



Rui Miguel Simões Teófilo

Licenciatura em Engenharia Biomédica

Implementação de Controlo Estatístico a um Processo de Injeção de Plásticos

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia e Gestão Industrial

Orientador: Prof. Doutora Ana Sofia Vilela de Matos –
Faculdade de Ciências e Tecnologia – Universidade
Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Prof. Doutora Virgínia Helena Arimateia de Campos Machado
Arguente: Prof. Doutor José Fernando Gomes Requeijo
Vogais: Prof. Doutora Ana Sofia Leonardo Vilela de Matos
Eng^a Carla Silva



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro de 2014

Implementação de Controlo Estatístico a um Processo de Injeção de Plásticos

Copyright © Rui Teófilo, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Agradecimentos

A presente dissertação apresenta-se como o culminar do trabalho de anos e não seria possível sem a contribuição de várias pessoas.

Em primeiro lugar quero agradecer a minha professora e orientada, Ana Sofia Vilela de Matos, pela simpatia, constante disponibilidade e preocupação demonstradas sem as quais não teria sido possível concluir este trabalho

Ao Engenheiro Pedro Teles e Engenheira Carla Silva pelas críticas e sugestões propostas ao longo do meu estágio na *Visteon* Palmela.

Ainda da *Visteon* ao André Gomes enorme contributo de transmissão de maneira de pensar, aos técnicos Luís e João pelo tempo contributo crítico e apoio nas sugestões de melhoria do equipamento de medição à Dália, Florbela e Pedro pela amabilidade com que me receberam e pela paciência demonstrada nas longas horas passadas a recolher amostras e efetuar estudos.

A todos os meus amigos e colegas que ao longo destes anos sempre me apoiaram e incentivaram fazendo-me crescer como pessoa e como estudante.

Por fim, aos meus pais por todas as palavras de incentivo nos momentos em que as incertezas se sobrepunham à força de vontade de conclusão desta etapa.

A todos os referidos, o meu mais sincero Obrigado!

Sumário

Este trabalho consistiu na implementação de controlo estatístico a um processo de injeção de plásticos, da indústria de componentes automóveis.

A indústria de componentes automóveis destaca-se como sendo bastante competitiva, devido às dimensões das peças produzidas, sendo crucial garantir a filosofia “fazer bem à primeira”. Da vasta gama de setores de componentes, destacam-se componentes eletrónicos, interiores, exteriores e motores.

O processo de injeção de plásticos pode ser diferenciado em três fases: a primeira fase consiste na liquefação do material através do seu aquecimento, a segunda fase ocorre quando o material é injetado para as cavidades do molde onde vai obter a forma desejada e a última fase consiste na ejeção da peça do molde.

Na Fase I do *SPC* foram implementadas cartas $\bar{X} - S$ para estimação dos parâmetros do processo a serem utilizados na Fase II e cálculo da capacidade do processo. Na Fase II foi aplicada a carta *EWMA*, carta mais sensível à deteção de pequenas alterações na média do processo.

Após aplicação das cartas de controlo houve a necessidade de aplicar um teste estatístico *t-Student* para testar as médias das duas fases uma vez que o comportamento exibido pelas cartas na Fase II demonstrou não estar de acordo com a Fase I.

Aquando da recolha diária de dados, foram identificadas algumas diferenças entre os valores das cavidades de um dos componentes. De modo a perceber qual a origem dessas diferenças foi aplicado um desenho de experiências com o objetivo de estudar dois fatores a três níveis: percentagem de matéria-prima reciclada e segunda pressão. Foram realizadas nove experiências com seis replicações cada. A determinação dos fatores significativos e melhor combinação de níveis foi feita através da aplicação de análise de variância.

A realização deste trabalho permitiu concluir que, o sistema de medição utilizado não é o mais adequado ao caso. A aplicação das cartas de controlo demonstrou que o processo não se encontra estável para a aplicação da Fase II ao processo. Por sua vez o desenho de experiências revelou que a percentagem de matéria-prima reciclada não é um fator significativo. Porém a segunda pressão apresenta-se como fator significativo quando se considera como resposta a dimensão do componente.

Palavras-chave: Injeção de Plásticos; Reprodutibilidade; Repetibilidade; *SPC*; Cartas de Controlo; *EWMA*; Desenho de Experiências.

Abstract

This work consisted on implementing statistical control in an injection molding process for an automobile component industry.

The industry of automobile components is a very competitive industry due to the dimensions of the parts produces being crucial to guarantee the “do it right the first time”. From the wide range of sectors for components, there is the need to point out electronic components, interior, exterior and engines.

The injection plastic process can be separated in three phases. The first one consists in the liquefaction of the material through its heating. The second one occurs when the material is injected into the mold cavities where it will obtain the desired shape. The final phase consists in the ejection of the part from the mold.

In phase I of SPC where implemented the $\bar{X} - S$ charts to estimate the process parameters to use on phase II and also the process capability. In phase II the control chart applied was EWMA, because is more sensible when detecting small shifts on the process mean.

After construction of the control charts there was the need to apply a t-Student statistical test to teste the means of both phases since the behavior showed by the phase II chart didn't correspond to the phase I

While collecting the data some differences between the data from each cavity from one component were noticed. In order to which lead to those differences a design of experiments was applied to study two factors at three levels: Percentage of regrind material and Back pressure. Nine experiments were conducted each with six replications. To determine which factors were significant and the best combination of its levels was used the analysis of variance method.

With this worked it was possible to conclude that the measurement system isn't the most appropriated for the case. The control charts showed that the process is not stable to apply the second phase of the SPC. While the DOE showed that the percentage of regrind isn't a significant factor it also proved that the back pressure is when the response is the overall length of the parts.

Keywords: Plastic Injection; Reproducibility; Repeatability; SPC; Control Charts; EWMA; Design of Experiments.

Abreviaturas

ABS - Acrilonitrila butadieno estireno

$ARL_{Em\ Controlo}$ – *Average Run Length*

$ARL_{Fora\ de\ Controlo}$ – *Average Run Length*

CUSUM – *Cumulative Sum* (Somas Acumuladas)

DOE – *Design of Experiments* (Desenho de Experiências)

EWMA – *Exponentially Weighted Moving Average* (Média Móvel Exponencialmente Amortecida)

FIR – *Fast Initial Response*

LC – Linha Central

LIC – Limite Inferior de Controlo

LIE – Limite Inferior de Especificação

LSC – Limite Superior de Controlo

LSE – Limite Superior de Especificação

PP - Polipropileno

PS - Poliestireno

RR – Repetibilidade e Reprodutibilidade

VIM – Vocabulário Internacional de Metrologia

Simbologia

a – número de níveis

$A_2, B_3, B_4, C_4, D_3, d_3, D_4, d_3$ – Constantes das cartas de controlo

C_t – Variável para deteção de um aumento na média do processo

C_p – Índice de capacidade potencial do processo

C_{pk} – Índice de capacidade do processo

$(C_{pk})_I$ – Índice de capacidade inferior do processo

$(C_{pk})_S$ – Índice de capacidade superior do processo

C_{pm} – Índice de capacidade de segunda geração

C_{pmk} – Índice de capacidade de terceira geração

d_2^* – Constante do estudo de Repetibilidade e Reprodutibilidade

E_0 – Valor inicial da variável E

E_t – Média móvel exponencialmente amortecida para o instante t

$F_{a;b}$ – Função de Fisher para a e b graus de liberdade no numerador e denominar, respetivamente

g – produto entre o número de unidades e o número de operadores

$g.l.$ – Graus de liberdade

h – Limite de controlo para a carta CUSUM

H_0 – Hipótese nula

H_1 – Hipótese alternativa

k – Valor de referência

K – Constante para um determinado λ e $ARL_{Em\ Controlo}$

m – Número de amostras

\overline{MR} – Amplitude móvel média

MS – *Mean of squares* (Desvios quadráticos médios)

MS_A – Desvio quadrático médio do fator A

MS_B – Desvio quadrático médio do fator B

MS_{AB} – Desvio quadrático médio da interação dos fatores A e B

n – Dimensão da amostra/número de replicações

N_C – Número de períodos consecutivos em que C é diferente de 0

N_T – Número de períodos consecutivos em que T é diferente de 0

r – Número de medições

R – Amplitude da amostra

\bar{R} – Amplitude média da amostra

$R_{\bar{x}}$ – Amplitude das médias globais

S – Desvio padrão da amostra

\bar{S} – Desvio padrão médio

S/N – Índice Sinal-Ruído

SS – Soma dos quadrados (*Sum of Squares*)

SS_A – Soma dos quadrados do fator A

SS_B – Soma dos quadrados do fator B

SS_{AB} – Variação entre a interação dos fatores A e B

SS_W – Soma dos quadrados do Erro

SS_T – Variação Total

T_t – Variável para detecção de um decréscimo na média do processo

X_t – Observação individual no instante t

\bar{X} – Média da amostra

$\bar{\bar{X}}$ – Média global da processo

y_{ij} – Valor da resposta para o nível i replica j

$Y_{..}$ – Soma da N observações

$Y_{i.}$ – Soma das observações do nível i

Y_t – Valor da variável Y no instante t

$\bar{Y}_{i.}$ – Média da soma das respostas para o nível i do fator A

$\bar{Y}_{.j}$ – Média da soma das respostas para o nível j do fator B

$\bar{Y}_{...}$ – Média das observações para cada combinação de níveis de dois fatores

Z_t – Variável normal reduzida no instante t

β_j – Efeito no nível j no fator B

γ_{ij} – Efeito da interação entre os fatores A e B

δ – Alteração na média do processo, em número de desvios padrão

Δ – Valor da alteração da média que se pretende detetar

λ – Constante de amortecimento

μ – Média do processo

σ^2 – Variância do Processo

σ_E^2 – Variância da variável E

σ_Y^2 – Variância da variável Y

$\hat{\sigma}_{repet.}$ – Desvio padrão da repetibilidade

$\hat{\sigma}_{reprod.}$ – Desvio padrão da reprodutibilidade

$\hat{\sigma}_{reprod.ajustada}$ – Desvio padrão da reprodutibilidade ajustada

$\hat{\sigma}_{repet.}^2$ – Variância da repetibilidade

$\hat{\sigma}_{reprod.}^2$ – Variância da reprodutibilidade

τ_i – Efeito do nível i no fator A

Índice

Agradecimentos.....	v
Sumário	vii
Abstract	ix
Abreviaturas	xi
Simbologia	xiii
Índice de Figuras	xix
Índice de Tabelas.....	xxi
1. Introdução	1
1.1. Justificação do tema	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Estrutura	2
2. Fundamentos Teóricos	3
2.1. Injeção de Plásticos	3
2.2. Análise de <i>Outliers</i>	7
2.3. Avaliação de Sistemas de Medição	8
2.4. Cartas de Controlo – Abordagem Tradicional.....	12
2.4.2.3. Capacidade do Processo	17
2.4.3. Cartas de Controlo Especiais.....	19
2.4.4. Desenho de Experiências	22
3. Caso de Estudo – Metodologia, análise e discussão de resultados.....	31
3.1. A Empresa.....	31
3.2. Qualidade	31
3.3. Produtos.....	31
3.3.1. Processo Produtivo.....	32
3.4. Metodologia	34
3.4.1. Compilação e Análise preliminar dos dados	34
3.4.2. Validação do Sistema de medição.....	35
3.4.3. Aplicação de Cartas de Controlo.....	35
3.4.4. Desenho de Experiências	35
3.5. Apresentação e Discussão de Resultados	36
3.5.1. Compilação de dados	36
3.5.2. Estudo de <i>Outliers</i>	36
3.5.3. Análise de Variância	45

3.5.4.	Diagrama Causa-Efeito	49
3.5.5.	Estudo R&R	50
3.5.6.	Controlo Estatístico do Processo.....	59
3.5.7.	Desenho de Experiências <i>Two-way ANOVA</i>	68
4.	Conclusões e Recomendações.....	79
	Bibliografia	81
	Anexos.....	85
	Anexo I.....	85
	Anexo II	90
	Anexo III	98

Índice de Figuras

Figura 2. 1 - Máquina de Injeção (Retirada de Tecnologia Mecânica – Processamento de Plásticos)	4
Figura 2. 2 - Ciclo de Injeção.....	5
Figura 2. 3 - Triângulo da injeção	6
Figura 2. 4 - Espectro de valores normais até outliers	7
Figura 2. 5 - Etapas do processo de medição	8
Figura 2. 6 - Regras para a deteção de causas especiais	17
Figura 2. 7 - Esquema de abordagem para aplicação de DOE	23
Figura 2. 8 – Sistema de variáveis.....	24
Figura 3. 1 - Produto final	32
Figura 3. 2 - Componente do Produtos; a) <i>Cover</i> , b) <i>Mounting Plate</i> , c) <i>Bezzel</i> , d) Lente.....	32
Figura 3. 3 - Diagrama do processo produtivo para os componentes 1-3	33
Figura 3. 4 - Diagrama do processo produtivo para o componente 4.....	34
Figura 3. 5 - Box-Plot Componente 1, 1ª Janela; a) 1º Turno, b) 2º Turno, c) 3º Turno.....	37
Figura 3. 6 - Box-Plot Componente 1, 2ª Janela; a) 1º Turno, b) 2º Turno, c) 3º Turno.....	38
Figura 3. 7 - Box-Plot Componente 1, 3ª Janela; a) 1º Turno, b) 2º Turno, c) 3º Turno.....	39
Figura 3. 8 - Box-Plot Componente 2, 2ª Janela; a) 1º Turno, b) 2º Turno, c) 3º Turno.....	40
Figura 3. 9 - Box-Plot Componente 2, 3ª Janela; a) 1º Turno, b) 2º Turno, c) 3º Turno.....	41
Figura 3. 10 - Box-Plot Componente 3, 2ª Janela; a) 1º Turno, b) 2º Turno, c) 3º Turno.....	42
Figura 3. 11 - Box-Plot Componente 3, 3ª Janela; a) 1º Turno, b) 2º Turno, c) 3º Turno.....	43
Figura 3. 12 - Box-Plot Componente 4, 2ª Janela; a) 1º Turno, b) 2º Turno, c) 3º Turno.....	44
Figura 3. 13 - Box-Plot, Componente 4, 3ª Janela; a) 1º Turno, b) 2º Turno, c) 3º Turno.....	45
Figura 3. 14 - Diagrama Causa-Efeito para processo de medição	50
Figura 3. 15 - Equipamento de medição manual (<i>CMM</i>).....	50
Figura 3. 16 - Procedimento de medição componente 1; a) colocação da peça no equipamento, b) recolha da dimensão.....	51
Figura 3. 17 - Gráfico resumo de Repetibilidade e Reprodutibilidade Componente 1	52
Figura 3. 18 - Média Por Operador e Peça Componente 1.....	52
Figura 3. 19 - Procedimento de medição componente 2; a) colocação da peça no equipamento, b) recolha da dimensão.....	53
Figura 3. 20 - Gráfico resumo de Repetibilidade e Reprodutibilidade Componente 2	53
Figura 3. 21 - Média Por Operador e Peça Componente 2.....	54
Figura 3. 22 - Procedimento de medição componente 3; a) colocação da peça no equipamento, b) recolha da dimensão.....	54
Figura 3. 23 - Gráfico resumo de Repetibilidade e Reprodutibilidade Componente 3	55
Figura 3. 24 - Média Por Operador e Peça Componente 3.....	55
Figura 3. 25 - Procedimento de medição componente 4; a) colocação da peça no equipamento, b) recolha da dimensão.....	56
Figura 3. 26 - Gráfico resumo de Repetibilidade e Reprodutibilidade Componente 4	56
Figura 3. 27 - Media por Operador e Peça Componente 4.....	57
Figura 3. 28 - Carta de Controlo $\bar{X} - S$ Revista Componente 1	60
Figura 3. 29 - Carta de Controlo $\bar{X} - S$ revista Componente 2.....	61
Figura 3. 30 - Carta de Controlo $\bar{X} - S$ Revista Componente 3	62
Figura 3. 31 - Carta de Controlo $\bar{X} - S$ Revista Componente 4, Cavidade 1	63

Figura 3. 32 - Carta de Controlo $\mathbf{X} - \mathbf{S}$ Revista Componente 4, Cavidade 2	64
Figura 3. 33 – Carta EWMA para Componente 1	66
Figura 3. 34 – Carta EWMA para Componente 2	67
Figura 3. 35 - Desenho Composto Central	68
Figura 3. 36 - Evolução da contração das peças do Componente 1 (Cavidade 1).....	70
Figura 3. 37 - Evolução da contração das peças do Componente 1 (Cavidade 2).....	70
Figura 3. 38 – Probabilidades da Distribuição Normal (Cavidade 1)	71
Figura 3. 39 - Resíduos vs. Sequência de Experiências (Cavidade 1).....	72
Figura 3. 40 - Resíduos vs. Valores Previstos (Cavidade 1)	73
Figura 3. 41 - Valores médios da resposta (Cavidade 1).....	74
Figura 3. 42 – Probabilidades da Distribuição Normal (Cavidade 2)	75
Figura 3. 43 - Resíduos vs. Sequência de Experiências (Cavidade 2)	76
Figura 3. 44 - Resíduos vs. Valores Previstos (Cavidade 2)	76
Figura 3. 45 – Valores médios da Resposta (Cavidade 2).....	78
Figura I. 1 - Valor ótimo de λ da carta de controlo EWMA, para vários valores de $ARL_{Em\ Controlo}$	88
Figura I. 2 - Valor ótimo de λ da carta de controlo EWMA, para vários valores de $ARL_{Em\ Controlo}$	88
Figura I. 3 - Valor ótimo de λ e K , da carta de controlo EWMA, para vários valores de $ARL_{Em\ Controlo}$	89
Figura I. 4 - Valor ótimo de λ e K , da carta de controlo EWMA, para vários valores de $ARL_{Em\ Controlo}$	89
Figura II. 1 - Box-Plot Componente 1, 1ª Janela; a) 2º Turno, b) 3º Turno	90
Figura II. 2 - Box-Plot Componente 1, 2ª Janela; a) 1º Turno, b) 2º Turno, c) 3º Turno	90
Figura II. 3 - Box-Plot Componente 1, 3ª Janela, 2º Turno	91
Figura II. 4 - Box-Plot Componente 3, 1ª Janela; a) 1º Turno, b) 2º Turno, c) 3º Turno	91
Figura II. 5 - Box-Plot Componente 3, 3ª Janela, 3º Turno.....	92
Figura II. 6 - Box-Plot Componente 4, 2ª Janela; a) 1º Turno, b) 2º Turno, c) 3º Turno	92
Figura II. 7 - Box-Plot Componente 4, 3ª Janela; a) 1º Turno, b) 2º Turno, c) 3º Turno	93
Figura II. 8 - Gráfico das Médias Componente 1, 1ª Janela.....	93
Figura II. 9 - Gráfico das Médias Componente 1, 2ª Janela.....	94
Figura II. 10 - Gráfico das Médias Componente 2, 2ª Janela.....	94
Figura II. 11 - Gráfico das Médias Componente 3, 2ª Janela.....	95
Figura II. 12 - Gráfico das Médias Componente 4, 2ª Janela.....	95
Figura II. 13 - Gráfico das Médias Componente 1, 3ª Janela.....	96
Figura II. 14 - Gráfico das Médias Componente 2, 3ª Janela.....	96
Figura II. 15 - Gráfico das Médias Componente 3, 3ª Janela.....	97
Figura II. 16 - Gráfico das Médias Componente 4, 3ª Janela.....	97
Figura III. 1 - Carta de Controlo $\bar{\mathbf{X}} - \mathbf{S}$ Componente 1	98
Figura III. 2 - Carta de Controlo $\bar{\mathbf{X}} - \mathbf{S}$ Componente 2	99
Figura III. 3 - Carta de Controlo $\bar{\mathbf{X}} - \mathbf{S}$ Componente 3	100
Figura III. 4 - Carta de Controlo $\bar{\mathbf{X}} - \mathbf{S}$ Componente 4 (Cavidade 1).....	101
Figura III. 5 - Carta de Controlo $\bar{\mathbf{X}} - \mathbf{S}$ Componente 4 (Cavidade 2).....	102

Índice de Tabelas

Tabela 2. 1 - Tabela ANOVA	25
Tabela 2. 2 - Valores de μ_Y e σ_Y^2 para amostras e observações individuais	21
Tabela 2. 3 - Tabela ANOVA para fatorial 3^2	27
Tabela 3. 1 - Tabela Resumo Componente 1	46
Tabela 3. 2 - Tabela Resumo Componente 1, Segunda Janela.....	46
Tabela 3. 3 - Tabela Resumo Componente 2, Segunda Janela.....	47
Tabela 3. 4 - Tabela Resumo Componente 3, Segunda Janela.....	47
Tabela 3. 5 - Tabela Resumo Componente 4, Segunda Janela.....	48
Tabela 3. 6 - Tabela Resumo Componente 1, Terceira Janela	48
Tabela 3. 7 - Tabela Resumo Componente 2, Terceira Janela	48
Tabela 3. 8 - Tabela Resumo Componente 3, Terceira Janela	49
Tabela 3. 9 - Tabela Resumo Componente 4, Terceira Janela	49
Tabela 3. 10 - Tabela Resumo da Repetibilidade e Reprodutibilidade	58
Tabela 3. 11 - Tabela Resumo para o melhor Operador	59
Tabela 3. 12 - Tabelaa resumo para blocos-padrão.....	59
Tabela 3. 13 - Tabela Resumo da Capacidade	65
Tabela 3. 14 - Tabela resumo com os valores de p	67
Tabela 3. 15- Níveis dos fatores.....	69
Tabela 3. 16 - Sequência das experiências realizadas	71
Tabela 3. 17 - Valores da Resposta (Cavidade 1)	73
Tabela 3. 18 - Tabela ANOVA (Cavidade 1).....	73
Tabela 3. 19 - Tabela resumo com os melhores níveis para os parâmetros (Cavidade 1).....	74
Tabela 3. 20 - Valores de Resposta (Cavidade 2)	77
Tabela 3. 21 - Tabela ANOVA (Cavidade 2).....	77
Tabela 3. 22 - Tabela resumo com os melhores níveis para os parâmetros (Cavidade 2).....	78
Tabela I. 1 - Valores de d_2^* para o cálculo da repetibilidade.....	85
Tabela I. 2 - Valores de d_2^* para a reprodutibilidade	86
Tabela I. 3 - Valores de d_2^* para o cálculo da variação das unidades do produto	86
Tabela I. 4 - Constantes para as Cartas Tradicionais de Variáveis	87

1. Introdução

1.1. Justificação do tema

A indústria automóvel em Portugal destaca-se por ser uma das mais dinâmicas, o que se reflete num volume de negócios que representa 4% do PIB (IAPMEI, 2013). Em conjunto com a indústria automóvel está a indústria de componentes automóveis (os setores de componentes eletrónicos, interiores, exteriores e motores). Em Portugal esta indústria verificou um crescimento de 200% nos últimos 15 anos (AICEP, 2013).

No que diz respeito à qualidade das empresas nacionais, todas apresentam certificação de qualidade de acordo com a Norma ISO 9001, embora ainda uma grande parte delas seja certificada pela Norma de especificação técnica ISO/TS 16949 e Norma Ambiental ISO 14001 (AICEP, 2013).

Apresentando-se como uma indústria competitiva é imperativo para uma empresa deste ramo garantir o cumprimento da filosofia fazer bem à primeira. A aplicação desta filosofia, passa pela aplicação de ferramentas da qualidade que permitem detetar tendências no processo produtivo, possibilitando a sua correção antecipadamente.

Posto isto, este tema surge no âmbito de melhoria do processo produtivo de um produto já em produção, através da aplicação de Cartas de Controlo e Desenho de Experiências.

1.2. Objetivos

A presente dissertação tem como objetivo a aplicação de ferramentas da qualidade, numa empresa da indústria de componentes automóveis para reduzir a variabilidade do processo produtivo de um dos seus produtos, melhorando assim a qualidade do produto final.

Com base em dados históricos pretende-se implementar o controlo estatístico a um processo da indústria da injeção de plásticos, através da implementação das cartas de controlo para monitorização do processo.

A aplicação das cartas de controlo, além de monitorizar o processo, permite detetar causas especiais que após a sua eliminação permitirá reduzir a dispersão do processo. Estando o processo livre de causas especiais, serão estimados os parâmetros, média e desvio padrão do mesmo, para o cálculo da capacidade e posterior aplicação numa Fase II da implementação do controlo estatístico.

O desenho de experiências tem como objetivo verificar se dois fatores, individualmente ou através da sua interação, são significativos quando se tem como resposta a dimensão da peça. Outro objetivo é a determinação dos melhores níveis dos fatores de modo a otimizar a resposta e consequente melhoria do processo.

Com a monitorização e estudo do processo, pretende-se que a aplicação de cartas de controlo seja uma opção viável para melhoria do processo, uma vez que será possível detetar e identificar causas especiais e intervir no processo aplicando medidas corretivas.

A realização desta dissertação irá permitir adquirir conhecimentos relativos ao processo de injeção de componentes plásticos na indústria de componentes automóveis, bem como a

aplicação de conhecimentos teóricos de estudos de Repetibilidade e Reprodutibilidade, Cartas de Controlo e Desenho de Experiências em contexto real.

1.3. Estrutura

A presente dissertação encontra-se dividida em 4 capítulos, nos quais são abordadas as temáticas consideradas relevantes para a compreensão da mesma.

O primeiro capítulo referente à Introdução contém informação relativa à contextualização e motivação para a escolha do tema e os objetivos que se pretendem atingir com a realização desta dissertação.

No segundo capítulo são detalhados os fundamentos teóricos, onde serão descritos os princípios básicos da injeção de plásticos e constituintes de uma máquina de injeção. Além disso são feitas descrições do Estudo de Repetibilidade e Reprodutibilidade, Estudo de *Outliers*, Cartas de Controlo Tradicionais e Capacidade de Processo, Cartas de Controlo Especiais e ainda Desenho de Experiências e Análise de Variâncias.

O terceiro capítulo consiste na apresentação e caracterização da empresa onde foi realizado o estágio. Exposição de todas as metodologias utilizadas para a construção da dissertação e por fim análise de discussão dos resultados obtidos.

O quarto capítulo consiste nas conclusões retiradas pelos resultados obtidos no terceiro capítulo e apresentação de sugestões com o intuito de melhorar o processo produtivo da empresa, através da redução da variação do mesmo.

2. Fundamentos Teóricos

2.1. Injeção de Plásticos

Os materiais termoplásticos são utilizados em várias indústrias, desde a indústria aeroespacial até à indústria de componentes automóveis. Isto deve-se à fácil alteração das suas propriedades físicas e químicas (Ozcelik, et al., 2009).

Pelas razões descritas anteriormente, a injeção de plásticos é uma das técnicas mais utilizadas a nível industrial, pois possibilita o fabrico de peças cuja especificação de tamanho é restrita, peças que possuem uma forma complexa ou necessitam de uma espessura específica, adequando-se a vários tipos de indústria (Dang, 2014).

Neste tipo de processo produtivo os parâmetros do processo são fatores que desempenham um papel importante na injeção de plásticos. Características como resistência, empeno e tensão residual das peças produzidas são afetadas em grande parte pelo modo como o processo é executado. Por sua vez as condições de maquinaria afetam a produtividade, tempo de ciclo, consumo de energia e o processo. Estas condições vão estar dependentes do tipo de material, design da peça e maquinaria (Kovács & Sikló, 2011).

Como tal, a qualidade das peças vai então depender não só das propriedades do material a ser processado mas também dos parâmetros de processamento. Deste modo é necessário otimizar os parâmetros do processo, uma vez que estes reduzem o tempo de ciclo e melhoram o produto final (Rosato, 2000). Contudo a seleção dos parâmetros vão depender da experiência do engenheiro do processo.

2.1.1. Máquina de Injeção

Um dos principais intervenientes na injeção de plásticos é a máquina de injeção uma vez que é esta que submeterá a matéria-prima aos vários processos sendo, por isso, necessário identificar os seus constituintes. A máquina de injeção encontra-se dividida em quatro partes (Reis, 2011):

- Unidade de Potência;
- Unidade de Plasticização;
- Unidade de Fecho;
- Unidade de Comando

A unidade de potência tem como objetivo fornecer a pressão necessária à unidade de plasticização e à unidade de fecho.

A unidade de plasticização ou injeção está encarregue de transportar a matéria-prima da tremonha para o molde onde será sujeita a aquecimento, plasticização e fusão, sendo injetada para o molde onde é pressurizada.

A unidade de fecho ou fixação é responsável pela fixação da movimentação do molde resultando na abertura ou fecho deste. É a unidade que mantém o molde fechado durante o ciclo de injeção, resistindo à pressão de injeção e quando aberto, aciona a extração da peça plástica.

A unidade de comando é a *interface* entre máquina-operador onde é feita a monitorização das variáveis operatórias e controlo de variáveis de processo. É possível ser integrada com sistemas de gestão da produção.

Associados às várias unidades encontram-se componentes específicos da máquina de injeção. A figura 2.1. representa uma máquina de injeção típica e os vários componentes.

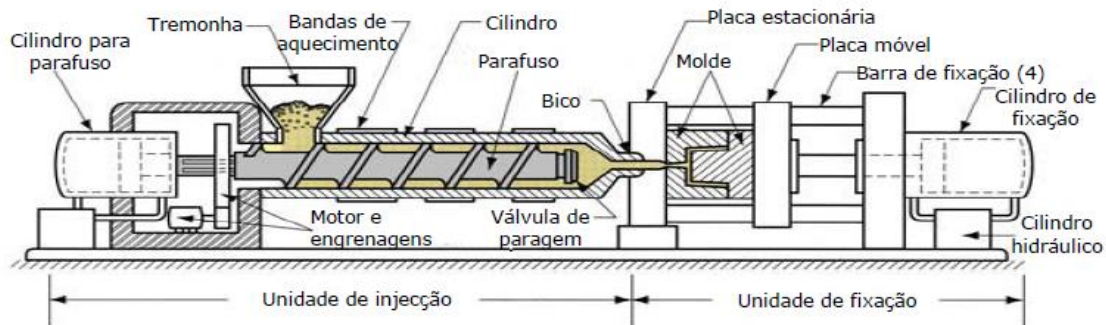


Figura 2. 1 - Máquina de Injeção (Retirado de Tecnologia Mecânica – Processamento de Plásticos)

Seguidamente serão mencionados alguns dos componentes de uma máquina de injeção explicando a sua constituição e função no processo de injeção.

A tremonha corresponde à zona da máquina que recebe e armazena o material até este ser injetado. Outra das suas funções é armazenar matéria-prima que vem diretamente do armazém de forma a garantir que a máquina não fica sem matéria-prima, possuindo uma forma afunilada por onde a matéria-prima é puxada. As suas dimensões variam entre máquinas, de acordo com a dimensão do molde que estas levam (Harper, 2006).

O cilindro corresponde à zona da máquina de injeção pela qual a matéria-prima passa até chegar ao molde. Ao deslocar-se pelo cilindro a matéria-prima está sujeita a fricção com as paredes do cilindro, contribuindo assim para o aumento da temperatura e fusão do material. Existem vários tipos de cilindros, consoante o material utilizado, como o caso de cilindros resistentes à abrasão ou à corrosão (Harper, 2006).

O molde é o componente chave na máquina de injeção, pois é o que dá origem à peça, de acordo com o seu *design*. É composto por duas partes: uma fixa ou matriz e outra móvel. A parte móvel, como o nome indica, é a que se desloca, abrindo ou fechando o molde consoante a fase do ciclo de injeção (Rosato, 2000).

2.1.2. Processo Produtivo

Segundo Rosato (1995) o processo de injeção de plásticos divide-se em três operações. A primeira operação consiste no aumento de temperatura do material, tornando liquefeito o que permite a sua movimentação quando sujeito a pressão. Esta transformação é obtida através do aquecimento e trituração do material sólido até este formar uma “pasta” com viscosidade uniforme. A operação seguinte consiste no arrefecimento e solidificação do material no molde através da transferência do material que está contido no fuso para as várias cavidades do molde através de canais de injeção onde este obtém a forma desejada. Após o material ter sido sujeito a pressão e calor, que lhe conferem a forma pretendida, dá-se a ejeção da peça que corresponde à terceira operação.

2.1.3. Ciclo de Injeção

O processo produtivo na injeção de plásticos pode ser descrito como um ciclo contínuo onde se diferenciam várias etapas como evidenciado na figura 2.2.



Figura 2. 2 - Ciclo de Injeção (Adaptado de Reis, 2011)

A primeira etapa do ciclo de injeção é o fecho do molde onde este é trancado pela força de fecho exercida pela máquina de injeção. De seguida o material é injetado, consequência do avanço do fuso que atua como um êmbolo, injetando o material para as cavidades do molde. Posteriormente o fuso continua a exercer pressão de modo a compensar a contração do material durante o arrefecimento. A próxima etapa corresponde à plasticização e arrefecimento, onde ocorre o recuo do fuso, com um movimento rotacional, plastificando o material para a próxima injeção, dando-se também o arrefecimento do material que se encontra nas cavidades do molde, até atingir a temperatura necessária para que as peças possam ser extraídas. Assim que se atinge essa temperatura, dá-se início à fase de abertura e extração onde o molde se abre e ejeta as peças, que são normalmente retiradas por extratores. Por fim, ocorre uma pausa entre injeções, voltando o ciclo a repetir-se.

Seguidamente será feita uma descrição mais pormenorizada de cada uma das fases do ciclo de injeção.

A fase de fecho, como descrito anteriormente corresponde ao início do ciclo. Esta fase depende da *performance* do equipamento, devendo ser tão rápida quanto possível.

