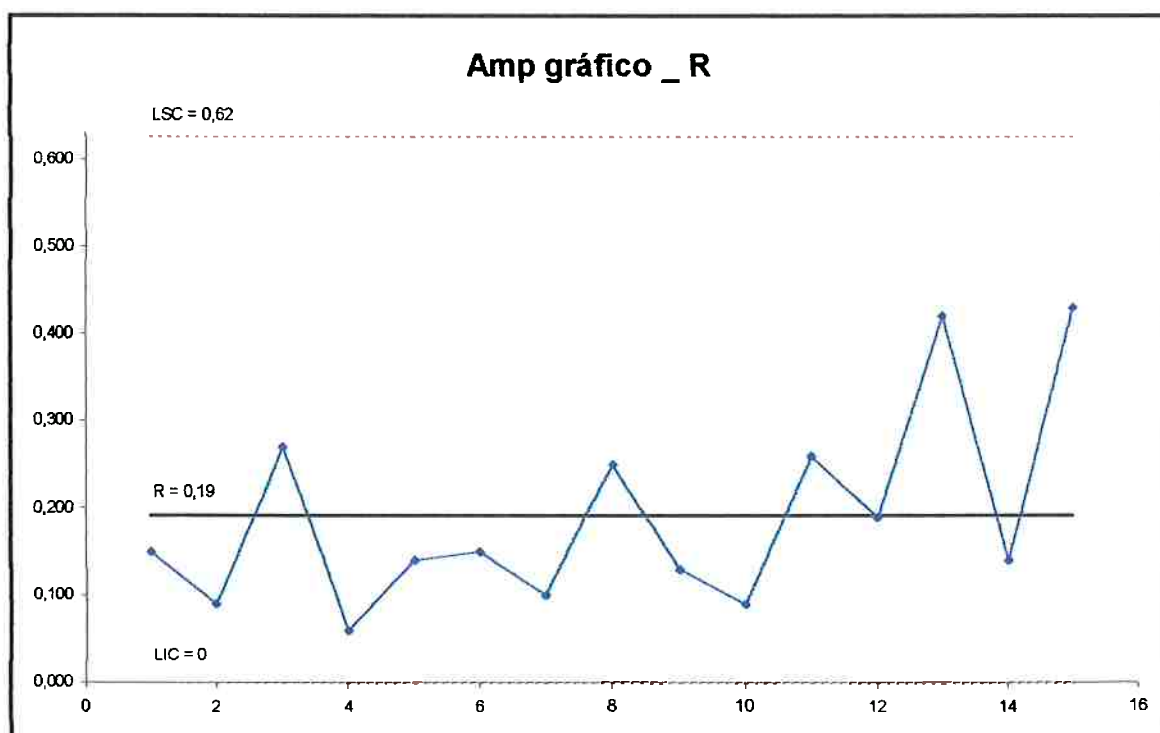


Gráfico de Controle 20 - amplitudes, parâmetro Amp

Estes gráficos indicam estabilidade no processo, verificando a normalidade dos dados e capacidade do processo, temos:

←	→	O	z1	z2	p1	p2	p	E	O - E	(O - E) ²	χ^2
17,23	17,36	5	-1,67	-1,01	0,45	0,34	0,108	3,261	1,73900	3,02412	0,92736
17,36	17,49	8	-1,01	-0,34	0,34	0,13	0,217	6,321	1,67900	2,81904	0,44598
17,49	17,74	11	-0,34	1,00	0,13	0,34	0,474	14,23	-3,23200	10,44582	0,73397
17,74	17,87	6	1,00	1,67	0,34	0,45	0,111	3,336	2,66400	7,09690	2,12737
		30						28,20			$\chi^2 = 2,72705$

Tabela 20 - teste de normalidade, Amp

O valor calculado de χ^2 é menor do que o valor encontrado para $\chi^2_{0,95}$ crítico:

$$\chi^2 < \chi^2_{\text{crítico}}$$

$$2,73 < 3,84$$

A conclusão é que a distribuição das amostras segue o modelo de distribuição normal com um nível de confiança de noventa e cinco por cento (95%).

Tolerância	σ	CP	Cpk (LSC)	Cpk (LIC)
1,017893	0,19137	0,89	0,89	0,89

Tabela 21 - Índices de capacidade, Amp

4.1.2.4. Parâmetro Largura do forro – L

As leituras desse parâmetro ocorreu, como as demais medidas do produto, de um conjunto de amostras recolhido durante o estudo. Um total de trinta amostras retiradas de meia em meia hora foram numeradas e sua largura medida conforme o procedimento descrito na capítulo 2.3. A seguinte tabela contém as informações obtidas:

subgrupo	x1	x2	R	subgrupo	x1	x2	R
1	200,20	200,10	0,1	8	200,01	200,10	0,09
2	200,07	200,17	0,1	9	200,03	200,05	0,02
3	200,06	200,08	0,02	10	200,13	200,08	0,05
4	200,00	200,14	0,14	11	200,16	200,09	0,07
5	200,12	200,16	0,04	12	200,01	200,05	0,04
6	200,11	200,08	0,03	13	200,14	200,03	0,11
7	200,09	200,06	0,03	14	200,05	200,17	0,12
				15	200,04	200,16	0,12
Total		6002,74	1,08	Médias	200,091	0,07	

Tabela 22 - médias e amplitudes, parâmetro L

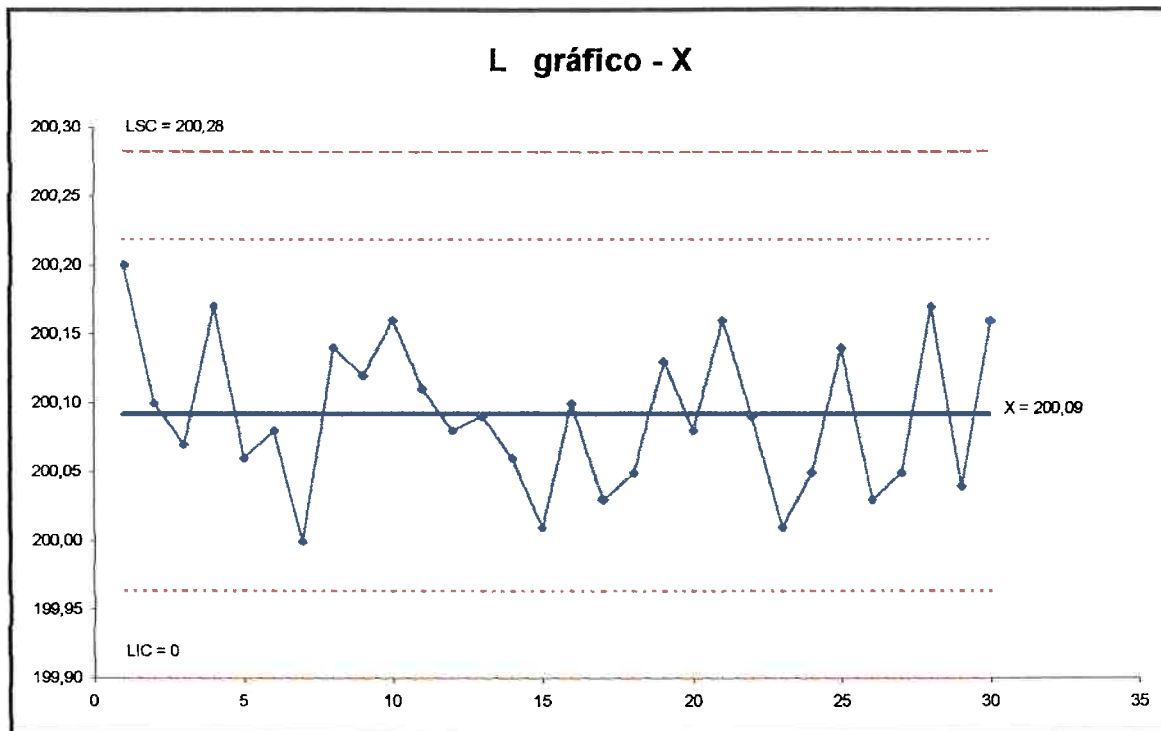


Gráfico de Controle 21 - medidas, parâmetro L

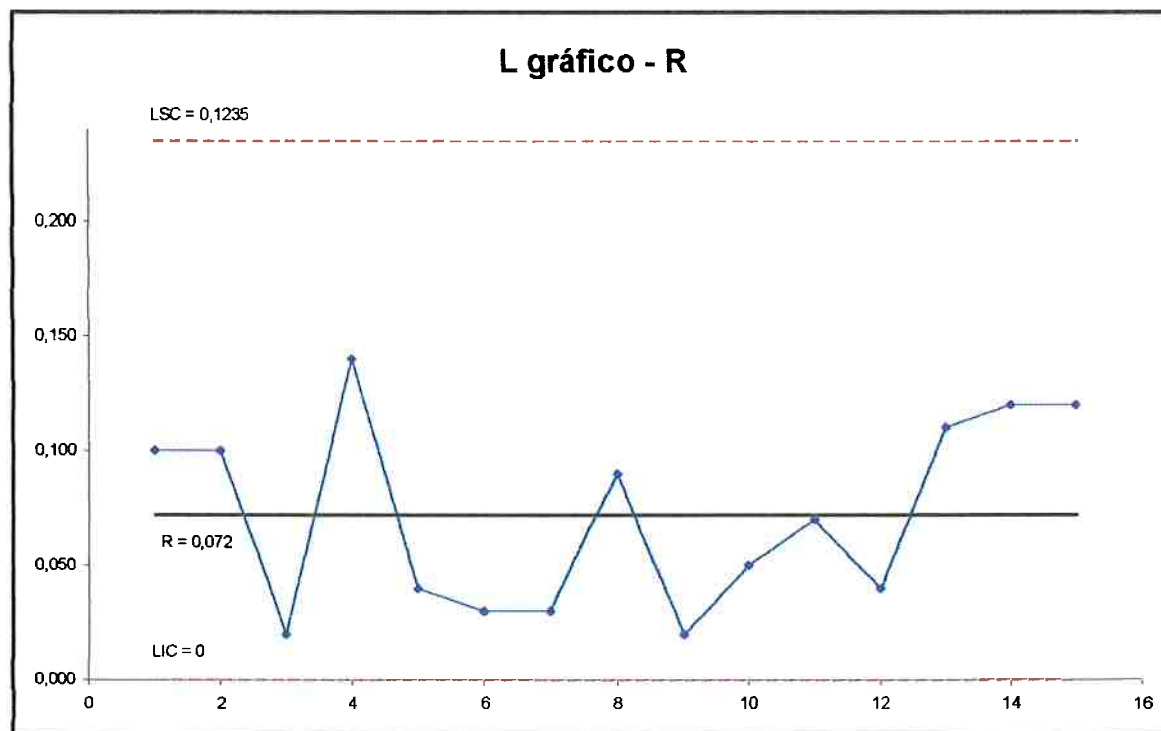


Gráfico de Controle 22 - amplitudes, parâmetro L

Através dos gráficos de controle obtidos comprovamos que o processo é estável segundo este parâmetro. É interessante notar o efeito de uma prática usada pelos operadores em relação a este parâmetro, a de regular sua medida logo após a inicialização da máquina não com o valo nominal, que seria de 200,00 mm, mas com alguns milímetros a mais. Esta prática reflete a intuição dos operadores, com vários anos de experiência, de que uma leitura isolada não avalia bem a gama de valores que o parâmetro pode assumir no decorrer do processo; o que é conhecido entre os operadores como “deixar uma margem de segurança” é na verdade um ajuste na curva de distribuição estatística dos valores obtidos para tal parâmetro.

Se esta curva tivesse seu centro exatamente no valor nominal, e fosse uma distribuição normal como é de se esperar, metade das leituras estariam abaixo desse valor, ao passo que centrando a curva em um valor um pouco mais alto, fica garantido a obtenção do valor nominal ou superior na grande maioria das leituras. De fato, analisando uma curva normal de média e desvio padrão iguais aos do espaço amostral, fica constatado que 96% das leituras indicará um valor acima do nominal, isto é a cada cem leituras tomadas de meia em meia hora, espera-se apenas quatro menores que o valor nominal. Abaixo a curva normal com estas características:

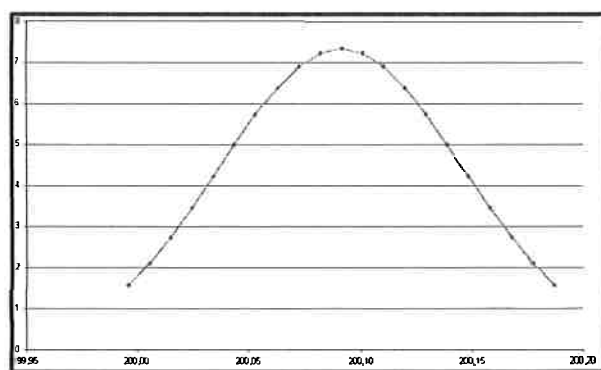


Gráfico 6 - curva normal

Porém para que estas conclusões estejam corretas deve-se testar se de fato a distribuição é normal, segue a tabela com resultado do teste χ^2 , para este parâmetro.

←	→	O	z1	z2	p1	p2	p	E	O - E	(O - E) ²	χ^2
200,04	200,06	5	-1,66	-0,90	0,45	0,31	0,135	4,068	0,932	0,868624	0,213526
200,07	200,08	11	-0,90	-0,14	0,31	0,05	0,262	7,806	3,194	10,20163	1,306896
200,09	200,11	5	-0,14	0,62	0,05	0,23	0,288	8,643	-3,643	13,27144	1,535514
200,12	200,15	9	0,62	2,15	0,23	0,48	0,258	7,554	1,446	2,090916	0,276795
		30							28	$\chi^2 =$	3,33273

Tabela 23 - teste de normalidade, L

O valor calculado de χ^2 é menor do que o valor encontrado para $\chi^2_{0,95}$ crítico, de fato temos:

$$\chi^2 < \chi^2_{\text{crítico}}$$

$$3,34 < 3,84$$

Portanto a distribuição das amostras segue o modelo de distribuição normal com um nível de confiança de noventa e cinco por cento (95%).

Finalmente a análise é concluída com a tabela dos índices de capacidade:

Tolerância	σ	CP	Cpk (LSC)	Cpk (LIC)
0,38304	0,05431	1,17	1,17	1,17

Tabela 24 - índices de capacidade, L

Pode ser calculado que 99,96% das leituras realizadas estão dentro dos limites de controle, a cada dez mil leituras, apenas quatro estarão fora dos limites!

4.1.2.5. Parâmetro encaixe macho – m

As mesmas trinta amostras foram utilizadas para avaliar a espessura do encaixe do forro, a tabela e os gráficos de controle seguem a seguir:

subgrupo	x1	x2	R	subgrupo	x1	x2	R	subgrupo	x1	x2	R
1	4,30	4,15	0,15	6	4,22	4,26	0,04	11	4,06	4,08	0,02
2	4,12	4,20	0,08	7	4,11	4,23	0,12	12	4,20	4,18	0,02
3	4,13	4,19	0,06	8	4,21	4,33	0,12	13	4,19	4,18	0,01
4	4,18	4,31	0,13	9	4,19	4,20	0,01	14	4,27	4,21	0,06
5	4,17	4,12	0,05	10	4,30	4,14	0,16	15	4,23	4,21	0,02

Total	125,87	1,05
-------	--------	------

Médias	4,195667	0,07
--------	----------	------

Tabela 25 - médias e amplitudes, parâmetro m

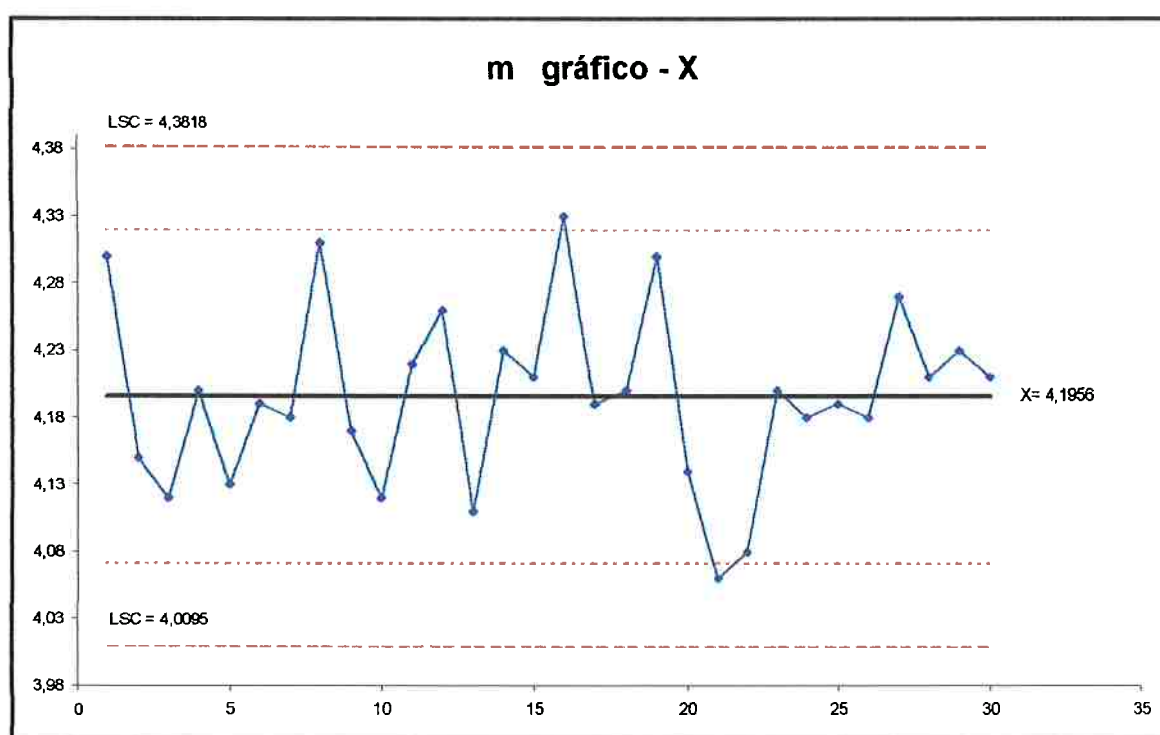


Gráfico de Controle 23 - amplitudes, parâmetro m

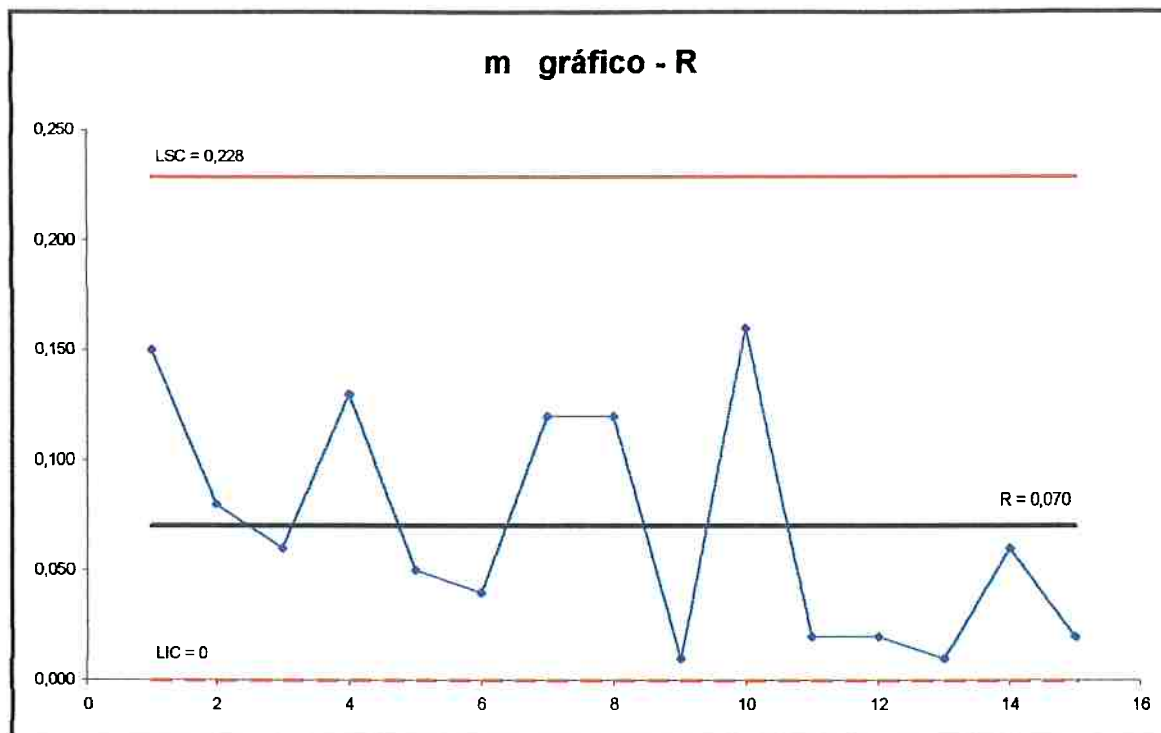


Gráfico de Controle 24 - amplitude, parâmetro m

Não é verificada condição de instabilidade.

O teste de normalidade trás:

←	→	O	z1	z2	p1	p2	p	E	O - E	(O - E) ²	χ^2
4,06	4,14	6	-2,04	-0,84	0,47	0,29	0,179	5,394	0,606	0,367236	0,068082
4,14	4,20	9	-0,84	0,07	0,29	0,02	0,271	8,148	0,852	0,725904	0,08909
4,20	4,22	6	0,07	0,37	0,02	0,14	0,116	3,492	2,508	6,290064	1,801278
4,22	4,33	9	0,37	2,02	0,14	0,47	0,334	10,02	-1,02	1,0404	0,103832
		30							28	$\chi^2 =$	2,06228

Tabela 26 - teste de normalidade, m

O valor calculado de χ^2 é menor do que o valor encontrado para $\chi^2_{0,95}$ crítico:

$$\chi^2 < \chi^2_{\text{crítico}}$$

$$2,07 < 3,84$$

A distribuição das amostras segue o modelo de distribuição normal com um nível de confiança de noventa e cinco por cento (95%).

Da análise dos índices de capacidade, segue a tabela:

Tolerância	σ	CP	Cpk (LSC)	Cpk (LIC)
0,3724	0,06636	0,94	0,94	0,94

Tabela 27 - índices de capacidade, m

Aqui, 99,5% das leituras realizadas estão dentro dos limites de controle, cinco a cada mil leituras estarão fora dos limites. Em comparação com o parâmetro L, essa diminuição do índice CP pode ser relacionado com o aumento do desvio padrão.

4.1.2.6. Parâmetro a

Os dados colhidos nas trinta amostras são apresentados abaixo:

subgrupo	x1	x2	R	subgrupo	x1	x2	R	subgrupo	x1	x2	R
1	7,47	7,53	0,06	6	7,53	7,47	0,06	11	7,5	7,48	0,02
2	7,49	7,44	0,05	7	7,51	7,52	0,01	12	7,46	7,48	0,02
3	7,5	7,49	0,01	8	7,51	7,47	0,04	13	7,49	7,48	0,01
4	7,48	7,53	0,05	9	7,45	7,48	0,03	14	7,51	7,5	0,01
5	7,47	7,52	0,05	10	7,5	7,54	0,04	15	7,49	7,46	0,03
Total				224,75		0,49					
Médias				7,491667		0,03266					

Tabela 28 - médias e amplitudes, parâmetro a

E assim temos os gráficos de controle relacionados:

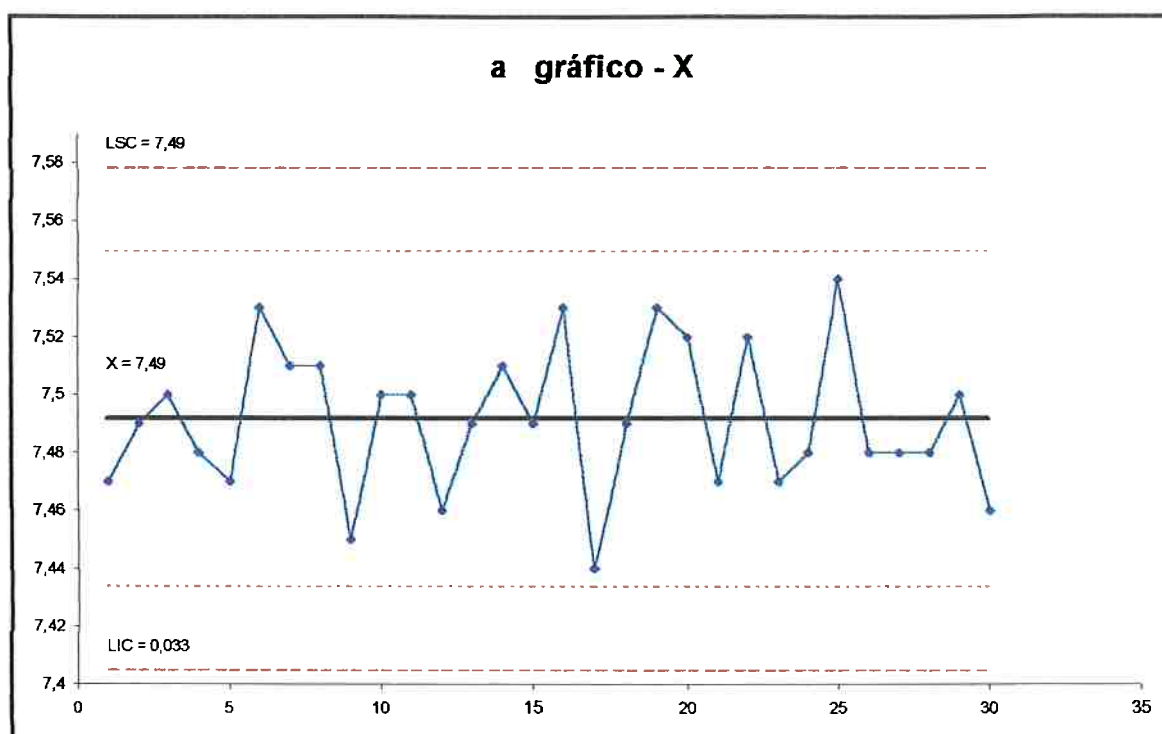


Gráfico de Controle 25 - medidas, parâmetro a

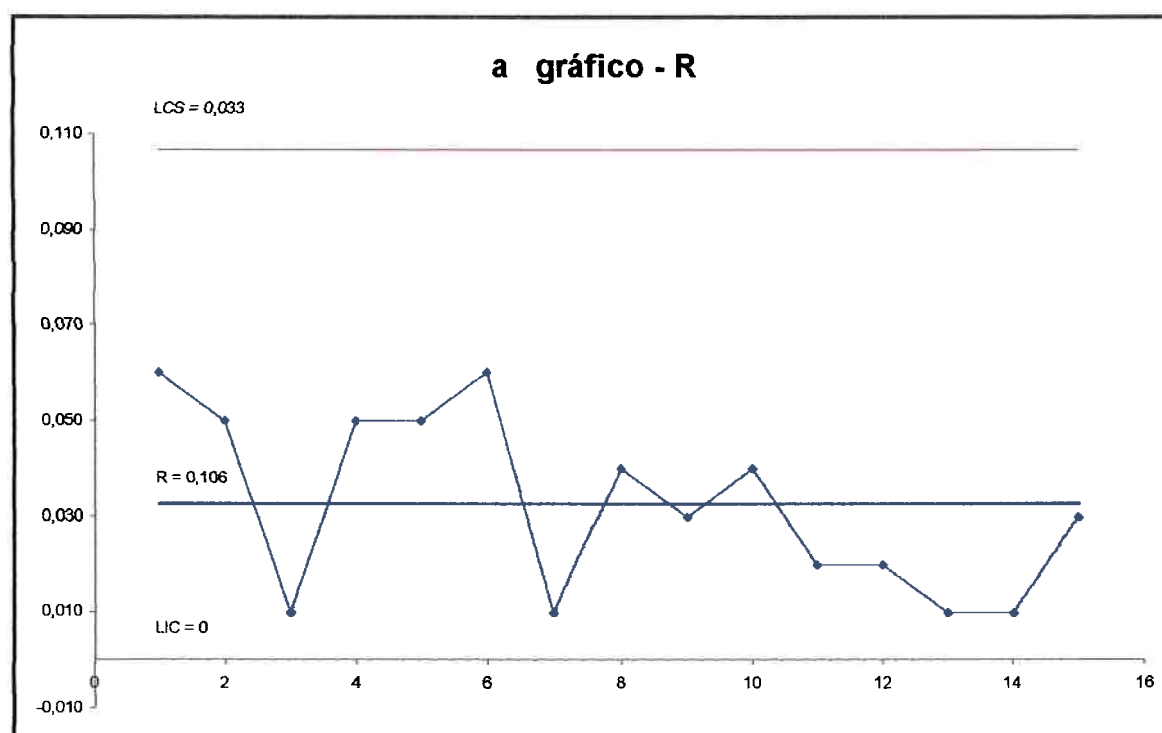


Gráfico de Controle 26 - amplitudes, parâmetro a

←	→	O	z1	z2	p1	p2	p	E	O - E	(O - E) ²	χ^2
7,44	7,46	5	-2,04	-1,25	0,47	0,38	0,088	2,661	2,339	5,470921	2,055964
7,46	7,48	8	-1,25	-0,46	0,38	0,17	0,217	6,507	1,493	2,229049	0,342562
7,48	7,51	10	-0,46	0,72	0,17	0,25	0,428	12,84	-2,84	8,0656	0,628162
7,51	7,54	7	0,72	1,91	0,25	0,46	0,209	6,273	0,727	0,528529	0,084255
		30							28	$\chi^2 =$	3,11094

Tabela 29 - teste de normalidade, a

O valor calculado de χ^2 é menor do que o valor encontrado para $\chi^2_{0,95}$ crítico:

$$\chi^2 < \chi^2_{\text{crítico}}$$

$$3,11 < 3,84$$

A distribuição das amostras segue o modelo de distribuição normal com um nível de confiança de noventa e cinco por cento (95%).

Então os índices de capacidade, resumem:

Tolerância	σ	CP	Cpk (LSC)	Cpk (LIC)
0,173787	0,02533	1,14	1,14	1,14

Tabela 30 - índices de capacidade, a

Logo, 99,94% das leituras realizadas estão dentro dos limites de controle, cinco a cada mil leituras estarão fora dos limites.

4.1.2.7. Parâmetro p

Das leituras das amostras temos a tabela de dados abaixo:

subgrupo	x1	x2	R	subgrupo	x1	x2	R	subgrupo	x1	x2	R
1	0,75	0,83	0,08	6	0,83	0,84	0,01	11	0,67	0,71	0,04
2	0,73	0,77	0,04	7	0,71	0,68	0,03	12	0,70	0,78	0,08
3	0,70	0,64	0,06	8	0,71	0,69	0,02	13	0,69	0,70	0,01
4	0,63	0,63	0	9	0,69	0,66	0,03	14	0,73	0,69	0,04
5	0,63	0,66	0,03	10	0,70	0,68	0,02	15	0,70	0,70	0

Total	21,23	0,49
Médias	0,707	0,0016

Tabela 31 - médias e amplitudes, parâmetro p

Da avaliação da tabela, fica claro que existem dois pontos, 4 e 15, que se igualam ao LIC - R, de fato montando os gráficos de controle abaixo, fica comprovado que a amostra nos dá sinais de instabilidade do processo.