Na fase de injeção dá-se o encosto do bico da máquina ao molde, o fuso é acionado para a frente sendo estabelecidas velocidades e pressões de injeção para que a peça apresente as características dimensionais e visuais exigidas.

A plasticização corresponde à dosagem do material e ocorre durante o tempo de arrefecimento. Esta fase inicia-se com a rotação do fuso que empurra o material ao longo do cilindro. O material plastificado exerce uma pressão contrária que empurra o fuso para trás. Este movimento termina quando a dosagem estiver concluída.

O arrefecimento da peça começa com a solidificação do gito (excesso de material que fica em cada injeção) e termina quando a peça atinge a temperatura que permite a ejeção da peça sem distorção. Tempos de arrefecimento baixos, permitem reduzir tensões internas, contudo implicam uma diminuição na produtividade, uma vez que o tempo de arrefecimento corresponde a cerca de 60% do ciclo de injeção.

A abertura e ejeção da peça dependem do tipo de equipamento utilizado. Podem ser utilizados extratores ou outro tipo de sistemas. É habitual ser utilizado um robot para a extração da peça.

O tempo de pausa corresponde ao tempo entre o final de uma injeção e o início de outra. Este tempo é curto quando se trabalha em funcionamento automático mas longo quando a peça é removida manualmente pelo operador.

2.1.4. Principais Problemas

O processo de injeção é progressivo. A matéria-prima é injetada para um molde onde ganha a forma pretendida, mas a simplicidade desta definição não se reflete no tipo de problemas que podem surgir neste processo, sendo estes de difícil resolução tornando-o mais complexo (Harper, 2006).

Existem três parâmetros que influenciam o processo: pressão, temperatura e tempo (Harper, 2006). A alteração de apenas um destes parâmetros irá refletir-se nos outros dois. Charles A. Harper definiu o triângulo da injeção (figura 2.3) que reflete as interações entre os três parâmetros.

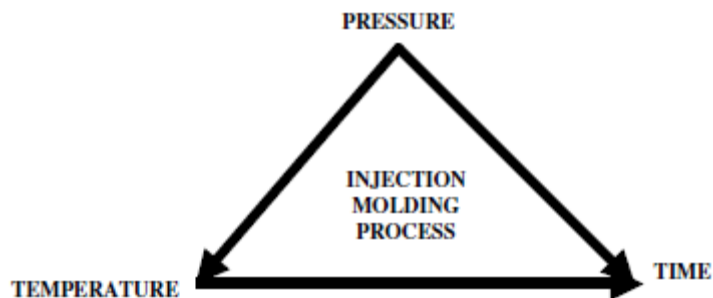


Figura 2. 3 - Triângulo da injeção (Adaptado de Harper, 2006, pág. 60)

Por exemplo, uma alteração na temperatura de fusão do material irá afetar a pressão necessária para o injetar para as cavidades do molde.

Existem vários problemas que podem ocorrer neste tipo de processo, encontrando-se entre eles a estabilidade dimensional, *short-shots* e empeno.

A estabilidade dimensional é afetada pela inconsistência na injeção de material que se reflete em peças mais ou menos pesadas e por sua vez, com dimensões inconsistentes. A dimensão inadequada do bico de injeção também afeta a dimensão das peças.

Os *short-shots* correspondem à falta de material numa peça. Este problema pode dever-se à baixa temperatura de fusão que impede o fluxo do material. O bloqueio do bico de injeção com material de injeções prévias pode também dar origem a este problema ou então a temperatura do molde, se for baixa, fará com que o material solidifique antes do molde estar preenchido.

O empeno da peça pode resultar do arrefecimento não uniforme da mesma. A velocidade de injeção do material também se pode refletir no empeno, pois se for demasiado elevada irá encher demasiado o molde que, por sua vez, irá criar tensões no material que resultam no empeno da peça. Tempos de arrefecimentos curtos irão, também, contribuir para o empeno das peças.

Deste modo torna-se bastante importante o controlo dos parâmetros neste tipo de processo, tornando possível associar a alteração de um ou mais parâmetros a determinado tipo de não conformidade que a peça apresente.

2.2. Análise de *Outliers*

Um dos objetivos das cartas de controlo é a deteção de causas especiais de variação que possam surgir no processo. Nenhum processo, por mais estável que seja, produz duas peças idênticas, o que leva a existência de peças com dimensões diferentes. Contudo, quando se trabalha com dados históricos e se pretende implementar o controlo estatístico, existe a possibilidade de analisar os dados e verificar se existem valores estranhos ao processo causados por erros de medição, erros de execução ou mesmo da variabilidade inerente ao processo. Caso apareçam esses valores, devem ser estudados para que a sua origem seja determinada.

A sua deteção é feita com recurso ao Estudo de *Outliers*, cujo objetivo é identificar valores anormais quando comparados com as restantes observações. (Kaya, 2010).

Hawkins (1980) define um *outlier* como sendo uma observação que se desvia o suficiente das restantes observações para levantar suspeitas que foi gerado por outro mecanismo.

O estudo de *outliers* pode ser aplicado em diversas áreas, desde deteção de fraudes na banca a intrusões em computadores até à medicina (Aggarwal, 2014).

O estudo destes valores pode mostrar-se bastante valioso pois contém informação útil que vai permitir aos analistas tomar decisões mais assertivas de modo a melhorar a qualidade do processo (Ben-Gal, 2005).

A decisão a tomar sobre o que fazer com um *outlier* é crucial uma vez que poderá invalidar o resto do estudo. Por isso é boa prática aplicar-se o estudo de *outliers* em três fases. A primeira fase do estudo consiste na identificação de potenciais *outliers* através da observação direta dos dados, quando se tratam de pequenas amostras ou da análise da sua representação gráfica. Na segunda fase, quando se tem conhecimento de quais os valores potencialmente problemáticos, são realizados testes estatísticos que irão corroborar ou não, a suspeita. De acordo com o grau de afastamento do valor médio estes valores podem ser denominados como suspeitos ou aberrantes (Matos, 2012).

A figura 2.4. representa o espectro de dados, desde valor normal até aos *outliers*.

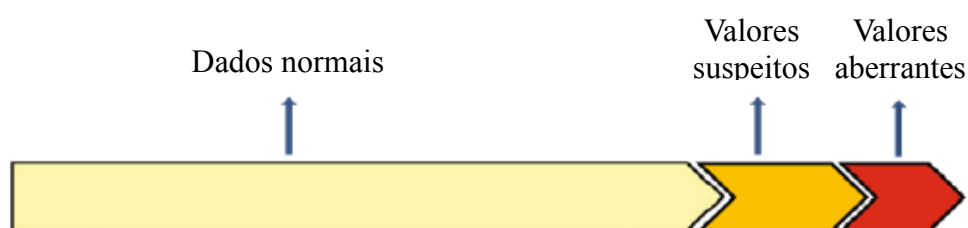


Figura 2. 4 - Espectro de valores normais até outliers. □(Adaptado de Aggarwal, 2014, pág. 4)

Por fim, é necessário tomar uma decisão sobre o que fazer com estes valores, nomeadamente verificar se na altura de recolha das observações ocorreu algum acontecimento que possa ter levado ao aparecimento daquele valor e proceder-se ao seu estudo ou eliminação.

Os *outliers* podem apresentar comportamentos diferentes e de acordo com o seu comportamento têm classificações distintas. Da classificação utilizada pela *IBM Corporation* destacam-se os seguintes tipos de *outliers*:

- *Outlier* de Salto;
- *Outlier* de Rampa;

Um *outlier* de salto afeta apenas uma observação, resultado de um erro do operador causado por uma falha de observação ou registo de um valor, sem consequência para as restantes. O *outlier* de rampa, por sua vez, já afeta os valores seguintes ocorrendo aleatoriamente, merecendo por isso um cuidado especial, pois pode tratar-se de um indicador de alterações no processo.

Como referido anteriormente é necessário proceder ao estudo de *outliers* para se perceber qual a sua influência. Para tal existem métodos que são tanto melhores quanto menor for o número de *outliers* existentes, sendo necessário cuidado ao analisar os dados (Kaya, 2010). Existem várias técnicas de deteção de *outlier* (Matos, 2012), destacando-se as seguintes:

- Método de Interquartil;
- Método do Intervalo de Confiança;
- Método de *Dixon*;
- Método de *Grubbs*;
- Método dos Z-Scores;
- Método *MAD*;

2.3. Avaliação de Sistemas de Medição

Antecedendo a aplicação de cartas de controlo é necessário perceber se o sistema de medição até aqui utilizado é adequado, pois este pode inviabilizar todos os resultados obtidos através de dados recolhidos com um sistema de medição inadequado. Por esta razão é imprescindível fazer a avaliação do sistema de medição.

A avaliação de sistemas de medição pretende validar os mesmos como capazes de realizar a medição para a qual são solicitados. Esta avaliação é feita através da determinação da percentagem de variação que advém do instrumento de medição, uma vez que monitorizar processos com sistemas de medição não adequados invalida qualquer resultado, uma vez que não é possível afirmar se a variação do processo é intrínseca ou causada pelo sistema de medição. Deste modo é necessário executar um conjunto de etapas (figura 2.5) para validar os processos de medição.

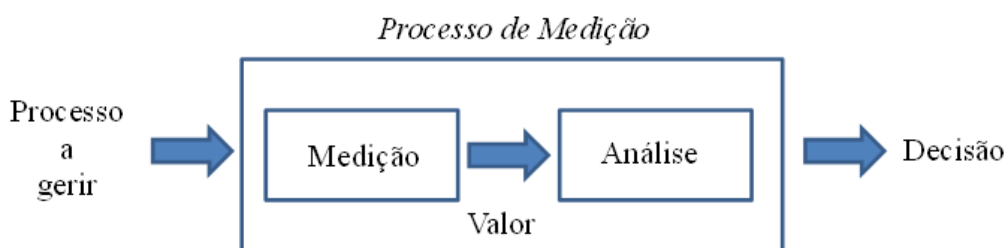


Figura 2. 5 - Etapas do processo de medição (Adaptado de Down, et al. pág. 13)

Quando se aborda a temática de avaliação de sistemas de medição é necessário definir vários termos, uma vez que se pode tornar algo confuso a discussão do tema sem o fazer.

Define-se como Medição o processo de obtenção experimental de um ou mais valores que podem ser, razoavelmente, atribuídos a uma grandeza (VIM 2012, 2.1).

Entende-se por Instrumento de Medição, o dispositivo utilizado para realizar medições, individualmente ou associado a um ou mais dispositivos suplementares (VIM 2012, 3.1).

Sistema de Medição consiste no conjunto dum ou mais instrumentos de medição e frequentemente outros dispositivos, compreendendo, se necessário, reagentes e fontes de alimentação, montado e adaptado para fornecer informações destinadas à obtenção dos valores medidos, dentro de intervalos especificados para grandezas de naturezas especificadas (VIM 2012, 3.2).

2.3.1. Repetibilidade e Reprodutibilidade

Uma das fontes de variação que influencia as características da qualidade é o sistema de medição, sendo necessário verificar a adequabilidade deste para implementar medidas de melhoria no processo.

A utilização de dados estatísticos é bastante utilizada quando se pretende fazer ajustes no processo. Para tal, é necessário garantir a validade do sistema de medição para que este não anule os resultados. Esta garantia é dada pela elaboração de estudos de Repetibilidade e Reprodutibilidade, características que permitem estudar a dispersão de um determinado sistema de medição (Down, *et al*, 2010) e ainda pelas características de Exatidão, Linearidade e Estabilidade.

Exatidão é o grau de concordância entre um valor medido e um valor verdadeiro numa mensuranda (VIM 2012, 2.13 (3.5)).

Linearidade corresponde à variação do erro de exatidão ao longo das suas amplitudes (Matos, 2012).

Estabilidade consiste na diferença entre a média de dois ou mais grupos de medições obtidas em momentos distintos, com o mesmo equipamento e sobre as mesmas peças (Matos, 2012).

Para que fique explícito em que consiste um estudo de Repetibilidade e Reprodutibilidade é necessário apresentar um conjunto de definições que tem como objetivo ajudar a compreensão da temática.

A Repetibilidade é a característica que nos permite observar a variação das medições com um instrumento de medição, quando utilizado por um operador para medir a mesma característica do mesmo objeto várias vezes, sob as mesmas condições de repetibilidade.

Condição de Repetibilidade é a condição de medição num conjunto de condições, as quais incluem o mesmo procedimento de medição, os mesmos operadores, o mesmo sistema de medição, as mesmas condições de operação e o mesmo local, assim como medições repetidas no mesmo objeto ou em objetos similares durante um curto período de tempo (VIM 2012, 2.20).

Repetibilidade de medição é a fidelidade ou precisão de medição sob um conjunto de condições de repetibilidade (VIM 2012, 2.21).

Condição de Reprodutibilidade é a condição de medição num conjunto de condições, as quais incluem diferentes locais, diferentes operadores, diferentes sistemas de medição e medições repetidas no mesmo objeto ou em objetos similares (VIM 2012, 2.24).

Reprodutibilidade de medição é a fidelidade ou precisão de medição conforme um conjunto de condições de reprodutibilidade (VIM 2012, 2.25).

A estimação dos parâmetros para o cálculo da repetibilidade é feita através das seguintes expressões:

$$\hat{\sigma}_{Repet.} = \frac{\bar{R}}{d_2^*} \quad (2.1)$$

$$Repetibilidade = 6\hat{\sigma}_{Repet} \quad (2.2)$$

$$Repetibilidade = 5,15\hat{\sigma}_{Reprod} \quad (2.3)$$

Onde \bar{R} é o valor médio de todas as amplitudes e o valor de d_2^* é retirado de uma tabela constantes de acordo com o número de medições por unidade (r) e g (n° de unidades \times n° de operadores). Quando este valor é superior a 15, o valor de d_2^* é dado apenas em função do número de medições, de acordo com os valores da tabela I.1.

Quando a distribuição não é Normal, recomenda-se o uso do intervalo $5,15\hat{\sigma}_{Repet}$, para existir coerência relativamente ao Índice de Capacidade (Pereira & Requeijo, 2012).

Por outro lado a Reprodutibilidade fornece informação relativa à variação da média das medições feitas por diferentes operadores, utilizando o mesmo instrumento de medição à mesma característica de um objeto.

O seus parâmetros são estimados através de:

$$R_{\bar{X}} = \bar{X}_{m\acute{a}x} - \bar{X}_{m\acute{i}n} \quad (1.4)$$

$$\hat{\sigma}_{Reprod.} = \frac{R_{\bar{X}}}{d_2^*} \quad (2.5)$$

$$Reprodutibilidade = 6\hat{\sigma}_{Reprod} \quad (2.6)$$

$$Reprodutibilidade = 5,15\hat{\sigma}_{Reprod} \quad (2.7)$$

Para o cálculo das amplitudes, considera-se $\bar{X}_{m\acute{a}x}$ o maior valor médio entre os operadores e $\bar{X}_{m\acute{i}n}$ o menor valor, também entre operadores.

Uma vez que o valor da reprodutibilidade pode ser influenciado pela repetibilidade é necessário fazer o seu ajuste, com recurso a seguinte expressão:

$$\hat{\sigma}_{Reprod.ajustada} = \sqrt{\frac{\hat{\sigma}_{Reprod.}^2 - \hat{\sigma}_{Repet.}^2}{mr}} \quad (2.8)$$

Onde m corresponde ao número de amostras e r ao número de medições. O novo valor de reprodutibilidade é dado em função da distribuição dos dados.

A variação peça a peça ou variação entre unidades (VP), pode também ser calculada. As expressões para o seu cálculo são as seguintes:

$$R_p = \bar{X}_{m\acute{a}x} - \bar{X}_{m\acute{i}n} \quad (2.9)$$

$$\hat{\sigma}_p = \frac{R_p}{d_2^*} \quad (2.10)$$

Os valores de d_2^* podem ser consultados na tabela I.3.

$$\hat{\sigma}_{Total}^2 = \hat{\sigma}_p^2 + \hat{\sigma}_{R\&R}^2 \quad (2.11)$$

Existe ainda outro critério para aceitação do sistema de medição que é o Número de Características Distintas (NC), ou seja, numa amostra quantas características o sistema de medição deteta. O cálculo de NC é feito com recurso à expressão 2.12.

$$NC = \frac{VP}{R\&R} \times d_2^* \quad (2.12)$$

Sendo VP a variação peça a peça, dado pela expressão:

$$VP = 5,15\hat{\sigma}_p \quad (2.13)$$

Caso NC tome um valor inferior a 2, o sistema de medição é inadequado. Se este valor for superior a 5, o sistema é recomendado.

O Estudo R&R deve ser feito de acordo com o seguinte procedimento (Pereira & Requeijo, 2012):

1. Recolha aleatória de m unidades do produto: é correto recolher 10 ou mais unidades se o estudo é feito apenas com um operador, devendo este efetuar pelo menos 5 medições.
2. Numeração das m unidades.
3. Medição da característica X , de forma aleatória, em cada uma das m unidades.
4. Repetição do paço 3 até se obter o número desejado de medições para cada unidade (r).

O estudo R&R permitirá determinar a variação das medidas realizadas por um único operador ao utilizar o mesmo equipamento, ou seja, a variabilidade introduzida no processo pelo operador e a variação das médias obtidas por vários operadores utilizando o mesmo equipamento de medição, ou seja, a variabilidade introduzida no processo pelo instrumento de medição e consequente validação do mesmo para a situação que é solicitado.

2.4. Cartas de Controle – Abordagem Tradicional

Atualmente a competitividade existente no mercado leva à procura constante de qualidade no produto por parte do cliente. Deste modo as empresas devem possuir um processo produtivo, estável e com a menor variabilidade possível, com o objetivo de garantir a satisfação do cliente. Contudo, por melhor concebido que esteja o processo produtivo, este estará sempre sujeito a uma variabilidade natural que, quando conjugada com fatores externos, faz com que o processo fique fora de controlo (*Montgomery, 2009*). Assim sendo, é imperativo implementar técnicas que permitam controlar o processo, nomeadamente Controlo Estatístico do Processo (*SPC*) que, através de cartas de controlo, permite monitorizar a sua estabilidade, reduzindo a variabilidade, se necessário, e determinar se este é capaz de produzir de acordo com as especificações (*Montgomery, 2009*).

2.4.1. Cartas de Controle – Princípios

Define-se carta de controlo como a representação gráfica da evolução de determinada estatística relativa a uma característica da qualidade medida num intervalo de tempo (*Pereira & Requeijo, 2012*). No gráfico consta informação do valor médio do processo, definido por uma Linha Central e outras duas linhas de referência, Limite Superior de Controlo (*LSC*) e Limite Inferior de Controlo (*LIC*). Para se assumir que um processo está sob controlo estatístico, todas as amostras devem estar compreendidas na zona definida pelos limites (*Pereira & Requeijo, 2012*). Caso um ou mais pontos se encontrem fora do intervalo diz-se que o processo está fora de controlo. Porém, existem exceções mesmo quando o processo se encontra controlado. Estas situações são identificadas quando os pontos apresentam um comportamento sistemático e não aleatório. Ao ser detetada uma causa especial deve averiguar-se a razão da sua existência e aplicar ações corretivas.

A presença desses comportamentos nos pontos está associada a variações no processo. Estas variações podem ser originadas por causas comuns ou especiais (*Pereira & Requeijo, 2012*). No primeiro grupo estão as causas não controláveis e inerentes ao processo. As causas especiais correspondem a um desvio do comportamento normal do processo. Enquanto as causas comuns devem ser reduzidas as causas especiais devem ser eliminadas.

A construção de uma carta de controlo trata-se de um processo iterativo, independente da característica em estudo, estando dividido em duas fases distintas (*Pereira & Requeijo, 2012*). A Fase I consiste na recolha e análise dos dados com o objetivo de fazer uma análise retrospectiva do processo e determinar se este se encontra estável aquando da recolha dos dados. Nesta fase os parâmetros do processo são desconhecidos. Porém, caso o processo se encontre sob controlo estatístico é possível estimar-se a média e variância do mesmo, que por sua vez permitem determinar a capacidade do processo, verificando se o mesmo produz de acordo com a especificação. A Fase II inicia-se quando existe confirmação de que o processo se encontra estatisticamente controlado e corresponde à fase de monitorização do processo.

Um dos passos mais importantes para a implementação do controlo estatístico é a recolha de dados (*Montgomery, 2009*). Se esta não for executada de maneira correta pode inviabilizar todo

o estudo, pois podem-se identificar situações que não correspondem à realidade do processo. Para que tal não aconteça, é necessário que as unidades de uma amostra obedeçam a certos requisitos, sendo importante definir a dimensão da amostra e frequência de recolha.

A utilização de cartas de controlo permite, então, manter o processo sob controlo estatístico que se irá refletir numa melhoria de produtividade, consequência da redução de peças rejeitadas e a necessidade da peça ser retrabalhada, impulsionando a filosofia “fazer bem à primeira”. A capacidade de distinção entre ruído e variações anormais no processo permite reduzir a necessidade de ajuste dos parâmetros, que podem influenciar o processo. Além disso a capacidade de detetar padrões nos dados, indicadores da instabilidade do processo, permite uma atuação antecipada. Em conjunto, toda esta informação irá contribuir para uma redução dos custos do processo (Montgomery, 2009).

2.4.2. *Cartas de Controlo Tradicionais*

Independentemente da característica da qualidade que se pretende controlar e a área de aplicação, as cartas de controlo apresentam-se como uma ferramenta bastante viável. As cartas de controlo tradicionais podem dividir-se de acordo com o tipo da característica que se pretende monitorizar, variáveis ou atributos (Pereira & Requeijo, 2012). As cartas de controlo de variáveis utilizam-se quando se pretende controlar uma característica passível de ser expressa numa escala contínua, como uma dimensão. Já as cartas de atributos são utilizadas quando a característica assume valores discretos, como por exemplo o número de defeitos numa peça.

2.4.2.1. *Cartas de Controlo de Variáveis*

De acordo com a característica e dados a trabalhar, podem ser aplicadas diferentes cartas de controlo. Seguidamente serão identificados quais os tipos de carta para variáveis e também a sequência para a sua construção.

- **Cartas da Média e Amplitude ($\bar{X} - R$)**

A construção destas cartas segue a lógica descrita no ponto 2.4.1. Dá-se início à Fase I quando se possui pelo menos 100 observações individuais ou 25 amostras com dimensão 5 (Pereira & Requeijo, 2012). A média, \bar{X} , e amplitude, R , são determinados através das equações 2.14 e 2.15.

$$\bar{X}_i = \frac{\sum_{j=1}^n x_{ij}}{n} \quad (2.14)$$

$$R_i = X_{m\acute{a}x} - X_{m\grave{i}n} \quad (3.15)$$

O próximo passo consiste no cálculo das linhas centrais da média e amplitude:

$$LC_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} = \frac{\sum_{i=1}^m \bar{X}_i}{m} \quad (2.16)$$

$$LC_R = \bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^m R_i}{m} \quad (2.17)$$

Quando os parâmetros do processo não são conhecidos é necessário estimá-los através de:

$$\sigma = \frac{\bar{R}}{d_2} \quad (2.18)$$

Os limites de controlo da carta da média e da amplitude são calculados com recurso às seguintes expressões:

$$LSC_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} + A_2 \bar{R} \quad (2.19)$$

$$LIC_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} - A_2 \bar{R} \quad (2.20)$$

$$LSC_R = D_4 \bar{R} \quad (2.21)$$

$$LIC_R = D_3 \bar{R} \quad (2.22)$$

Os valores de d_2, A_2, D_3 e D_4 são dependentes da dimensão da amostra, podendo ser consultados na tabela I.4 no Anexo I.

Se existir alguma observação na carta da média ou na amplitude que se encontre fora dos limites de controlo, esse ponto é eliminado e os limites recalculados. Este processo é repetido até que todos os pontos se encontrarem dentro dos limites de controlo.

Este tipo de carta, por vezes exhibe certos comportamentos indicadores de uma alteração no processo (Pereira & Requeijo, 2012). A presença de padrões cíclicos pode advir de uma alteração sistemática, como temperatura ou alguma variável no processo de produção.

- **Cartas da Média e Desvio Padrão ($\bar{X} - S$)**

Sendo as cartas $\bar{X} - R$ bastante utilizadas, por vezes é necessário estimar o desvio padrão do processo diretamente, em vez de recorrer à amplitude (Montgomery, 2009). Isto leva então à utilização das cartas $\bar{X} - S$, onde S corresponde ao desvio padrão da amostra. O procedimento de cálculo é em tudo idêntico às cartas da média e amplitude, contudo a estatística calculada é o desvio padrão, em vez da amplitude.

Em primeiro lugar calculam-se a média global ($\bar{\bar{X}}$) e o desvio padrão médio (\bar{S}) através das equações 2.23 e 2.24, respetivamente:

$$LC_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} = \frac{\sum_{i=1}^m \bar{X}_i}{m} \quad (2.23)$$

$$LC_R = \bar{S} = \frac{\sum_{i=1}^m S_i}{m} \quad (2.24)$$

O desvio padrão da amostra, S_i , é dado pela expressão:

$$S_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (X_j - \bar{X}_i)^2}{n-1}} \quad (2.25)$$

Quando os parâmetros do processo são desconhecidos, é necessário recorrer ao estimador do desvio padrão do processo (Pereira & Requeijo, 2012), dado por:

$$\sigma = \frac{\bar{S}}{c_4} \quad (2.26)$$

Os limites da carta da média são calculados através das expressões:

$$LSC_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} + A_3 \bar{S} \quad (2.27)$$

$$LIC_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} - A_3 \bar{S} \quad (2.28)$$

Já os limites da carta do desvio padrão são calculados segundo as expressões:

$$LSC_S = B_4 \bar{S} \quad (2.29)$$

$$LIC_S = B_3 \bar{S} \quad (2.30)$$

Os valores de d_2 , A_3 , B_3 e B_4 são dependentes da dimensão da amostra, podendo ser consultados na tabela I.4.

- **Cartas de Observações Individuais e Amplitudes Móveis ($X - MR$)**

Existem ainda casos onde apenas se tem o valor de uma única observação individual ($n=1$), onde se utiliza a carta de controlo de observações individuais e amplitudes móveis (MR, *Moving Range*). Apenas se recorre a este tipo de carta quando é caro realizar medições, os testes são destrutivos ou quando é feito um controlo da produção a 100% (Pereira & Requeijo, 2012). Neste caso uma vez que não é possível calcular uma estatística relativa à dispersão do processo, são utilizadas observações consecutivas, com as quais se calcula a amplitude móvel. Contudo, o raciocínio de cálculo é idêntico às cartas anteriores.

As linhas centrais são dadas pelas expressões, 2.31 e 2.32, para a média e amplitude móvel, respetivamente:

$$LC_X = \bar{X} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m X_i \quad (2.31)$$

$$LC_{MR} = \overline{MR} = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m MR_i \quad (2.32)$$

Neste tipo de carta o estimador do desvio padrão do processo, quando não são conhecidos os parâmetros, é:

$$\sigma = \frac{\overline{MR}}{d_2} \quad (2.33)$$

Por sua vez, os limites quer da carta da média quer da carta da amplitude móvel, são dados por:

$$LSC_X = \bar{X} + \frac{3\overline{MR}}{d_2} \quad (2.34)$$

$$LIC_X = \bar{X} - \frac{3\overline{MR}}{d_2} \quad (2.35)$$

$$LSC_{MR} = D_4 \overline{MR} \quad (2.36)$$

$$LIC_{MR} = D_3 \overline{MR} \quad (2.37)$$

Para este tipo de cartas, os valores de d_2 , D_3 e D_4 correspondem ao número de observações utilizadas para o cálculo da amplitude móvel. Estes valores podem ser consultados na tabela I.4, Anexo I.

2.4.2.2. Regras de deteção de Causas Especiais

Como vem sendo referido ao longo deste documento, as cartas de controlo podem apresentar padrões que indicam que algo errado se está a passar com o processo, sendo por isso necessário atuar.

A Norma ISO 7870-1/3:2013 apresenta 8 regras que permitem identificar comportamentos anómalos (Pereira & Requeijo, 2012). Esta Norma assume que os limites distam $6\sigma_\omega$, estando esta área dividida em 6 zonas com a mesma dimensão e simétricas relativamente à linha central. A figura 2.6 ilustra este pressuposto.

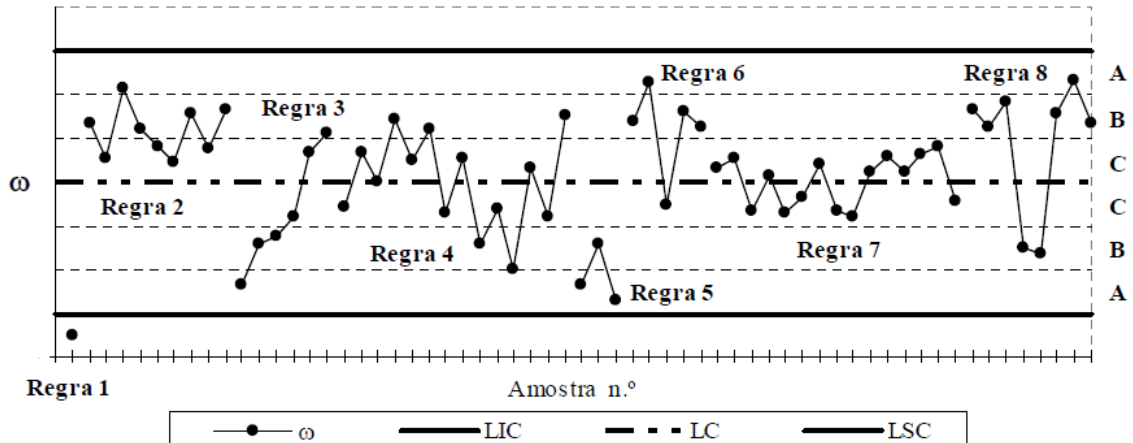


Figura 2. 6 - Regras para a deteção de causas especiais (Adaptado de Pereira e Requeijo, 2012, pág. 360)

As regras são:

- Um qualquer ponto fora dos limites de ação
- Nove pontos consecutivos na zona C ou para além da zona C do mesmo lado da linha central.
- Seis pontos consecutivos no sentido ascendente ou descendente
- Catorze pontos consecutivos crescendo e decrescendo alternadamente
- Dois de três pontos consecutivos na zona A, ou além desta zona, do mesmo lado da linha central
- Quatro de cinco pontos consecutivos na zona B ou A, ou além destas zonas, do mesmo lado da linha central.
- Quinze pontos consecutivos na zona C acima ou abaixo da linha central.
- Oito pontos consecutivos de ambos os lados da linha central, sem nenhum na zona C

2.4.2.3. Capacidade do Processo

A análise da capacidade do processo é ponto vital num programa de melhoria contínua. A capacidade do processo indica de que modo este se comporta de acordo com a sua tolerância, auxiliando os responsáveis pelo produto, na tomada de decisões de melhoria do processo.

Este conceito permite verificar a uniformidade de um processo, isto é, se este é ou não capaz de produzir de acordo com a especificação técnica (Pereira & Requeijo, 2012). Para tal é feita a comparação da amplitude da especificação com a amplitude do processo (6σ quando o processo é Normalmente distribuído).

O estudo da capacidade é uma ferramenta chave para a melhoria da qualidade do processo, pois permite determinar se o processo é ou não capaz de produzir de acordo com as suas especificações técnicas, auxiliar na escolha de parâmetros para um novo processo e definição de intervalos de confiança.

- **Índices de Capacidade**

Os índices de capacidade avaliam um processo relativamente às suas especificações (Pereira & Requeijo, 2012). Estes permitem concluir se determinado processo está centrado ou mais próximo de um dos limites.

O primeiro índice referido como índice de capacidade potencial é definido pela seguinte expressão:

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6\sigma} \quad (2.38)$$

A equação 2.38 apenas se aplica quando o processo apresenta uma especificação bilateral (Pereira & Requeijo, 2012), devendo o processo apresentar um valor de $C_p \geq 1,33$ para que seja considerado capaz de produzir de acordo com a sua especificação.

É necessário referir que mesmo apresentando um valor de $C_p \geq 1,33$, o processo pode produzir peças defeituosas, uma vez que a média do processo pode não corresponder ao valor nominal (Pereira & Requeijo, 2012).

Por observação da expressão 2.38 verifica-se que este índice não considera a média do processo, ou seja, não é considerado qualquer desvio da média do processo em relação ao valor nominal da especificação.

Uma vez que o índice de capacidade potencial não considera a localização do valor médio do processo, foi desenvolvido o índice C_{pk} , que tem em consideração o fator média (Pereira & Requeijo, 2012).

No que diz respeito ao C_{pk} , considera não só a média do processo mas também a sua dispersão, estando definido como:

$$C_{pk} = \min\left((C_{pk})_I, (C_{pk})_S\right) \quad (4.39)$$

onde:

$$(C_{pk})_I = \frac{\mu - LIE}{3\sigma} \quad (2.40)$$

$$(C_{pk})_S = \frac{LSE - \mu}{3\sigma} \quad (2.41)$$

A garantia de que o processo é capaz de produzir de acordo com a sua especificação, é dada por um valor de $C_{pk} \geq 1,33$, estando centrado quando $(C_{pk})_I = (C_{pk})_S$.

Se o processo for definido apenas por uma especificação unilateral, o índice de capacidade é dado pela equação 2.40 se a característica for do tipo quanto-maior-melhor, sendo imperativo que o seu valor seja superior ao LIE. Quando se trata de uma característica quanto-menor-melhor, o índice é dado pela equação 2.41 devendo estar abaixo do LSE (Pereira & Requeijo, 2012).