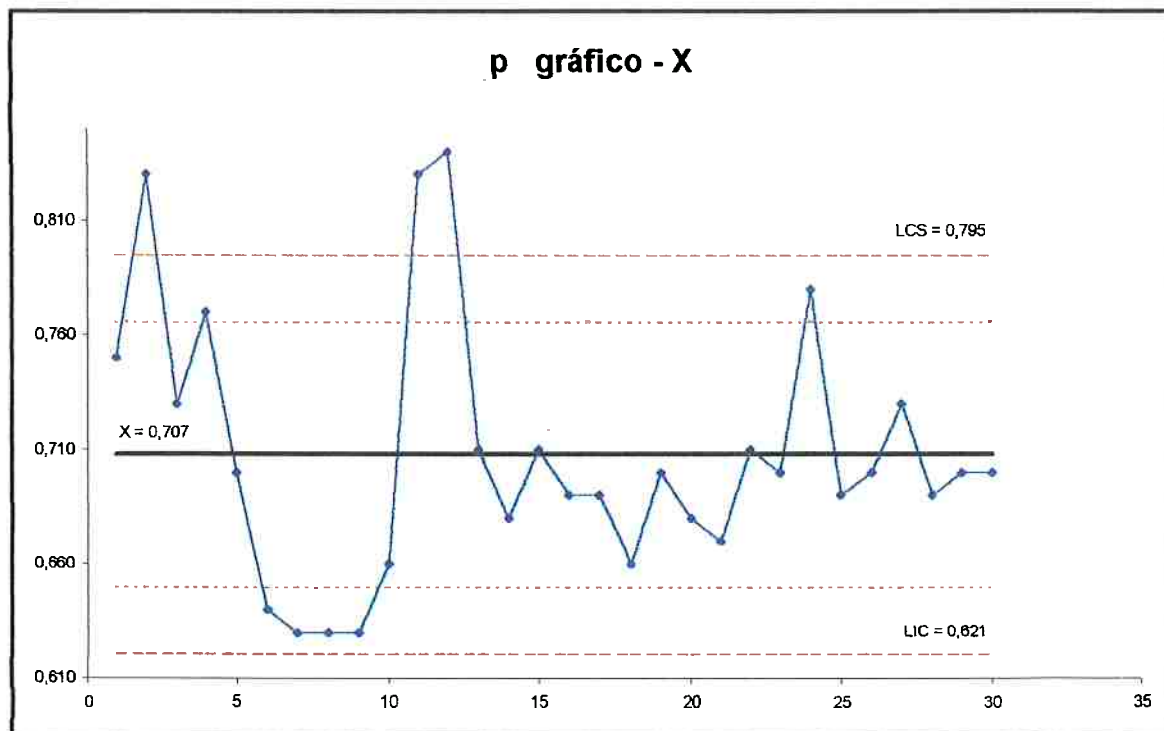


Gráfico de Controle 27 - medidas, parâmetro p

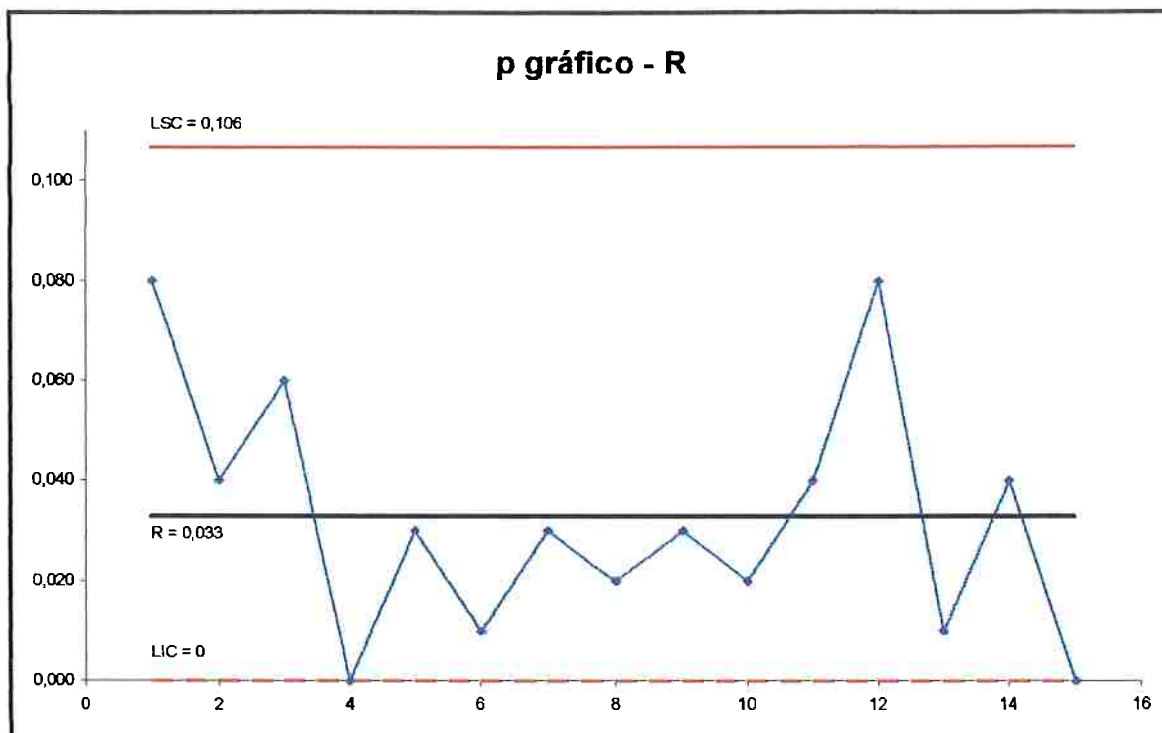
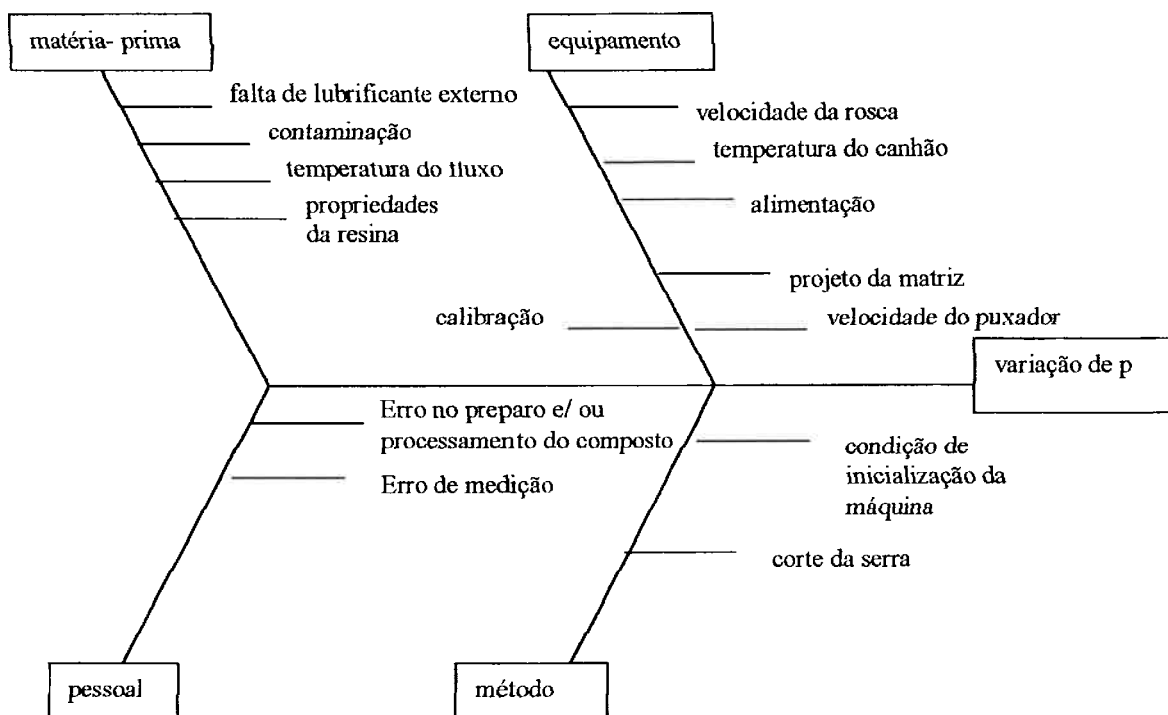


Gráfico de Controle 28 - amplitudes, parâmetro p

Este fato nos leva a especular sobre as possíveis causas dessa variação intermitente, isto é, não aleatória. A busca por uma provável explicação começa por um diagrama de causas, aqui foram apresentadas apenas uma seleção do total de idéias apresentadas em conversas do autor com operadores de máquina, técnicos do fabricante da máquina e técnicos de alguns fornecedores de matéria prima.:



Quando o diagrama chegou no estágio mostrado acima, depois de serem descartadas outras idéias menos prováveis como, temperatura ambiente, umidade relativa, temperatura da água de refrigeração, design da rosca, design da matriz, etc, foi construído um diagrama de Pareto relacionando essas idéias. A seguir são analisadas as proposições acima.

1. Falta de lubrificante externo

Um lubrificante externo é aquele que é expulso do fluxo de material durante o processamento e age entre ele e o metal do cilindro, da rosca e depois da matriz. A idéia é que a falta deste aditivo aumenta-se o atrito entre o fluxo e a matriz causando o problema. Porém isto não explica porque só a parede interna sofreria este efeito, além do que, se sabia que este lubrificante chega a se depositar no calibrador, portanto, esta hipótese é pouco provável.

2. Contaminação

Sempre é possível haver contaminação do material durante seu traslado pela fábrica, através da tubulação que o leva ao funil, durante o tempo que permanece ensacado no estoque, porém seria de se esperar que causasse efeito em outros parâmetros,

ainda que a parede interna seja a região mais delgada do perfil e portanto mais susceptível a sofrer a influencia de alguma partícula sólida que pudesse estar dispersa no fluxo.

3. Temperatura do fluxo

Apesar da temperatura ser altamente responsável pelo comportamento mecânico do material, a parede, sendo a parte mais delgada, e que esfria mais rapidamente seria a menos influenciada por possíveis variações neste sentido.

4. Características da resina

A resina utilizada para perfis rígidos difere da resina utilizada para filmes. De forma que poderia apresentar um comportamento diferente nestas seções mais finas.

5. Velocidade da rosca

A velocidade da rosca não mostra alterações nos equipamentos de medição da máquina, porém, de fato, pequenas variações não detectáveis por estes instrumentos poderiam estar causando as variações.

6. Temperatura do canhão

Como tem relação direta com a manutenção da temperatura do fluxo segue a mesma linha de raciocínio usada para a temperatura do fluxo.

7. Alimentação

A alimentação da canhão com material muda drasticamente as características de operação, como será explicado no próximo capítulo, estas condições podem afetar o parâmetro em questão de forma a tornar sua condição instável.

8. Projeto da matriz

Um projeto errado poderia causar este distúrbio, porém, para poder avaliar corretamente este conceito, seria necessário dados históricos do comportamento do parâmetro durante um longo período.

9. Velocidade do puxador

Alterações nesta velocidade poderiam influenciar da mesma forma do que a velocidade da rosca., porém mais acentuada, isto por que, esta velocidade impõe uma certa tensão ao extrudado, que poderia estar causando a variação não aleatória em sua espessura.

10. Calibração

Um aspecto interessante do processo é a calibração a vácuo. A relação entre as pressões no interior do perfil, pressão atmosférica, tida como invariável, e a pressão imediatamente abaixo da parede do calibrador, podem variar, devido ao efeito da bomba de vácuo ligada ao sistema. Esta variação poderia não ser grande suficiente para influenciar o contorno externo do perfil, que fica adjacente a parede do calibrador, porém, poderia influenciar a espessura da parede interna que seria repuxada ou afrouxada por uma alteração ainda que muito pequena, da distancia entre as paredes internas e o calibrador.

11. Erro no preparo e/ ou processamento do composto

Embora sejam supervisionados e inspecionados com frequência, erros na medição das quantidades de cada um dos componentes poderiam ocorrer, ou ainda erro no tempo de processamento da mistura. Porém, restaria saber por que o parâmetro parede interna seria mais afetada que outros.

12. Erro de medição

Como a medição desse parâmetro é bastante trabalhosa pelo procedimento adotado, é bastante possível que a variação seja inerente ao processo, neste caso suspeita-se da avaliação feita.

13. Condição de inicialização da máquina

Novamente seriam necessários dados históricos para poder se avaliar esta hipótese. Mas ela incorre na mesma questão de hipóteses tão gerais como esta: por que a alteração seria notada apenas neste parâmetro.

14. Corte da Serra

O momento em que a serra corta o perfil introduz o problema de corte do fluxo de ar nas colmeias internas do perfil. Pelos mesmos motivos da hipótese de calibração, esta variação na relação entre as pressões dentro do calibrador, poderiam estar ligadas a instabilidade observada.

Neste ponto do estudo do processo, porém mudaram-se algumas características de operação, como comentado no capítulo 4.2. Assim, as investigações sobre estas hipóteses foram brecadas, para que um novo estudo do processo, sob estas novas condições tivesse lugar. As novas condições assim como os resultados desse novo estudo são assunto do capítulo seguinte.

4.2. Segundo Estudo estatístico do processo

4.2.1. Pré-Controle

Seguindo os mesmos moldes do pré-controle feito anteriormente verificou-se que as velocidade V_p caíram sempre na região verde acima do nominal 2,8 m/min, indicando um aumento na média desse parâmetro. Depois do estudo estatístico, mudou-se o valor nominal e a tolerância, para este controle.

O parâmetro BAR passou a apresentar apenas valores acima do nominal, inclusive vários valores nas zona vermelha e amarela. Como este é um parâmetro de eficiência do processo, as peças não foram descartadas, por estarem de acordo com as medidas. Houve, também um aumento na média dos valores e novos limites tiveram que ser calculados para este controle. O parâmetro L permaneceu sem alterações e o valor de seus limites foram mantidos.

4.2.2. Estudo do processo sob novas condições

Como foi explicado no cap. 3.4, novas condições de operação foram impostas, afim de se alcançar maiores velocidades de produção mudando-se a relação entre as velocidades da rosca e de alimentação, processando mais material por unidade de tempo. Este estudo pode então analisar o efeito dessa alteração do processo sobre o comportamento estatísticos dos parâmetros de controle anteriormente estudados. Os mesmos cuidados em relação a manter o processo livre de efeitos externos foi tomado. Também foi preparado um lote do composto de PVC de uma tonelada e meia para o estudo, porém, é possível que alguma alteração deva-se ao fato de que neste meio tempo, foram alterados os fornecedores de alguns aditivos. Desta vez o estudo foi feito por um período de oito horas consecutivas, sendo os dados coletados de meia em meia hora em subgrupos de dois, tendo inicializado a máquina para este fim, depois de um serviço de manutenção básico, igual ao do primeiro estudo.

4.2.2.1.Velocidade de produção - Vp

As leituras realizadas resultaram na tabela abaixo:

subgrupo	x1	x2	R	subgrupo	x1	x2	R
1	3,100	3,088	0,012	8	3,126	3,124	0,002
2	3,066	3,118	0,052	9	3,104	3,100	0,004
3	3,100	3,077	0,023	10	3,088	3,124	0,036
4	3,100	3,133	0,033	11	3,140	3,090	0,05
5	3,104	3,097	0,007	12	3,124	3,090	0,034
6	3,088	3,116	0,028	13	3,095	3,128	0,033
7	3,092	3,096	0,004	14	3,100	3,142	0,042
				15	3,099	3,094	0,005
Total				93,143	0,365		
Médias				3,1047	0,024		

Tabela 32 - médias e amplitudes, parâmetro Vp

Esta tabela trás o fato de que as velocidades foram aumentadas, porém resta avaliar se este novo desempenho esta sob controle ou se fez é apenas em decorrência de pontos fora dos limites de controle que forçam a média das velocidades para cima. Isto pode ser melhor avaliado com os gráficos de controle a seguir:

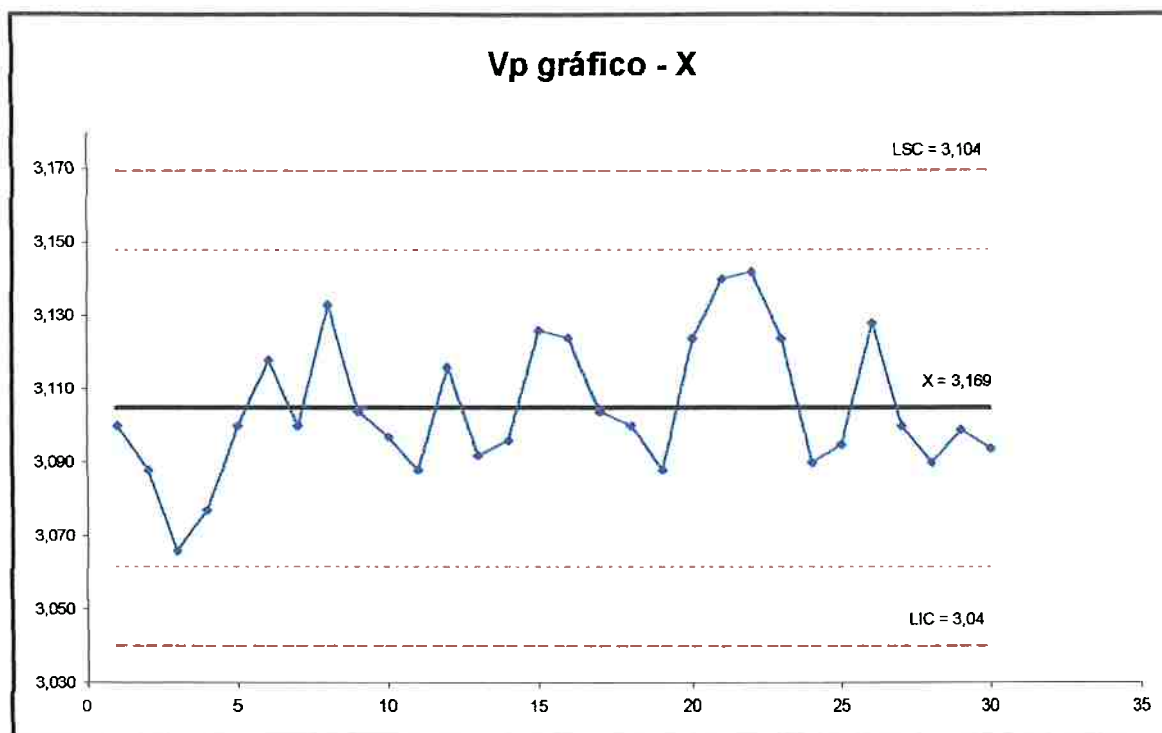


Gráfico de Controle 29 - medidas, parâmetro Vp

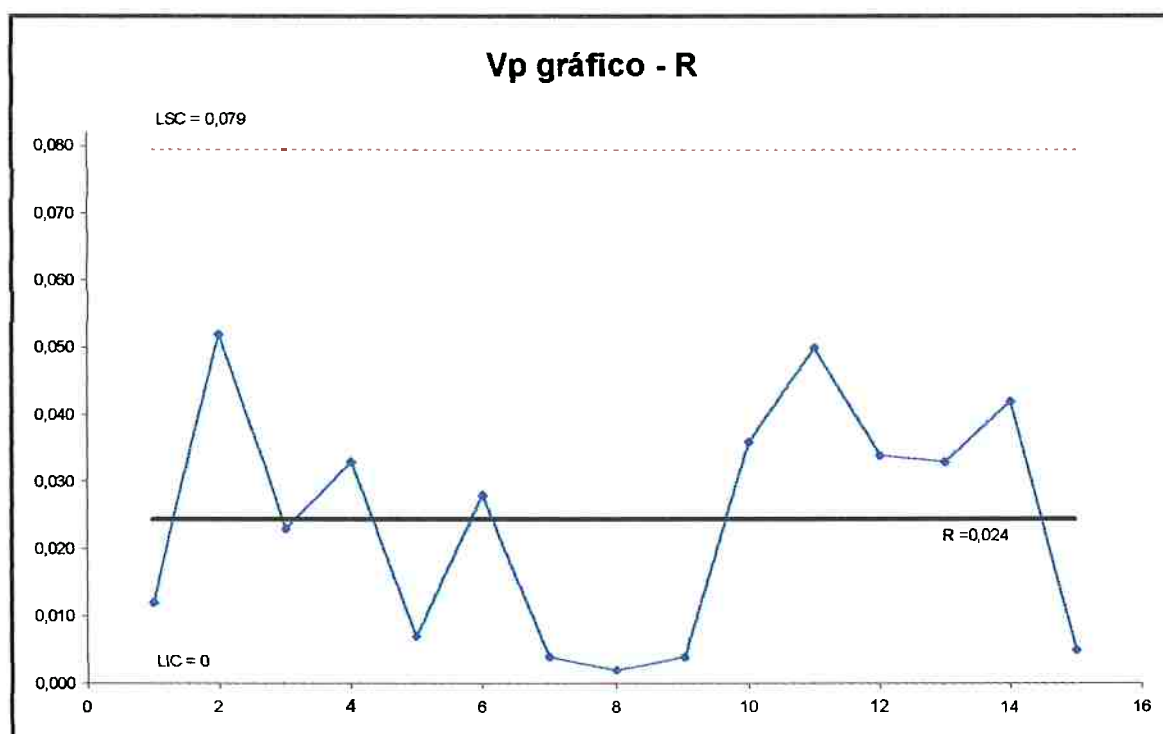


Gráfico de Controle 30 - amplitudes, parâmetro Vp

Portanto as novas velocidades além de serem em média mais altas permanecem sob controle. Da mesma forma como no estudo anterior, seguem as tabelas com o resultado do teste de normalidade e os índices de capacidade do processo:

←	→	O	z1	z2	p1	p2	p	E	O - E	(O - E) ²	χ^2
3,06	3,08	5	-2,08	-0,85	0,481	0,302	0,17890	5,367	-0,367	0,134689	0,025096
3,08	3,09	5	-0,85	-0,47	0,302	0,180	0,12150	3,645	1,355	1,836025	0,503711
3,09	3,10	8	-0,47	-0,04	0,180	0,016	0,16480	4,944	3,056	9,339136	1,888984
3,10	3,14	12	-0,04	2,00	0,016	0,477	0,49320	14,79	-2,796	7,817616	0,52836
30									$\chi^2 =$	2,94615	

Tabela 33 - teste de normalidade, Vp

O valor calculado de χ^2 é menor do que o valor encontrado para $\chi^2_{0,95}$ crítico, na tabela de distribuição χ^2 , que é 3,84.

$$\chi^2 < \chi^2_{\text{crítico}}$$

$$2,95 < 3,84$$

A distribuição das amostras segue o modelo de distribuição normal com um nível de confiança de noventa e cinco por cento (95%).

Logo, os índices de capacidade podem ser calculados, a tabela abaixo apresenta seus valores:

Tolerância	σ	CP	Cpk (LSC)	Cpk (LIC)
0,129453	0,0186	1,16	1,16	1,16

Tabela 34 - índices de capacidade, Vp

Com estes valores é possível estimar que 99,95% das leituras realizadas estarão dentro dos limites de controle.

Portanto as velocidades avaliadas indicam que o processo continua sob controle. De fato o desvio padrão das amostras dos dois estudos são bastante próximos, o que indica que houve realmente uma deslocação da média para valores maiores sem no entanto alterar drasticamente o perfil de distribuição dessas velocidades em torno desta média, na verdade, pelo aumento do CP verifica-se que o nível de instabilidade foi reduzido para este parâmetro.

4.2.2.2. Pressão na entrada da matriz - BAR

Mais uma vez os dados foram registrados numa tabela para a construção dos gráficos de controle que seguem:

subgrupo	x1	x2	R	subgrupo	x1	x2	R	subgrupo	x1	x2	R
1	240	242	2	6	234	252	18	11	232	252	20
2	237	236	1	7	240	226	14	12	257	255	2
3	235	243	8	8	222	228	6	13	250	231	19
4	235	234	1	9	224	243	19	14	251	237	14
5	242	224	18	10	258	241	17	15	233	243	10
Total					7177		169				
Médias					239,233		11,2667				

Tabela 35 - médias e amplitudes, parâmetro BAR

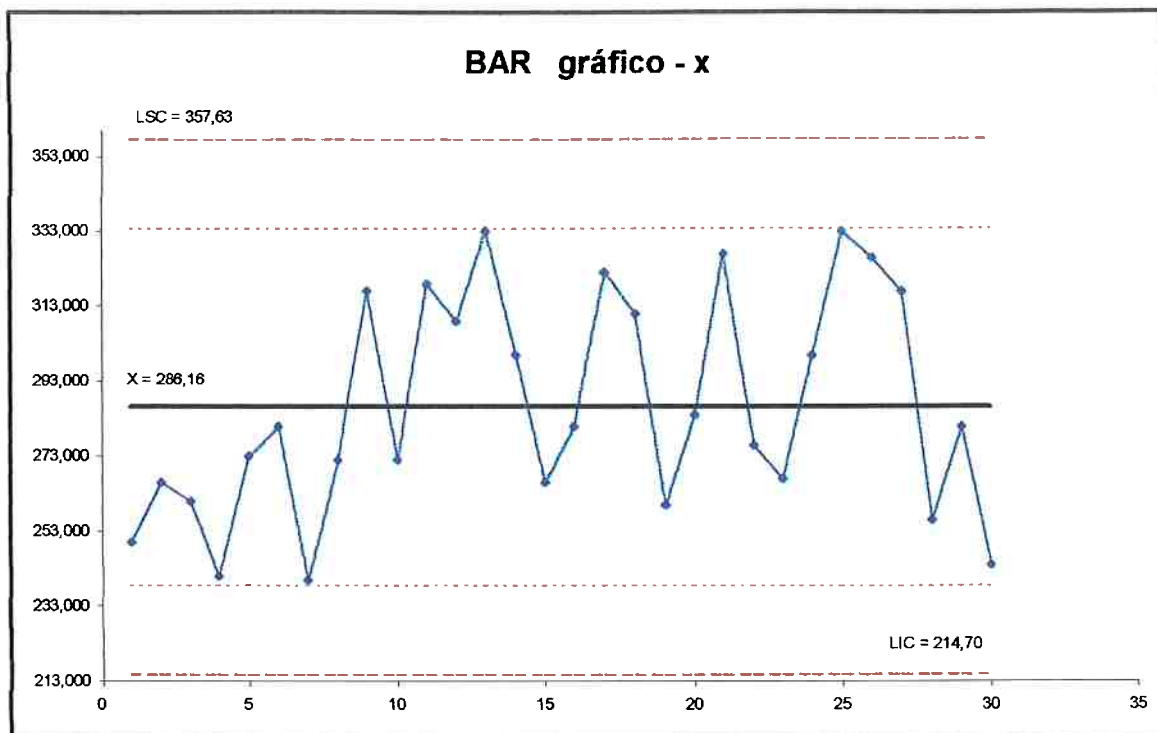


Gráfico de Controle 31 - medidas, parâmetro BAR

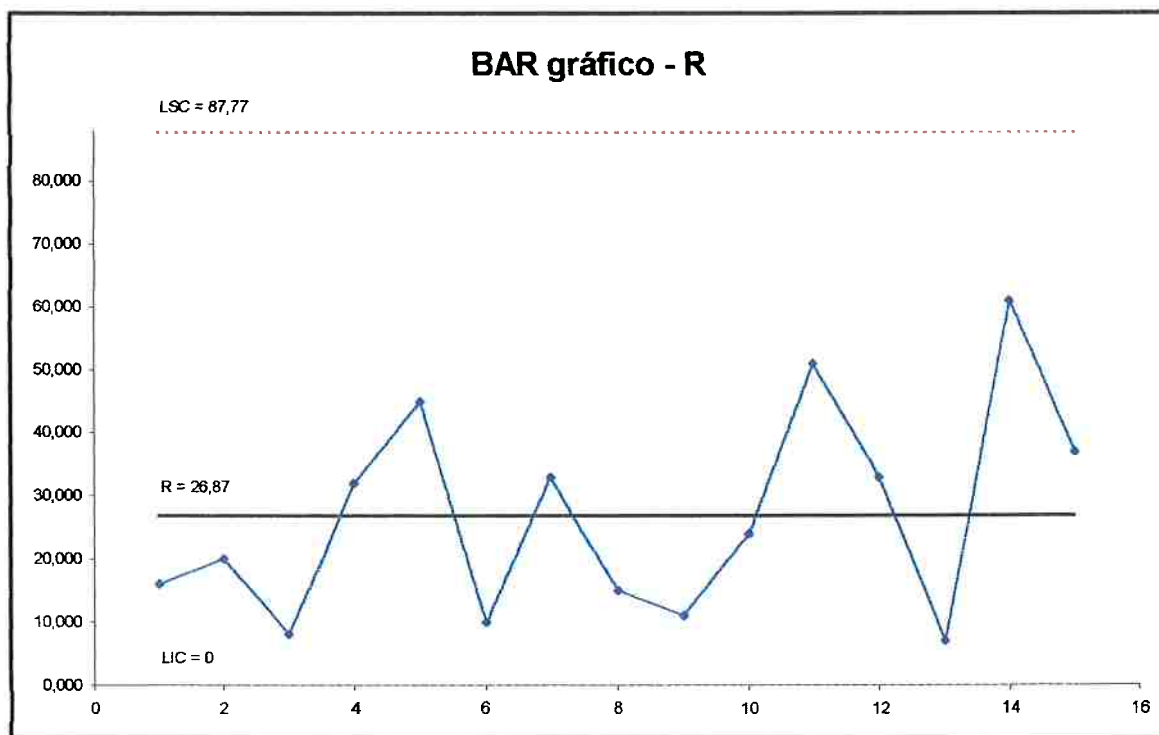


Gráfico de Controle 32 – amplitudes, parâmetro BAR

Os gráficos indicam que não a sinais de instabilidade, apesar da pressão ter se elevado. Isto era de se esperar, devido a maior quantidade de material no corpo da extrusora, além do aumento de velocidade. Seguem as tabelas com o teste de normalidade e os índices de capacidade:

←	→	O	z1	z2	p1	p2	p	E	O - E	(O - E) ²	χ^2
240	260	6	-1,56	-0,89	0,44	0,31	0,127	3,819	2,181	4,756761	1,245551
260	280	8	-0,89	-0,22	0,31	0,08	0,226	6,786	1,214	1,473796	0,217182
280	300	6	-0,22	0,45	0,08	0,17	0,260	7,821	-1,821	3,316041	0,423992
300	320	5	0,45	1,12	0,17	0,36	0,195	5,85	-0,85	0,7225	0,123504
30										$\chi^2 =$	3,65094

Tabela 36 - teste de normalidade, BAR

O valor calculado de χ^2 é menor do que o valor encontrado para $\chi^2_{0,95}$ crítico, de fato temos:

$$\chi^2 < \chi^2_{\text{crítico}}$$

$$3,65 < 3,84$$

A distribuição das amostras segue o modelo de distribuição normal com um nível de confiança de noventa e cinco por cento (95%).

Tolerância	σ	CP	Cpk (LSC)	Cpk (LIC)
142,9307	29,2752	0,81	0,81	0,81

Tabela 37 - índices de capacidade, BAR

Com isto podemos estimar que 98,54% das leituras realizadas estão dentro dos limites de controle. Notamos aqui, que além de um aumento das médias houve também um aumento na dispersão das leituras, com isso o índice de capacidade ficou menor. Portanto o processo embora ainda estável, como sugerem os gráficos de controle, tornou-se menos apto a manter os valores numa faixa estreita ao redor da média. Comparando-se duas curvas normais com as médias e desvios de cada uma das situações, podemos visualizar melhor este fato. As curvas são mostradas abaixo:

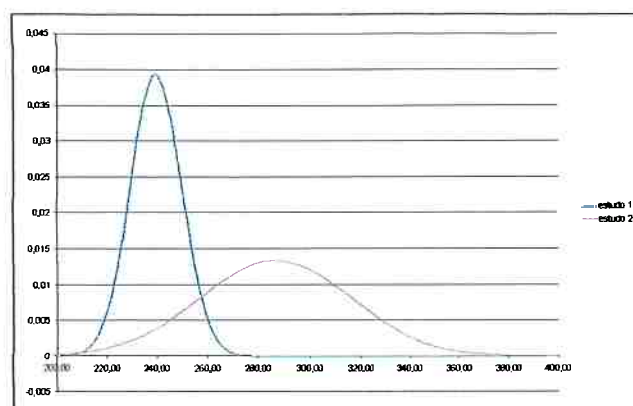


Gráfico 7 - comparação das normais, parâmetro BAR

4.2.2.3. Parâmetro amperagem do motor – Amp

As leituras tomadas no amperímetro são apresentadas abaixo, junto aos gráficos de controle relacionados:

subgrupo	x1	x2	R	subgrupo	x1	x2	R
1	20,150	20,230	0,08	8	19,960	20,470	0,51
2	19,940	19,670	0,27	9	19,650	20,450	0,8
3	20,130	19,820	0,31	10	20,160	20,350	0,19
4	20,220	19,910	0,31	11	20,440	19,660	0,78
5	19,680	19,770	0,09	12	19,700	19,840	0,14
6	19,900	20,260	0,36	13	20,130	20,470	0,34
7	20,100	19,500	0,6	14	20,440	19,980	0,46
				15	19,600	20,300	0,7

Total	600,88	5,94
Médias	20,0293	0,396

Tabela 38 - médias e amplitudes, parâmetro Amp

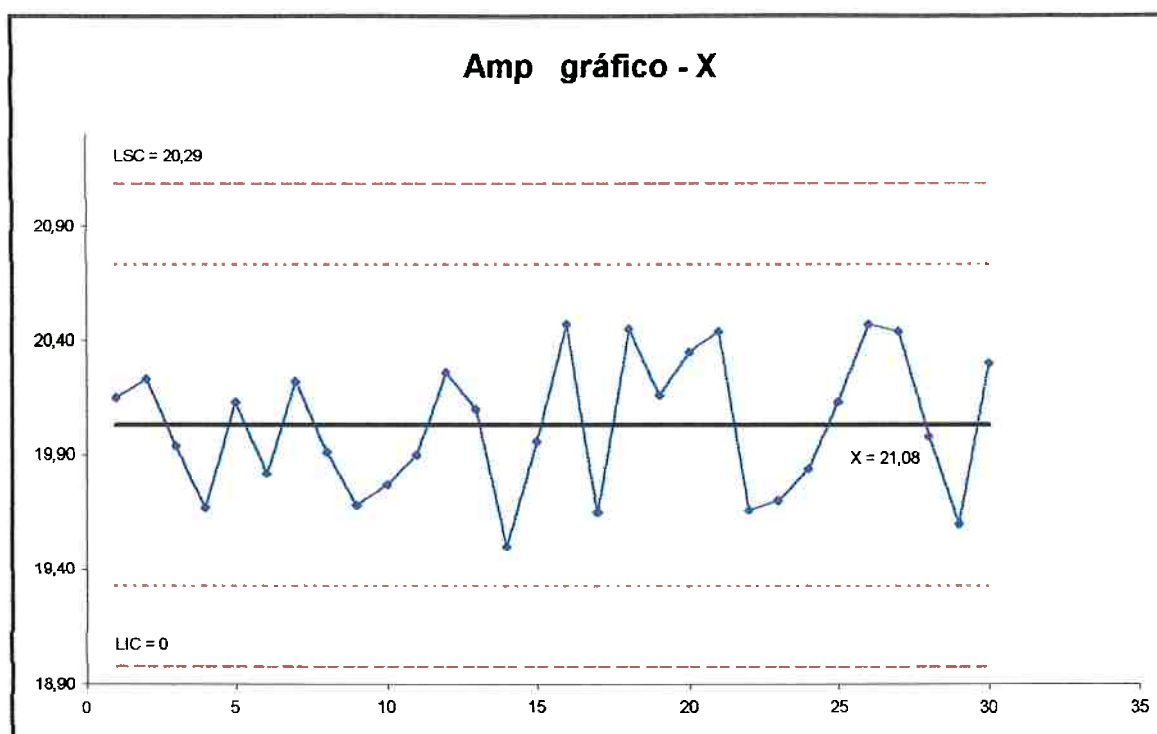


Gráfico de Controle 33 - medidas, parâmetro Amp

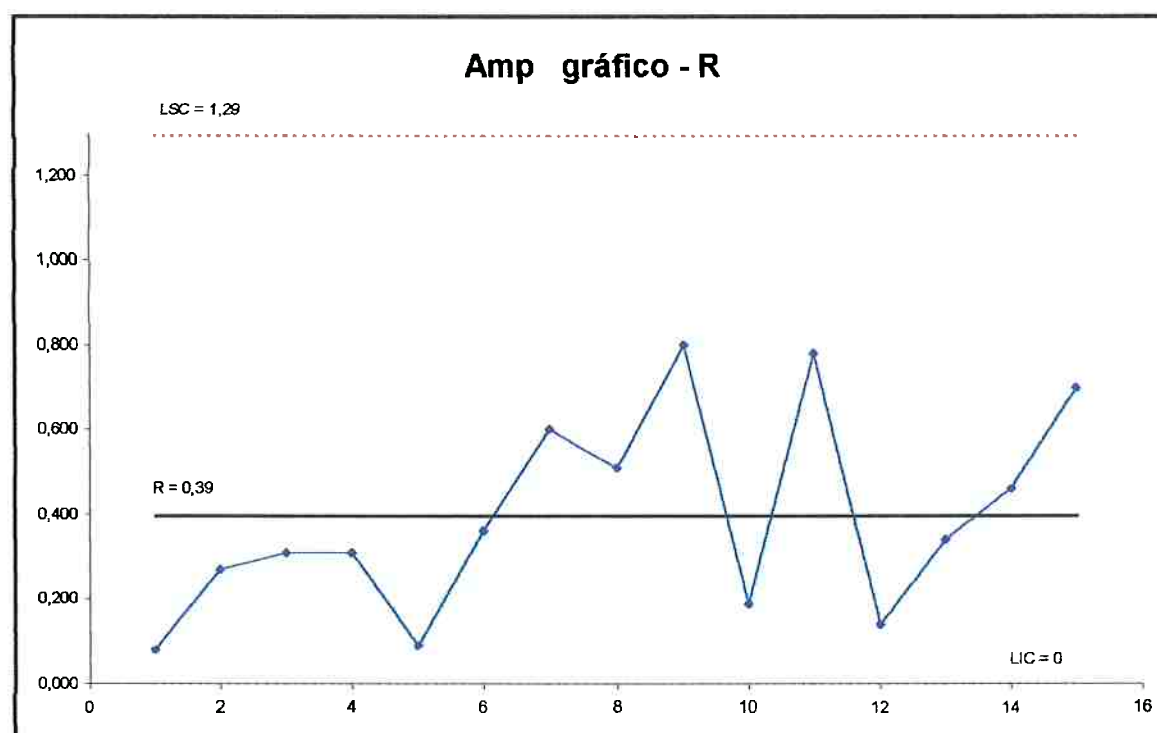


Gráfico de Controle 34 - amplitudes, Amp

Estes gráficos indicam estabilidade no processo, verificando a normalidade dos dados e capacidade do processo, temos:

←	→	O	z1	z2	p1	p2	p	E	O - E	(O - E) ²	χ^2
19,50	19,69	6	-1,78	-1,13	0,46	0,37	0,091	2,751	3,249	10,556	3,83715
19,69	19,90	9	-1,13	-0,45	0,37	0,17	0,197	5,916	3,084	9,511056	1,607684
19,90	20,28	8	-0,45	0,83	0,17	0,29	0,470	14,10	-6,109	37,31988	2,645112
20,28	20,47	5	0,83	1,48	0,29	0,43	0,133	4,017	0,983	0,966289	0,24055
		30							28	$\chi^2 =$	2,72705

Tabela 39 - teste de normalidade, Amp

O valor calculado de χ^2 é menor do que o valor encontrado para $\chi^2_{0,95}$ crítico:

$$\chi^2 < \chi^2_{\text{crítico}}$$

$$2,73 < 3,84$$

A distribuição das amostras segue o modelo de distribuição normal com um nível de confiança de noventa e cinco por cento (95%).

Tolerância	σ	CP	Cpk (LSC)	Cpk (LIC)
2,10672	0,29728	1,18	1,18	1,18

Tabela 40 - índices de capacidade, Amp

Portanto, segundo este parâmetro, o processo permanece estável. Este aumento era esperado devido ao aumento na carga para o motor, com mais material no canhão maior será o torque necessário para move-lo. Convém notar, no entanto que este efeito foi maior do que a redução da amperagem do motor devido a diminuição da velocidade de rotação.

4.2.2.4. Parâmetro Largura do forro – L

Da mesma forma que no estudo anterior, construiu-se a tabela e os gráficos de controle abaixo:

subgrupo	x1	x2	R	subgrupo	x1	x2	R
1	200,200	200,100	0,1	8	200,01	200,10	0,09
2	200,070	200,170	0,1	9	200,03	200,05	0,02
3	200,060	200,080	0,02	10	200,13	200,08	0,05
4	200,000	200,140	0,14	11	200,16	200,09	0,07
5	200,120	200,160	0,04	12	200,01	200,05	0,04
6	200,11	200,08	0,03	13	200,14	200,03	0,11
7	200,09	200,06	0,03	14	200,05	200,17	0,12
				15	200,04	200,16	0,12

Total	6002,74	1,08
-------	---------	------

Médias	200,0913	0,072
--------	----------	-------

Tabela 41 - médias e amplitudes, parâmetro L

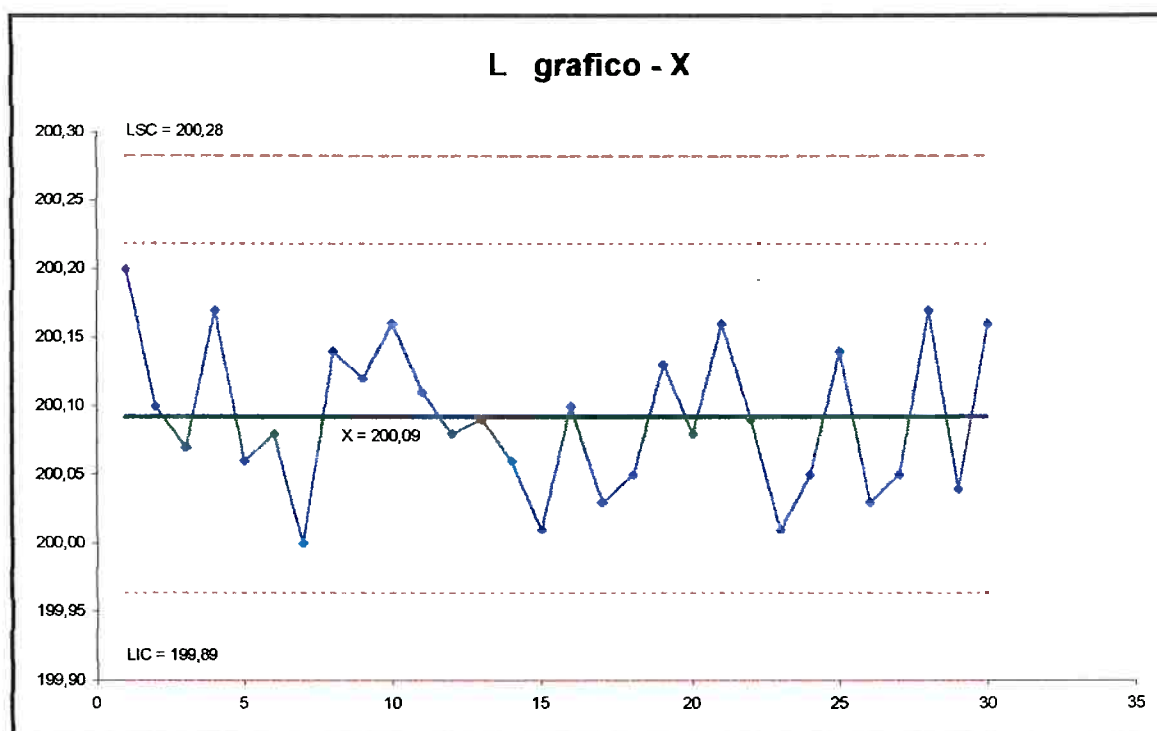


Gráfico de Controle 35 - medidas, parâmetro L

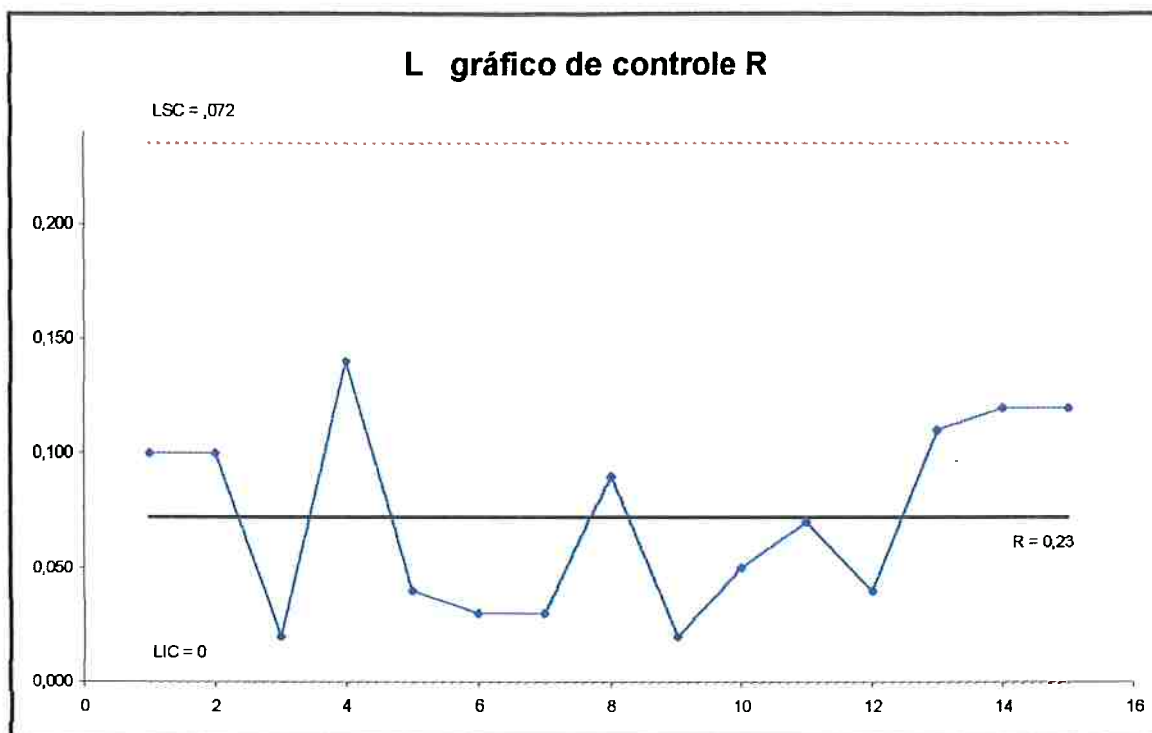


Gráfico de Controle 36 - amplitudes, parâmetro L

←	→	O	z1	z2	p1	p2	p	E	O - E	(O - E) ²	χ^2
200,00	200,04	6	-1,68	-0,95	0,45	0,32	0,124	3,738	2,262	5,116644	1,368819
200,04	200,06	5	-0,95	-0,58	0,32	0,21	0,109	3,297	1,703	2,900209	0,879651
200,06	200,10	8	-0,58	0,16	0,21	0,06	0,282	8,478	-0,478	0,228484	0,02695
200,10	200,14	5	0,16	0,90	0,06	0,31	0,252	7,569	-2,569	6,599761	0,871946
200,14	200,20	6	0,89	2,00	0,31	0,47	0,161	4,839	1,161	1,347921	0,278554
		30							28	$\chi^2 =$	3,42592

Tabela 42 - teste de normalidade, L

O valor calculado de χ^2 é menor do que o valor encontrado para $\chi^2_{0,95}$ crítico, de fato temos:

$$\chi^2 < \chi^2_{\text{crítico}}$$

$$3,43 < 3,84$$

Portanto a distribuição das amostras segue o modelo de distribuição normal com um nível de confiança de noventa e cinco por cento (95%).

Tolerância	σ	CP	Cpk (LSC)	Cpk (LIC)
0,38304	0,05431	1,18	1,18	1,18

Tabela 43 - Índices de capacidade, L

Pode ser calculado que 99,96% das leituras realizadas estão dentro dos limites de controle.

4.2.2.5. Parâmetro encaixe macho – m

A tabela e os gráficos de controle seguem abaixo:

subgrupo	x1	x2	R	subgrupo	x1	x2	R	subgrupo	x1	x2	R
1	4,250	4,160	0,09	6	4,190	4,260	0,07	11	4,180	4,051	0,129
2	4,110	4,051	0,059	7	4,210	4,130	0,08	12	4,270	4,190	0,08
3	4,150	4,220	0,07	8	4,051	4,170	0,119	13	4,240	4,190	0,05
4	4,300	4,220	0,08	9	4,090	4,050	0,04	14	4,170	4,260	0,09
5	4,180	4,230	0,05	10	4,110	4,220	0,11	15	4,210	4,150	0,06
Total					125,263		1,177				
Médias					4,175433		0,078				

Tabela 44 - médias e amplitudes, parâmetro m



Gráfico de Controle 37 - medidas, parâmetro m

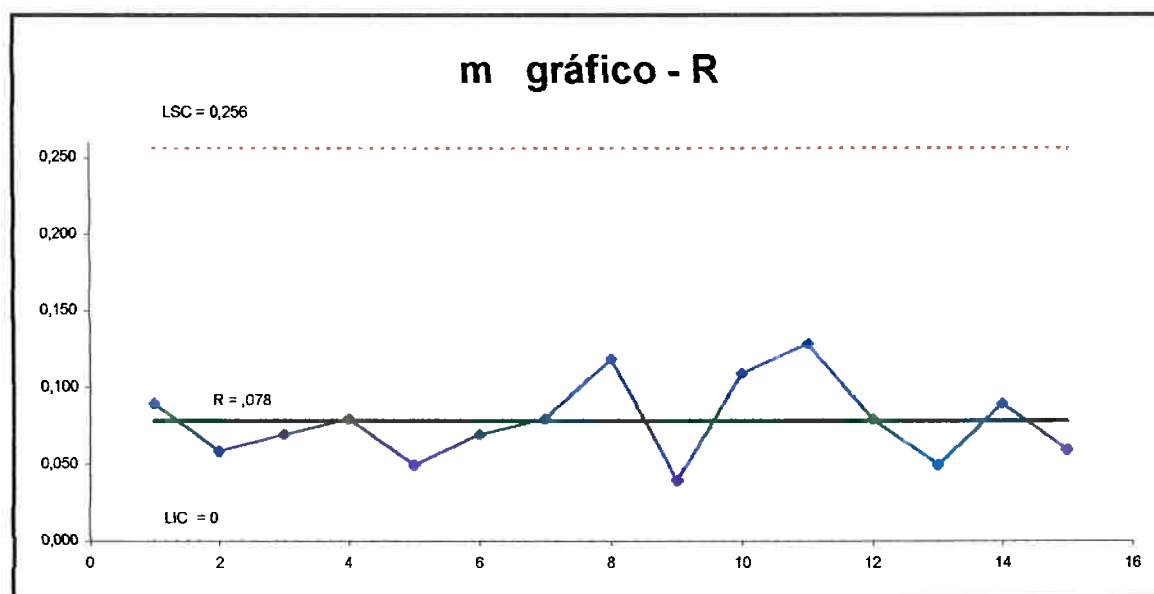


Gráfico de Controle 38 - amplitudes, parâmetro m

O teste de normalidade trás:

←	→	O	z1	z2	p1	p2	p	E	O - E	(O - E) ²	χ^2
4,05	4,13	7	-1,96	-0,85	0,47	0,30	0,172	5,181	1,819	3,308761	0,638634
4,13	4,18	7	-0,85	-0,10	0,30	0,03	0,262	7,875	-0,875	0,765625	0,097222
4,18	4,23	9	-0,10	0,64	0,03	0,23	0,199	5,973	3,027	9,162729	1,534025
4,23	4,30	7	0,64	1,75	0,23	0,45	0,221	6,63	0,37	0,1369	0,020649
		30						25		$\chi^2 =$	2,29052

Tabela 45 - teste de normalidade, m

O valor calculado de χ^2 é menor do que o valor encontrado para $\chi^2_{0,95}$ crítico:

$$\chi^2 < \chi^2_{\text{crítico}}$$

$$2,30 < 3,84$$

A distribuição das amostras segue o modelo de distribuição normal com um nível de confiança de noventa e cinco por cento (95%).