Neste caso, o valor mínimo aceitável para se admitir que o processo tem capacidade, é $C_{pk} \geq 1,25$.

Os índices C_{pm} e C_{pmk} consideram a distância da média do processo em relação ao seu valor nominal, T . O índice C_{pm} é calculado pela seguinte expressão:

$$C_{pm} = \frac{LSE - LIE}{6\sqrt{\sigma^2 + (\mu - T)^2}} \quad (2.42)$$

Do mesmo modo que C_{pk} está para C_p , C_{pmk} está para C_{pm} , considerando também as mesmas variáveis que C_{pm} , sendo o índice definido por:

$$C_{pmk} = \frac{\min(LSE - \mu, \mu - LIE)}{3\sqrt{\sigma^2 + (\mu - T)^2}} \quad (2.43)$$

Todas as expressões referidas anteriormente, apenas se aplicam quando os dados são Normais. Para dados não Normais recomenda-se a consulta de Pereira & Requeijo (2012).

2.4.3. Cartas de Controlo Especiais

As cartas de *Shewhart* abordadas anteriormente são bastante úteis na Fase I da implementação do controlo estatístico. Contudo uma das desvantagens destas cartas é considerar apenas a informação do último ponto e não da sequência como um todo (Pereira & Requeijo, 2012). Este motivo torna-as pouco sensíveis a pequenas variações na média do processo (cerca de 0,5 σ) tornando-as pouco úteis na Fase II, onde o processo tende a operar sob controlo.

Como alternativa foram desenvolvidas as cartas das Somas Acumuladas (*CUSUM*) e da Média Móvel Exponencialmente Amortecida (*EWMA*), que apresentam uma maior sensibilidade na deteção de pequenas alterações nos parâmetros do processo (Montgomery, 2009).

2.4.3.1. Carta CUSUM

Esta carta foi proposta por Page (1954) existindo duas maneiras de a abordar (Pereira & Requeijo, 2012). A abordagem tradicional consiste na representação gráfica dos pares ordenados (i, S_i) , onde S é soma acumulada dos valores da estatística \bar{X} ou X . (Este método é também denominado por *V-Mask*). A abordagem descrita seguidamente corresponde à versão *CUSUM*, onde são feitas duas semi-cartas.

As duas semi-cartas visam detetar aumentos e/ou decréscimos na média do processo produtivo, sendo designadas por C_t e T_t , respetivamente. Esta carta é suportada pelos parâmetros k , h , e *ARL*, obtidos através da amostra. (Pereira & Requeijo, 2012)

O *ARL* ou *Average Run Length* corresponde ao número médio de pontos representados numa carta de controlo até aparecer um ponto fora dos limites de controlo.

O *ARL* deverá apresentar o maior valor possível quando o processo está sob controlo estatístico ($ARL_{Em\ Controlo}$) e o menor possível quando o processo está fora de controlo ($ARL_{Fora\ de\ Controlo}$) (Pereira & Requeijo, 2012).

Como referido anteriormente, a carta *CUSUM* utiliza duas variáveis. No instante t , as expressões para o cálculo das variáveis são:

$$T_t = \min(0, T_{t-1} + (Z_t + k)) \quad (2.44)$$

$$C_t = \text{máx} (0, C_{t-1} + (Z_t - k)) \quad (5.45)$$

Onde

$$T_0 = 0$$

$$C_0 = 0$$

$$Z_t = \frac{\bar{X}_t - \mu}{\sigma_{\bar{X}}} = \frac{\bar{X}_t - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n}}} \quad (2.46)$$

$$\Delta = \delta \sigma_{\bar{X}} \quad (2.47)$$

$$\delta = \frac{\Delta}{\sigma_{\bar{X}}} = \frac{\Delta \sqrt{n}}{\sigma} \quad (2.48)$$

$$k = \frac{\delta}{2} \quad (2.49)$$

Enquanto a semi-carta T , deteta um decréscimo no valor da média do processo a semi-carta C deteta um aumento (Pereira & Requeijo, 2012). O processo encontra-se fora de controlo estatístico quando:

$$T_t < -h$$

$$C_t > h$$

Onde h é o limite da carta de controlo, obtido através do valor de k com recurso aos ábacos elaborados por *Gan* (Pereira & Requeijo, 2012) para a carta de controlo *CUSUM*.

Caso exista uma alteração no processo, pode ser relevante determinar o novo valor da média, levando à aplicação de ações de melhoria no processo. O novo valor da média é determinado através de:

$$\mu_{novo} = \begin{cases} \mu + \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \left(k + \frac{C_t}{N_C} \right), & C_t > h \\ \mu - \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \left(k - \frac{T_t}{N_T} \right), & T_t < h \end{cases} \quad (2.50)$$

A carta *CUSUM* pode ser adaptada de acordo com o tipo de processo e a variável que se quer monitorizar.

2.4.3.2. Carta EWMA

Analogamente à carta *CUSUM*, esta carta também é sensível na detecção de pequenas alterações nos parâmetros do processo, nomeadamente na média (Montgomery, 2009). É necessário assumir que os valores de X_t são independentes e identicamente distribuídos, seguindo uma distribuição $N(\mu, \sigma^2)$ no caso de se tratar de observações individuais (Pereira & Requeijo, 2012).

A variável exponencialmente amortecida é definida por:

$$EWMA_t = E_t = (1 - \lambda)E_{t-1} + \lambda Y_t, \quad t = 1, 2, \dots \quad (2.51)$$

Sendo:

$$E_0 = \mu$$

Consoante a dimensão da amostra, Y pode tomar o valor de X_t caso se tratem de observações individuais ou \bar{X}_t se forem utilizadas amostras. (Pereira & Requeijo, 2012)

O processo encontra-se fora de controlo estatístico, quando um valor de E_t se encontra fora dos limites de controlo para a carta *EWMA*, definidos por:

$$LSC_E = E_0 + K\sigma_E \quad (2.52)$$

$$LSC_E = E_0 \quad (2.53)$$

$$LSC_E = E_0 + K\sigma_E \quad (2.54)$$

A variância da variável exponencialmente amortecida, E , é dada por:

$$\sigma_E^2 = \sigma_Y^2 \left(\frac{\lambda}{2 - \lambda} \right) (1 - (1 - \lambda)^{2t}) \quad (2.55)$$

Novamente, a utilização de amostras ou observações individuais irá influenciar os parâmetros da variável Y . A tabela 2.1 define os parâmetros a utilizar.

Tabela 2. 1 - Valores de μ_Y e σ_Y^2 para amostras e observações individuais (Fonte: Pereira & Requeijo, 2012, pág. 473)

	Amostras	Observações Individuais
μ_Y	$\mu_{\bar{X}} = \mu$	$\mu_X = \mu$
σ_Y^2	$\sigma_{\bar{X}}^2 = \sigma^2/n$	$\sigma_X^2 = \sigma^2$

Do mesmo modo que é necessário seleccionar os parâmetro h e k para as cartas *CUSUM*. Para as cartas *EWMA* é necessário escolher os parâmetros λ e K . Estes parâmetros são estimados com

recurso aos ábacos desenvolvidos por Crowder (Pereira & Requeijo, 2012). Estes ábacos podem ser consultados no Anexo I, figuras I.1 a I.4.

Se existir alguma alteração no valor da média do processo, identificado pela presença de um ou mais pontos fora dos limites de controlo, pode-se estimar o seu novo valor calculando a média dos valores a partir do qual se deteta a alteração (Pereira & Requeijo, 2012).

Este tipo de carta pode ser aplicado noutras situações, nomeadamente para detetar alterações no início do processo ou quando existe um número restrito de dados (Pereira & Requeijo, 2012).

- **Carta EWMA-FIR**

A carta EWMA-FIR (*Fast Initial Response*) é uma variante da carta EWMA cuja sensibilidade é superior no início da análise do processo (Pereira & Requeijo, 2012).

Esta carta é composta por duas semi-cartas: uma para a deteção de decréscimos (E^-) e outra para a deteção de aumentos (E^+) na média do processo. O cálculo da estatística para deteção de decréscimos e aumentos é feito através das seguintes equações, respetivamente:

$$E_t^- = (1 - \lambda)E_{t-1}^- + \lambda Y_t \quad (2.56)$$

$$E_t^+ = (1 - \lambda)E_{t-1}^+ + \lambda Y_t \quad (2.57)$$

Os valores de E_0^- e E_0^+ são dados, respetivamente por:

$$E_0^- = LC_E - \frac{LCE - LIC_E}{2} \quad (2.58)$$

$$E_0^+ = LC_E + \frac{LSC_E - LC_E}{2} \quad (2.59)$$

Os limites de controlo para a carta EWMA-FIR são idênticos aos da carta EWMA dados pelas equações 2.52, 2.53 e 2.54. O variância da variável, E, é dada por:

$$\sigma_E^2 = \sigma_Y^2 \left(\frac{\lambda}{2 - \lambda} \right) \quad (2.60)$$

A seleção dos parâmetros λ e K é idêntica à da carta EWMA.

2.4.4. Desenho de Experiências

Hoje em dia o nível de exigência dos consumidores é bastante elevado. Este nível de exigência faz com que as empresas se tornem mais competitivas, utilizando equipamentos mais complexos e materiais com maiores áreas de aplicação. Como tal é necessário otimizar o processo para fazer face a estas necessidades. O desenho de experiências é uma das técnicas aplicáveis ao

planeamento, controlo e melhoria contínua que permite detetar quais os fatores que afetam as características da qualidade e conseqüentemente determinar quais os melhores níveis para esses fatores (Pereira & Requeijo, 2012).

De modo a facilitar a compreensão deste capítulo é necessário explicar vários termos utilizados, quando se fala de Desenho de Experiências.

Uma experiência consiste num ensaio onde são feitas alterações a determinados parâmetros para verificar qual o seu impacto numa ou várias características da qualidade (Pereira & Requeijo, 2012). O componente/entidade em que é feita a medição da característica da qualidade denomina-se unidade experimental (Oehlert, 2000)

Os fatores distinguem-se em controláveis ou não controláveis. Os fatores controláveis são aqueles que são alterados propositadamente com o intuito de verificar qual o seu impacto numa ou mais características. Fatores não controláveis são fatores externos como temperatura ou humidade e são designados por Ruído (Pereira & Requeijo, 2012).

O nível do fator corresponde ao diferente valor que lhe é atribuído.

A alteração causada em determinada característica, provocada pela mudança de nível do fator, designa-se por Efeito (Pereira & Requeijo, 2012). Por sua vez, a característica em estudo designa-se por Resposta, sendo esta a característica a otimizar (Oehlert, 2000).

A Replicação é outro termo importante quando se fala de desenho de experiências. Entende-se por Replicação a repetição da mesma experiência sob as mesmas condições. Isto significa que os resultados obtidos correspondem aos valores obtidos por replicação da experiência e não aos valores da resposta medidos na mesma experiência (Pereira & Requeijo, 2012).

Para que o Desenho de Experiências produza resultados que permitam melhorar o processo é necessário ter em consideração uma sequência lógica no seu planeamento. O esquema apresentado na figura 2.7 resume de forma concisa as várias etapas do planeamento de um desenho de experiências.

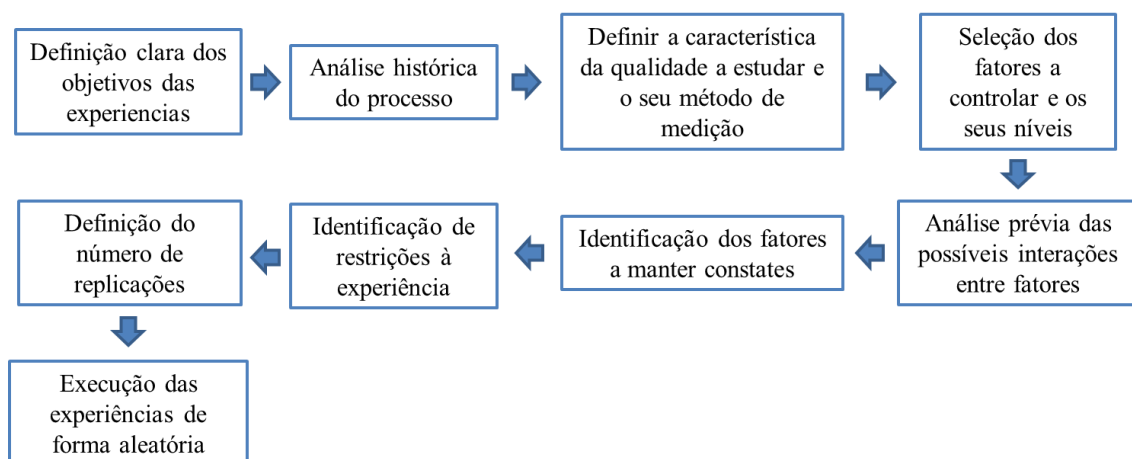


Figura 2.7 - Esquema de abordagem para aplicação de DOE (Adaptado de Pereira & Requeijo, 2012, pág. 153)

A realização das experiências de modo aleatório previne a influência dos resultados por distúrbios que possam ou não ocorrer. Mesmo sabendo, *a priori*, que os resultados não são

influenciados pela realização das experiências de forma sequencial, é aconselhável recorrer à aleatoriedade das experiências (Oehlert, 2000).

O desenho de experiências consiste no estudo do impacto de vários *inputs*, numéricos ou categóricos, associados a fatores externos (ruído) que não sendo controláveis constituem fontes de variação que influenciam determinada característica (resposta) (Anderson & Whitcomb, 2007). A figura 2.8 representa o sistema de variáveis de um desenho de experiências, onde os fatores controláveis e o ruído consistem em *inputs* e a resposta corresponde ao *output*.

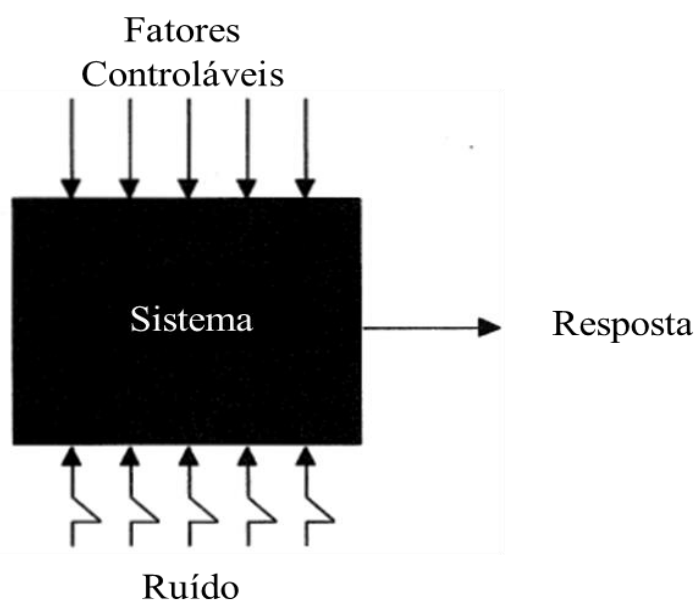


Figura 2. 8 – Sistema de variáveis (Adaptado de Anderson & Whitcomb, 2007, pág. 3)

2.4.4.1. Análise de Variância

O processo de injeção de plásticos envolve sempre o molde que confere a forma desejada ao material. É comum os moldes possuírem mais do que uma cavidade para aumentar a produção com o mesmo tempo de ciclo. Por vezes, e por questões de *design* do molde, as peças produzidas apresentam diferenças de acordo com a cavidade em que são produzidas. Estas diferenças podem ou não ser significativas. Caso se verifique o segundo caso é necessário estudar o processo em separado. A verificação da existência de diferenças é feita através da análise de variâncias.

A análise de variância (*ANOVA – Analysis of Variance*) é uma técnica estatística que permite estudar a relação entre a resposta de uma ou mais variáveis independentes de determinado modelo (Seltman, 2014).

Assim sendo, o objetivo da análise de variância, é verificar se as médias das populações em estudo apresentam diferenças ou não, podendo ser comparadas várias populações ao mesmo tempo. Esta análise é feita com base no Teste de Hipóteses, sendo a hipótese nula (H_0) e a hipótese alternativa (H_1) dadas normalmente por:

H_0 : não existem diferenças entre as médias

H_1 : existe pelo menos um par de médias diferente

Deste modo pode-se constatar se as diferenças existentes são reais, isto é, se as populações apresentam realmente diferenças entre si, ou causais, caso as diferenças sejam provenientes da variabilidade inerente ao processo.

Consoante os dados com que se está a trabalhar, existem vários tipos de ANOVA que podem ser aplicados (Seltman, 2014).

- **One-way ANOVA**

Quando se estuda apenas um fator é aplicável a *One-Way ANOVA* que compara a igualdade de um par de médias. Para este tipo de análise não é necessário que as amostras tenham a mesma dimensão. A aplicação deste tipo de análise de variância para dois níveis é equivalente à aplicação de um teste *t-Student*.

A aplicação deste teste assenta nos pressupostos da Normalidade, Independência e Homogeneidade dos resíduos (Pereira & Requeijo, 2012).

A tabela 2.2. corresponde à representação de uma *One-way ANOVA*.

Tabela 2. 2 - ANOVA (Fonte: Pereira & Requeijo, 2012, pág. 160)

Fonte de Variação	SS	g.l.	MS	F ₀
Entre Tratamentos	SS _B	a - 1	$\frac{SS_B}{(a - 1)}$	$\frac{MS_B}{MS_W}$
Erro	SS _W	N - a	$\frac{SS_W}{(N - a)}$	
Total	SS _T	N - 1		

Sendo SS_T a soma dos quadrados dos desvios de todas as observações relativamente à média global, SS_B é a variação entre os níveis e a o número de níveis a que se está a estudar o fator e SS_W corresponde à variação dentro dos níveis. Na Tabela 2.2 MS_B e MS_W, designados por Desvios Quadráticos Médios, são o quociente entre a sua variação e o respetivo número de graus de liberdade.

O cálculo das variações é feito com recurso às seguintes expressões:

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 - \frac{(Y_{..})^2}{N} \quad (2.61)$$

$$SS_B = \sum_{i=1}^a \frac{Y_{i.}^2}{n} - \frac{(Y_{..})^2}{N} \quad (2.62)$$

$$SS_W = SS_{Erro} = SS_T - SS_B \quad (2.63)$$

Onde y_{ij} corresponde ao valor da respostas, sendo $Y_{i.}$ a soma das observações relativas ao nível i e $Y_{..}$ corresponde à soma das $N = a \times n$ observações.

A interpretação do valor dos resultados é feita com base no valor da estatística F de Fisher (F_0) comparando-o com o valor tabelado de $F_{\alpha; \nu_n; \nu_d}$, onde α corresponde ao nível de significância, e ν_n e ν_d aos graus de liberdade no numerador e denominador, respectivamente. A hipótese nula é rejeitada quando $F_0 > F_{\alpha; \nu_n; \nu_d}$. (Pereira & Requeijo, 2012).

- **Two-way ANOVA**

A versão da ANOVA utilizada quando se pretende estudar a influência de dois fatores numa variável designa-se por *Two-way ANOVA*. É feita uma análise de variância às médias das populações que permite identificar fatores significativos bem como interações, caso exista replicação. A aplicação deste teste implica que o número de observações seja idêntico para as amostras (Seltman, 2014).

No modelo *Two-way*, as hipóteses nulas e alternativas são dadas por:

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0$$

$$H_1: \text{Pelo menos um } \tau_i \neq 0$$

$$H_0: \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_a = 0$$

$$H_1: \text{Pelo menos um } \beta_j \neq 0$$

$$H_0: \gamma_{ij} = 0 \text{ para qualquer par } (i, j)$$

$$H_1: \text{Pelo menos um } \gamma_{ij} \neq 0$$

Sendo τ_i é o efeito do nível i do fator A , β_j corresponde ao efeito do nível j no fator B e γ_{ij} é o efeito da interação entre os fatores A e B .

As estimativas dos parâmetros são dadas pelas seguintes expressões:

$$\hat{\mu} = \bar{Y}_{...} \tag{2.64}$$

$$\hat{\tau}_i = \bar{Y}_{i..} - \bar{Y}_{...} \tag{2.65}$$

$$\hat{\beta}_j = \bar{Y}_{.j.} - \bar{Y}_{...} \tag{2.66}$$

$$\hat{\gamma}_{ij} = \bar{Y}_{ij.} - \bar{Y}_{i..} - \bar{Y}_{.j.} + \bar{Y}_{...} \tag{2.67}$$

Onde $\bar{Y}_{i..}$ e $\bar{Y}_{.j.}$ representam a média da soma das respostas para o nível i do fator A e do nível j para o fator B , respectivamente, $\bar{Y}_{...}$ corresponde à média das observações para cada combinação de níveis de dois fatores.

A tabela ANOVA para uma versão *Two-way* é semelhante à da tabela 2.2. A sua estrutura encontra-se representada na tabela 2.3.

Tabela 2.3 - *Two-way ANOVA* (Adaptada de Pereira & Requeijo, 2012)

Fonte de Variação	SS	<i>g.l.</i>	MS	F_0
A	SS_A	$a - 1$	$\frac{SS_A}{(a - 1)}$	$\frac{MS_A}{MS_{AB}}$
B	SS_B	$b - 1$	$\frac{SS_B}{(b - 1)}$	$\frac{MS_B}{MS_{AB}}$
AB	SS_{AB}	$N - a$	$\frac{SS_{AB}}{(N - a)}$	$\frac{MS_{AB}}{MS_{Erro}}$
Erro	SS_{Erro}	$(ab)(n - a)$	$\frac{SS_{Erro}}{(ab)(n - a)}$	
Total	SS_T	$N - 1$		

Na tabela 2.3 SS_T designa a soma dos quadrados dos desvios de todas as observações relativamente à média global, SS_A é a variação entre os níveis do fator *A* enquanto a representa o número de níveis a que se está a estudar o fator, SS_B corresponde à variação entre níveis do fator *B* e b corresponde ao número de níveis desse fator. Por sua vez, SS_{AB} representa a variação da interação *AB*, onde $N = a \times b \times n$, onde n é o número de replicações.

As variações são calculadas com recurso às seguintes expressões:

$$SS_A = \sum_{i=1}^a \frac{Y_{i..}^2}{bn} - \frac{(Y_{...})^2}{abn} \quad (2.68)$$

$$SS_B = \sum_{j=1}^b \frac{Y_{.j.}^2}{an} - \frac{(Y_{...})^2}{abn} \quad (2.69)$$

$$SS_{AB} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{Y_{ij.}^2}{n} - \frac{(Y_{...})^2}{abn} - SS_A - SS_B \quad (2.70)$$

$$SS_{Erro} = SS_T - SS_A - SS_B - SS_{AB} \quad (2.71)$$

O cálculo dos desvios quadráticos médios, MS_A , MS_B e MS_{AB} corresponde ao quociente entre o as variações e respetivos graus de liberdade.

Tratando-se do estudo de dois fatores é possível analisar o comportamento individual e a interação dos fatores. Deste modo é adicionada uma linha à tabela que corresponde à interação dos dois fatores.

É possível fazer um analogia entre um desenho fatorial 3^2 , onde dois fatores são estudados a três níveis, estudando-se o seu efeito isolado ou a sua interação entre, com a aplicação de uma *Two-way ANOVA*, uma vez que esta ferramenta é aplicada ao estudo de interações entre duas fatores diferentes, cuja alteração de um dos níveis de um dos fatores pode, ou não, ser dependente do nível do outro fator (Seltman, 2014), isto é, a alteração do nível de um dos fatores leva à alteração do nível do outro fator.

2.4.4.2. *Análise de Resíduos*

Como referido anteriormente o desenho de experiências assenta em três pressupostos. Normalidade, Independência e Variância constante dos resíduos. A verificação de tais pressupostos é feita através da análise de resíduos, onde é feita uma estimativa dos erros (Pereira e Requeijo, 2012).

A verificação da Normalidade pode ser feita com recurso a várias ferramentas. A primeira consiste na elaboração do gráfico das probabilidades da distribuição Normal. O pressuposto da normalidade é satisfeito, se os resíduos se dispuserem em linha reta (Pereira & Requeijo, 2012). Outro método para validar este pressuposto é o “Teste do Lápis” descrito por Anderson & Whitcomb (2007), que consiste em colocar um lápis sobre o gráfico da distribuição normal e se este cobrir todos os pontos, o pressuposto é verificado.

A Independência dos dados é testada através de um gráfico de resíduos em função da ordem aleatória pela qual se realizaram as experiências. Para que se verifique, os resíduos devem dispor-se aleatoriamente (Pereira & Requeijo, 2012).

Um gráfico dos resíduos em função dos valores previsto é uma das técnicas que permite verificar se a variância é constante. Este pressuposto é cumprido caso o gráfico não apresente uma disposição especial (Pereira & Requeijo, 2012). Segundo Anderson & Whitcomb (2007), outra maneira de verificar a homogeneidade dos dados é através da “Regra do Polegar”, onde caso se observe uma tendência nos dados e se ao tapar um ponto essa tendência desaparecer, o pressuposto é garantido.

2.4.5. *Desenho de Experiências em Injeção de Plásticos*

Como referido no tópico relativo à Injeção de Plásticos, existem vários defeitos que advêm deste tipo de processo. Para se perceber qual a sua origem e de que modo os parâmetros das máquinas de injeção se refletem na peça, vários estudos foram feitos aplicando várias técnicas estatísticas, isoladamente, ou em conjunto com outros métodos.

Neste capítulo serão apresentados vários estudos aplicados, focando-se nomeadamente na aplicação de desenho de experiências.

Chen *et al.* (2009) integraram engenharia assistida por computador com técnicas estatísticas com o objetivo de reduzir o empeno em peças plásticas. Com recurso a Desenho de Experiências tradicional e com os parâmetros, temperatura de fusão, temperatura do molde, velocidade de injeção e pressão de compactação, a três níveis e através da análise dos resultados, os autores concluíram que os fatores significativos são a temperatura de fusão e pressão de compactação.

Altan (2009) determinou as condições de injeção ótimas para minimizar a contração das peças plásticas, através do desenho de experiências de Taguchi e métodos de análise de variância. Foram utilizados dois tipos de materiais, Polipropileno (PP) e Poliestireno (PS), e os parâmetros

estudados foram a temperatura de fusão, pressão e injeção, pressão de compactação e tempo de compactação. A determinação da combinação ótima de parâmetros foi feita através do rácio S/N, índice Sinal/Ruído. Verificou-se então que para uma temperatura de fusão de 260°C, uma pressão de injeção de 60 MPa, 50 MP de pressão de compactação e 15 s de tempo de compactação, o material apresenta uma contração mínima de 0,937% (PP) e 1,224% (PS). Estatisticamente, os parâmetros significativos foram a pressão de compactação para o PP e a temperatura de fusão para o PS.

Mustafa et al. (2009) estudaram a influência da pressão nas cavidades do molde e a temperatura da superfície do molde, na qualidade final de peças produzidas por injeção. A medição destes parâmetros foi feita utilizando sensores de medição. Os autores concluíram então que ambos os fatores são determinantes na qualidade das peças produzidas por injeção.

Ozcelik et al. (2010) pretendiam otimizar parâmetros de injeção com o intuito de melhorar as propriedades mecânicas de peças plásticas. O método utilizado foi o de *Taguchi* e os parâmetros em estudo foram temperatura de fusão, pressão de compactação, tempo de injeção e pressão de injeção. Com a aplicação do estudo concluíram que os fatores significativos são a temperatura de fusão e pressão de injeção.

Kovács e Sikló (2011) apresentam um novo método de análise e medição (*V-top*) da deformação de peças fabricadas por injeção, desenhando uma peça especial com o objetivo de medir o empeno causado por alteração dos parâmetros, *design* do molde e propriedades do material. Os parâmetros estudados foram matéria-prima com diferentes percentagens de fibra (10, 20 e 30), temperatura do fuso (30, 50 e 70°C) e pressão de fecho (100, 300 e 500 bar). Após estudo concluíram que a maior percentagem de fibra reduziu o empeno, que quanto maior a temperatura, maior a deformação causada e que por sua vez, a pressão de fecho apenas influencia os cantos mais distantes das peças.

Mehat & Kamaruddin (2011) fizeram um estudo com o intuito de melhorar as propriedades mecânicas de produtos feitos com plástico reciclado. Para tal utilizaram o método de *Taguchi*, matriz ortogonal L9. Foram produzidas várias peças com matéria-prima virgem e reciclada através da injeção. Os fatores controláveis são temperatura de fusão, pressão de compactação, tempo de compactação e tempo de injeção, cada um com três níveis a serem testados. Os resultados demonstram que o produto que apresenta melhores propriedades quando comparado com o produto feito com 100% matéria-prima virgem é o produto com o rácio de 25% matéria-prima reciclada e 75% virgem.

Azaman et al. (2013) simularam, através do *software MoldFlow Insight*, a injeção de peças plásticas, onde avaliaram a contração volumétrica e empeno das peças, sob condições de produção diferentes. Os parâmetros em causa foram a temperatura do molde, tempo de arrefecimento, pressão de compactação e tempo de compactação. Os autores concluíram que os parâmetros tempo de compactação e tempo de arrefecimento têm menor impacto na contração e empeno. Foi verificada uma correlação entre a contração volumétrica e o empeno. Os parâmetros ótimos para menor contração volumétrica e empeno encontram-se entre 40-45°C para a temperatura do molde, 20-30 s para o tempo de arrefecimento, 0,85 P_{inject} para a pressão de injeção e 15-20 s para o tempo de compactação.

Wang et al. (2014) utilizaram o método de *Taguchi* em conjunto com um modelo de elementos finitos, para otimizar sete parâmetros de injeção com o intuito de melhorar a força de

compressão em válvulas de travões. Com a otimização dos parâmetros verificaram um aumento da força de compressão de 12%.

Gu et al. (2014) tinham como objetivo melhorar as propriedades de peças plásticas com material reciclado. Com recurso ao método de *Taguchi*, selecionaram os fatores temperatura de fusão, temperatura do molde, velocidade de injeção e pressão de compactação, a três níveis cada. Além disso utilizaram vários rácios entre matéria-prima virgem e matéria-prima reciclada. Com este estudo concluíram que a peça com melhores propriedades mecânicas resulta na utilização de um rácio de 90% de matéria-prima virgem e 10% de matéria-prima reciclada. Por sua vez, qualquer alteração nos parâmetros pode causar a melhoria, ou não, das propriedades mecânicas.

Rahimi et al. (2014) estudaram o efeito da utilização de ABS reciclado nas propriedades mecânicas de peças plásticas. Para tal misturaram matéria-prima virgem com a 20, 30 e 50% de matéria-prima reciclada. Depois de obtidas as amostras foram feitos testes de impacto, tensão, flexão e contração de acordo com a norma ASTM e testes de viscosidade. Os resultados demonstram que com o aumento da percentagem de matéria reciclada, a contração diminui. A mistura que apresenta menos contração é a de 50% de matéria-prima reciclada, enquanto a de 20% é a que apresenta melhores propriedades mecânicas. A resistência das peças ao impacto é menor para a mistura com 50% de matéria-prima reciclada. Já os testes de flexão não apresentam diferenças significativas entre eles.

3. Caso de Estudo – Metodologia, análise e discussão de resultados

3.1. A Empresa

A *Visteon*, multinacional do ramo de componentes automóveis está segmentada de acordo com os seus produtos em *Visteon Electronics*, *Visteon Interiors* e *Halla Visteon Climate Control Corp.* Produz uma vasta gama de produtos para uma grande parte dos automóveis, atualmente no mercado. Apresenta-se como uma empresa cujo objetivo é ser líder de mercado, tendo como princípios a integridade e respeito, focando-se nas necessidades do cliente, com o intuito do cumprimento dos objetivos e fortemente orientada para uma melhoria contínua.

A *Visteon Portuguesa*, localizada em Palmela, foi fundada em 1989 como consequência do aumento das vendas da *Ford Motor Company*, com o nome de *Ford Eletrónica Portuguesa*. Em outubro de 1991 é iniciada a produção, criando 1700 postos de trabalho. Nos três anos que seguintes houve a inclusão de novos produtos, nomeadamente amplificadores, airbags e painéis de instrumentos (*clusters*). Em 1997 a *Ford Motor Company* agrupa todo o seu negócio de componentes eletrónicos, dando-lhe o nome de *Visteon*. Em 1998 expandiu-se novamente o negócio com duas novas fábricas, sendo uma de compressores e a outra de plásticos. A 28 de junho de 2000 a *Visteon* tornou-se uma empresa independente, acrescentando assim valor para o mercado do ramo automóvel. Em 2013 a empresa vendeu o negócio dos compressores a uma empresa coreana e recebeu os negócios de plásticos e eletrónica da Hungria.

Atualmente a empresa tem duas áreas de negócio, Eletrónica e Plásticos, empregando 1039 pessoas, nos departamentos de Manufatura, Qualidade, Sistemas, Material Planeamento e Logística, Recursos Humanos e áreas internacionais.

3.2. Qualidade

A política da qualidade da *Visteon Portuguesa* baseia-se no desenvolvimento de Sistemas de Qualidade que impulsionem a melhoria contínua, prevenindo a existência de defeitos e consequente redução dos desperdícios. Para tal, a *performance* é medida de modo a fazer os ajustes necessários para atingir os objetivos.

Em 2003 a *Visteon Portuguesa* foi certificada de acordo com a norma *ISO/TS 16949:2002*, distinguindo assim o sistema de gestão da qualidade.