Da análise dos índices de capacidade, segue a tabela:

Tolerância	σ	CP	Cpk (LSC)	Cpk (LIC)
0,417443	0,07002	0,99	0,99	0,99

Tabela 46 - índices de capacidade, m

Aqui, 99,71% das leituras realizadas estão dentro dos limites de controle.

4.2.2.6. Parâmetro a

Os dados colhidos nas trinta amostras são apresentados abaixo:

subgrupo	x1	x2	R	subgrupo	x1	x2	R	subgrupo	x1	x2	R
1	7,480	7,500	0,02	6	7,500	7,490	0,01	11	7,510	7,450	0,06
2	7,450	7,500	0,05	7	7,460	7,530	0,07	12	7,500	7,540	0,04
3	7,520	7,460	0,06	8	7,470	7,500	0,03	13	7,500	7,470	0,03
4	7,480	7,490	0,01	9	7,520	7,500	0,02	14	7,460	7,510	0,05
5	7,480	7,510	0,03	10	7,490	7,470	0,02	15	7,500	7,470	0,03

Total	224,71	0,53
-------	--------	------

Médias	7,49	0,03533
--------	------	---------

Tabela 47 - médias e amplitudes, parâmetro a

E assim temos os gráficos de controle relacionados:

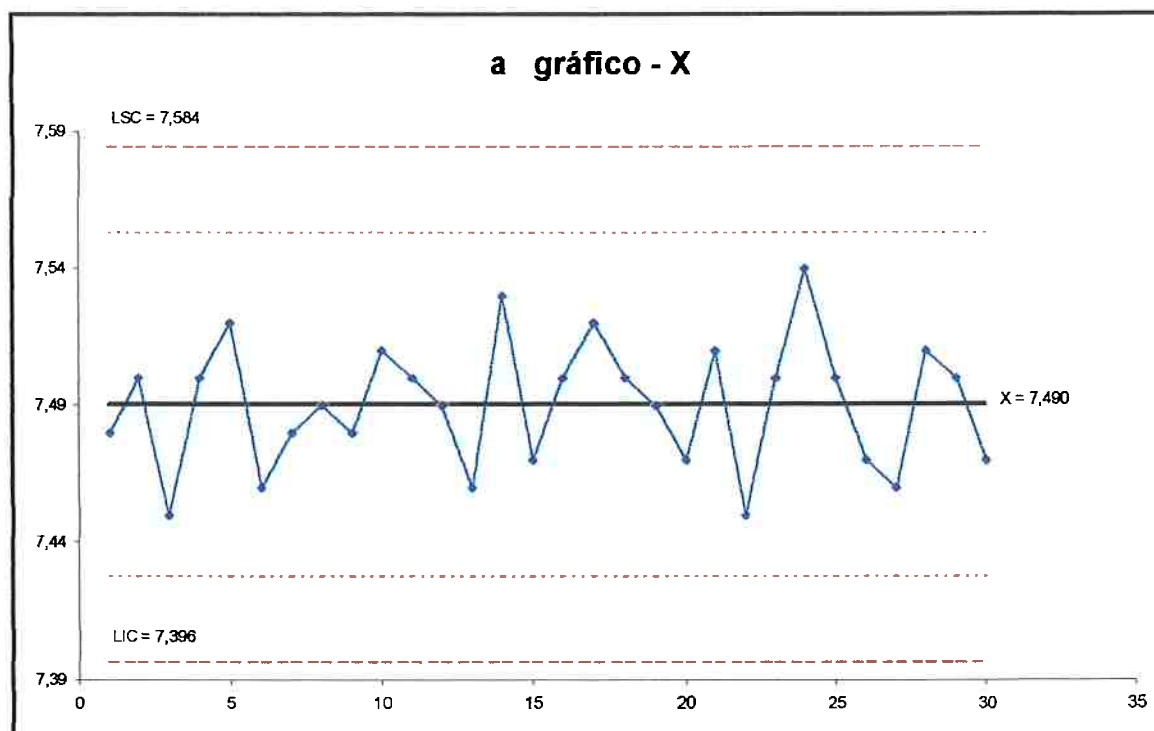


Gráfico de Controle 39 - medidas, parâmetro a

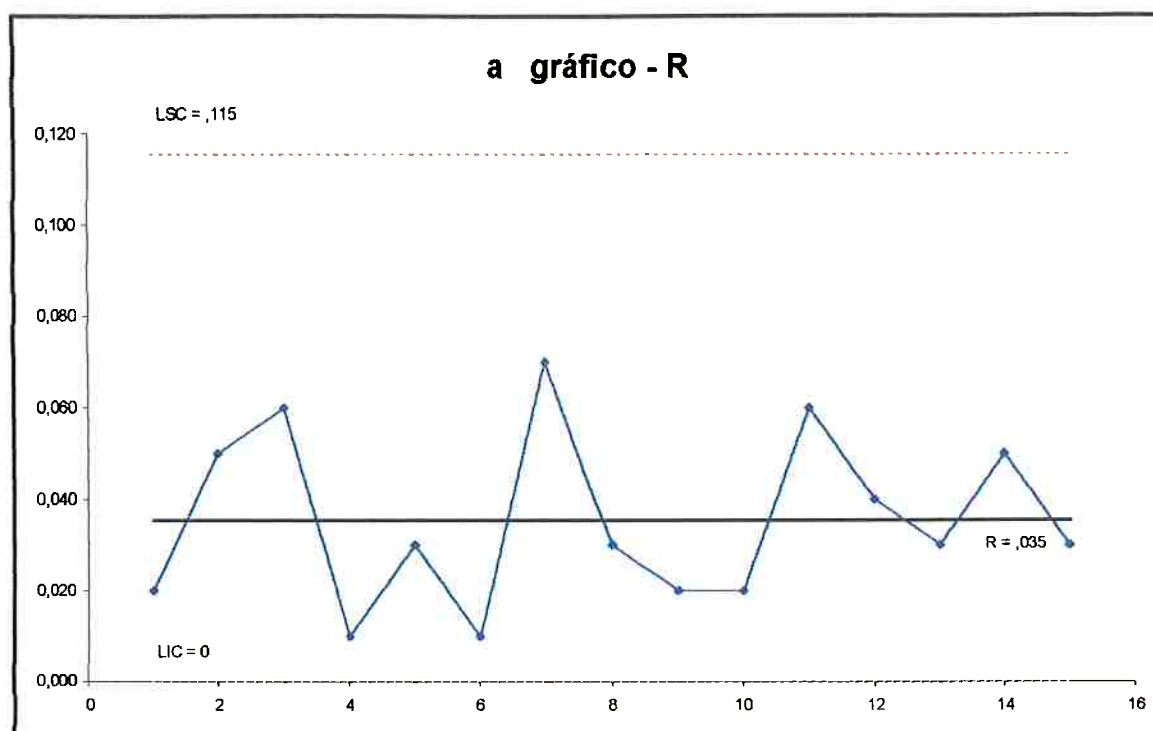


Gráfico de Controle 40 - amplitudes, parâmetro a

←	→	O	z1	z2	p1	p2	p	E	O - E	(O - E) ²	χ^2
7,45	7,47	5	-1,73	-0,96	0,45	0,33	0,126	3,801	1,199	1,437601	0,378217
7,47	7,49	7	-0,96	-0,19	0,33	0,07	0,256	7,686	-0,686	0,470596	0,061228
7,49	7,50	11	-0,19	0,59	0,07	0,22	0,297	8,931	2,069	4,280761	0,479315
7,50	7,54	7	0,59	2,13	0,22	0,48	0,261	7,83	-0,83	0,6889	0,087982
		30									$\chi^2 = 1,00674$

Tabela 48 - teste de normalidade, a

O valor calculado de χ^2 é menor do que o valor encontrado para $\chi^2_{0,95}$ crítico:

$$\chi^2 < \chi^2_{\text{crítico}}$$

$$1,01 < 3,84$$

A distribuição das amostras segue o modelo de distribuição normal com um nível de confiança de noventa e cinco por cento (95%).

Tolerância	σ	CP	Cpk (LSC)	Cpk (LIC)
0,187973	0,02326	1,15	1,15	1,15

Tabela 49 - índices de capacidade, a

Logo, 99,99% das leituras realizadas estão dentro dos limites de controle.

4.2.2.7. Parâmetro p

Este parâmetro havia se mostrado instável no estudo anterior, e várias hipóteses haviam sido levantadas para entender o fato. Os técnicos do fabricante da extrusora garantiram que as mudanças na relação das velocidades tornaria o processo mais estável. Com o que foi visto até aqui, não houve alteração significativa das distribuição estatística dos parâmetros com exceção da pressão na entrada da matriz, BAR, que, ao contrário, tinha se tornado mais dispersa. Porém pode-se comprovar que de fato o processo mostrou-se sob controle analisado também por este parâmetro; a tabela e os gráficos de controle são mostrados abaixo:

subgrupo	x1	x2	R	subgrupo	x1	x2	R	subgrupo	x1	x2	R
1	0,700	0,580	0,12	6	0,520	0,660	0,14	11	0,600	0,690	0,09
2	0,630	0,650	0,02	7	0,600	0,690	0,09	12	0,560	0,570	0,01
3	0,510	0,530	0,02	8	0,550	0,530	0,02	13	0,590	0,640	0,05
4	0,550	0,640	0,09	9	0,500	0,570	0,07	14	0,680	0,560	0,12
5	0,570	0,500	0,07	10	0,640	0,660	0,02	15	0,700	0,660	0,04

Total	18,03	0,97
Médias	0,601	0,064

Tabela 50 - médias e amplitudes, parâmetro p

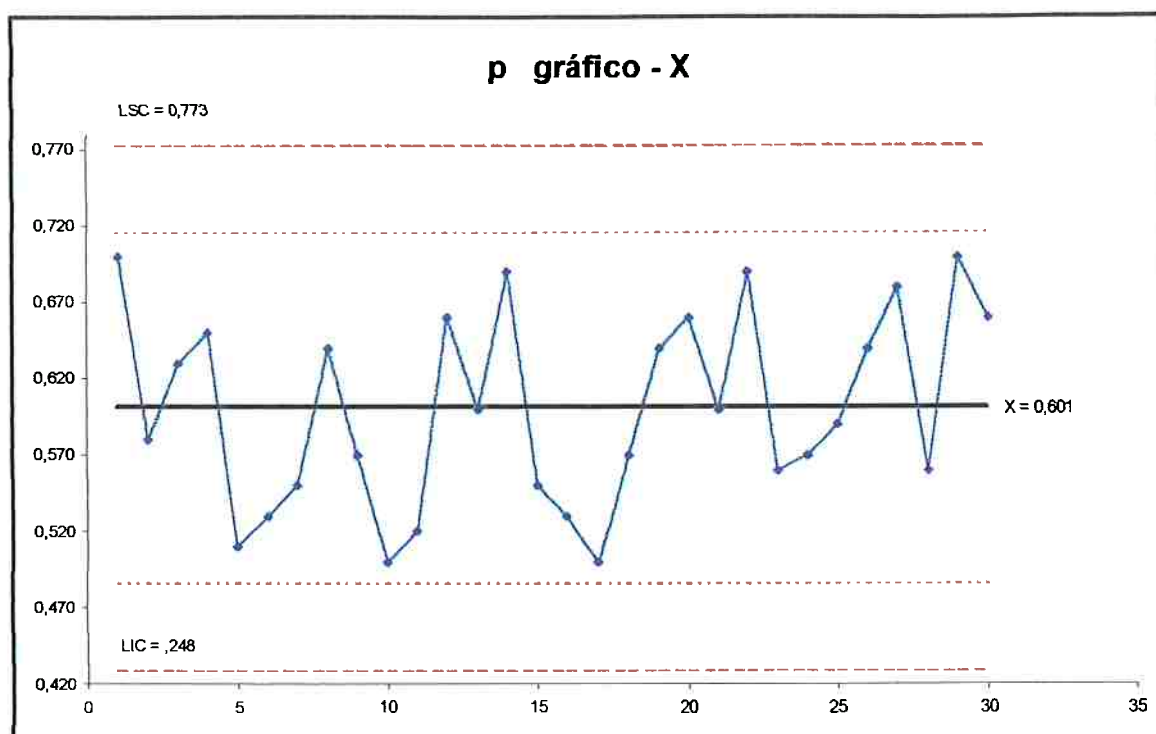


Gráfico de Controle 41 - medidas, parâmetro p

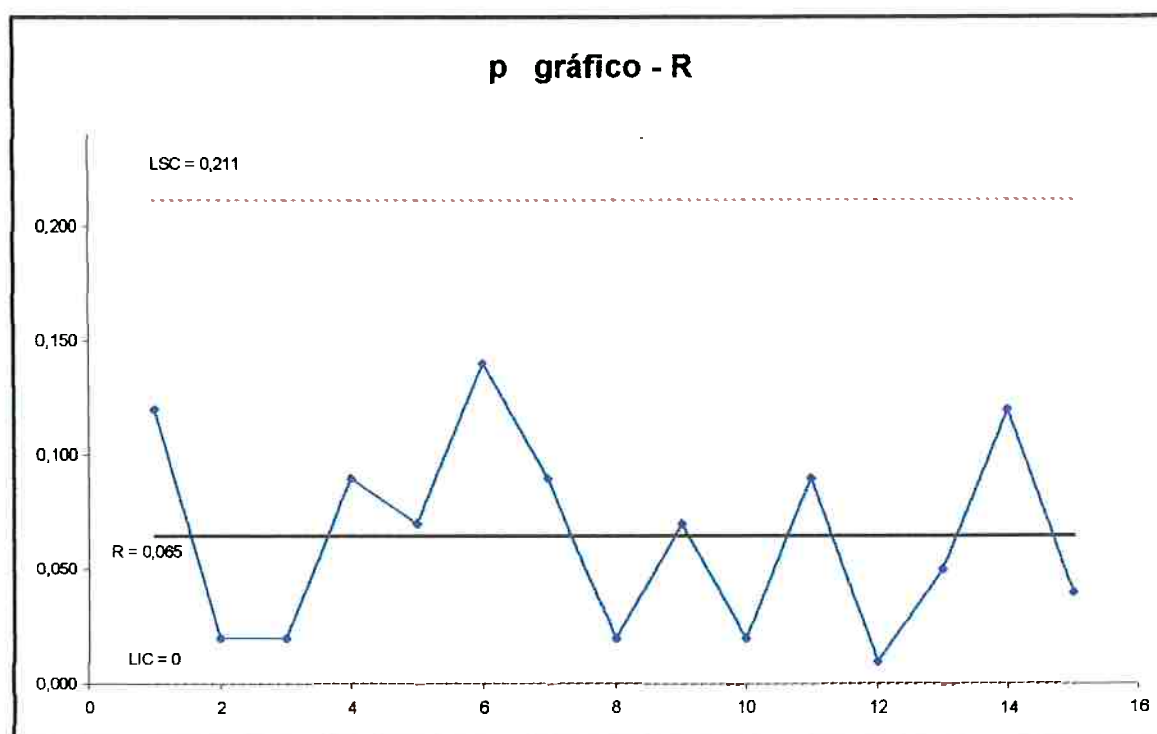


Gráfico de Controle 42 - amplitudes, parâmetro p

←	→	O	z1	z2	p1	p2	p	E	O - E	(O - E) ²	χ^2
3,066	3,089	5	-2,08	-0,85	0,48	0,30	0,178	5,367	-0,367	0,134689	0,025096
3,089	3,096	5	-0,85	-0,47	0,30	0,18	0,121	3,645	1,355	1,836025	0,503711
3,096	3,104	8	-0,47	-0,04	0,18	0,01	0,165	4,944	3,056	9,339136	1,888984
3,104	3,142	12	-0,04	2,00	0,01	0,47	0,493	14,79	-2,796	7,817616	0,52836
										$\chi^2 =$	2,94615

Tabela 51 - teste de normalidade, p

O valor calculado de χ^2 é menor do que o valor encontrado para $\chi^2_{0,95}$ crítico:

$$\chi^2 < \chi^2_{\text{crítico}}$$

$$2,95 < 3,84$$

A distribuição das amostras segue o modelo de distribuição normal com um nível de confiança de noventa e cinco por cento (95%).

Tolerância	σ	CP	Cpk (LSC)	Cpk (LIC)
0,344027	0,06359	0,90	0,90	0,90

Tabela 52 - índices de capacidade, p

Logo, 99,32% das leituras realizadas estão dentro dos limites de controle.

Com isto termina a avaliação do processo com as novas condições de operação. Esta novas condições, de fato, foram capazes de aumentar a velocidade média de produção, mantendo ainda a amperagem do motor e a pressão na entrada da matriz em níveis aceitáveis, embora a pressão tenha adquirido uma maior dispersão em torno da nova média. Foi conseguido, também que o parâmetro p, que caia fora dos limites de controle no primeiro estudo, permanecesse sob controle. Os demais parâmetros não mostraram alterações significativas, simplesmente responderam as novas condições deslocando levemente os valores médios sem alterar de maneira expressiva sua distribuição.

As duas tabelas a seguir trazem um resumo das mudanças ocorridas no processo:

Estudo 1					
	média	desv. pad.	max	min	R
L	200,10	0,034173	200,17	200,04	0,13
a	7,49	0,024316	7,54	7,44	0,1
m	4,20	0,066368	4,33	4,06	0,27
p					
Vp	2,50	0,018162	2,54	2,468	0,072
Bar	239,30	10,12048	260,00	222	38
Amp	17,55	0,191374	17,87	17,23	0,64

Tabela 53 - parâmetros do Estudo 1

Estudo 2					
	média	desv pad	max	min	R
L	200,09	0,054313	200,20	200	0,2
a	7,49	0,023265	7,54	7,45	0,09
m	4,18	0,067333	4,30	4,05	0,25
p	0,60	0,063591	0,70	0,500	0,2
Vp	3,10	0,018606	3,14	3,066	0,076
Bar	286,50	29,85338	340,00	240	100
Amp	20,02933	0,297286	20,47	19,5	0,97

Tabela 54 – parâmetros do Estudo 2

A razão do parâmetro p mostrar-se sob controle nessas novas condições possivelmente veio do aumento de massa que tornou a passar no calibrador por unidade de tempo. Uma maneira de ilustrar este efeito é pensando na extrusora como uma bomba, movida a um pistão. Nas condições anteriores esse pistão fazia movimentos curtos, empurrando pouca massa por unidade de tempo num ciclo acelerado. As novas condições comparam-se a um pistão de eixo mais longo, com menos ciclos por unidade de tempo, porém mais massa por ciclo. Esta diferença pode fazer com que a calibração dessa parede delgada se desse de maneira mais uniforme, com menos variação.

5. Conclusão

Com este trabalho pode-se aplicar os conhecimentos adquiridos sobre a teoria da extrusão polimérica, compreendendo o processo como um todo e verificando no chão da fábrica como estas teorias se aplicam num equipamento real.

A implantação de planos de pré-controle cooperaram para uma racionalização dos métodos utilizados na empresa. É possível ainda afirmar que, com a utilização dessas técnicas antes do estudo estatístico, criou-se as condições necessárias para manter o processo sob controle. O estudo estatístico efetuado, possibilitou que se aplique de imediato uma política de controle estatístico de processo. Isto irá ocorrer quando for efetuado um treinamento consistente dos operadores e pessoas envolvidas com a produção de maneira geral. As bases teóricas, assim como os caminhos para a implantação do CEP foram apontados neste trabalho.

Este estudo ainda pode avaliar de forma criteriosa as mudanças trazidas ao processo no decorrer do estudo. Estas mudanças mostraram-se benéficas no que diz respeito a produtividade e principalmente na estabilidade do processo quanto ao parâmetro p . O próprio aumento de vazão no calibrador pode explicar este efeito, como foi levantado no diagrama causa e efeito. É difícil de analisar se a causa da variação foi eliminada ou se o efeito da vazão simplesmente a sobrepõe, principalmente por que a alteração do processo não foi feita numa forma de otimização verdadeiramente criteriosa.

Um aspecto interessante apontado neste estudo é a distribuição estatísticas dos parâmetros estudados: todos seguem uma distribuição normal, segundo o teste de aderência χ^2 . Pelo teorema do limite central isto sugere que as interações das variáveis do processo traduzem-se como causas de variação independentes. Isto leva a crer que no atual estado do sistema, muitas são as fontes de variação cuja interação trazem um ruído, ou uma variação natural, aceitável para as condições atuais de produção. É provável que, reduzindo-se algumas dessas fontes de variação, a distribuição estatística dos parâmetros deixe de ser normal, uma vez que outras fontes específicas de variação, de distribuição estatística não necessariamente normal, passariam a influenciar ativamente estes parâmetros.

A utilização dos gráficos de medidas individuais para a avaliação do processo, embora válidas segundo Relyea, referência bibliográfica numero cinco (5), trazem uma nova hipótese: Quais as vantagens que teríamos no processo, se fosse possível trazer essas

médias sob controle? Esta hipótese não foi avaliada aqui, mas é uma questão importante para qualquer estudo posterior desse sistema.

Outra possibilidade é, constatado que o processo é estável, administrar um programa de otimização, como o Método das Operações Evolucionárias (EVOP). Uma breve explanação sobre o EVOP consta no Apêndice C.

6. Referências Bibliográficas

1. Hensen, F. **Plastics Extrusion Tehnology**. 2^a ed New York, Hanser Plublisher, 1997.
2. Rauwendaal, C. **Polymer Extrusion**. 3^a ed New York, Hanser Publishers, 1994.
3. Rauwendaal, C. **SPC Statistical Process Control in Extrusion**. New York, Hanser Publishers, 1993.
4. Juran, J.M. **Controle da Qualidade Handbook**. Trad. de Gryna, F. São Paulo, McGraw-Hill, 1993. v.VI
5. Relyea, D. B. **Pratical Application of SPC in the Wire & Cable Industry**. New York, Quality Resouces, 1990.
6. Costa Neto, P. L. **Probabilidades**. 12^a ed São Paulo, Edgard Blücher Ltda., 1995 .
7. Costa Neto, P. L. **Estatística**. 6^a Ed São Paulo, Edgard Blücher Ltda, 1986.
8. Blass, A. **Processamento de Polímeros**. 2^a Ed Florianópolis, Editora da UFSC, 1988.
9. Redfarn, C. A. **Tecnologia da Matérias Plásticas**. São Paulo, Editora Polígodo, 1962.
10. Ogorkiewicz, R. M. **Engeneering Properties of Thermoplastics**. Michigan, Wiley_Interscience, 1970.
11. Levy, S.; Carley, J. F. **Plastics Extrusion Technology Handbook**. 2^a Ed, Industrial Press Inc, 1989.
12. Barros Neto, B. **Planejamento e Otimização de Experimentos**. Campinas, Editora da Unicamp, 1996.
13. Elias, H.G. **An Introduction to Plastics**. New York, VCH, 1993.
14. Assy, T.M. **Mecânica dos Fluidos**. São Paulo, Editora da EPUSP, 1996.

Apêndice A

Tabela A1 – Fatores para cálculo das linhas do gráfico de controle

Observações em amostra <i>n</i>	Gráfico para médias			Gráfico para desvios-padrão						Gráfico para amplitudes							
	Fatores para limites de controle			Fatores para linha central		Fatores para limites de controle		Fatores para linha central		Fatores para limites de controle							
	<i>A</i>	<i>A</i> ₂	<i>A</i> ₃	<i>c</i> ₄	<i>1/c</i> ₄	<i>B</i> ₃	<i>B</i> ₄	<i>B</i> ₅	<i>B</i> ₆	<i>d</i> ₂	<i>1/d</i> ₂	<i>d</i> ₃	<i>D</i> ₁	<i>D</i> ₂	<i>D</i> ₃	<i>D</i> ₄	
2	2,121	1,880	2,659	0,7979	1,2533	0	3,267	0	2,606	1,128	0,8865	0,853	0	3,696	0	3,267	
3	1,732	1,023	1,954	0,8862	1,1284	0	2,568	0	2,276	1,693	0,5907	0,888	0	4,358	0	2,574	
4	1,500	0,729	1,628	0,9213	1,0854	0	2,266	0	2,088	2,059	0,4857	0,880	0	4,698	0	2,282	
5	1,342	0,577	1,427	0,9400	1,0638	0	2,069	0	1,964	2,326	0,4296	0,864	0	4,918	0	2,134	
6	1,225	0,483	1,287	0,9515	1,0510	0,030	1,970	0,029	1,874	2,534	0,3946	0,848	0	5,079	0	2,004	
7	1,134	0,419	1,182	0,9589	1,0423	0,118	1,882	0,113	1,806	2,704	0,3698	0,833	0,204	5,204	0,076	1,924	
8	1,061	0,373	1,099	0,9650	1,0363	0,185	1,815	0,179	1,751	2,847	0,3512	0,820	0,388	5,306	0,136	1,864	
9	1,000	0,337	1,033	0,9693	1,0317	0,239	1,761	0,232	1,707	2,976	0,3367	0,808	0,547	5,393	0,184	1,816	
10	0,949	0,308	0,975	0,9727	1,0281	0,284	1,716	0,276	1,669	3,078	0,3249	0,797	0,687	5,469	0,223	1,777	
11	0,905	0,285	0,927	0,9754	1,0252	0,321	1,679	0,313	1,637	3,173	0,3152	0,787	0,811	5,535	0,256	1,744	
12	0,866	0,266	0,886	0,9776	1,0229	0,354	1,646	0,346	1,610	3,256	0,3069	0,778	0,923	5,594	0,283	1,717	
13	0,832	0,249	0,850	0,9794	1,0210	0,382	1,618	0,374	1,585	3,326	0,2998	0,770	1,025	5,647	0,307	1,693	
14	0,802	0,235	0,817	0,9810	1,0194	0,406	1,594	0,399	1,563	3,407	0,2935	0,763	1,118	5,696	0,328	1,672	
15	0,775	0,223	0,789	0,9823	1,0180	0,428	1,572	0,421	1,544	3,472	0,2880	0,756	1,203	5,741	0,347	1,653	
16	0,750	0,212	0,763	0,9835	1,0168	0,448	1,552	0,440	1,526	3,532	0,2831	0,750	1,282	5,782	0,363	1,637	
17	0,728	0,203	0,739	0,9845	1,0157	0,466	1,534	0,458	1,511	3,588	0,2787	0,744	1,356	5,820	0,378	1,622	
18	0,707	0,194	0,718	0,9854	1,0148	0,482	1,518	0,475	1,496	3,640	0,2747	0,739	1,424	5,856	0,391	1,608	
19	0,688	0,187	0,698	0,9862	1,0140	0,497	1,503	0,490	1,483	3,689	0,2711	0,734	1,487	5,891	0,403	1,597	
20	0,671	0,180	0,690	0,9869	1,0133	0,510	1,490	0,504	1,470	3,735	0,2677	0,729	1,549	5,921	0,415	1,586	
21	0,655	0,173	0,683	0,9876	1,0126	0,523	1,477	0,516	1,459	3,778	0,2647	0,724	1,605	5,951	0,425	1,575	
22	0,640	0,167	0,647	0,9882	1,0119	0,534	1,468	0,528	1,448	3,819	0,2618	0,720	1,659	5,979	0,434	1,566	
23	0,626	0,162	0,633	0,9887	1,0114	0,545	1,455	0,539	1,438	3,858	0,2592	0,716	1,710	6,006	0,443	1,557	
24	0,612	0,157	0,619	0,9892	1,0109	0,553	1,445	0,549	1,429	3,895	0,2567	0,712	1,759	6,031	0,451	1,548	
25	0,600	0,153	0,606	0,9896	1,0105	0,555	1,435	0,559	1,420	3,931	0,2544	0,708	1,806	6,056	0,459	1,541	

Fonte: referência bibliográfica 4. Tabela A, apêndice II, página 424

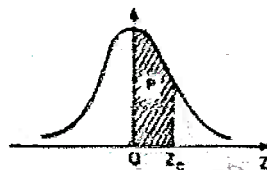
Tabela A2 – Fatores E2 para gráficos de controle

Número de observações no subgrupo	<i>E</i> ₂
2	2,660
3	1,772
4	1,457
5	1,290
6	1,184
7	1,109
8	1,054
9	1,010
10	0,975
11	0,946
12	0,921
13	0,899
14	0,881
15	0,864

Fonte: referência bibliográfica 4. Tabela Y, apêndice II, página 467

Tabela A3 – Distribuição Normal

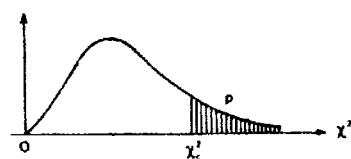
Distribuição normal reduzida: $N(0,1)$
 Probabilidades p tais que $p = P(0 < Z < Z_c)$



parte inteira e primeira decimal de Z_c	SEGUNDA DECIMAL DE Z_c										parte inteira e primeira decimal de Z_c
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
0.0	00000	00399	00798	01197	01595	01994	02392	02790	03188	03586	0.0
0.1	03983	04380	04778	05172	05567	05962	06356	06749	07142	07535	0.1
0.2	07926	08317	08708	09098	09483	09871	10257	10642	11026	11409	0.2
0.3	11791	12172	12552	12930	13307	13683	14058	14431	14803	15173	0.3
0.4	15542	15910	16276	16640	17003	17364	17724	18082	18438	18793	0.4
0.5	19146	19497	19847	20194	20540	20884	21226	21566	21904	22240	0.5
0.6	22575	22907	23237	23565	23891	24215	24537	24857	25175	25490	0.6
0.7	25804	26115	26424	26730	27035	27337	27637	27935	28230	28524	0.7
0.8	28814	29103	29389	29673	29955	30234	30511	30785	31057	31327	0.8
0.9	31594	31859	32121	32381	32639	32894	33147	33398	33646	33891	0.9
1.0	34134	34375	34614	34850	35083	35314	35543	35769	35993	36214	1.0
1.1	36433	36650	36864	37076	37285	37493	37698	37900	38100	38298	1.1
1.2	38493	38688	38877	39065	39251	39435	39617	39795	39973	40147	1.2
1.3	40320	40490	40658	40824	40988	41149	41309	41466	41621	41774	1.3
1.4	41924	42073	42220	42364	42507	42647	42786	42922	43056	43189	1.4
1.5	43319	43448	43574	43699	43822	43943	44062	44179	44295	44408	1.5
1.6	44520	44630	44738	44845	44950	45053	45154	45254	45352	45449	1.6
1.7	45543	45637	45728	45818	45907	45994	46080	46164	46246	46327	1.7
1.8	46407	46485	46562	46638	46712	46784	46856	46926	46995	47062	1.8
1.9	47128	47193	47257	47320	47381	47441	47500	47558	47615	47670	1.9
2.0	47725	47778	47831	47882	47932	47982	48030	48077	48124	48169	2.0
2.1	48214	48267	48300	48341	48382	48422	48461	48500	48537	48574	2.1
2.2	48610	48645	48679	48713	48745	48778	48809	48840	48870	48899	2.2
2.3	48928	48956	48983	49010	49036	49061	49086	49111	49134	49158	2.3
2.4	49180	49202	49224	49245	49266	49286	49305	49324	49343	49361	2.4
2.5	49379	49396	49413	49430	49446	49461	49477	49492	49506	49520	2.5
2.6	49534	49547	49560	49573	49585	49598	49609	49621	49632	49643	2.6
2.7	49653	49664	49674	49683	49693	49702	49711	49720	49728	49736	2.7
2.8	49744	49752	49760	49767	49774	49781	49788	49795	49801	49807	2.8
2.9	49813	49819	49825	49831	49836	49841	49846	49851	49856	49861	2.9
3.0	49865	49869	49874	49878	49882	49886	49889	49893	49897	49900	3.0
3.1	49903	49906	49910	49913	49916	49918	49921	49924	49926	49929	3.1
3.2	49931	49934	49936	49938	49940	49942	49944	49946	49948	49950	3.2
3.3	49952	49953	49955	49957	49958	49960	49961	49962	49964	49965	3.3
3.4	49966	49968	49969	49970	49971	49972	49973	49974	49975	49976	3.4
3.5	49977	49978	49978	49979	49980	49981	49981	49982	49983	49983	3.5
3.6	49984	49985	49985	49986	49986	49987	49987	49988	49988	49989	3.6
3.7	49989	49990	49990	49991	49991	49992	49992	49992	49992	49993	3.7
3.8	49993	49993	49993	49994	49994	49994	49994	49995	49995	49995	3.8
3.9	49995	49995	49995	49996	49996	49996	49996	49996	49997	49997	3.9
4.0	49997	49997	49997	49997	49997	49997	49998	49998	49998	49998	4.0
4.5	49998	50000	50000	50000	50000	50000	50000	50000	50000	50000	4.5
parte inteira e primeira decimal de Z_c	SEGUNDA E TERCEIRA DECIMAIS DE Z_c										parte inteira e primeira decimal de Z_c
	05	15	25	35	45	55	65	75	85	95	
0.0	00199	00598	00997	01396	01795	02193	02591	02989	03387	03784	0.0
0.1	04181	04578	04974	05369	05764	06159	06553	06946	07339	07730	0.1
0.2	08121	08512	08901	09290	09677	10064	10450	10834	11218	11600	0.2
0.3	11982	12362	12741	13119	13495	13871	14244	14617	14988	15358	0.3
0.4	15726	16093	16458	16822	17184	17545	17903	18261	18600	18970	0.4
0.5	19322	19672	20021	20368	20712	21055	21396	21735	22073	22408	0.5
0.6	22741	23072	23401	23729	24054	24377	24697	25016	25333	25647	0.6
0.7	25959	26270	26577	26883	27186	27488	27788	28083	28377	28669	0.7
0.8	28959	29246	29531	29814	30094	30372	30648	30921	31192	31461	0.8
0.9	31727	31990	32252	32511	32767	33021	33273	33522	33769	34013	0.9