A *ISO/TS 16949:2002* consiste numa especificação técnica focada no desenvolvimento de sistemas de gestão de qualidade, com o objetivo de melhoria contínua, centrando-se na prevenção de defeitos, redução de variação e desperdícios na cadeia de abastecimento.

3.3. Produtos

A *Visteon Electronics* apresenta uma vasta gama de produtos nas suas duas áreas de negócios fabricando produtos para, virtualmente, qualquer tipo de automóveis. Na parte eletrónica são produzidas placas para painéis de instrumentos, *displays* e componentes de áudio, tendo em consideração a *interface* com o utilizador, bem como a conectividade com outros dispositivos. Na área dos plásticos são produzidos todos os componentes plásticos que formam o painel de instrumentos, painéis para portas e para acabamentos (*Visteon, 2014*).

Esta dissertação foi realizada na área dos plásticos, onde foi selecionado um dos vários produtos, para verificação da aplicabilidade de cartas de controlo ao seu processo.

O produto escolhido é um dos *high-runners* da fábrica, isto é, dos produtos com maior produção. A figura 3.1 ilustra o produto escolhido sendo este, composto no total por 9 componentes.



Figura 3.1 - Produto final

Sendo o objetivo desta dissertação a implementação de cartas de controlo, foram selecionados quatro componentes cujo controlo dimensional é feito sempre que as peças são injetadas, facto que não se verifica para os restantes componentes.

Os componentes escolhidos são: *Cover*, *Mounting Plate*, *Bezzel* e *Lente*. A figura 3.2. ilustra todos os componentes estudados nesta dissertação.

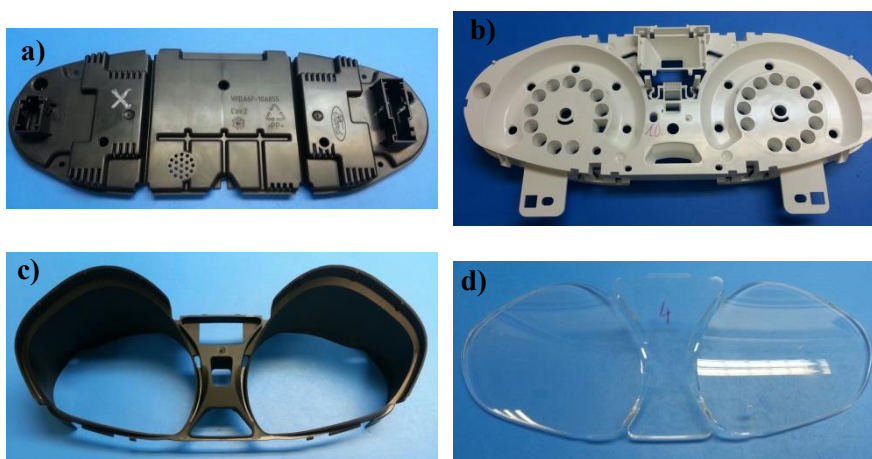


Figura 3.2 - Componente do Produtos; a) *Cover*, b) *Mounting Plate*, c) *Bezzel*, d) *Lente*

Ao longo do documento, o *Cover* será referido como componente 1, o *Mounting Plate* como componente 2, o *Bezzel* como componente 3 e a *Lente* como componente 4.

3.3.1. Processo Produtivo

O processo produtivo dos componentes tem por base os princípios de injeção de plásticos definidos no tópico 2.1.3. Tratando-se todos os produtos de peças plásticas, o seu processo de produção é bastante semelhante, podendo ser definido em várias etapas. Contudo, existe uma diferença nos processos dependendo da visibilidade do componente na peça final.

Encontra-se esquematizado, de forma sequencial na figura 3.3, o processo de produção dos componentes 1, 2 e 3.

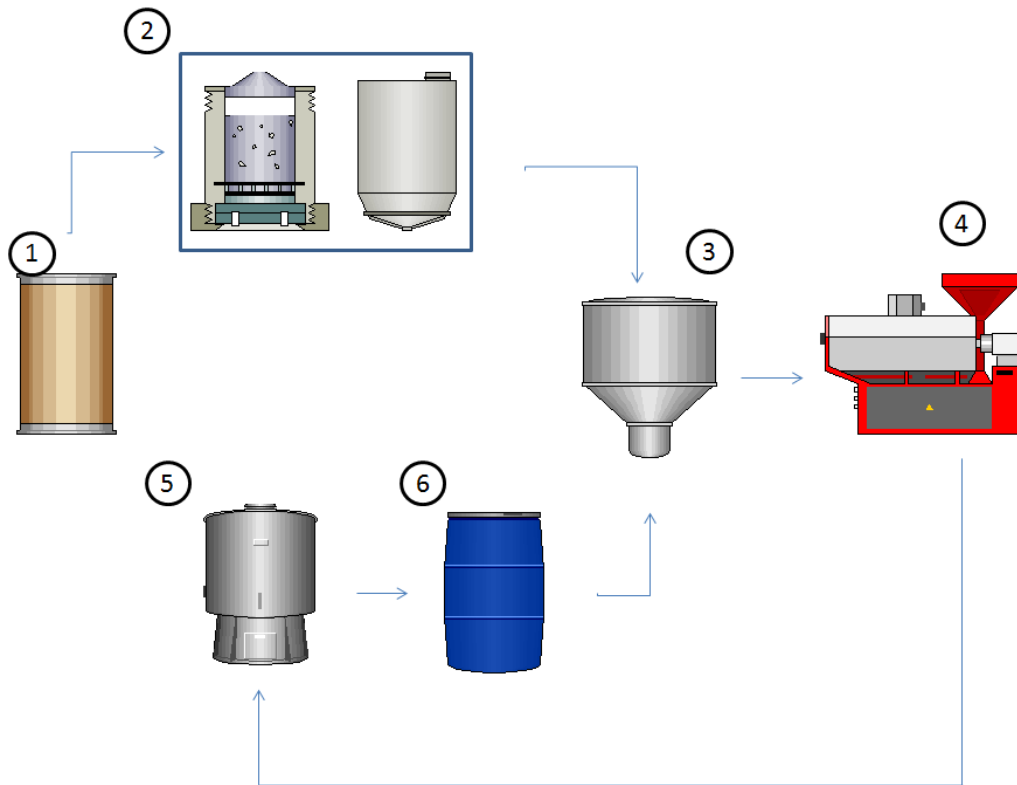


Figura 3.3 - Diagrama do processo produtivo para os componentes 1-3

Para estes componentes podem ser diferenciadas 6 etapas distintas, pois sendo componentes interiores é possível a utilização de matéria-prima reciclada, o que implica a inclusão de mais duas etapas. De seguida é feita uma breve descrição de cada uma destas.

1 – A matéria-prima encontra-se dentro do batoco (recipiente de armazenagem), fechada dentro de um saco de modo a minimizar a possibilidade de contaminação.

2 – A matéria-prima é puxada através de um tubo para o silo, cuja temperatura e humidade são constantes. (A matéria-prima é estufada à temperatura de 90°C durante duas horas até ser transporta para a tremonha).

3 – É feito o rácio entre matéria-prima virgem e matéria-prima reciclada de modo a garantir uma peça de acordo com as especificações. (O rácio indicado encontra-se entre os 16-20% de matéria-prima reciclada).

4 – Processo produtivo, no qual a matéria-prima é sujeita a várias pressões e temperaturas de modo a ganhar a forma pretendida.

5 – Caso a peça possua algum defeito, é reciclada através de uma trituração. É necessário garantir que não existe mistura de matérias-primas diferentes.

6 – A matéria-prima reciclada é colocada dentro de um contentor e é aspirada novamente para a tremonha onde é feito novamente o rácio entre matéria-prima virgem e reciclada.

O componente 4 apresenta um diagrama em tudo idêntico aos anteriores, como se pode ver pela figura 3.4

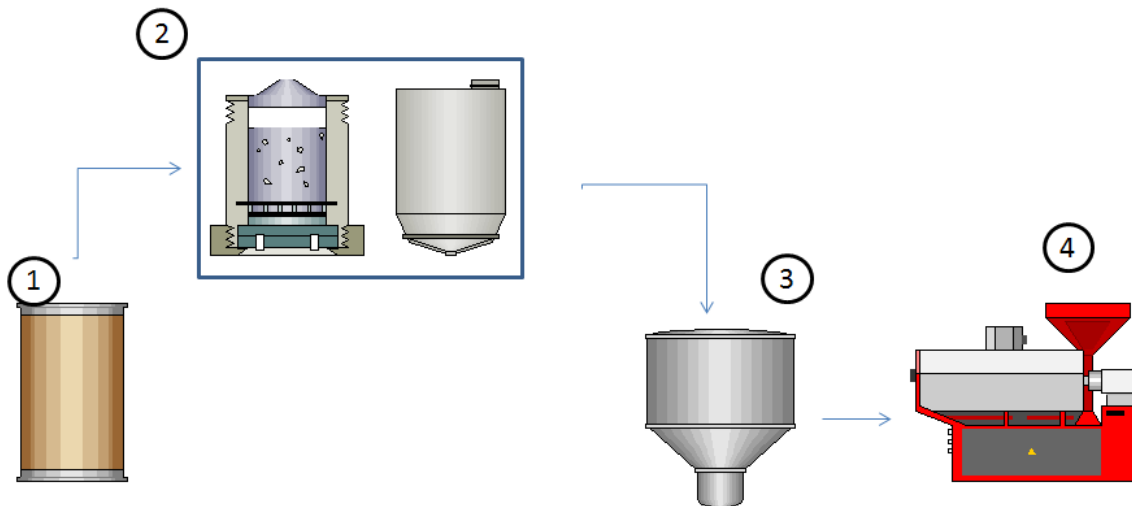


Figura 3. 4 - Diagrama do processo produtivo para o componente 4

A principal diferença deve-se à ausência das etapas 5 e 6. Sendo este um componente transparente, o material que é utilizado para o seu fabrico não pode sofrer qualquer tipo de contaminação ou alteração na composição, não sendo possível a sua reutilização após a deteção de algum defeito.

Como não é utilizada matéria-prima reciclada na etapa 3, não é feito qualquer rácio de matérias-primas, servindo a tremonha apenas como um reservatório para garantir que não existe falta de material na máquina de injeção.

3.4. Metodologia

Neste capítulo será descrita toda a metodologia seguida para a implementação das cartas de controlo, começando pela análise preliminar dos dados seguido da validação do sistema de medição, estratégia para implementação das cartas de controlo e por fim a motivação para realização do desenho de experiências.

3.4.1. Compilação e Análise preliminar dos dados

Tratando-se de um processo de injeção no qual as várias peças necessitam encaixar entre si, é necessário fazer controlo dimensional das peças para que o encaixe seja garantido. Uma vez que era feito o controlo dimensional, compilaram-se os dados dos componentes.

Devido à existência de uma grande quantidade de dados históricos optou-se por fazer a divisão destes em duas janelas temporais, correspondendo cada uma a um período de três meses, sendo estes dados utilizados para verificar a existência de diferenças significativas entre cavidades ou turnos e elaboração das cartas de controlo da Fase I. Os dados da Fase II corresponderiam aos dados de uma terceira janela temporal, de seis meses, correspondendo à duração do estágio.

O tratamento de dados históricos deverá considerar o mesmo número de observações por amostras para cada um dos turnos, uma vez que a inconsistência no número de observações irá produzir resultados que não são representativos da realidade.

A análise preliminar de dados consistiu numa análise de *outliers* e numa análise de variâncias.

O estudo de *outliers* será feito para cada um dos turnos das três janelas temporais com o objetivo de eliminar dados estranhos ao processo que possam invalidar a continuação do estudo. O método utilizado para a verificação de existência de *outliers* é o método do Interquartil que,

através de uma simples análise gráfica, permite verificar a presença de valores estranhos ao processo.

A análise de variâncias será aplicada com o objetivo de verificar que não existem diferenças significativas entre cavidades do mesmo turno e cavidades entre os três turnos. Uma vez que se quer verificar a existência de diferenças entre dois blocos (turnos e cavidades) o tipo de análise de variância a utilizar será a *Two-way ANOVA*, pois é o tipo que vai ao encontro dos objetivos pretendidos.

3.4.2. Validação do Sistema de medição

A validação do sistema de medição é de extrema importância, uma vez que todo o trabalho terá como base os valores recolhidos utilizando este sistema.

Posto isto, será realizado um estudo de Repetibilidade e Reprodutibilidade para cada um dos componentes. Apesar destes apresentarem a mesma ordem de grandeza é necessário verificar se o sistema de medição é o adequado.

O estudo envolverá o equipamento de medição utilizado diariamente para a recolha dos dados e os operadores responsáveis pela recolha dos dados. O número de amostras a utilizar será 10. Estas amostras serão recolhidas em diferentes alturas, diretamente da produção, para garantir uma amostra mais representativa do processo possível. O número de operadores para o teste corresponderá ao número de turnos existentes na empresa, ou seja três, correspondendo cada operador a cada um dos turnos. Cada operador realizará três medições a cada uma das amostras.

3.4.3. Aplicação de Cartas de Controlo

A implementação de cartas de controlo é o principal objetivo deste trabalho, sendo necessário verificar a sua aplicabilidade, uma vez que todos os resultados dependerão desta fase.

Após a eliminação de valores estranhos ao processo e confirmação de que não existem diferenças significativas entre cavidades e turnos, serão construídas as cartas de controlo que permitirão monitorizar o processo.

Na Fase I o tipo de carta a utilizar será carta $\bar{X} - S$, tendo cada amostra uma dimensão 3, correspondendo à política da fábrica. Devido à dimensão das amostras, poder-se-ia utilizar a carta $\bar{X} - R$, contudo o desvio padrão é um melhor estimador da variância do processo, uma vez que este considera todas as observações de uma amostra e não apenas os extremos. O número de amostras definido para esta fase será de 50.

Depois de se garantir que o processo se encontra sob controlo estatístico, serão estimados os parâmetros do processo e os seus índices de capacidade, verificando se este é capaz de produzir de acordo com a sua especificação técnica.

A carta escolhida para aplicar na Fase II foi a carta *EWMA*. Esta carta permite a deteção de pequenas alterações da média do processo mais rapidamente que as cartas de controlo de *Shewhart*.

3.4.4. Desenho de Experiências

A primeira etapa na aplicação do desenho de experiências consiste na definição concreta dos objetivos. Posto isto, pretende-se determinar quais os níveis dos parâmetros que permitem obter peças o mais próximo do valor nominal do processo possível.

Quando se aplica um *DOE* é crucial definir a resposta que se pretende estudar e os fatores controláveis que irão ter influência na resposta.

Para tal é necessário definir com o engenheiro de processo e os técnicos responsáveis, os parâmetros a estudar. Após discussão, os dois parâmetros escolhidos para a experiência foram a percentagem da matéria-prima utilizada e a 2ª pressão.

A escolha do número de níveis a utilizar está relacionada com os níveis utilizados atualmente para o equipamento. Serão utilizados três níveis, correspondendo o nível médio ao valor utilizado a cada injeção, o nível alto corresponde a um aumento e o nível baixo a um decréscimo no fator em estudo.

Tratando-se de um desenho de experiências com dois fatores a três níveis, o número de experiências a realizar será de nove, replicando-se cada experiência seis vezes.

3.5. Apresentação e Discussão de Resultados

3.5.1. Compilação de dados

Tratando-se de um processo de injeção no qual as peças necessitam encaixar entre si, é necessário fazer controlo dimensional do comprimento total das mesmas, para que o encaixe seja garantido. Uma vez que era feito o controlo dimensional, compilaram-se os dados dos componentes a estudar.

3.5.2. Estudo de *Outliers*

Este estudo tem como base a verificação da existência de valores não normais do processo. Para tal foi feita análise de *Box-Cox* com recurso ao *software Statistica*, de modo a detetar valores *outliers* no processo. A construção dos gráficos teve por base a primeira observação dos dados de cada turno, onde estão representadas as duas cavidades.

O componente 1, por não ter sofrido alteração no molde, é o único que apresenta uma análise de *outliers* com três janelas temporais distintas. Relativamente aos outros componentes, apresentam duas janelas, uma vez que a utilização de dados provenientes de peças feitas em moldes diferentes pode comprometer o estudo devido à presença de variáveis não controláveis como dimensões do molde, optando-se assim por utilizar os dados relativos aos moldes mais recentes. Outra razão para esta escolha prende-se ao facto da descontinuidade dos moldes antigos, sendo estes apenas utilizados aquando da manutenção dos seus homólogos mais recentes.

Todos os gráficos correspondentes à primeira iteração para os vários componentes e turnos podem ser consultados no Anexo II, Figura II.1-II.7.

3.5.2.1. Componente 1

- **Primeira Janela**

Para obtenção dos gráficos representados na figura 3.5, sem *outliers*, foi necessário remover no segundo turno, três *outliers* na cavidade 1 e um *outlier* na cavidade 2. A mesma quantidade de *outliers* foi removida para o terceiro turno. A eliminação dos pontos foi feita com base no critério de serem peças de início de injeção. Os gráficos têm por base 16 observações individuais para cada uma das cavidades.

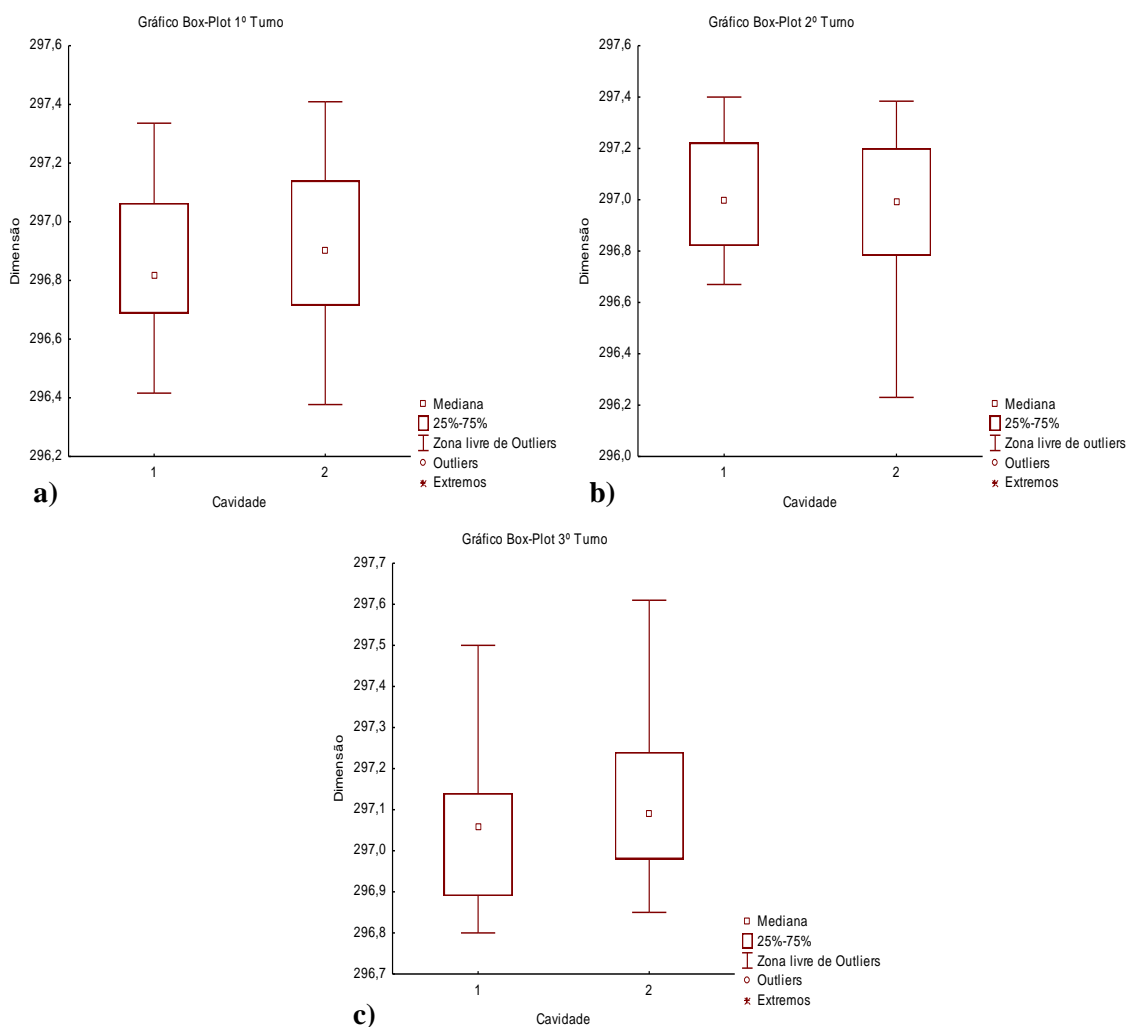


Figura 3. 5 - Box-Plot Componente 1, 1ª Janela; a) 1º Turno, b) 2º Turno, c) 3º Turno

- **Segunda Janela**

A figura 3.6 apresenta os gráficos *box-plot* do componente 1 relativos à segunda janela temporal. Os gráficos de cada turno foram obtidos utilizando um total de 70 valores, tendo cada cavidade 35 observações individuais. Os gráficos correspondem às versões livres de outliers para cada janela estudada.

A análise de *outliers* revelou a existência de valores estranhos ao processo no primeiro e segundo turnos. Relativamente ao primeiro turno foi necessário remover três pontos existentes na cavidade 1. Para o segundo turno foi retirado o mesmo número que no turno anterior para que este se apresentasse livre de *outliers*. No que diz respeito ao terceiro turno, houve a necessidade de eliminar quatro dos 35 valores. O critério para a eliminação dos valores no que diz respeito aos pontos abaixo do quartil inferior foi a existência de erros na recolha dos dados e para as restantes observações foi o facto de serem peças de início de injeção.

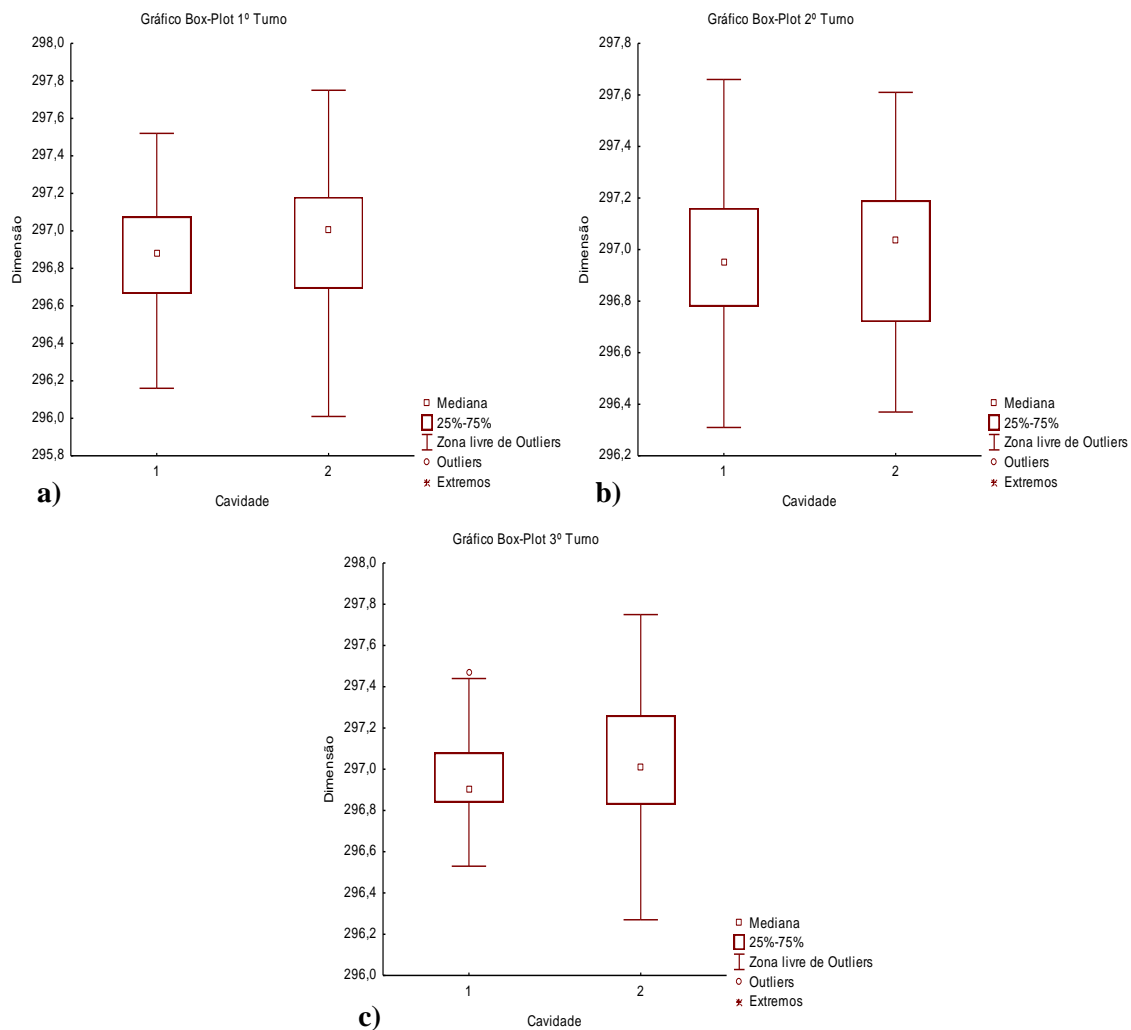


Figura 3. 6 - Box-Plot Componente 1, 2ª Janela; a) 1º Turno, b) 2º Turno, c) 3º Turno

Feita a análise gráfica, pode-se constatar que para o primeiro turno a cavidade 2 apresenta uma maior dispersão de dados quer no quartil superior quer no quartil inferior, devido à amplitude que estes apresentam, bem como uma mediana superior na cavidade 2. A dispersão do segundo turno, relativos à cavidade 1, é superior no quartil inferior. Já a cavidade 2 apresenta uma dispersão semelhante entre quartis estando 50% dos valores médios bastante dispersos. No que diz respeito ao 3º turno verifica-se a presença de um *outlier* para a cavidade 1. Contudo, devido à sua proximidade da zona livre de *outliers*, este valor foi considerado como normal ao processo. No que diz respeito à dispersão de valores, a cavidade 2 apresenta uma maior dispersão quer a nível dos quartis quer a nível dos valores médios.

- **Terceira Janela**

Os gráficos relativos à terceira janela encontram-se representados na figura 3.7. Estes gráficos foram construídos com base em 15 observações para cada cavidade. Para esta janela, apenas foi necessário eliminar dois valores *outliers* para o terceiro turno. O valor presente no quartil inferior foi eliminado uma vez que corresponde a um valor mal tirado, enquanto o do quartil superior corresponde a um valor estranho ao processo.

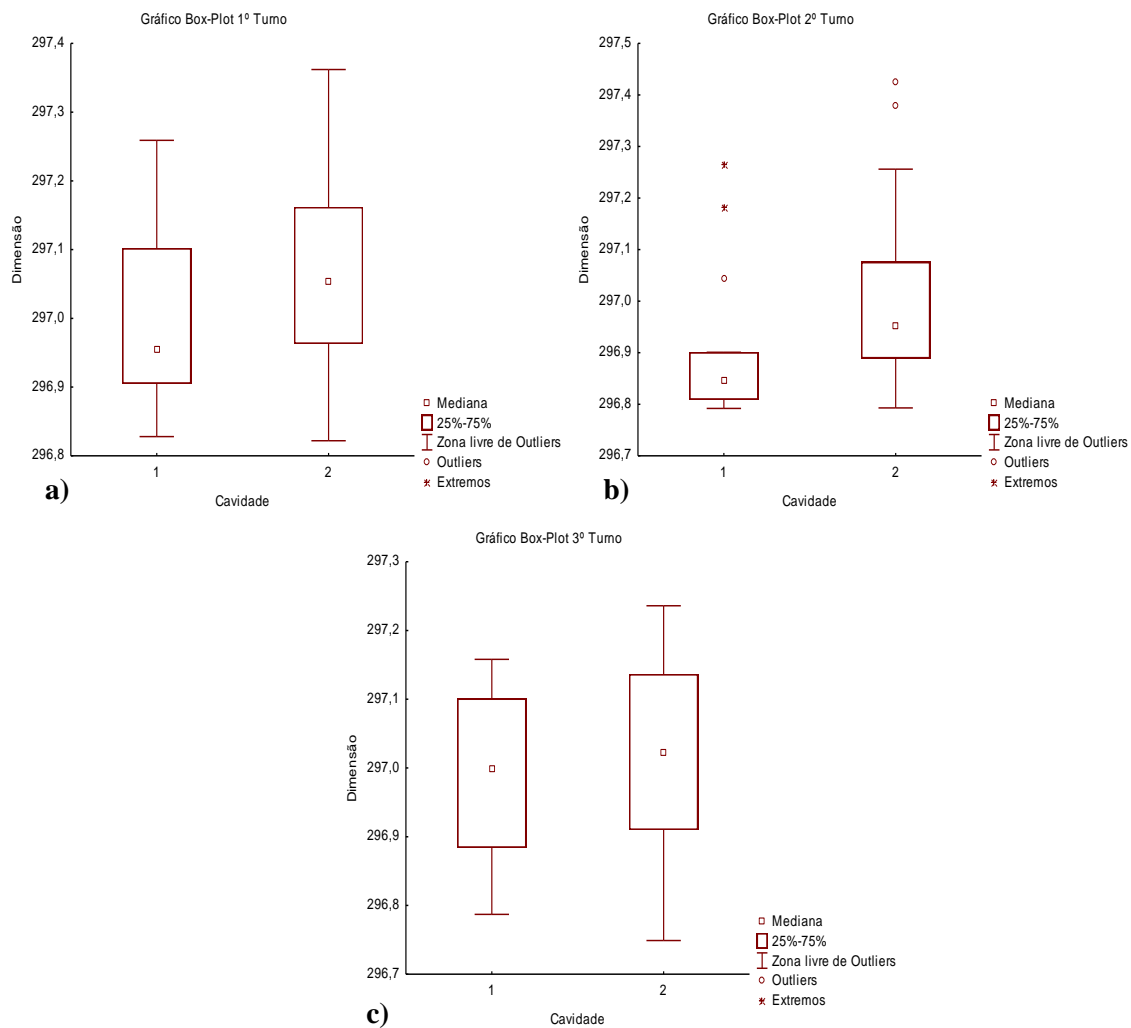


Figura 3. 7 - Box-Plot Componente 1, 3ª Janela; a) 1º Turno, b) 2º Turno, c) 3º Turno

No que diz respeito ao primeiro turno verifica-se que ambas as cavidades apresentam uma maior dispersão de valores no quartil superior, não havendo valores *outliers*. Para o segundo turno existe a presença de valores *outliers* e extremos, na cavidade 1. Contudo estes valores não vão ser eliminados pois são valores normais do processo, apesar de apresentarem um comportamento diferente. Para a cavidade 2 utilizou-se o mesmo critério para a decisão de manter os valores *outliers*. Já no terceiro turno observa-se que a cavidade 2 apresenta maior dispersão de dados em ambos os quartis, quando comparada com a cavidade 1, sendo que o quartil inferior apresenta o maior valor de dispersão. Considerando os valores médios, a dispersão é semelhante entre cavidades e a mediana é inferior para a cavidade 1.

3.5.2.2. Componente 2

- Segunda Janela

A figura 3.8 representa os gráficos *Box-Plot* para a segunda janela do componente 2. Para este componente não houve necessidade de remover valores estranhos uma vez que estes não

existiam. O número de observações que deu origem a este gráfico foi de 13 valores por cavidade.

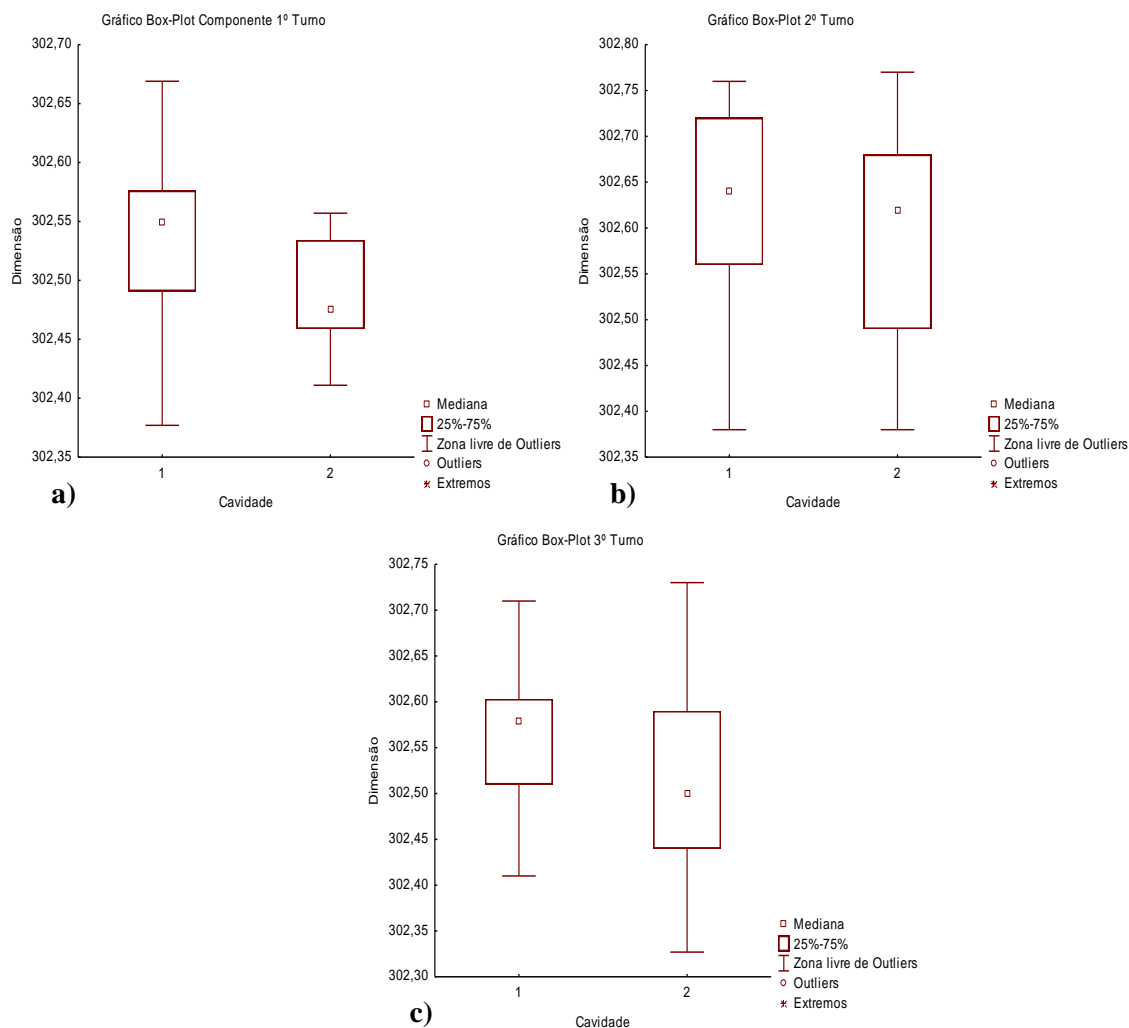


Figura 3. 8 - Box-Plot Componente 2, 2ª Janela; a) 1º Turno, b) 2º Turno, c) 3º Turno

Para o primeiro turno, contudo, a cavidade 1 apresenta uma maior dispersão nos quartis, relativamente à cavidade 2. Por sua vez, a cavidade 2 apresenta uma mediana inferior à da cavidade 1. A cavidade 1 do segundo turno apresenta uma dispersão maior no quartil inferior, enquanto a cavidade 2 apresenta uma dispersão idêntica nos dois quartis. No terceiro turno verifica-se uma maior dispersão nos valores médios, tendo a cavidade 2 uma maior dispersão nos quartis.

- **Terceira Janela**

A representação gráfica dos *box-plot* correspondentes à terceira janela temporal do componente 2 encontram-se na figura 3.9. Analogamente à segunda janela, não se verificou a existência de qualquer valor estranho ao processo, não tendo sido eliminado qualquer valor em nenhuma dos turnos assim como em nenhuma das cavidades. A construção dos gráficos relativos a esta janela temporal utilizou um total de 24 valores, 12 por cada cavidade.

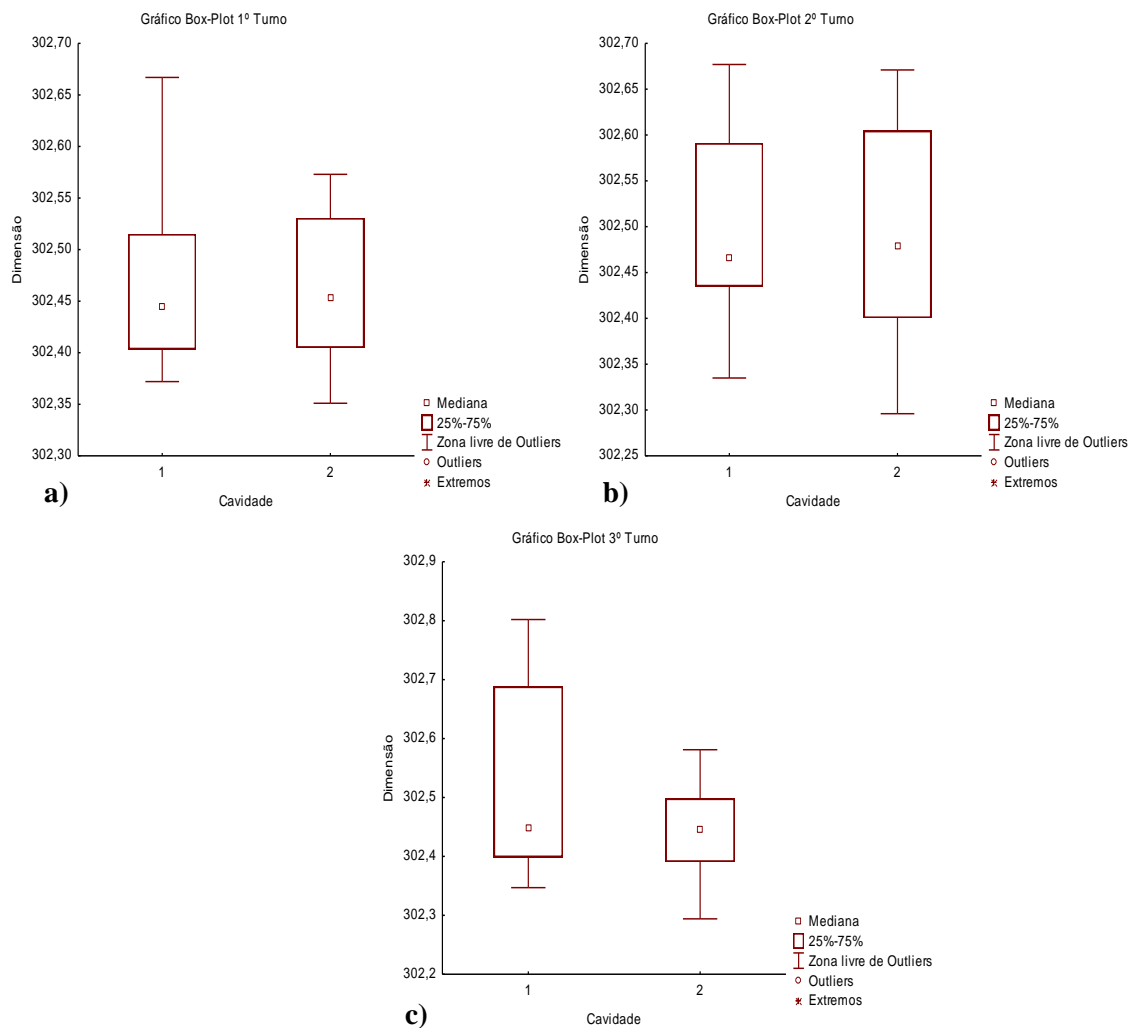


Figura 3.9 - Box-Plot Componente 2, 3ª Janela; a) 1º Turno, b) 2º Turno, c) 3º Turno

Para o primeiro turno é de salientar que a cavidade 1 apresenta uma dispersão maior nos valores do quartil superior. Quanto ao segundo turno, os valores médios apresentam grande dispersão, apresentando a cavidade 1 igual dispersão no quartis, e a cavidade 2 maior dispersão no quartil inferior. No terceiro turno é evidente que a cavidade 1 apresenta uma dispersão maior, quando comparada com a cavidade 2, no que diz respeito aos seus valores médios.

3.5.2.3. Componente 3

- **Segunda Janela**

Relativamente à remoção de *outliers* para este componente, foi necessário eliminar um ponto na cavidade 1 do primeiro turno, dois pontos na cavidade 1 e um ponto na cavidade 2 para o segundo turno e apenas um ponto na cavidade 1 do terceiro turno. Os valores *outliers* no quartil superior foram eliminados, uma vez que não correspondem a valores normais do processo enquanto os valores dos quartis inferiores correspondem a erros de medição. Através da eliminação dos pontos, obtiveram-se os gráficos apresentados na figura 3.10. A construção dos gráficos foi feita utilizando 23 valores para cada um das cavidades.

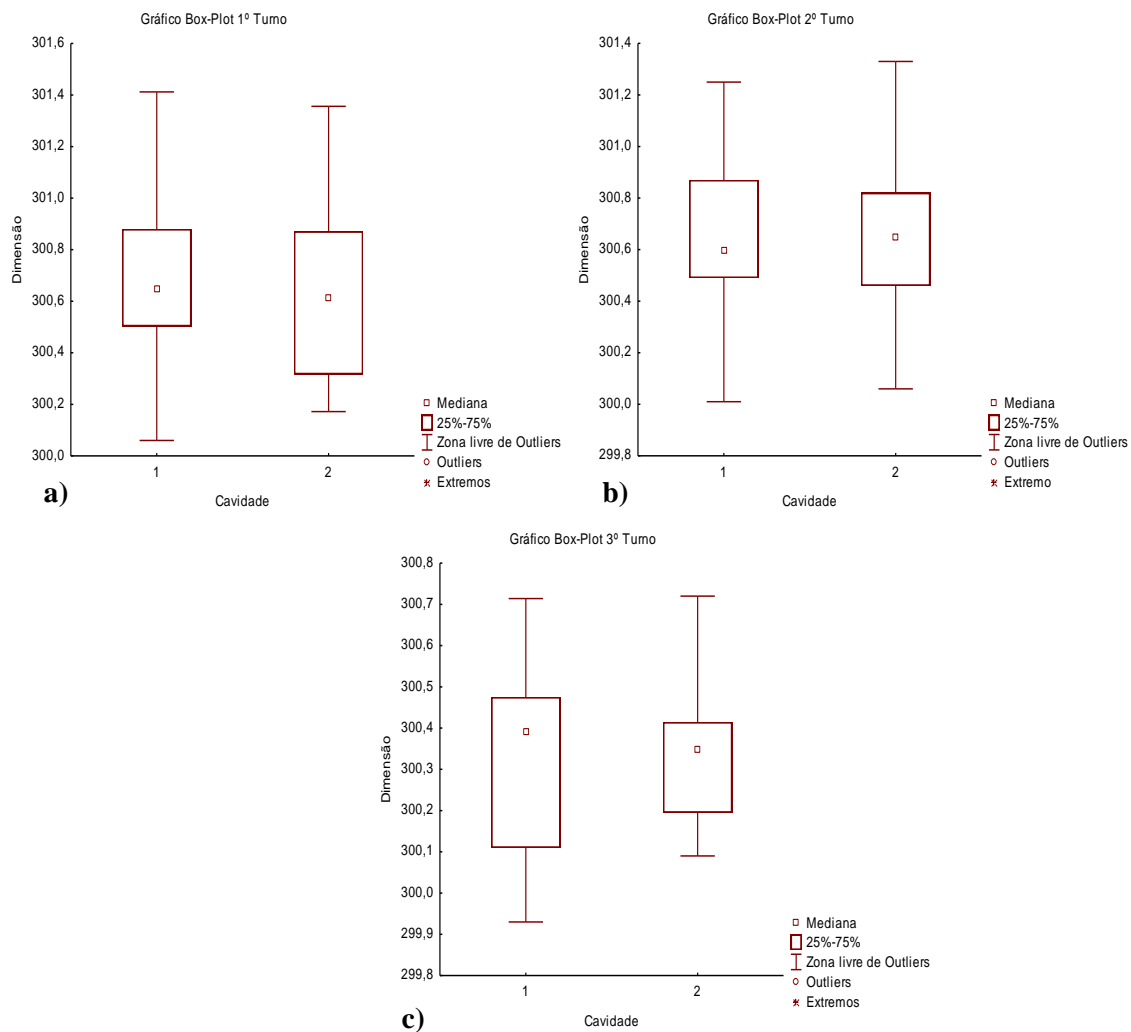


Figura 3. 10 - Box-Plot Componente 3, 2ª Janela; a) 1º Turno, b) 2º Turno, c) 3º Turno

Verifica-se no primeiro turno, que a cavidade 1 apresenta maior dispersão nos seus valores relativamente à cavidade 2. Para o segundo turno verifica-se um comportamento semelhante, apresentando ambas as cavidades uma grande dispersão nos seus valores. O terceiro turno apresenta maior dispersão de valores no quartil superior para ambas as cavidades.

- **Terceira Janela**

Os gráficos, após remoção de *outliers* para a terceira janela do componente 3, encontram-se representados na figura 3.11. A primeira iteração foi construída utilizando 34 valores, correspondendo a 17 por cada uma das cavidades.

Quando à análise de *outliers* para o primeiro turno, verificou-se a presença de um valor estranho na cavidade 2, sendo este removido. Quanto ao segundo turno não existia nenhum valor *outlier* em ambas as cavidades. Por sua vez, o terceiro turno apresentou um valor *outlier* em cada uma das cavidades, sendo este eliminado. O critério para eliminação no primeiro turno foi ser, na realidade, um valor estranho ao processo. Para o segundo turno, os valores encaixavam no critério de existência de erros na recolha das medições. E para o terceiro turno, o critério de remoção foi o mesmo do primeiro turno.

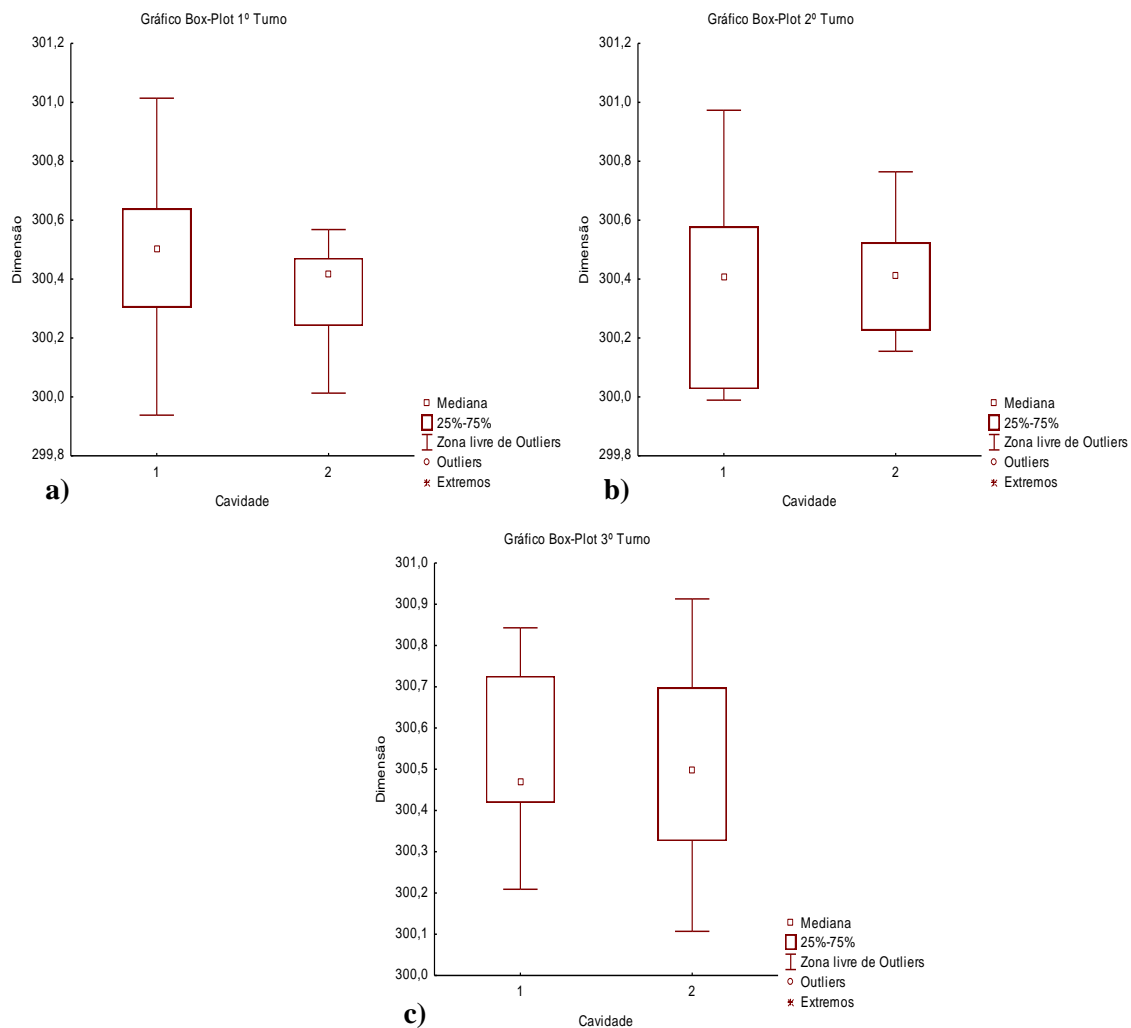


Figura 3. 11 - Box-Plot Componente 3, 3ª Janela; a) 1º Turno, b) 2º Turno, c) 3º Turno

Ao analisar os gráficos na figura 3.11 a dispersão dos valores da cavidade 1 é superior à dispersão da cavidade 2. No segundo turno a cavidade 1 apresenta um comportamento semelhante. Já no terceiro turno verifica-se o oposto, ou seja, a cavidade 2 é a que apresenta maior dispersão.

3.5.2.4. Componente 4

- **Segunda Janela**

A elaboração dos gráficos *box-plot* do componente 4 relativos à segunda janela temporal, teve por base a utilização de 37 valores para cada cavidade.

Os gráficos apresentados na figura 3.12 correspondem à versão revista sem *outliers*. O primeiro turno não apresentou nenhum valor estranho ao processo. Contudo, o segundo e terceiro turnos apresentaram cada um, um valor *outlier*. O valor do segundo turno encontrava-se no quartil inferior da cavidade 1 e foi eliminado, uma vez que existiram erros na sua recolha. O valor da cavidade 2, também localizado no quartil inferior, foi eliminado por ser um valor estranho ao processo produtivo deste componente.

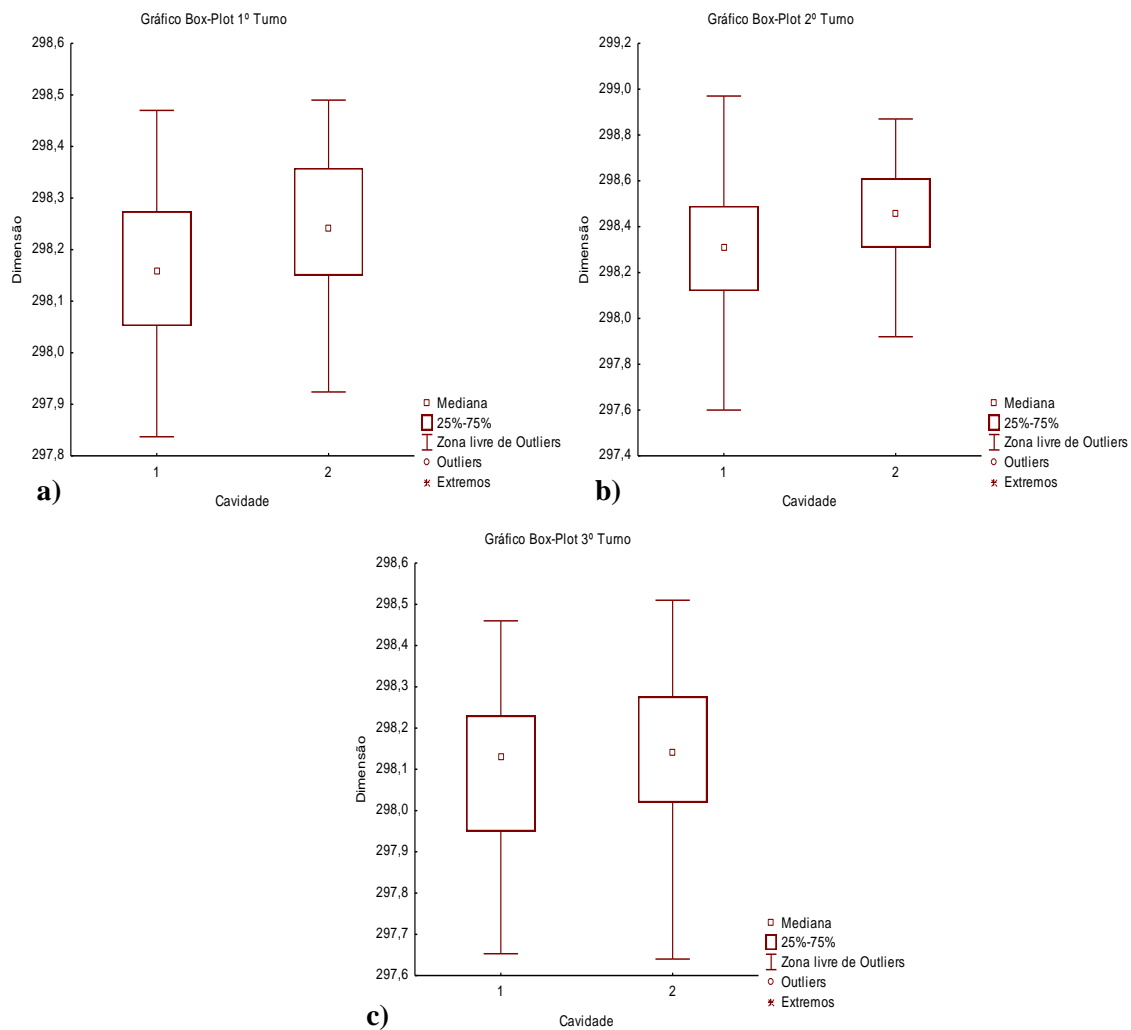


Figura 3. 12 - Box-Plot Componente 4, 2ª Janela; a) 1º Turno, b) 2º Turno, c) 3º Turno

No que diz respeito ao valor médio este é sempre superior na cavidade 2 de todos os turnos. A dispersão de valores é superior na cavidade 1 do primeiro e segundo turnos, havendo um comportamento oposto para 3º turno.

- **Terceira Janela**

As representações gráficas *box-plot*, deste componente, foram feitas utilizando 17 observações por cada cavidade, nos três turnos.

Para se obter os gráficos na figura 3.13 foi necessário proceder à eliminação de valores *outliers* em todos os turnos. No primeiro turno foi necessário remover apenas um valor por se encontrar acima do quartil superior da cavidade 1. Para o segundo turno, o valor eliminado encontrava-se acima do quartil superior da cavidade 2. Ambos os valores foram eliminados por serem considerados estranhos ao processo. Quanto ao terceiro turno, foram eliminados três valores presentes acima do quartil superior da cavidade 1.

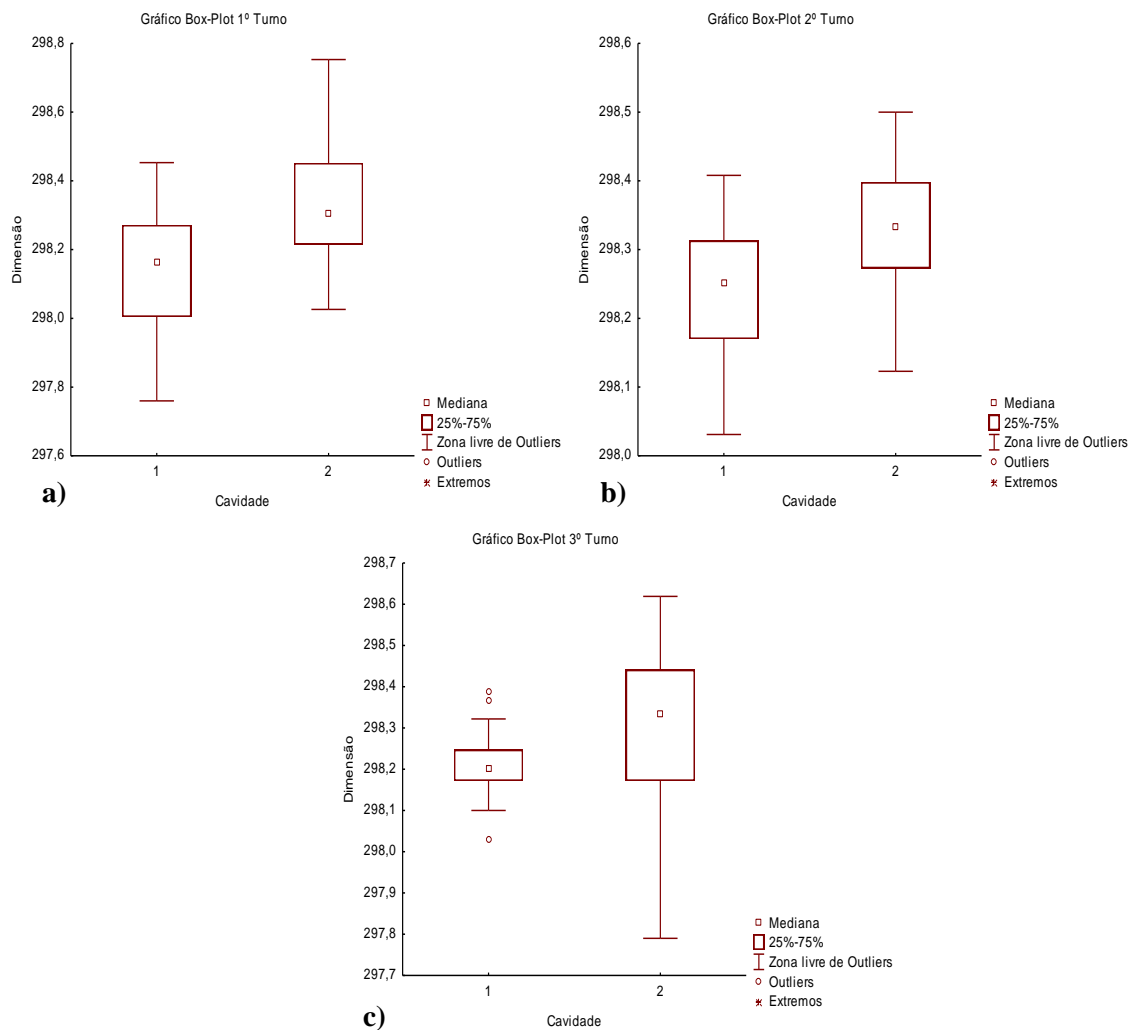


Figura 3. 13 - Box-Plot, Componente 4, 3ª Janela; a) 1º Turno, b) 2º Turno, c) 3º Turno

Para todos os turnos é possível verificar uma mediana superior na cavidade 2, havendo concordância com a janela temporal anterior. Relativamente à dispersão, esta é semelhante em ambas as cavidades para o 1º e 2º turno, já para o 3º turno a cavidade dois apresenta uma dispersão maior. Também para o 3º turno se verifica a presença de valores *outliers*, que não vão ser eliminados devido à sua proximidade com os quartis.

3.5.3. Análise de Variância

A aplicação de cartas de controlo assume que não existem diferenças significativas entre as observações. Em contexto industrial e tratando-se de um processo contínuo, estão envolvidos vários intervenientes que podem contribuir para a variação do processo. Com o intuito de verificar se existiam diferenças significativas entre os turnos e entre cavidades, foi aplicada uma *Two-way ANOVA*.

A análise de variâncias teve por base o mesmo conjunto de dados utilizados no estudo de *outliers*, e por essa razão a análise feita ao componente 1 apresenta três janelas temporais devido à utilização do mesmo molde em todas elas. Os restantes componentes apenas possuem duas janelas, uma vez que a utilização de dados de peças provenientes de moldes diferentes, poderia aumentar a variância do processo.

O teste de hipóteses, utilizado para realizar a análise de variâncias, foi idêntico para todos os componentes, considerando-se:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2$$

$$\mu_1 > \mu_2$$

$$\mu_1 < \mu_2$$

Todos os gráficos relativos à análise de variância podem ser consultados no Anexo II, figuras II.8-II.16.

3.5.3.1. Primeira Janela

Uma vez que apenas um dos componentes manteve o mesmo molde durante as três janelas temporais, apenas foi feita a análise de variância para esse componente, uma vez que a alteração de molde irá contribuir com outros fatores de variância que poderiam enviesar os resultados.

- **Componente 1**

Após a aplicação dos testes, obtiveram-se os resultados apresentados na tabela 3.1.

Tabela 3. 1 – Two-Way ANOVA Componente 1

<i>Fonte de variação</i>	<i>SS</i>	<i>Gl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>valor P</i>	<i>F crítico</i>
Cavidade	0,023	1	0,023	0,298	0,586	4,001
Turno	0,732	2	0,366	4,626	0,0138	3,150
Interações	0,149	2	0,074	0,944	0,394	3,150
Erro	4,746	60	0,079			
Total	5,651	65				

Sendo o critério de rejeição de $F < F_{crítico}$, analisando a tabela 3.1 conclui-se que não existem diferenças significativas entre ambas as cavidades para cada um dos turnos. Contudo, se tivermos em consideração os três turnos, verificamos que estes apresentam diferenças significativas entre si.

3.5.3.2. Segunda Janela

Tratando-se agora da segunda janela temporal, serão considerados todos os componentes.

- **Componente 1**

A tabela 3.2 corresponde à tabela *Two-way ANOVA* do componente 1 para a segunda janela temporal.

Tabela 3. 2 - Two-Way ANOVA Componente 1, Segunda Janela

<i>Fonte de variação</i>	<i>SS</i>	<i>Gl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>valor P</i>	<i>F crítico</i>
Cavidade	0,055	1	0,055	0,530	0,467	3,897
Turno	0,213	2	0,106	1,025	0,360	3,049
Interações	0,004	2	0,002	0,022	0,978	3,049
Erro	17,514	168	0,104			
Total	17,788	173				

Observando os valores de F e comparando-os com os valores de $F_{critico}$, não existem indícios para se rejeitar a hipótese nula, uma vez que o seu valor é superior a 5%. Podendo chegar-se a esta conclusão tanto para as cavidades do mesmo turno como para a comparação feita entre turnos.

- **Componente 2**

A tabela ANOVA obtida para a segunda janela do componente 2 está representada na tabela 3.3.

Tabela 3. 3 - Two-Way ANOVA Componente 2, Segunda Janela

<i>Fonte de variação</i>	<i>SS</i>	<i>gl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>valor P</i>	<i>F crítico</i>
Cavidade	0,029	1	0,029	3,299	0,074	4,001
Turno	0,080	2	0,040	4,465	0,015	3,150
Interações	0,003	2	0,002	0,198	0,821	3,150
Erro	0,537	60	0,009			
Total	0,651	65				

Verifica-se, por comparação dos valores e F e $F_{critico}$, que não existem diferenças significativas entre as cavidades do mesmo turno. Contudo, quando se comparam os três turnos existem diferenças significativas entre eles.

- **Componente 3**

A tabela ANOVA para o componente 3 encontra-se representada pela tabela 3.4.

Tabela 3. 4 - Two-Way ANOVA Componente 3, Segunda Janela

<i>Fonte de variação</i>	<i>SS</i>	<i>gl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>valor P</i>	<i>F crítico</i>
Cavidade	0,003	1	0,003	0,036	0,848	3,920
Turno	2,934	2	1,467	17,879	1,6E-07	3,071
Interações	0,038	2	0,019	0,231	0,793	3,071
Erro	9,849	120	0,082			
Total	12,825	125				

Comparando os valores de F com os de $F_{critico}$, conclui-se que não existem diferenças significativas entre as cavidades do mesmo turno, ao contrário do que se conclui quando se comparam os três turnos.

- **Componente 4**

A tabela 3.5 corresponde à ANOVA para o componente 4.

Verifica-se que existem indícios para rejeitar a hipótese nula, uma vez que os valores de F são superiores aos de $F_{critico}$. Esta conclusão é válida quando se comparam as cavidades do mesmo turno e quando é feita a comparação dos três turnos.

Tabela 3. 5 - Two-Way ANOVA Componente 4, Segunda Janela

<i>Fonte de variação</i>	<i>SS</i>	<i>gl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>valor P</i>	<i>F crítico</i>
Cavidade	0,570	1	0,570	12,677	0,001	3,884
Turno	2,693	2	1,346	29,933	3,35E-12	3,037
Interações	0,154	2	0,077	1,716	0,182	3,037
Erro	9,718	216	0,044			
Total	13,137	221				

3.5.3.3. Terceira Janela

Para a terceira janela temporal foram considerados novamente os quatro componentes.

- **Componente 1**

A tabela abaixo apresentada, tabela 3.6, corresponde à tabela ANOVA para o componente 1.

Tabela 3. 6 - Two-Way ANOVA Componente 1, Terceira Janela

<i>Fonte de variação</i>	<i>SS</i>	<i>gl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>valor P</i>	<i>F crítico</i>
Cavidade	0,061	1	0,061	2,724	0,103	3,986
Turno	0,007	2	0,004	0,173	0,841	3,135
Interações	0,024	2	0,012	0,550	0,579	3,135
Erro	1,468	66	0,022			
Total	1,561	71				

Sendo os valores de F sempre inferiores aos valores de F crítico é possível afirmar que não existem diferenças nem entre cavidades, nem entre turnos.

- **Componente 2**

A tabela ANOVA para este componente encontra-se representa na tabela 3.7.

Tabela 3. 7 - Two-Way ANOVA Componente 2, Terceira Janela

<i>Fonte de variação</i>	<i>SS</i>	<i>gl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>valor P</i>	<i>F crítico</i>
Cavidade	0,011	1	0,011	0,889	0,349	4,001
Turno	0,009	2	0,004	0,359	0,699	3,150
Interações	0,014	2	0,007	0,592	0,556	3,150
Erro	0,736	60	0,012			
Total	0,771	65				

Analisando a tabela 3.7 é possível afirmar que, quer entre cavidades quer entre turnos, não existem indícios para que a hipótese nula seja rejeitada, pois os valores de F são sempre inferiores aos valores de F crítico.

- **Componente 3**

A tabela 3.8 corresponde à tabela ANOVA para o componente 3, segunda janela.