Fonte: referência bibliográfica 6. Tabela 4, apêndice II, página 136

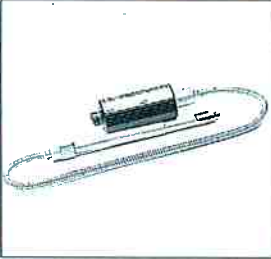

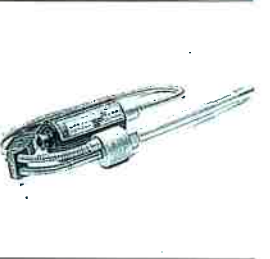
Tabela A4 – Distribuição Qui-Quadrado

Distribuição de qui-quadrado: $\chi^2(n)$																		
Valores críticos de qui quadrado tais que																		
$P(\chi^2 > \chi_c^2) = p$																		
																		
p =	99%	98%	97.5%	95%	90%	80%	70%	50%	30%	20%	10%	5%	4%	2.5%	2%	1%	0.2%	0.1%
1	0.001	0.002	0.003	0.004	0.008	0.016	0.032	0.072	0.168	0.271	0.446	0.738	0.988	1.321	1.642	2.008	2.706	3.841
2	0.010	0.015	0.020	0.026	0.054	0.102	0.178	0.338	0.592	0.788	1.064	1.392	1.679	2.000	2.318	2.773	3.572	4.605
3	0.078	0.100	0.124	0.150	0.216	0.284	0.357	0.445	0.558	0.675	0.812	0.975	1.163	1.378	1.626	1.924	2.366	2.837
4	0.216	0.237	0.260	0.284	0.350	0.419	0.488	0.564	0.658	0.742	0.854	0.984	1.143	1.327	1.533	1.771	2.145	2.486
5	0.554	0.579	0.601	0.625	0.675	0.729	0.782	0.845	0.918	0.980	1.079	1.193	1.327	1.475	1.646	1.841	2.145	2.366
6	0.872	0.897	0.919	0.943	0.993	1.047	1.100	1.163	1.236	1.298	1.397	1.511	1.645	1.793	1.964	2.159	2.463	2.684
7	1.239	1.264	1.286	1.310	1.360	1.414	1.467	1.530	1.603	1.665	1.764	1.878	2.012	2.160	2.331	2.526	2.830	3.051
8	1.646	1.671	1.693	1.717	1.767	1.821	1.874	1.937	2.010	2.072	2.171	2.285	2.419	2.567	2.738	2.933	3.237	3.458
9	2.088	2.113	2.135	2.159	2.209	2.263	2.316	2.379	2.452	2.514	2.613	2.727	2.861	3.009	3.180	3.375	3.679	3.900
10	2.558	2.583	2.605	2.629	2.679	2.733	2.786	2.849	2.922	2.984	3.083	3.197	3.331	3.479	3.650	3.845	4.149	4.370
11	3.053	3.078	3.100	3.124	3.174	3.228	3.281	3.344	3.417	3.479	3.578	3.692	3.826	3.974	4.145	4.340	4.644	4.865
12	3.571	3.596	3.618	3.642	3.692	3.746	3.799	3.862	3.935	3.997	4.096	4.210	4.344	4.492	4.663	4.858	5.162	5.383
13	4.107	4.132	4.154	4.178	4.228	4.282	4.335	4.398	4.471	4.533	4.632	4.746	4.880	5.028	5.199	5.394	5.698	5.919
14	4.600	4.625	4.647	4.671	4.721	4.775	4.828	4.891	4.964	5.026	5.125	5.239	5.373	5.521	5.692	5.887	6.191	6.412
15	5.228	5.253	5.275	5.299	5.349	5.403	5.456	5.519	5.592	5.654	5.753	5.867	6.001	6.149	6.320	6.515	6.819	7.040
16	5.812	5.837	5.859	5.883	5.933	5.987	6.040	6.103	6.176	6.238	6.337	6.451	6.585	6.733	6.904	7.099	7.403	7.624
17	6.406	6.431	6.453	6.477	6.527	6.581	6.634	6.697	6.770	6.832	6.931	7.045	7.179	7.327	7.498	7.693	7.997	8.218
18	7.015	7.040	7.062	7.086	7.136	7.190	7.243	7.306	7.379	7.441	7.540	7.654	7.788	7.936	8.107	8.302	8.606	8.827
19	7.633	7.658	7.680	7.704	7.754	7.808	7.861	7.924	7.997	8.059	8.158	8.272	8.406	8.554	8.725	8.920	9.224	9.445
20	8.260	8.285	8.307	8.331	8.381	8.435	8.488	8.551	8.624	8.686	8.785	8.899	9.033	9.181	9.352	9.547	9.851	10.072
21	8.907	8.932	8.954	8.978	9.028	9.082	9.135	9.198	9.271	9.333	9.432	9.546	9.680	9.828	10.000	10.195	10.499	10.720
22	9.542	9.567	9.589	9.613	9.663	9.717	9.770	9.833	9.906	9.968	10.067	10.181	10.315	10.463	10.634	10.829	11.133	11.354
23	10.196	10.221	10.243	10.267	10.317	10.371	10.424	10.487	10.560	10.622	10.721	10.835	10.969	11.117	11.288	11.483	11.787	12.008
24	10.856	10.881	10.903	10.927	10.977	11.031	11.084	11.147	11.220	11.282	11.381	11.495	11.629	11.777	11.948	12.143	12.447	12.668
25	11.524	11.549	11.571	11.595	11.645	11.699	11.752	11.815	11.888	11.950	12.049	12.163	12.297	12.445	12.616	12.811	13.115	13.336
26	12.196	12.221	12.243	12.267	12.317	12.371	12.424	12.487	12.560	12.622	12.721	12.835	12.969	13.117	13.288	13.483	13.787	14.008
27	12.879	12.904	12.926	12.950	13.000	13.054	13.107	13.170	13.243	13.305	13.404	13.518	13.652	13.800	13.971	14.166	14.470	14.691
28	13.565	13.590	13.612	13.636	13.686	13.740	13.793	13.856	13.929	13.991	14.090	14.204	14.338	14.486	14.657	14.852	15.156	15.377
29	14.258	14.283	14.305	14.329	14.379	14.433	14.486	14.549	14.622	14.684	14.783	14.897	15.031	15.179	15.350	15.545	15.849	16.070
30	14.953	14.978	14.999	15.023	15.073	15.127	15.180	15.243	15.316	15.378	15.477	15.591	15.725	15.873	16.044	16.239	16.543	16.764

Fonte: referência bibliográfica 7. Tabela A6.4, apêndice 6, página 249

APÊNDICE B

TRANSDUTORES E TRANSMISSORES DE PRESSÃO PARA EXTRUSÃO

Código do Catálogo	Doc 152			Doc 156			Doc 160		
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS PRINCIPAIS									
MODELO	SP830			SP831			SPT832		
	H	M	L	H	M	L	H	M	L
CLASSE DE PRECISÃO (%F.S.)	0,5	1	2	0,5	1	2	0,5	1	2
CAMPO DE MEDIÇÃO (BAR)	de 0/100 a 0/2000	de 0/50 a 0/2000	de 0/35 a 0/2000	de 0/100 a 0/2000	de 0/50 a 0/2000	de 0/35 a 0/2000	de 0/100 a 0/2000	de 0/50 a 0/2000	de 0/35 a 0/2000
TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO (Vd.c.)	10 (máx. 12)			10 (máx. 12)			10 (máx. 12)		
SINAL DE SAÍDA A PRESSÃO NOMINAL	2,5 mV/V	2,5 3,3 mV/V	2,3 a 3 3 a 4 mV/V	2,5 mV/V	2,5 3,3 mV/V	2,3 a 3 3 a 4 mV/V	2,5 mV/V	2,5 3,3 mV/V	2,3 a 3 3 a 4 mV/V
SINAL DE SAÍDA A PRESSÃO AMBIENTE	± 2% F.S.	± 5% F.S.	± 10% F.S.	± 2% F.S.	± 5% F.S.	± 10% F.S.	± 2% F.S.	± 5% F.S.	± 10% F.S.
CAMPO DE COMPENSAÇÃO COM A TEMPERATURA PARA O COMPARTIMENTO DO EXTENSÔMETRO	0...+100 °C	0...+80 °C	0...+80 °C	0...+100 °C	0...+80 °C	0...+80 °C	0...+100 °C	0...+80 °C	0...+80 °C
MÁXIMA TEMPERATURA PARA O COMPARTIMENTO DO EXTENSÔMETRO	-30... +120 °C	-30... +100 °C	-20... +100 °C	-30... +120 °C	-30... +100 °C	-20... +100 °C	-30... +120 °C	-30... +100 °C	-20... +100 °C
MÁXIMA TEMPERATURA DO FLUIDO DE PROCESSO	400°C			400°C			400°C		
GRAU DE PROTEÇÃO	IP 65			IP 65			IP 65		
CONEXÃO ELÉTRICA	V Conector VPT07RA10-6PT2			V Conector VPT07RA10-6PT2			V Conector VPT07RA10-6PT2 com conector compensado para termopar		
CONEXÃO DA PRESSÃO	1/2 - 20 UNF M14 x 1,5 M18 x 1,5			1/2 - 20 UNF M14 x 1,5 M18 x 1,5			1/2 - 20 UNF M14 x 1,5 M18 x 1,5		
CARACTERÍSTICAS PARTICULARES	Haste rígida com extensão flexível de 465 mm			Haste rígida sem extensão flexível			Haste rígida com extensão flexível de 465mm e termopar acoplado		
APLICAÇÃO	Extrusão			Extrusão			Extrusão		

ENCODER - GERADORES DE PULSO

Código do Catálogo	Doc 134	Doc 134	Doc 134
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS PRINCIPAIS			
MODELO	EG01	EG02	EG03
FUNÇÃO	Monodirecional com histerese do sinal de posição Saída x1, x2, x4	Monodirecional, Bi-direcional ou Bi-direcional com sinal de referência da posição zero	Tacômetro monodirecional com saída analógica proporcional à rotação (1 V/100 r.p.m. - 1 V/1000 r.p.m.)
TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO	5 V, 8 até 24 V	5 V, 8 até 24 V	11 até 25 V
CONSUMO MÁXIMO	30 mA (sem carga)	30 mA (sem carga)	30 mA (sem carga)
SAÍDA DIGITAL	Alimentação 8 até 24 V: VH = Vdc-2 V; IOH = 2 mA VL = 0,8 V; I máx = 30 mA Alimentação 5 V: VH = 2,4 V; IOH = 0,7 mA VL = 0,4 V; FAN OUT = 8 TTL	Alimentação 8 até 24 V: VH = Vdc-2 V; IOH = 2 mA VL = 0,8 V; I máx = 30 mA Alimentação 5 V: VH = 2,4 V; IOH = 0,7 mA VL = 0,4 V; FAN OUT = 8 TTL	Coletor aberto V máx. = 30 V; I máx = 30 mA. 240 pulsos / volta para 1 até 200 r.p.m. e 2 até 2000 r.p.m. 100 pulsos / volta para 5 até 5.000 r.p.m.
FREQUÊNCIA (máx.)	50 kHz	50 kHz	50 kHz
NÚMERO DE PULSOS/ROTAÇÃO OU SAÍDA ANALÓGICA	60/100/200/240/250 Pulsos/Rotação	60/100/200/240/250 Pulsos/Rotação	1 V / 100 r.p.m. para 1 até 200 r.p.m. 1 V / 1.000 r.p.m. para 1 até 2.000r.p.m. e 5 até 5.000r.p.m.
LINEARIDADE DA SAÍDA ANALÓGICA	—	—	0,2% f.s.
CONSTANTE DE TEMPO	—	—	(Tempo para alcançar 63% f.s.) 350 msec
CONEXÃO ELÉTRICA	Conector de 6 polos com saída axial ou radial	Conector de 6 polos com saída axial ou radial	Conector de 6 polos com saída axial ou radial
VELOCIDADE MÁXIMA	5.000 r.p.m.	5.000 r.p.m.	5.000 r.p.m.
MÁXIMA CARGA AXIAL / RADIAL	30 N / 34 N	30 N / 34 N	30 N / 34 N
TEMPERATURA DE TRABALHO	0...50°C	0...50°C	0...50°C
UMIDADE RELATIVA	95% não condensante	95% não condensante	95% não condensante
MATERIAL DO CORPO	Flange: alumínio anodizado Carcaça: plástico auto-extinguível	Flange: alumínio anodizado Carcaça: plástico auto-extinguível	Flange: alumínio anodizado Carcaça: plástico auto-extinguível
GRAU DE PROTEÇÃO	IP 65	IP 65	IP 65
VIDA ÚTIL	10 ⁹ rotações	10 ⁹ rotações	10 ⁹ rotações

Apêndice C - Método das Operações Evolucionárias (EVOP)

Este método de planejamento experimental utiliza duas premissas básicas: um processo industrial em larga escala raramente opera em suas condições ótimas por tempo indefinido e que é possível encontrar o ponto ótimo de operação de um sistema por um processo de seleção sucessiva dos pontos que tendem para o ótimo. Estes dois conceitos podem, a primeira vista parecer estranhos e até incompatíveis, mais na verdade não o são. No cotidiano de uma empresa muitos são os fatores que influenciam no processo de produção, como a qualidade da matéria-prima, o armazenamento, o envelhecimento dos equipamentos, etc. Com isto, mesmo adequando-se o processo para seu ponto ótimo num instante, não há garantias de que este permanecerá sendo o ponto ótimo depois de um certo tempo. Pode ser feita uma analogia entre o processo de operações evolucionárias e a seleção natural da teoria Darwiniana. Em ambos os casos o processo evolui no sentido de selecionar apenas as condições de operação (ou as características de um ser vivo) que melhor estejam adaptadas ao ambiente, isto é, que proporcione vantagens em relação a todas as outras condições possíveis. É claro que na EVOP a seleção desses estados de maior eficiência do sistema são selecionados pelo experimentador, que avalia segundo critérios próprios.

O método começa produzindo-se alguma variação no ambiente operacional, algo que funciona como uma pequena mutação da teoria de seleção natural. Deve-se observar que esta variação deve ser muito sutil, uma vez que a EVOP é aplicada a processos industriais em pleno funcionamento. A variação deve ser tal que altere a variação natural de uma certa característica, sem, no entanto, levar a uma variação que leve a produção a valores fora da especificação. A EVOP é um ajuste fino, que deve ser feito com muito cuidado. Depois de várias vezes repetidas as operações de otimização, sempre selecionando os parâmetros em função das melhores respostas do processo, pode-se traçar um panorama de como o sistema evolui na faixa estudada. O processo prossegue até que não haja mais evidência de que o processo possa melhorar sua eficiência desta maneira. Porém, como citado acima, o ambiente onde o processo está inserido pode passar por pequenas variações que resultem no deslocamento desse ponto ótimo, assim, a EVOP deve ser um processo constante de operação e melhoria de eficiência.