Tabela 3. 8 - Two-Way ANOVA Componente 3, Terceira Janela

<i>Fonte de variação</i>	<i>SS</i>	<i>gl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>valor P</i>	<i>F crítico</i>
Cavidade	0,006	1	0,006	0,105	0,746	4,019
Turno	0,243	2	0,121	1,982	0,147	3,168
Interações	0,055	2	0,027	0,453	0,637	3,168
Erro	3,320	54	0,061			
Total	3,626	59				

Uma vez que todos os valores de F são inferiores aos de F crítico, conclui-se que não existem diferenças significativas tanto entre turnos como entre cavidades.

- **Componente 4**

Relativamente a este componente, a tabela ANOVA encontram-se na tabela 3.9.

Tabela 3. 9 - Two-Way ANOVA Componente4, Terceira Janela

<i>Fonte de variação</i>	<i>SS</i>	<i>gl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>valor P</i>	<i>F crítico</i>
Cavidade	0,431	1	0,431	17,454	6,8E-05	3,946
Turno	0,112	2	0,056	2,283	0,107	3,097
Interações	0,129	2	0,064	2,623	0,078	3,097
Erro	2,222	90	0,024			
Total	2,896	95				

Fazendo uma análise aos valores de F obtidos para o teste entre cavidades, verifica-se que existem diferenças significativas. Contudo, quando se comparam as cavidades dos três turnos, não existem diferenças significativas.

Deste modo, o estudo será feito apenas considerando a terceira janela temporal uma vez que para as outras duas janelas existem diferenças significativas nos componentes, diferenças essas que nos componentes 1, 2 e 3 são entre turnos e no componente 4 é entre cavidades. Além disso é possível afirmar que em nenhum dos casos a interação é significativa.

3.5.4. Diagrama Causa-Efeito

Com a aplicação da análise preliminar de dados verificou-se, através da análise de *outliers*, a existência de valores estranhos obtidos através de uma má recolha dos dados e através da análise de variância verificou-se a existência de diferenças entre cavidades e entre turnos. De modo a perceber qual a sua fonte, realizou-se um diagrama Causa-Efeito onde foram colocadas as possíveis fontes de variação, considerando todos os intervenientes e processos associados ao processo de fabrico dos vários componentes que podem influenciar, de algum modo, o resultado final. O diagrama da figura 3.14 é válido para todos os componentes uma vez que o processo de fabrico de cada componente é bastante semelhante.

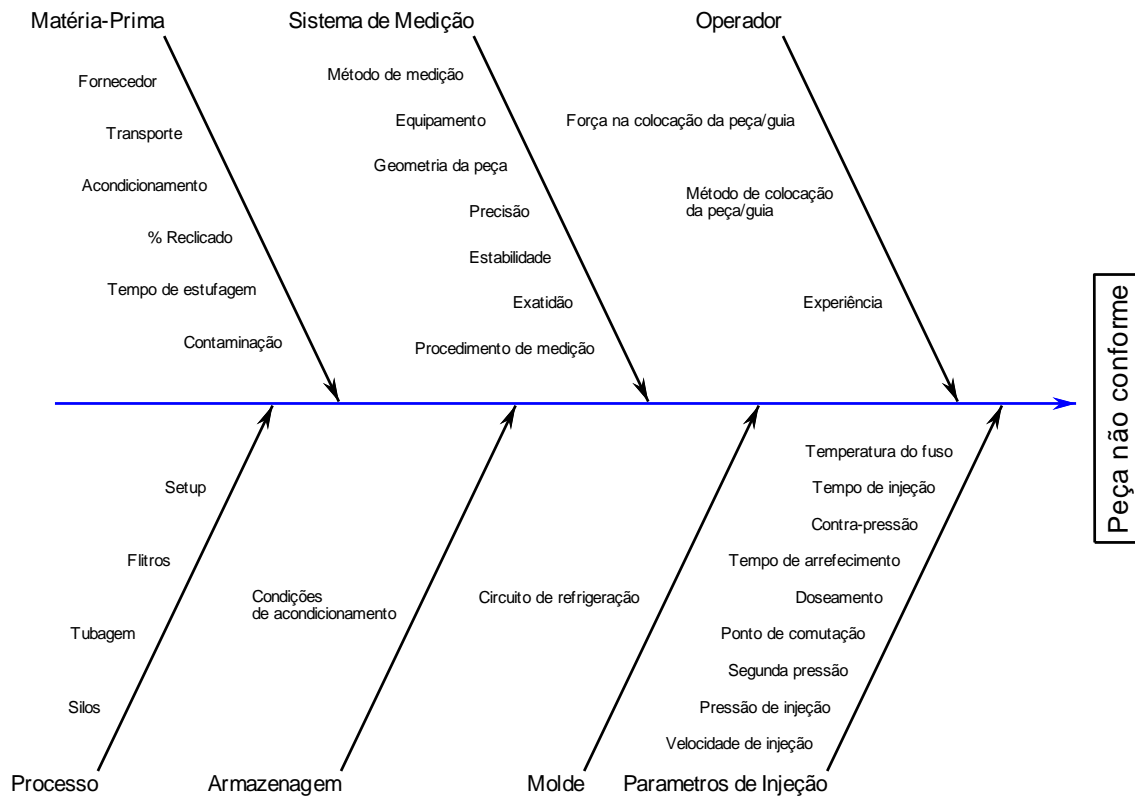


Figura 3. 14 - Diagrama Causa-Efeito para processo de medição

Uma vez que a matéria-prima pode ser uma fonte de variabilidade do processo, seria interessante aplicar um desenho de experiências com o objetivo de verificar a existência de diferenças entre lotes ou no próprio lote. Contudo, e devido à inexistência de um equipamento para esse fim, apenas é possível estudar o sistema de medição.

3.5.5. Estudo R&R

Uma vez que foram verificadas diferenças significativas entre turnos e pela construção do diagrama causa-efeito (figura 3.14) verificou-se que uma das fontes de variação pudesse ser o sistema de medição utilizado. Devendo esta ser uma das primeiras fontes de variação a ser estudada, uma vez que todos os dados utilizados provêm do sistema de medição, realizou-se um estudo R&R.



Figura 3. 15 - Equipamento de medição manual (CMM)

Com o intuito de avaliar o sistema de medição foi realizado um estudo de Repetibilidade e Reprodutibilidade ao equipamento de medição utilizado para a recolha de dados diários. O equipamento de medição é uma *Coordinate Measure Machine (CMM)* manual da *Mitutoyo*, representada na figura 3.15.

A condução do estudo teve por base os princípios definidos no capítulo 2.1, referente ao estudo R&R. Este estudo foi elaborado para três operadores e dez peças (m), às quais foram feitas três medições (r).

As medições foram feitas pelos três operadores encarregues de fazer o controlo dimensional das peças, representando cada operador um dos turnos.

A recolha das peças fez-se em períodos diferentes com o intuito de obter uma amostra representativa do processo produtivo.

Após recolha dos dados, procedeu-se ao seu tratamento utilizado o *software Statistica* para construção dos gráficos resumo da repetibilidade e reprodutibilidade e gráfico das médias.

3.5.5.1. *Componente 1*

A figura 3.16 corresponde à colocação da peça no equipamento de medição e recolha do resultado.

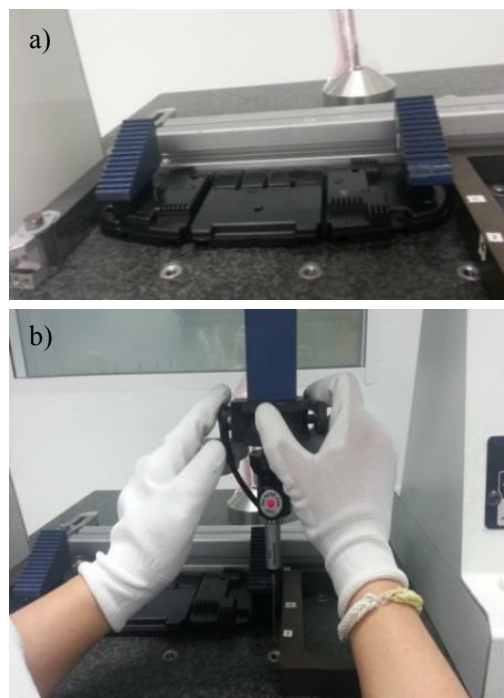


Figura 3. 16 - Procedimento de medição componente 1; a) colocação da peça no equipamento, b) recolha da dimensão

Após realização das medições por parte dos três operadores, procedeu-se à análise dos dados com recurso ao *Software Statistica*. A utilização do *software* tem com objetivo a obtenção de gráficos resumo da Repetibilidade e Reprodutibilidade que permitem verificar a exatidão e precisão de cada operador e gráficos da média por operador e peça. Os gráficos obtidos para o componente 1 encontram-se representados pelas figuras 3.17 e 3.18.

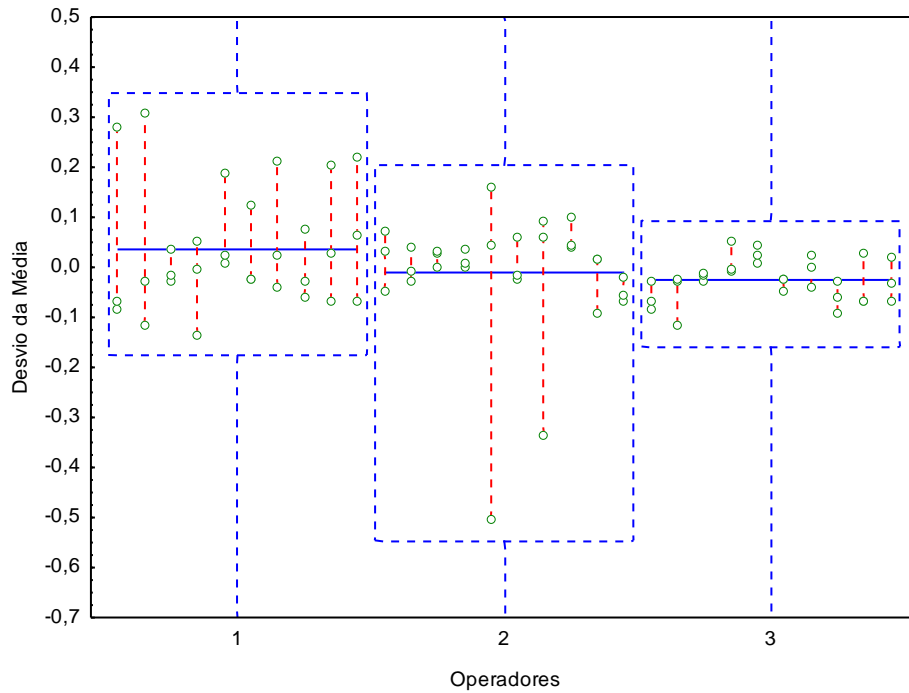


Figura 3. 17 - Gráfico resumo de Repetibilidade e Reprodutibilidade Componente 1

É possível verificar através da figura 3.17 que todos os operadores possuem uma exatidão idêntica, não sendo o desvio superior a 0,2 cm, embora o operador 2 apresente o maior desvio. No que diz respeito à precisão, o operador 3 é o que apresenta melhores resultados, uma vez que as diferenças entre medições são mínimas.

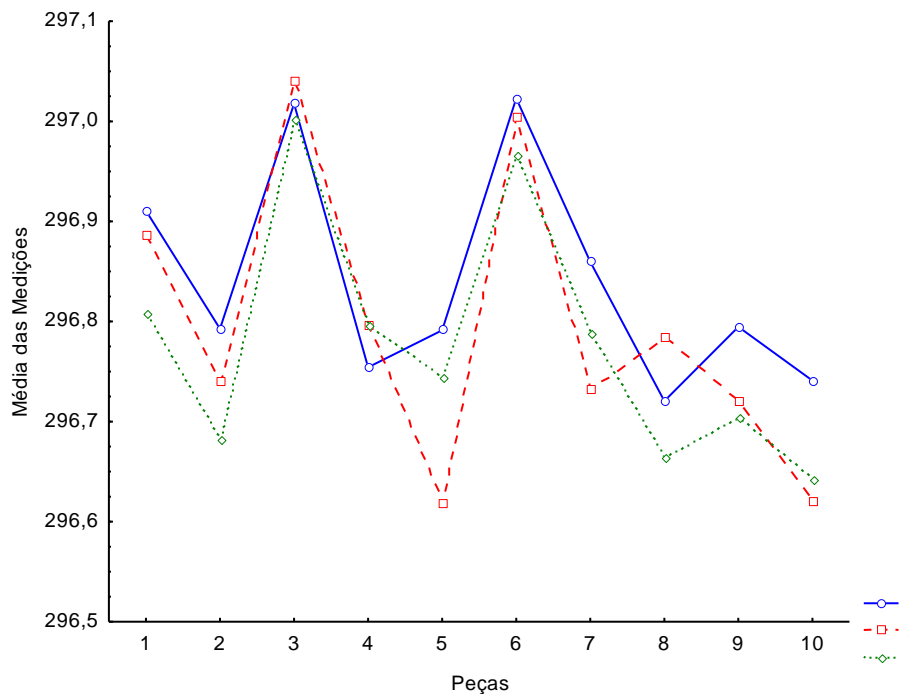


Figura 3. 18 - Média Por Operador e Peça Componente 1

No que diz respeito às médias por peça, verificam-se diferenças entre operadores, contudo os operadores 1 e 3, apresentam um comportamento semelhante relativamente às médias das várias

peças. As diferenças existentes podem resultar da colocação dos pesos de auxílio, vistos na figura 3.16, e da guia de auxílio. A colocação dos pesos tem como objetivo reduzir o empeno da peça, uma vez que esta é bastante maleável, no entanto a sua colocação em zonas diferentes pode não reduzir o empeno. A guia de medição é utilizada como auxiliar para a medição, na medida em que a dimensão é retirada na guia, devido à forma arredondada das peças. A força que é feita, quando se coloca a guia, pode causar empeno nas peças em medição.

3.5.5.2. Componente 2

O procedimento de medição para o componente 2 pode ser observado na figura 3.19.

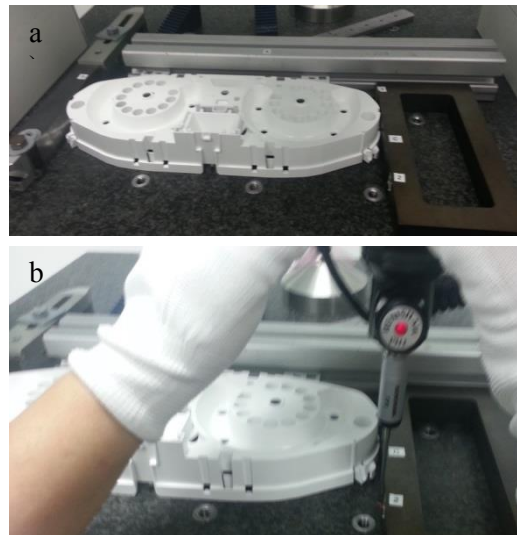


Figura 3. 19 - Procedimento de medição componente 2; a) colocação da peça no equipamento, b) recolha da dimensão

A recolha e tratamento dos dados para o componente 2 foram idênticos à do componente 1.

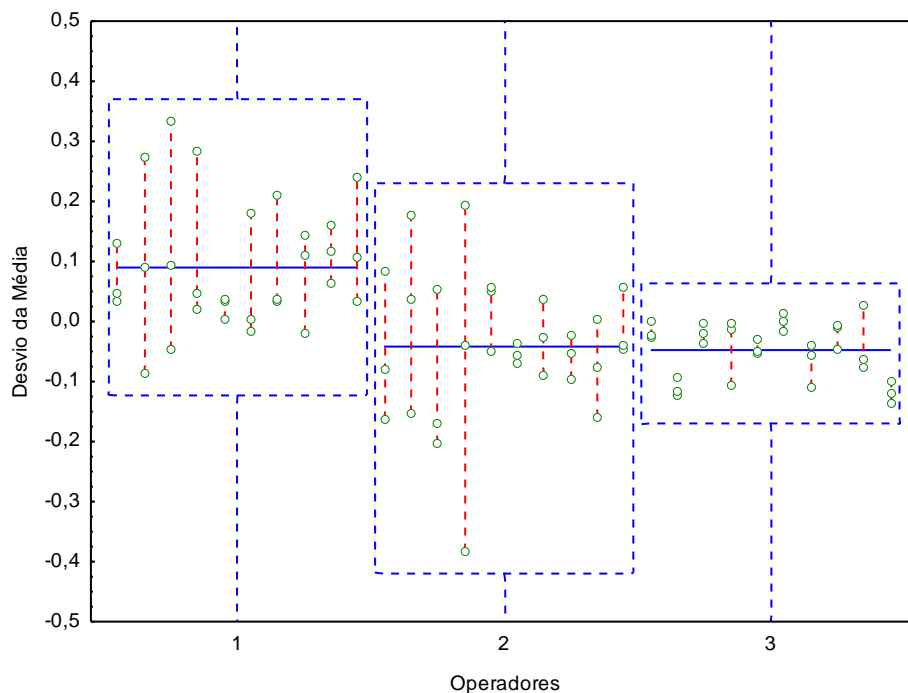


Figura 3. 20 - Gráfico resumo de Repetibilidade e Reprodutibilidade Componente 2

Ao analisar a figura 3.20 conclui-se que o operador 1 se destaca dos restantes, uma vez que apresenta um desvio maior relativamente ao valor zero, apresentando os restantes valores semelhantes de exatidão. Já na precisão, o operador 3 é o que apresenta melhores resultados, quando comparado com os restantes, devido à menor diferença entre as várias medições.

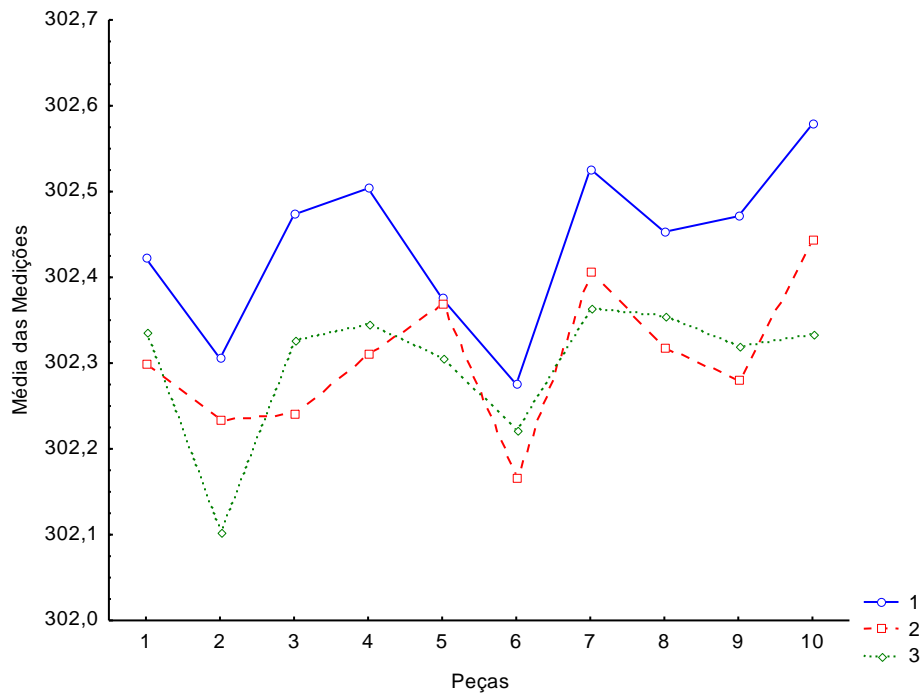


Figura 3. 21 - Média Por Operador e Peça Componente 2

A figura 3.21 corresponde à representação dos valores médios de cada peça por operador. Constata-se que existem diferenças entre os vários operadores, no entanto, todos os operadores exibem o mesmo comportamento nas peças 5, 6 e 7. Novamente, as variações nas medições entre operador podem surgir devido à força realizada pelo mesmo, ao colocar a guia de medição.

3.5.5.3. Componente 3

A figura 3.22 representa o procedimento de medição executado para a realização do estudo R&R para o componente 3.

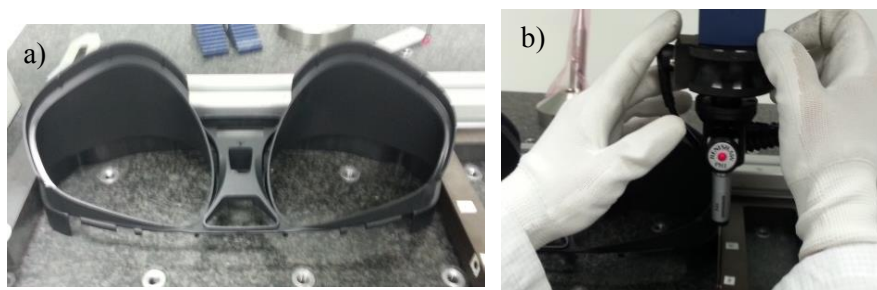


Figura 3. 22 - Procedimento de medição componente 3; a) colocação da peça no equipamento, b) recolha da dimensão

O tratamento dos dados para este componente teve por base o princípio aplicado para os componentes anteriores, obtendo-se os gráfico representados nas figuras 3.23 e 3.24.

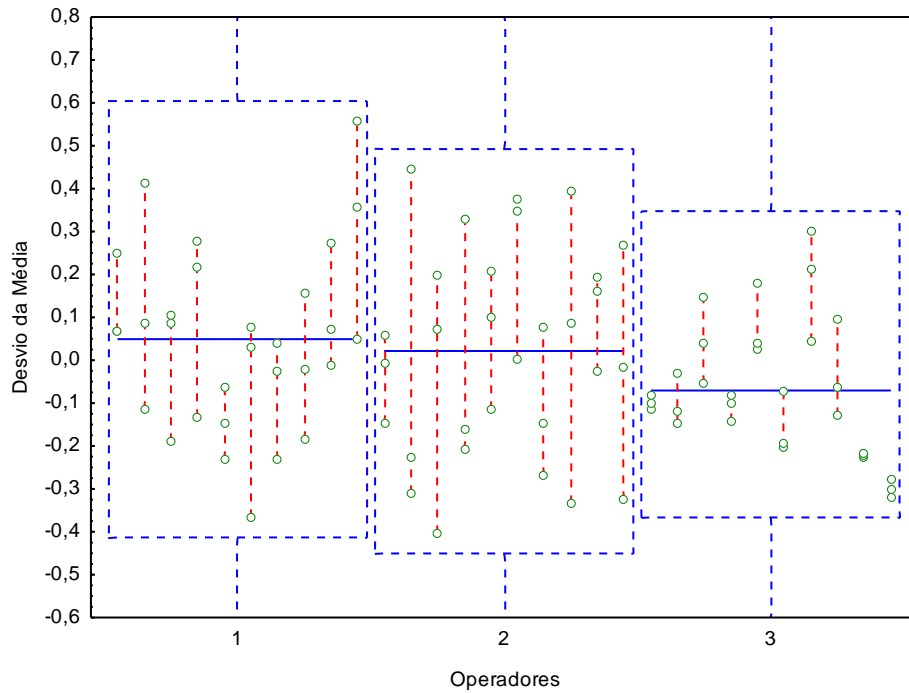


Figura 3. 23 - Gráfico resumo de Repetibilidade e Reprodutibilidade Componente 3

Relativamente ao componente 3 verifica-se a existência de uma exatidão semelhante entre operadores, não havendo desvios do eixo superiores a 0,1 mm. Quanto à precisão todos os operadores apresentam valores distintos nas medições retiradas, destacando-se o operador 3 pelas menores diferenças. As diferenças verificadas entre os vários operadores podem ser provocadas pelo próprio componente, uma vez que este é bastante maleável, o que significa que ao colocar a guia de auxílio à medição, o componente pode ficar mais ou menos restringido, originando as discrepâncias.

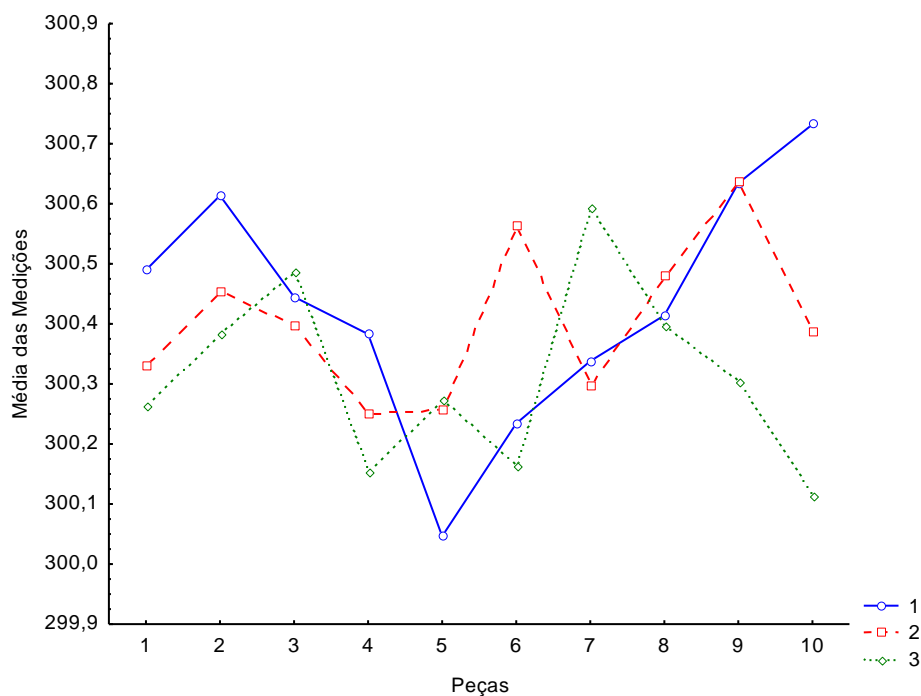


Figura 3. 24 - Média Por Operador e Peça Componente 3

Como é possível verificar através da análise da figura 3.24, todos os operadores apresentam valores médios diferentes para todas as amostras. Estas diferenças podem dever-se à força exercida pela colocação da guia de auxílio à medição, uma vez que este componente é bastante flexível.

3.5.5.4. Componente 4

O procedimento de medição para este componente encontra-se ilustrado na figura 3.25.

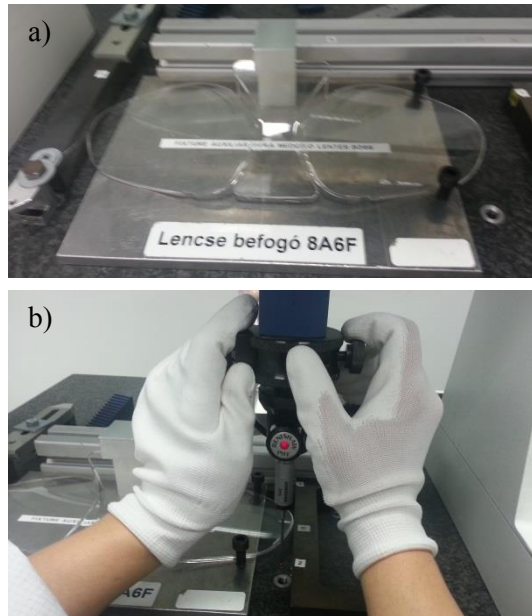


Figura 3. 25 - Procedimento de medição componente 4; a) colocação da peça no equipamento, b) recolha da dimensão

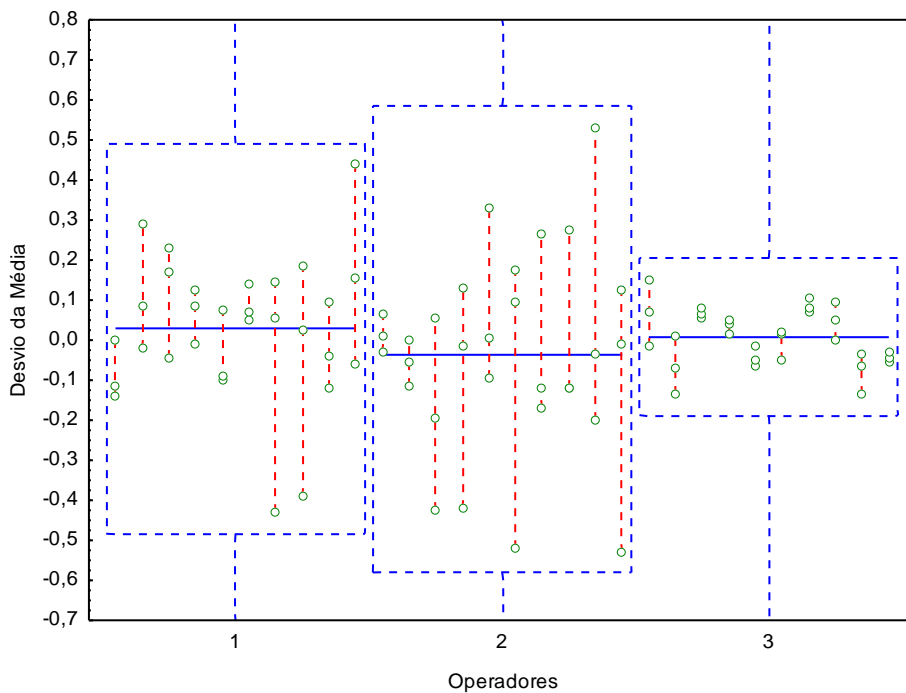


Figura 3. 26 - Gráfico resumo de Repetibilidade e Reproduzibilidade Componente 4

Analisando a figura 3.26 é possível verificar que em termos de exatidão todos os operadores apresentam valores semelhantes, uma vez que os desvios não são superiores a 0,1 mm. Contudo, em termos de precisão, todos os operadores apresentam valores bastante diferentes por medição, salientando-se o operador 3, que apresenta uma maior precisão relativamente aos restantes. Como é possível verificar pela figura 3.25 uma das fontes de variação é o corte da peça, que ao ser colocada no *fixture* pode ficar deslocada, tirando-se uma medida que não é a correta, bem como a força utilizada na colocação da guia de auxílio à medição.

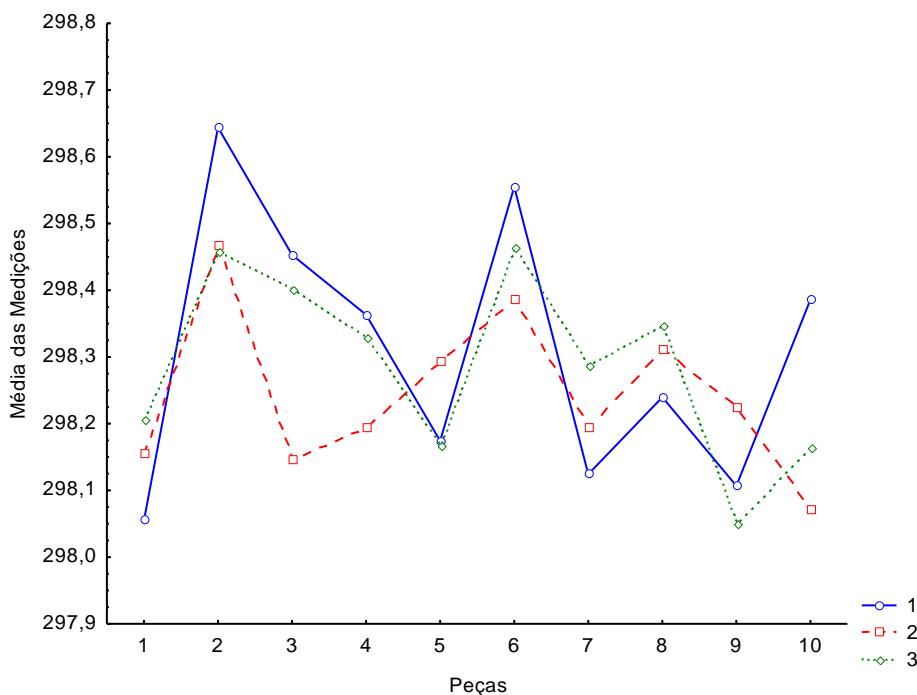


Figura 3.27 - Média por Operador e Peça Componente 4

A figura 3.27 apresenta o valor médio de cada peça para cada operador considerando as 3 medições. Como se pode observar os operadores 1 e 3 apresentam um comportamento semelhante para todas as peças.

No geral todos os operadores apresentam resultados maus no que diz respeito à repetibilidade, podendo estas diferenças advir da força exercida pelo operador aquando da colocação da guia de medição ou erros do equipamento.

3.5.5.5. Cálculo da Repetibilidade e Reprodutibilidade

Após ter sido feita a análise relativa à exatidão e precisão de cada operador, procedeu-se ao cálculo dos desvios da repetibilidade ($\hat{\sigma}_{VE}$), reprodutibilidade ($\hat{\sigma}_{VO}$), repetibilidade (VE) e reprodutibilidade (VO), variação peça a peça (VP) e variação total (VT), utilizando as expressões referidas no ponto 2.3.1. Os resultados obtidos encontram-se discriminados na tabela 3.10.

Pela tabela 3.10 é possível verificar que os dados apresentam muita repetibilidade e pouca reprodutibilidade. Isto significa que cada operador não obtém valores idênticos nas várias medições que realiza, o que significa que o sistema de medição não é o adequado. Para todos os componentes o valor de R&R é superior a 30% que, segundo o critério de aceitação, caracteriza o instrumento de medição como não aceitável.

Tabela 3. 10 - Tabela Resumo da Repetibilidade e Reprodutibilidade

	Componente 1			Componente 2		
	Desvio	Variação	% Variação	Desvio	Variação	% Variação
VE	0,09	0,462	61,89	0,088	0,455	65,222
VO	0,027	0,164	22,013	0,07	0,37	53,109
R&R	0,094	0,483	64,709	0,113	0,581	83,263
Vp	0,111	0,352	47,077	0,075	0,239	34,198
VT	0,145	0,747	100	0,135	0,698	100
	Componente 3			Componente 4		
	Desvio	Variação	% Variação	Desvio	Variação	% Variação
VE	0,184	0,947	84,389	0,164	0,843	78,507
VO	0,053	0,323	28,751	0,034	0,178	16,54
R&R	0,191	0,985	87,811	0,167	0,861	80,23
Vp	0,104	0,332	29,544	0,124	0,396	36,858
VT	0,218	1,122	100	0,208	1,073	100

Após o cálculo dos valores de repetibilidade e reprodutibilidade, calculou-se o número de características distintas para todos os componentes. Os resultados encontram-se apresentados na tabela 3.11.

Tabela 3. 11 - Tabela resumo para NC

Componente	NC
1	1,661
2	0,937
3	0,768
4	1,049

Os valores de NC, expostos na tabela 3.11, para cada um dos componentes, revelam que o equipamento de medição é inadequado, uma vez que todos os componentes apresentam valores inferiores a 2, devendo apresentar um valor superior a 5 para ser aceite.

Com os resultados obtidos conclui-se que os operadores medem todos de igual modo, contudo o método de medição não é o correto, sendo crucial implementar medidas de melhoria ao sistema de medição.

Com o intuito de se confirmar que o sistema de medição não é o adequado para a situação em questão, isolou-se o melhor operador, sendo calculada a sua Repetibilidade. A tabela 3.11 apresenta os valores de repetibilidade obtidos com recurso ao *software Statistica*.

Analisando os valores de Repetibilidade da tabela 3.11, é possível verificar que estes apresentam valores aceitáveis inferiores a 15%. Isto significa que, ao contrário do que se concluiu no estudo R&R para três operadores, o sistema de medição apresenta Repetibilidade.

Tabela 3. 12 - Tabela Resumo para o melhor Operador

	Componente 1			Componente 2		
	Desvio	Variação	% Variação	Desvio	Variação	% Variação
VE	0,035	0,001	7,95%	0,031	0,001	13,66%
Vp	0,120	0,014	92,05%	0,078	0,006	86,34%
VT	0,125	0,016	100	0,084	0,007	100
	Componente 3			Componente 4		
	Desvio	Variação	% Variação	Desvio	Variação	% Variação
VE	0,076	0,006	21,08%	0,045	0,002	9,88%
Vp	0,148	0,148	78,92%	0,135	0,018	90,12%
VT	0,166	0,166	100	0,142	0,020	100

Para se perceber se a variação induzida ao processo é causada pelo equipamento de medição ou pela amostra, replicou-se o estudo com blocos-padrão da mesma ordem de grandeza dos componentes em estudo.

Tabela 3. 13 - Tabela resumo para blocos-padrão

	Desvio	% Variação
VE	0,002	8,82%
Vp	0,007	91,18%
VT	0,007	100

Os resultados obtidos permitem confirmar que a maior parte da variação apresentada pelo sistema é causada pela amostra. Conclui-se então que o sistema de medição não é robusto o suficiente para absorver a variação das peças, sendo necessário aplicar medidas de melhoria de modo a mitigar a variação induzida.

3.5.6. Controlo Estatístico do Processo

O estudo de *outliers* foi feito com o objetivo de eliminar valores estranhos ao processo que possam influenciar a análise de variâncias. De seguida foi feita a análise de variância com o intuito de se verificar a existência de diferenças entre as cavidades para se juntarem os dados de ambas as cavidades. Posto isto, procedeu-se à elaboração das cartas de controlo.

Havendo a possibilidade de utilizar, na Fase I, tanto a carta $\bar{X} - R$ como a carta $\bar{X} - S$, devido à dimensão da amostra optou-se pela utilização da segunda, pois o desvio padrão é um indicador mais eficiente da variabilidade do processo para amostras de maiores dimensões. Na Fase II do processo, optou-se por cartas *EWMA* uma vez que estas permitem detetar variações pequenas na média, considerando sempre os dados recentes em detrimento de uma carta de controlo de *Shewhart*, que apenas considera os valores do instante em que se está a trabalhar.

A construção das cartas seguiu os princípios das cartas de controlo definidos no tópico 2.1.7 e as constantes utilizadas foram retiradas da tabela de constantes para cartas tradicionais de variáveis (Anexo I, Tabela I.4), para uma amostra de dimensão 3.

$$A_3 = 1,954$$

$$B_3 = 0$$

$$B_4 = 2,568$$

$$c_4 = 0,8802$$

É crucial referir que todos os dados utilizados na elaboração das cartas de controlo foram recolhidos pelo operador que apresentava melhores resultados de Repetibilidade.

3.5.6.1. Fase I – Carta $\bar{X} - S$

Para a elaboração destas cartas foi utilizada uma amostra de dimensão $n = 50$, com 3 observações por amostra. O *software* utilizado para construir as cartas foi o *Microsoft Excel*.

- **Componente 1**

A figura 3.28 corresponde às cartas \bar{X} e S revistas do componente 1. A primeira iteração pode ser consultada no Anexo III, figura III.1.

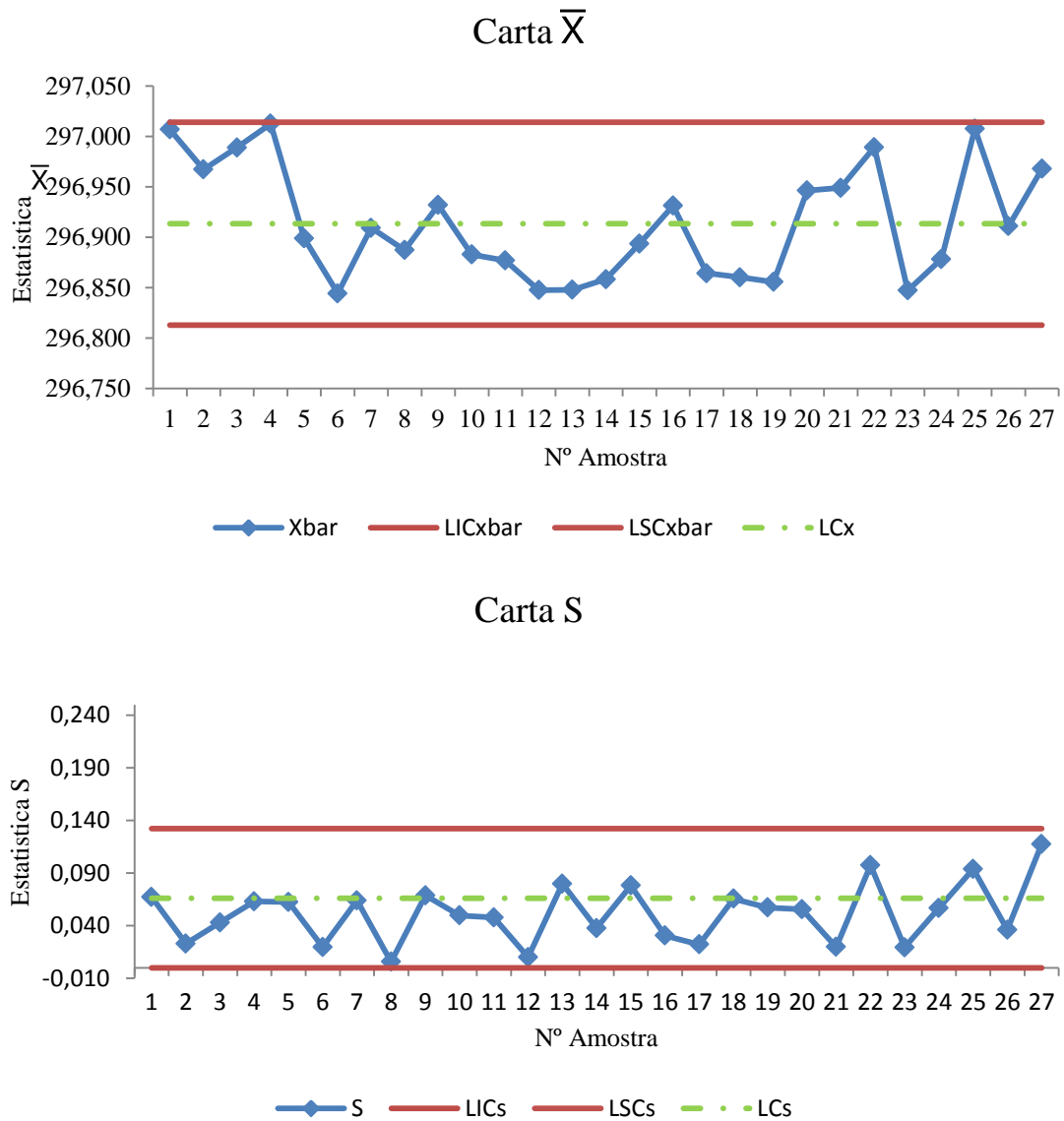


Figura 3. 28 - Carta de Controlo $\bar{X} - S$ Revista Componente 1

Após a remoção de 12 pontos na primeira iteração e 1 ponto na segunda, obtiveram-se as cartas representadas na figura 3.28. Apesar de se verificarem 2 regras para a deteção de causas especiais nas cartas revistas, nomeadamente regra 5 e regra 6, estas não vão ser consideradas para garantir um $ARL_{EC} = 370$.

Através da observação da carta $\bar{X} - S$ é possível afirmar que o processo se encontra sob controlo estatístico, uma vez que nenhum dos pontos se encontra fora dos limites de controlo e o processo tem como parâmetros, $\mu = 296,919 \text{ mm}$ e $\sigma = 0,06 \text{ mm}$.

- **Componente 2**

O tipo de tratamento feito aos dados para este componente, foi idêntico ao aplicado no componente anterior. Os gráficos revistos da média e desvio estão representados na figura 3.29.

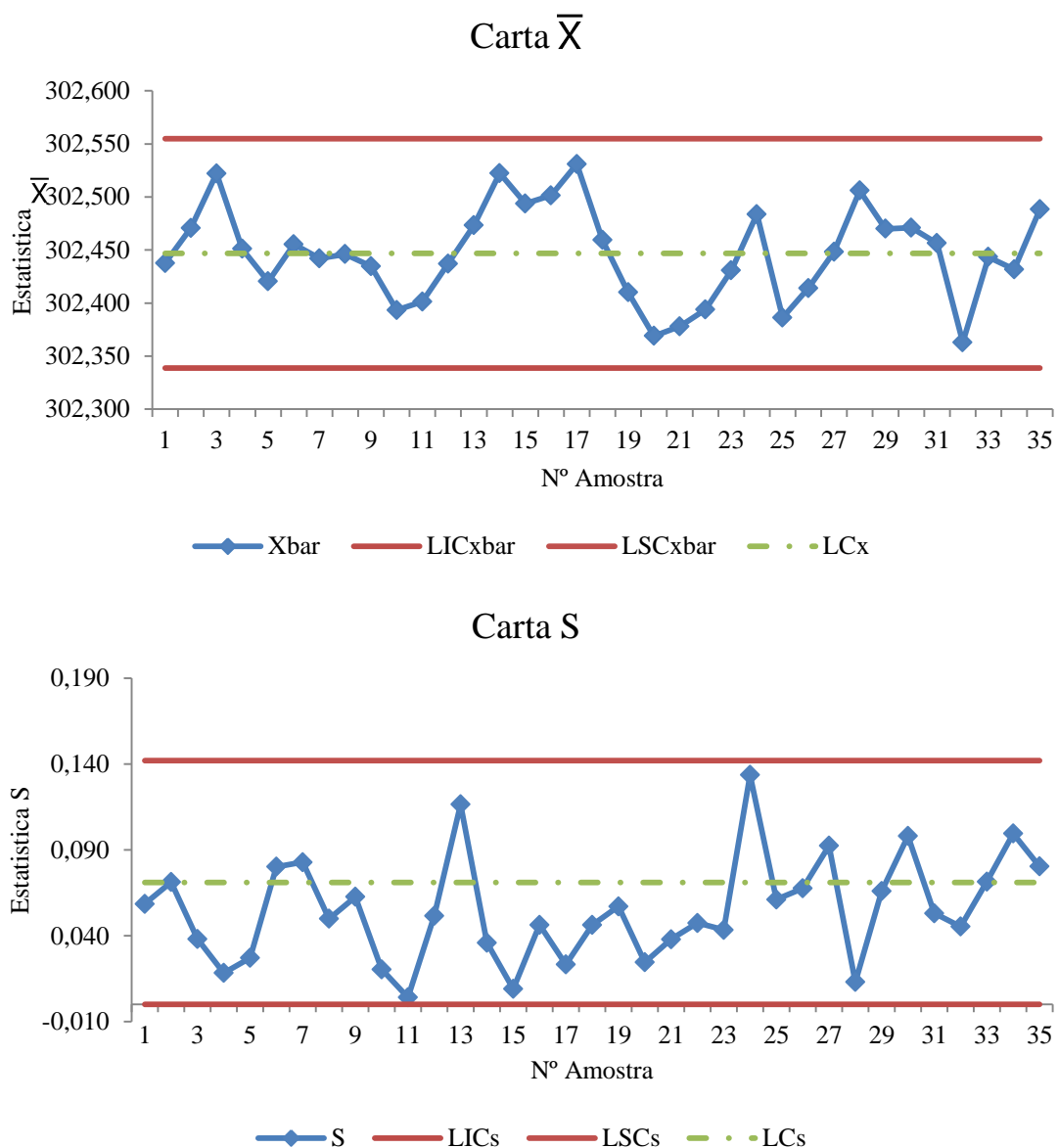


Figura 3. 29 - Carta de Controlo $\bar{X} - S$ revista Componente 2

Foi necessário proceder à remoção de vários pontos fora de controlo. Numa primeira fase foram removidos 13 pontos e numa segunda fase foram removidos 2 pontos. Após a remoção dos 15 pontos é possível afirmar que o processo se encontra controlado estatisticamente, sem a presença de nenhuma das regras para a deteção de causas especiais, sendo os seus parâmetros $\mu = 302,447 \text{ mm}$ e $\sigma = 0,062 \text{ mm}$.

As cartas intermédias podem ser consultadas no Anexo III, figura III.2.

- **Componente 3**

A representação das cartas de controlo revistas para o componente 3 encontram-se representadas na figura 3.30, estando a carta original no Anexo III, figura III.3.

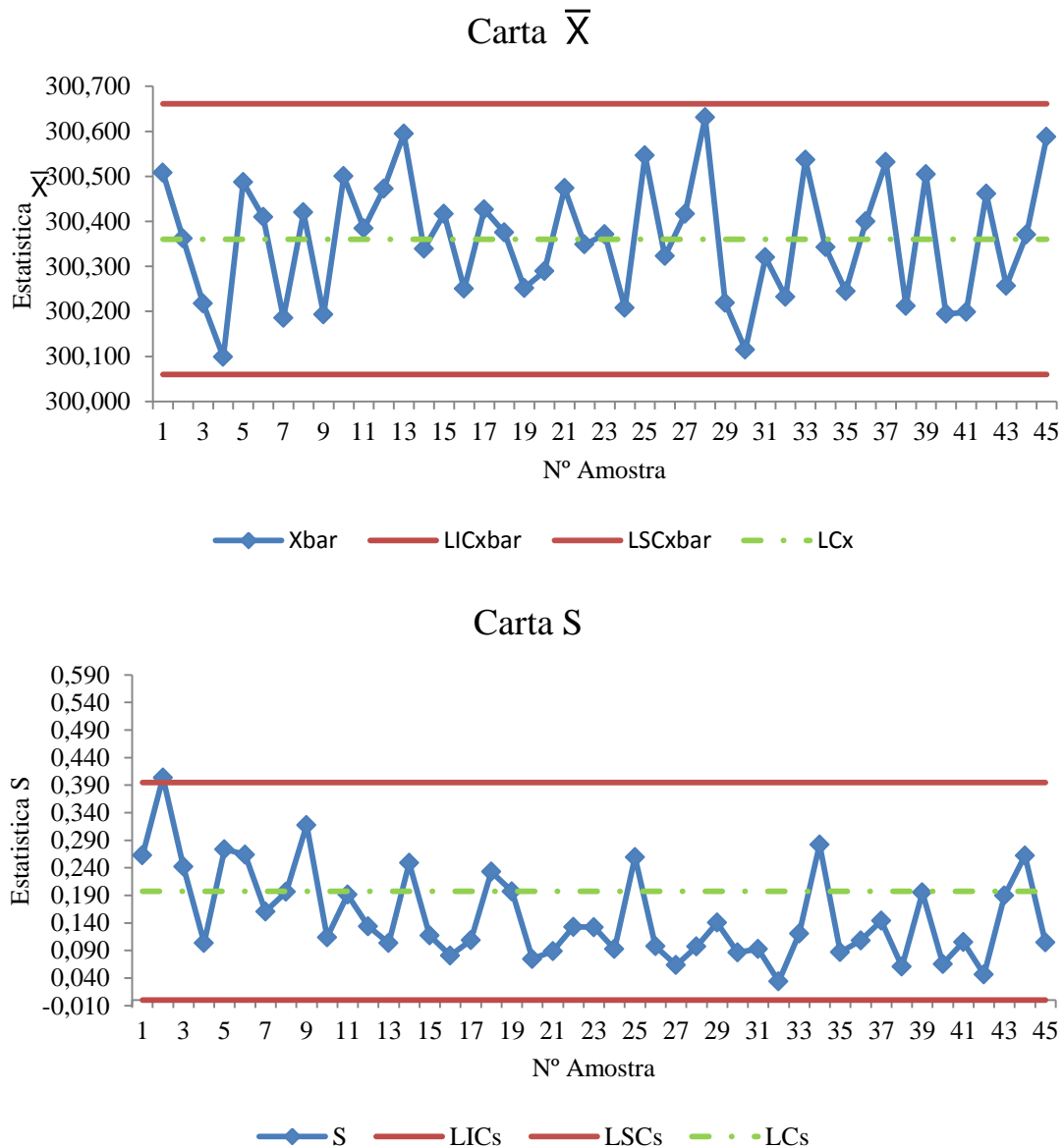


Figura 3.30 - Carta de Controlo $\bar{X} - S$ Revista Componente 3

As cartas representadas na figura 3.30 correspondem à versão revista das cartas $\bar{X} - S$ para o componente 3. Para obtenção destas cartas foi necessário eliminar 5 pontos para garantir que o processo se encontra sob controlo estatístico sem a presença de nenhuma das regras para a

deteção de causas especiais. No que diz respeito aos parâmetros do processo, o valor médio e desvio padrão são respetivamente, $\mu = 300,360 \text{ mm}$ e $\sigma = 0,167 \text{ mm}$.

- **Componente 4**

A aplicação das cartas de controlo para este componente implicou a divisão dos dados por cavidade, uma vez que a análise de variância do mesmo apresentava diferenças significativas. Para fins académicos construiu-se a carta $\bar{X} - S$ para se obter uma estimativa do comportamento do processo.

Cavidade 1

A carta $\bar{X} - S$ revista para a cavidade 1 do componente 4, encontra-se representada na figura 3.31. A versão original pode ser consultado na figura III.4, Anexo III.

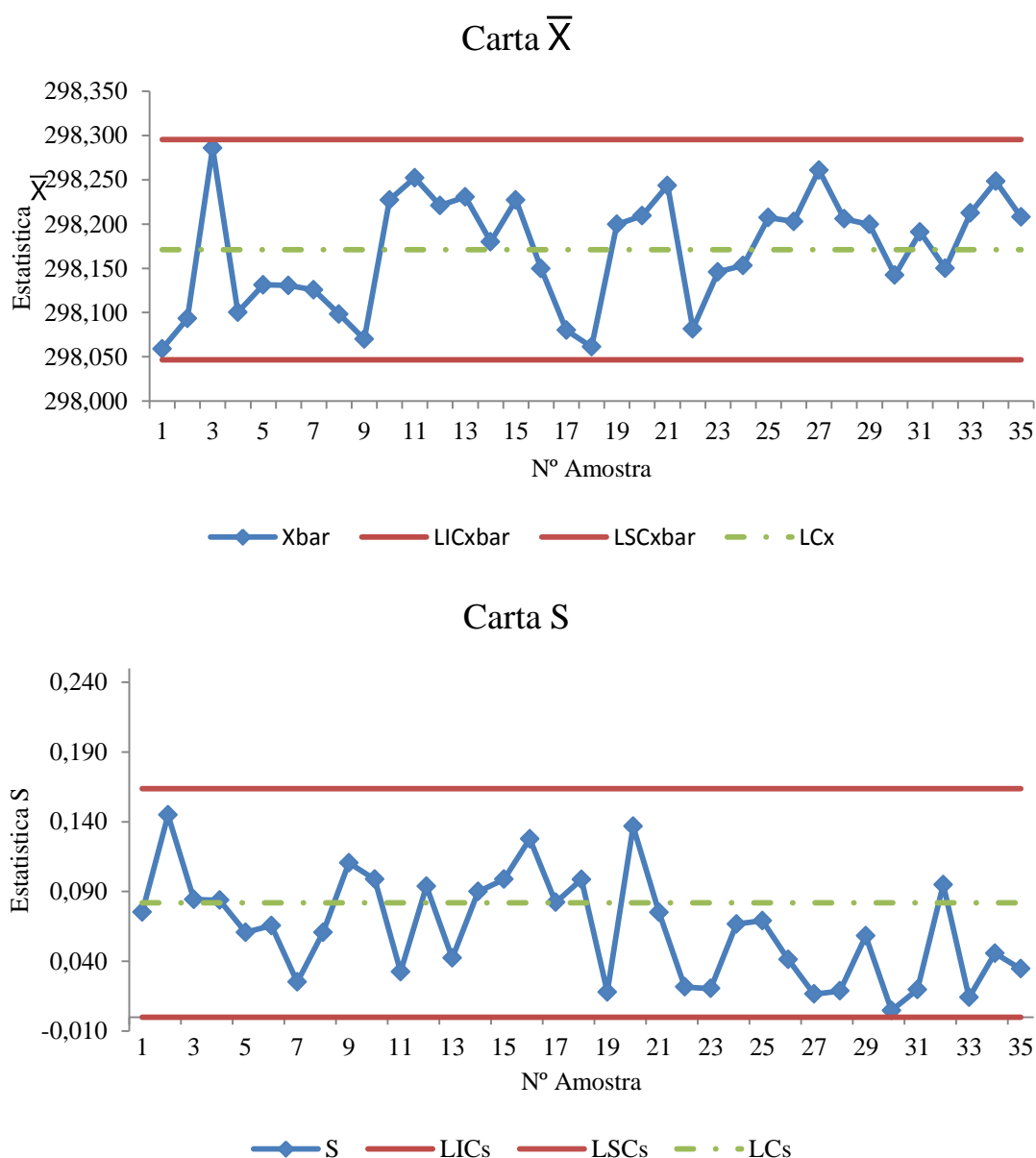


Figura 3. 31 - Carta de Controlo $\bar{X} - S$ Revista Componente 4, Cavidade 1

Para se obter um processo sob controlo estatístico foi necessário proceder à remoção de 15 pontos, obtendo-se a carta representada na figura 3.31.

O processo apresenta como parâmetros, $\mu = 298,171 \text{ mm}$ e $s = 0,072 \text{ mm}$.

Verifica-se a presença das regras 5 e 6, contudo estas não vão ser consideradas para garantir um $ARL_{EC} = 370$.

Cavidade 2

A carta representada na figura 3.32 corresponde à versão revista da carta $\bar{X} - S$ para a cavidade 2 do componente 1. A versão original encontra-se no Anexo III, figura III.5.

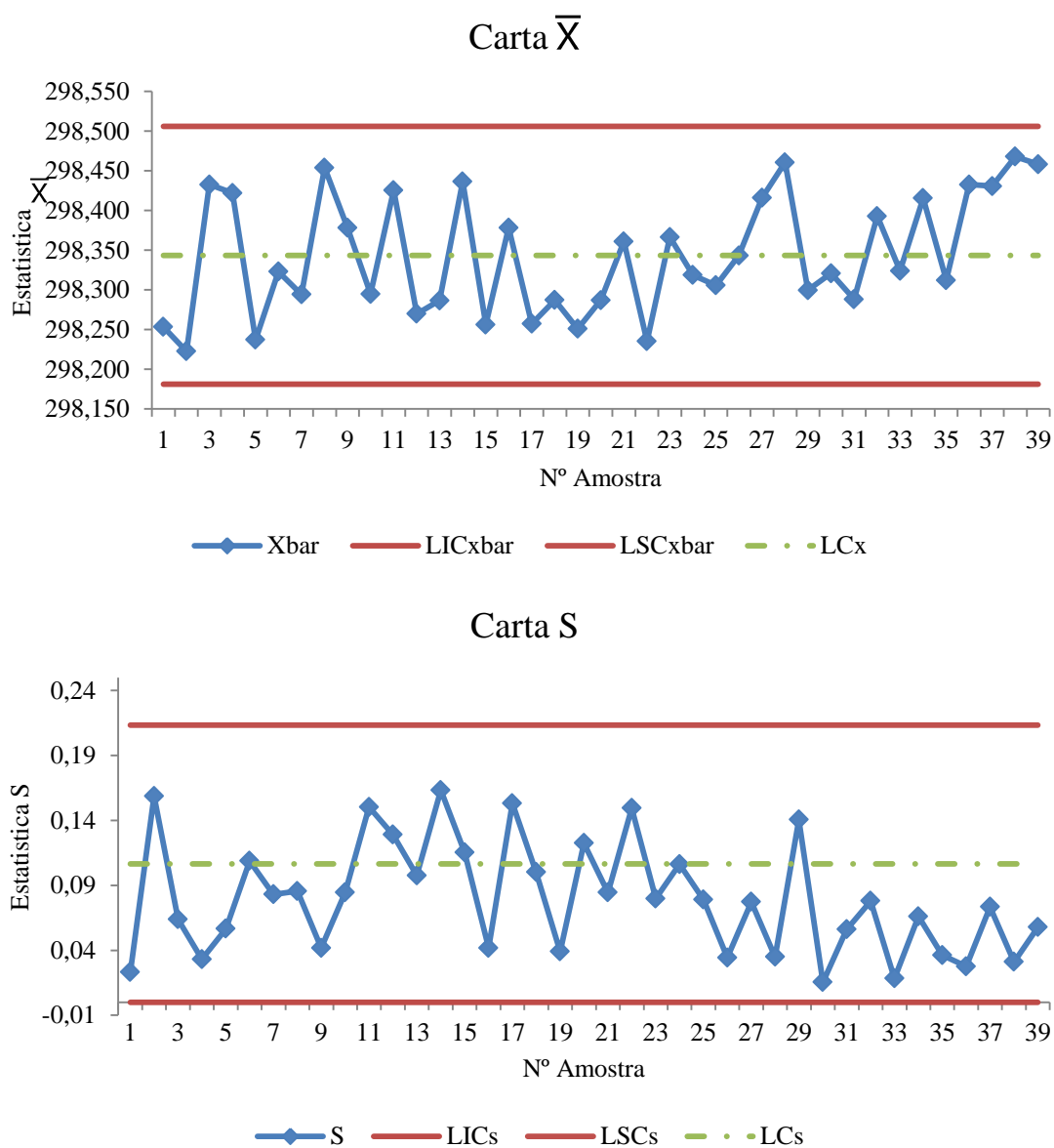


Figura 3. 32 - Carta de Controlo $\bar{X} - S$ Revista Componente 4, Cavidade 2

A versão revista da carta $\bar{X} - S$ para a cavidade 2 foi obtida através da remoção de 11 pontos que se encontravam fora de controlo, garantindo deste modo, que o processo se encontra sob controlo estatístico.

Para a cavidade 2 não se verifica a presença de nenhuma das regras para a deteção de causas especiais.

No que diz respeito aos parâmetros do processo estão são, $\mu = 298,344 \text{ mm}$ e $\sigma = 0,094 \text{ mm}$.

É de salientar que a remoção de 13 pontos para o componente 1, 15 para o componente 2, 5 para o componente 3 e de 15 e 11 pontos para as cavidades 1 e 2, respetivamente, do componente 4, não corresponde a causas especiais. A eliminação daqueles pontos num total de 50, não corresponde a causas especiais mas sim a um indicador da grande variabilidade da média do processo.

3.5.6.2. Capacidade do Processo

Após o processo estar estabilizado e sob controlo estatístico, procedeu-se ao cálculo da capacidade.

A tabela 3.14 corresponde a uma tabela resumo dos valores dos parâmetros estimados, assim como os C_{pk} , C_{pki} , C_{pks} de cada um dos quatro componentes.

Tabela 3. 14 - Tabela Resumo da Capacidade

Componente	μ	σ	C_p	C_{pk}	C_{pki}	C_{pks}	
1	296,919	0,060	2,781	1,775	1,775	3,786	
2	302,447	0,062	3,205	1,887	4,523	1,887	
3	300,360	0,167	0,599	-1,875	-1,875	3,073	
4	Cavidade 1	298,171	0,079	2,317	1,571	3,064	1,571
	Cavidade 2	298,344	0,094	1,778	0,592	2,964	0,592

Através da análise da tabela 3.14 verifica-se que o componente 3 não apresenta capacidade. O componente 3 apresenta-se deslocado para a esquerda do valor limite inferior de especificação, uma vez que apresenta um valor C_{pk} negativo. Relativamente aos componentes 1 e 2, apresentam capacidade, sendo capazes de produzir de acordo com a sua especificação. Por sua vez o componente 4 apresenta capacidade para a cavidade 1, sendo $C_{pk} > 1,33$ e não para a cavidade 2, o que vem confirmar a diferença de médias existente entre cavidades. Apesar dos componentes 1 e 2 possuírem capacidade para produzir de acordo com as especificações (não apresentadas neste documento por política da empresa) os processos não se encontram centrados. O mesmo se verifica para os outros dois componentes.

3.5.6.3. Fase II – Carta EWMA

Após se verificar quais os componentes cujo processo se encontrava sob controlo estatístico e apresentava capacidade para produzir de acordo com a sua especificação, prosseguiu-se para a Fase II do controlo estatístico do processo. Deste modo continuou-se com o estudo para os componentes 1 e 2. Nesta fase foram considerados os valores imediatamente a seguir à última observação da Fase I. Cada amostra tem uma dimensão, n , igual a 3. Para todos os componentes foi considerada uma alteração (Δ) na média de 1σ , uma vez que os processos não são estáveis, sendo um valor mais baixo mais exigente. A variação é dada por:

$$\Delta = \frac{\delta \times \sigma}{\sqrt{n}} \quad (3.1)$$

Como se pretende detetar uma alteração na média de 1σ , $\Delta = 1\sigma$, igualando este à expressão 3.1 obtém-se um valor de $\delta = 1,73$ para um ARL_{EC} de 370.

Tendo em consideração estes valores, é possível recorrer aos ábacos de *Crowder* apresentados no Anexo I, figuras I.1 e I.3 e determinar os parâmetros a utilizar na construção das cartas da Fase II. Os parâmetros são:

$$\lambda = 0,28$$

$$K = 2,9$$

Selecionados os parâmetros procedeu-se à construção das cartas *EWMA* para os componentes 1 e 2, utilizando as expressões mencionados no ponto 2.4.3.2.

- **Componente 1**

A figura 3.33 corresponde à carta EWMA para o componente 1.

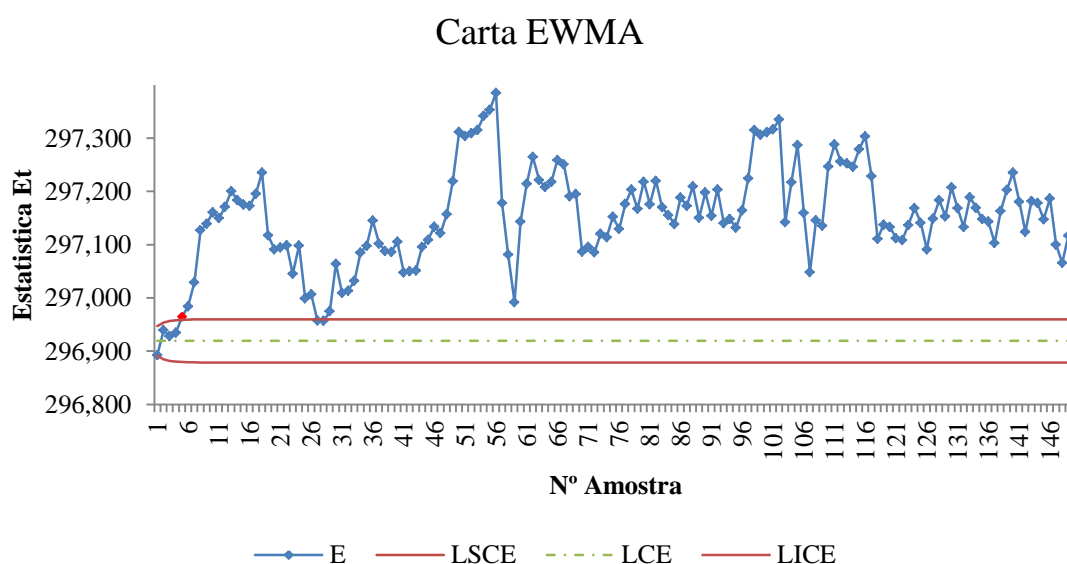


Figura 3. 33 – Carta EWMA para Componente 1

Interpretando os resultados obtidos na carta EWMA para o componente 1, verifica-se que a partir do ponto 5 ocorreu uma alteração na média de pelo menos 1σ . É possível observar grandes oscilações e tendências nos valores da estatística E_t .

- **Componente 2**

A carta de controlo EWMA para o componente 2 encontra-se representada na figura 3.34.

Verifica-se, através da análise da carta de controlo, que a partir do ponto 1 ocorreu uma alteração na média do processo de pelo menos 1σ . Além disso é possível verificar a existência de tendências nos dados, isto é, a existência de períodos onde os valores se encontram abaixo do limite inferior de controlo e acima do limite superior de controlo. Estas tendências não podem ser atribuídas a parâmetros de injeção ou à matéria-prima, devido à falta de meios para registo dos mesmos. O aumento da temperatura na nave industrial na zona de produção poderá também

ser um fator causador destas variações. Não sendo possível fazer esta afirmação com exatidão, torna-se necessário realizar estudos nesse âmbito.

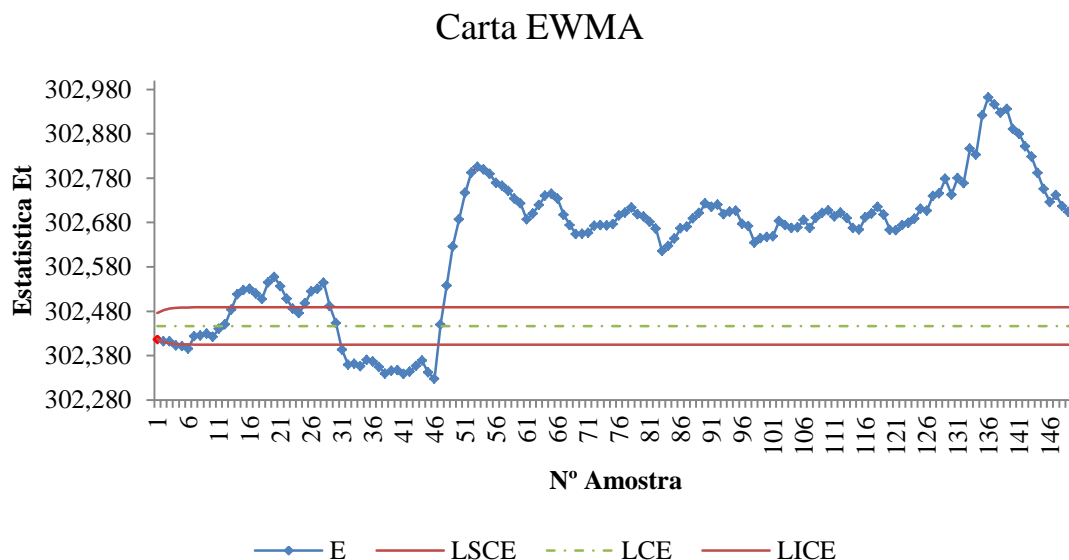


Figura 3. 34 –Carta EWMA para Componente 2

Uma vez que o processo dos vários componentes se apresenta fora de controle ao fim de um número bastante baixo de amostras e a existência de tendências para os pontos se apresentarem durante alguns períodos acima ou abaixo dos limites de controle, suspeita-se da existência de diferenças significativas entre as médias das duas fases do processo de controle. Para confirmar que realmente existem diferenças, aplicou-se um teste *t-Student* bilateral aos vários componentes. A formulação das hipóteses foi a seguinte:

$$H_0 : \text{n\~{o} existem diferen\c{c}as entre as m\~{e}dias}$$

$$H_1 : \text{existe pelo menos uma m\~{e}dia diferente}$$

O nívél de significância escolhido foi de 5% com um intervalo de confiança de 95%. Isto significa que a hipótese nula será rejeitada se o valor do teste for inferior a 5%.

A ferramenta utilizada para aplicação do teste foi o *Microsoft Excel*, com o qual se obtiveram os valores indicados na tabela 3.14.

Tabela 3. 15 - Tabela resumo com os valores de *p*

Componente	<i>p</i>
1	$1,211 \times 10^{-35}$
2	$5,101 \times 10^{-74}$

Como os valores *p* são claramente inferiores a 0 para todos os componentes, rejeita-se a hipótese nula em ambos os testes.

Sendo um dos pressupostos para a aplicação da Fase II a igualdade de médias, esta não se verificando, como demonstra o teste *t*, a aplicação de cartas de controle fica comprometida, pois

o cálculo dos limites de controlo das cartas *EWMA* é feito com base nos parâmetros calculados na Fase I.

3.5.7. Desenho de Experiências *Two-way ANOVA*

Após a constatação que para o período de tempo estudado na Fase I, o componente 1 apresentava capacidade, escolheu-se este para realizar um desenho de experiências. A seleção deste componente também se deve à disponibilidade da máquina para a realização do estudo, o que não se verificou com os restantes, devido à taxa de ocupação dos equipamentos. Com o intuito de se perceber se a percentagem de matéria-prima reciclada utilizada tinha algum impacto dimensional na peça, aplicou-se um Desenho de Experiências. Uma vez que a máquina estaria indisponível para a produção de peças, adicionou-se outro fator, de modo a verificar se a sua variação influenciava a dimensão da peça. A resposta (*y*) selecionada foi o comprimento total da peça. Após discussão com o Engenheiro do Processo, o segundo fator controlável selecionado foi a segunda pressão, que corresponde à resistência do plástico fundido ao avançar na máquina de injeção.

3.5.7.1. Seleção do tipo de desenho, fatores e níveis

A escolha do tipo de desenho a aplicar, baseou-se na possibilidade de estudar os vários tipos de comportamento dos fatores controláveis, sendo este o critério para a aplicação deste tipo de desenho de experiências.

No que diz respeito à escolha dos níveis a utilizar no desenho, foi necessário consultar o Engenheiro de Processo e o responsável pela matéria-prima, cuja experiência permite uma seleção de níveis mais concreta.

Relativamente aos valores de percentagem de matéria-prima reciclada a utilizar, após falar com o responsável, concluiu-se que a proporção mais elevada com que se pode trabalhar é 50%, uma vez que para valores superiores a peça não apresenta as características mecânicas necessárias para continuar no processo. Assim sendo, esta proporção foi definida com nível 1. Os restantes níveis consistem em 0% para o nível baixo e 25% para o nível intermédio, de modo a garantir uma uniformidade entre níveis.

A figura 3.38 representa o desenho composto central para o desenho de experiências escolhido.

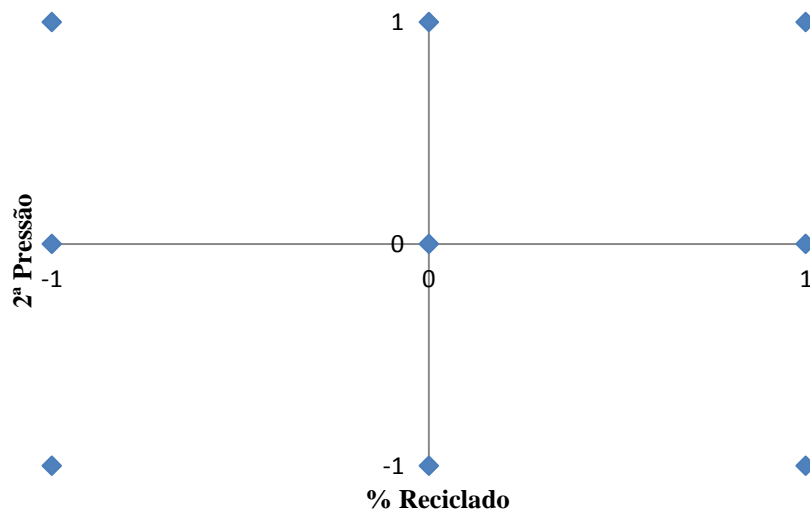


Figura 3. 35 - Desenho Composto Central

Como referido anteriormente, os níveis escolhidos para a 2ª pressão foram discutidos com o Engenheiro de Processo. Numa fase inicial foi falado em escolher para o nível mais baixo um valor de 600 psi. Contudo, após a realização de ensaios preliminares, verificou-se que as peças apresentavam falta de injeção, fator determinante para a rejeição das mesmas. Deste modo aumentou-se a 2ª pressão para 700 psi, sendo feitos também, ensaios preliminares onde não se observou qualquer defeito visual. A escolha do nível intermédio não apresentou problemas, tendo-se optado por 900 psi, valor utilizando no *setup* da máquina. Para o nível alto utilizou-se 1200 psi. Uma vez que a máquina de injeção apresenta dez pontos de 2ª pressão, de modo a simplificar o processo, decidiu-se utilizar o mesmo valor para cada um dos dez pontos.

A tabela 3.16 resume os níveis de cada fator utilizados neste desenho de experiências.

Tabela 3. 16- Níveis dos fatores

Fator	Nível -1	Nível 0	Nível 1
% Reciclado	0%	25%	50%
2ª Pressão	700 psi	900 psi	1200 psi

Deste modo pretende-se verificar qual o impacto dos fatores, percentagem de matéria-prima reciclada, 2ª pressão e a sua interação na resposta escolhida, isto é, no comprimento total das peças produzidas.

3.5.7.2. Aplicação do Desenho de Experiências

Tratando-se de um processo de injeção e sendo o controlo da produção feito às peças injetadas no próprio turno, é necessário perceber se existe um período de estabilização de contração das mesmas, de modo a que as medições retiradas correspondam à realidade.

Deste modo fez-se um estudo que foi ao encontro do objetivo descrito anteriormente, onde foram realização medições a três peças de cada cavidade, durante 7 horas, correspondente a 14 medições. Estas medições foram efetuadas pelo operador com melhor repetibilidade.

As peças foram retiradas diretamente da linha de produção e levadas para uma sala com a temperatura e humidade controladas para garantir que as amostras estavam sob as mesmas condições aquando da realização das medições.

As figuras 3.36 e 3.37 correspondem, respetivamente, à evolução da contração das peças para a cavidade 1 e 2, do componente 1.

Para este componente as peças de ambas as cavidades exibem um período de estabilização no que diz respeito ao seu comprimento. Este ocorre próximo dos 360 minutos (6 horas), período no qual a peça vai exibir a sua dimensão final.

Assim sendo, a medição das peças recolhidas no desenho de experiência, ocorreu apenas 6 horas depois da realização do mesmo.

A aplicação do desenho teve por base uma sequência pseudoaleatória, uma vez que a máquina de injeção tem um período de estabilização de 30 minutos após alteração do rácio entre matéria-prima virgem e matéria-prima reciclada, de modo a reduzir o tempo de ocupação da máquina.

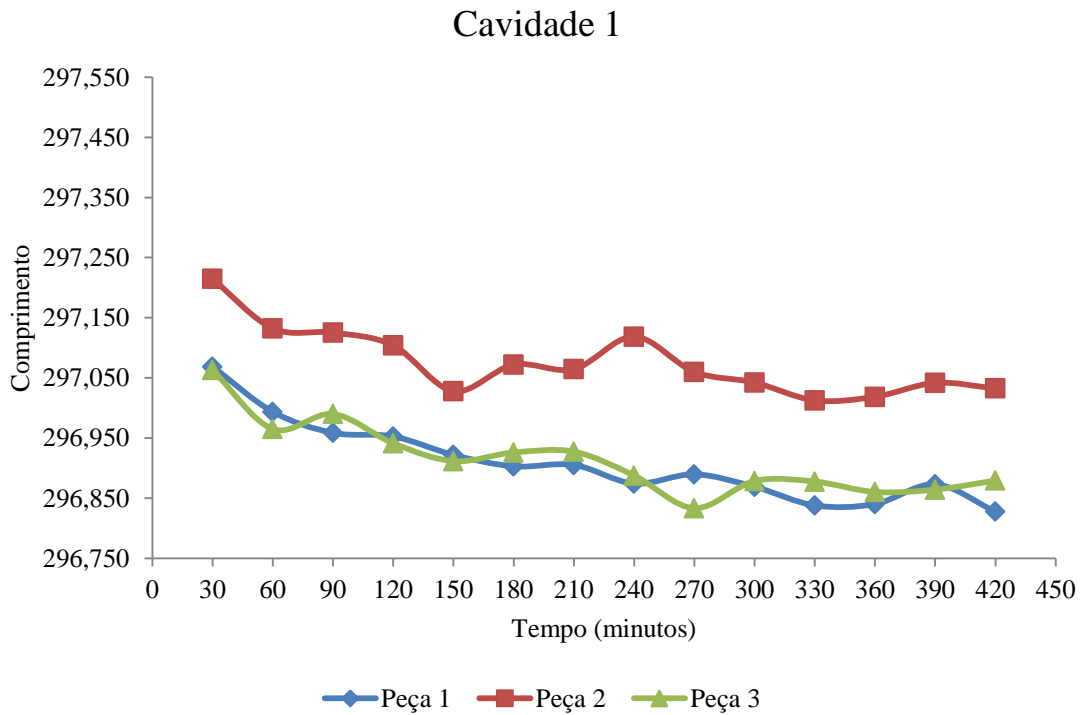


Figura 3.36 - Evolução da contração das peças do Componente 1 (Cavidade 1)

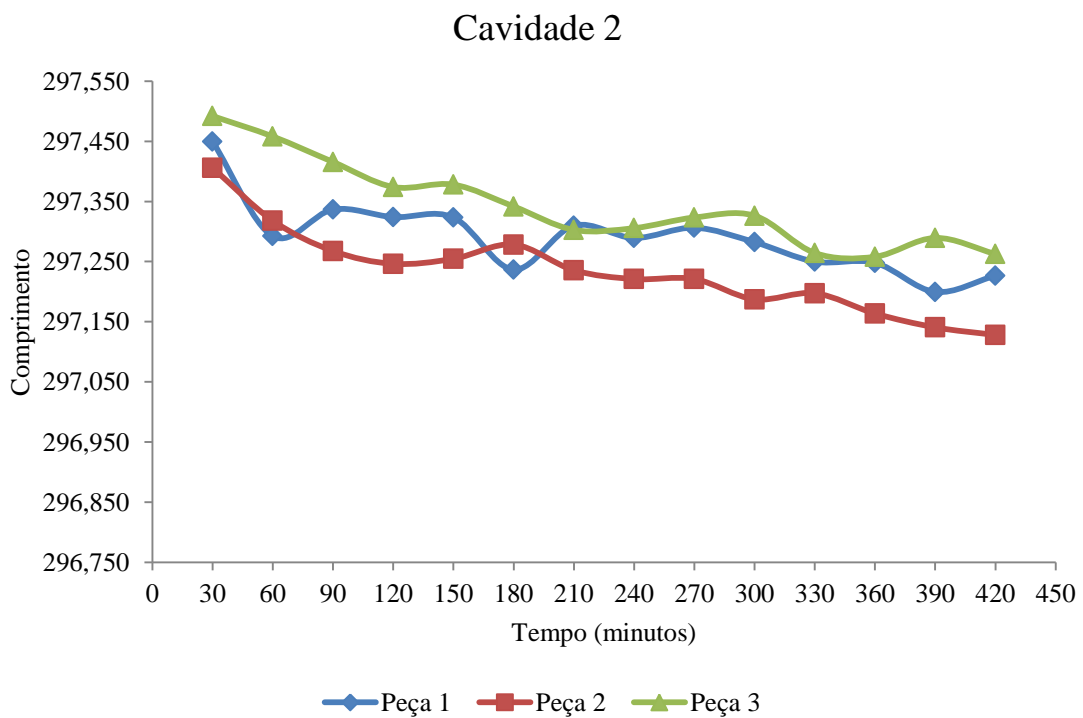


Figura 3.37 - Evolução da contração das peças do Componente 1 (Cavidade 2)

Tratando-se de uma *Two-way ANOVA*, com dois fatores a três níveis, foram 9 o número de experiências a realizar, replicando-se cada uma seis vezes. Na tabela 3.17 encontra-se definida a ordem pela qual foram executadas as experiências.

Tabela 3. 17 – Matriz do Planejamento.

Experiência	Combinação	Fator A	Fator B	Resposta
1	-1-1	-1	-1	y ₁
2	-1 1	-1	1	y ₂
3	-1 0	-1	0	y ₃
4	0 1	0	1	y ₄
5	0 -1	0	-1	y ₅
6	0 0	0	0	y ₆
7	1 -1	1	-1	y ₇
8	1 1	1	1	y ₈
9	1 0	1	0	y ₉

- **Cavidade 1**

Como referido anteriormente é necessário verificar os pressupostos da análise de variância, fazendo-se então uma análise aos resíduos. Utilizou-se o *software Statistica* para fazer esta verificação.

Em primeiro lugar é necessário verificar a normalidade dos dados. A figura 3.38 corresponde à representação gráfica das probabilidades da Distribuição Normal, para a cavidade 1.

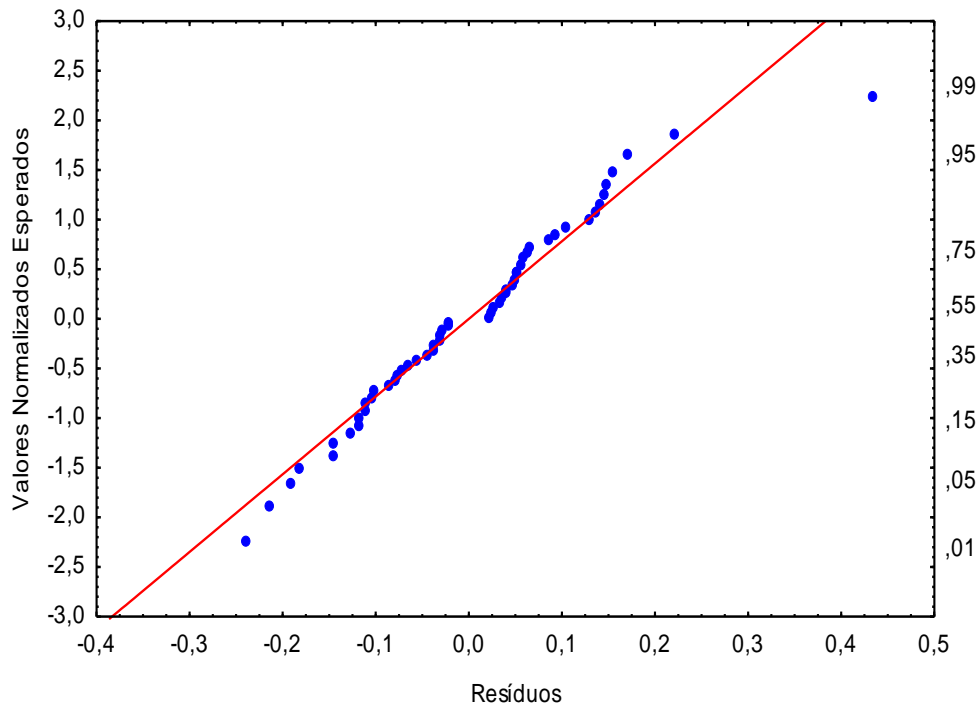


Figura 3. 38 – Probabilidades da Distribuição Normal (Cavidade 1)

Analisando o gráfico representado na figura 3.38 é possível afirmar que o pressuposto da Normalidade é razoavelmente satisfeito, uma vez que os pontos se dispõem ao longo da reta. Contudo é possível verificar a existência de um ponto que se apresenta como *outlier*. Posto isto, calculou-se o valor normalizado da amostra com recurso à seguinte expressão (Pereira & Requeijo, 2012):

$$\frac{e_{ij}}{\sqrt{MS_{erro}}} \quad (3.2)$$

O valor normalizado obtido foi de 3,436. Sendo este valor superior a 3, é um indicador de que a dispersão pode estar a ser afetada por esta experiência.

O próximo pressuposto a ser verificado é a Independência dos dados. A figura 3.39 corresponde à representação dos resíduos em função da ordem aleatória para a cavidade 1.

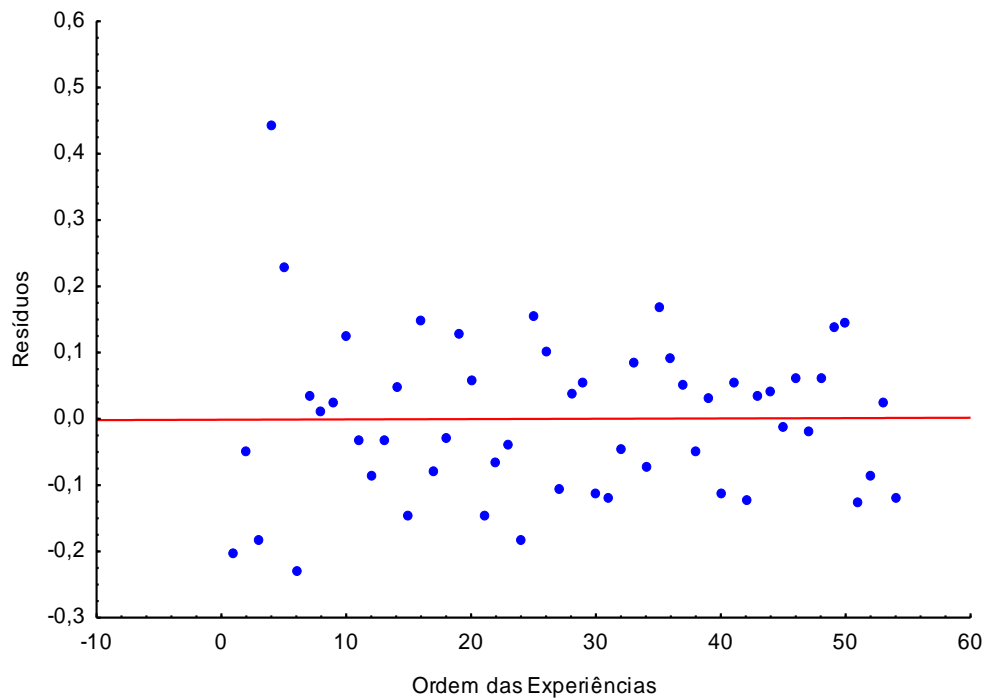


Figura 3. 39 - Resíduos vs. Sequência de Experiências (Cavidade 1)

É possível afirmar que o pressuposto de Independência é razoavelmente satisfeito, uma vez que os resíduos se dispõem sem qualquer tipo de tendência, para ambas as cavidades.

O último pressuposto é a Homogeneidade. A representação gráfica dos Resíduos vs. Valores previstos encontra-se na figura 3.40.

O gráfico dos resíduos, figura 3.40, não aparenta violar o pressuposto da homogeneidade, pois os valores encontram-se dispostos por uma ordem especial.

Como referido anteriormente, o principal objetivo deste desenho de experiências é perceber de que modo a percentagem de matéria-prima reciclada influencia a peça dimensionalmente. A sequência de realização das experiências utilizada foi a previamente descrita, estando os resultados obtidos para a cavidade 1, na tabela 3.18.

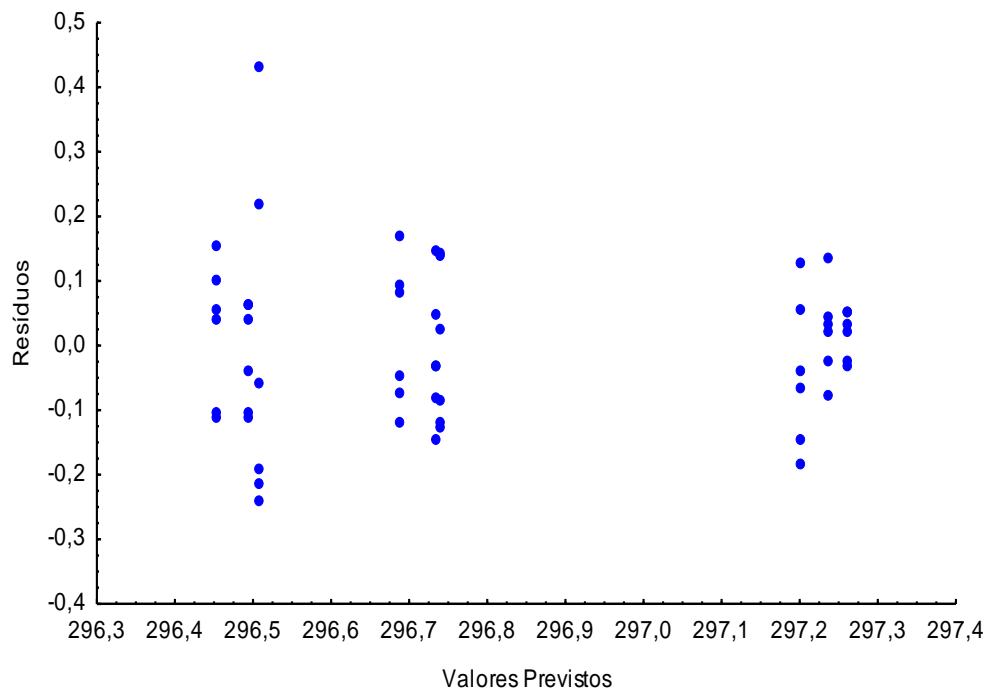


Figura 3. 40 - Resíduos vs. Valores Previstos (Cavidade 1)

A tabela 3.18 corresponde à tabela dos resultados obtidos para a cavidade 2 do componente 1.

Tabela 3. 18 - Valores da Resposta (Cavidade 1)

Experiência	A	B	Cavidade 1					
			y1	y2	y3	y4	y5	y6
1	-1	-1	296,295	296,451	296,317	296,941	296,728	296,268
2	-1	0	297,281	297,257	297,270	297,372	297,213	297,159
3	-1	1	296,702	296,782	296,587	296,880	296,654	296,703
4	0	1	297,330	297,258	297,056	297,135	297,163	297,018
5	0	-1	296,609	296,557	296,349	296,494	296,509	296,343
6	0	0	296,570	296,644	296,773	296,615	296,859	296,781
7	1	-1	296,557	296,457	296,535	296,392	296,559	296,382
8	1	1	297,285	297,294	297,239	297,312	297,231	297,312
9	1	0	296,879	296,884	296,612	296,653	296,764	296,621

Posto isto, o primeiro passo para a análise dos resultados consiste em fazer a tabela ANOVA, que corresponde à tabela 3.19.

Tabela 3. 19 - Tabela ANOVA (Cavidade 1)

	SS	g.l.	MS	F	valor P
A	0,027	2	0,013	0,824	0,445
B	0,251	2	2,625	159,336	0
AB	0,002	1	0,002	0,144	0,705
Erro	0,791	48	0,016		
Total	6,071	53			

Concluiu-se através da análise da tabela 3.19 que o fator A (% de matéria-prima reciclada) não é significativo, o fator B (2ª Pressão) é significativo enquanto a interação entre ambos também não é significativa. Estas conclusões são retiradas a partir do valor de p . Se o valor de p for inferior a 5% significa que o fator é significativo, caso contrário o fator não é significativo.

Sendo assim é necessário escolher quais os melhores níveis. A característica da qualidade selecionada foi quanto-mais-nominal-melhor. Para tal foram traçados os gráficos das médias para cada experiência, obtendo-se o gráfico representado na figura 3.41.

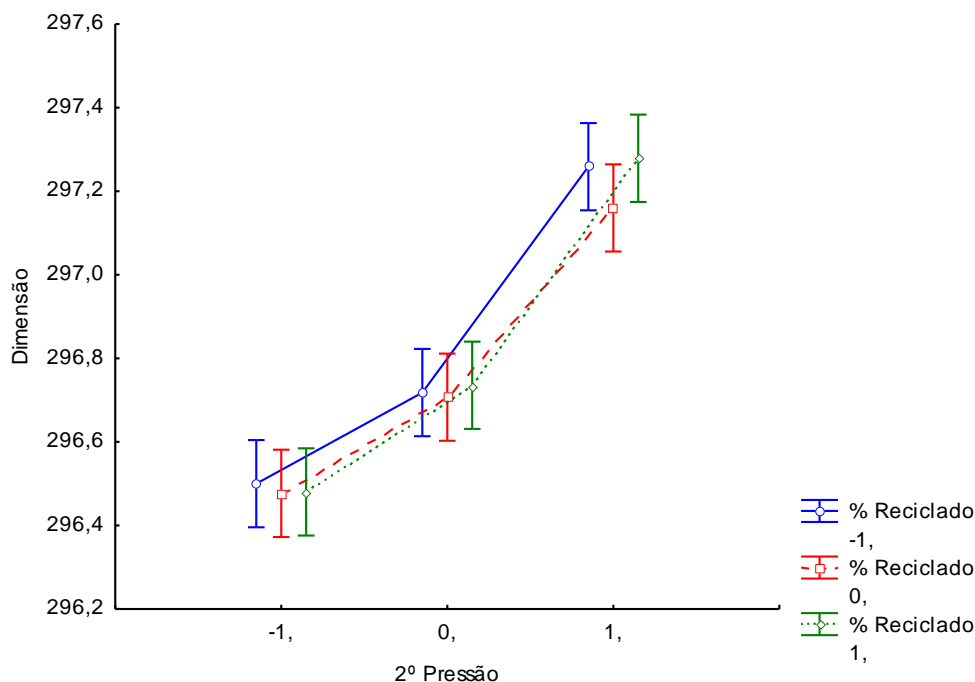


Figura 3. 41 - Valores médios da resposta (Cavidade 1)

Sendo o valor *target* do processo, 297,3 mm, os valores que mais se aproximam deste correspondem ao nível alto de 2ª Pressão. Apesar da percentagem de matéria-prima reciclada não ser um fator significativo, o nível com melhores resultados é também o nível 1. Quanto à interação dos dois fatores, revelou não ser significativa.

Apesar de não ter sido considerado como resposta, é necessário avaliar o aspeto visual das peças. Para os níveis referidos anteriormente, as peças apresentam rebarbas que são motivo de rejeição das mesmas. Isto significa que não é possível trabalhar nos níveis altos, no que diz respeito à 2ª pressão. Assim, o melhor nível de trabalho para 2ª pressão, é o nível médio.

A tabela 3.20 resume os melhores níveis para cada um dos fatores em estudo.

Tabela 3. 20 - Tabela resumo com os melhores níveis para os parâmetros (Cavidade 1)

Parâmetro	Fator	Nível	Valor
% de Reciclado	A	1	50%
2ª Pressão	B	0	900 psi

- **Cavidade 2**

De igual modo ao que foi feito na cavidade 1, começou-se por verificar a aplicação dos pressupostos de normalidade, independência e homogeneidade.

A figura 3.42 corresponde ao gráfico de probabilidades da distribuição normal para a cavidade 2.

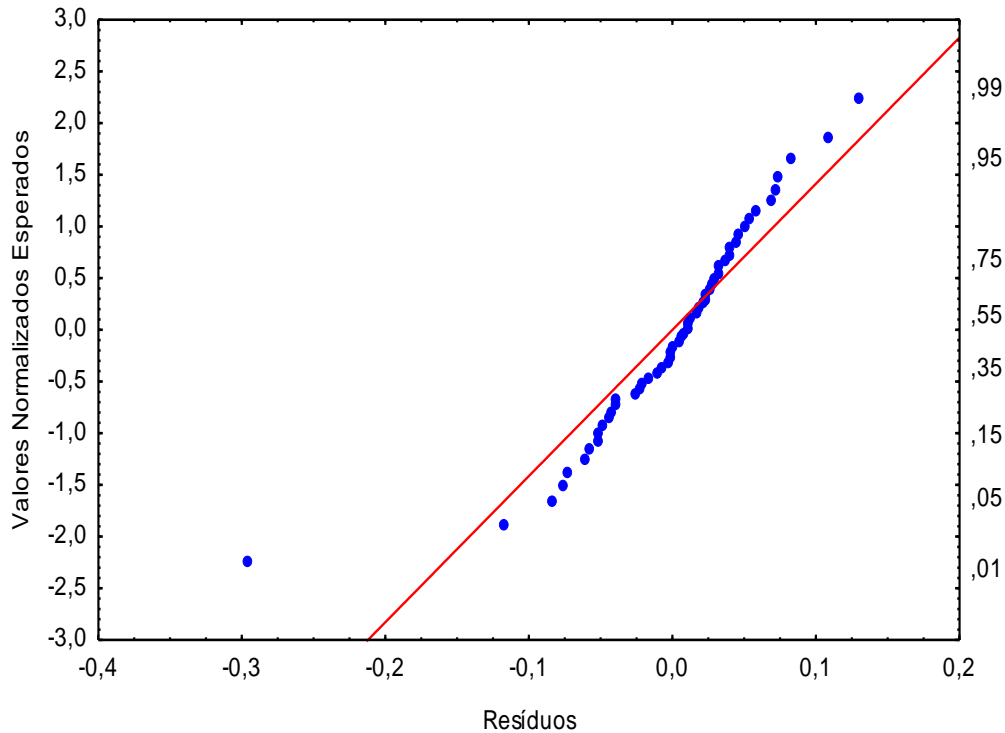


Figura 3. 42 – Probabilidades da Distribuição Normal (Cavidade 2)

Ao analisar a figura 3.42 é possível verificar que o pressuposto da normalidade é relativamente satisfeito, pois os valores dispõem-se ao longo de uma reta. Analogamente à cavidade 1 verificou-se a presença de um valor estranho. Foi então calculado o seu valor normalizado com a expressão 3.1.

O valor normalizado obtido foi de -3,697. Como o valor é inferior a -3, concluiu-se que os valores de dispersão podiam estar a ser influenciados por esta amostra. Não se procedeu à remoção deste valor uma vez que esta iria influenciar os resultados, no sentido em que a interação entre os dois fatores seria significativa, não sendo correto, do ponto de vista teórico, a interação ser significativa em apenas uma das cavidades.

Para se verificar o pressuposto da independência elaborou-se o gráfico representado na figura 3.43.

Através da interpretação da figura 3.43 pode concluir-se que o pressuposto é razoavelmente satisfeito, pois os resíduos dispõem-se sem qualquer tipo de tendência.

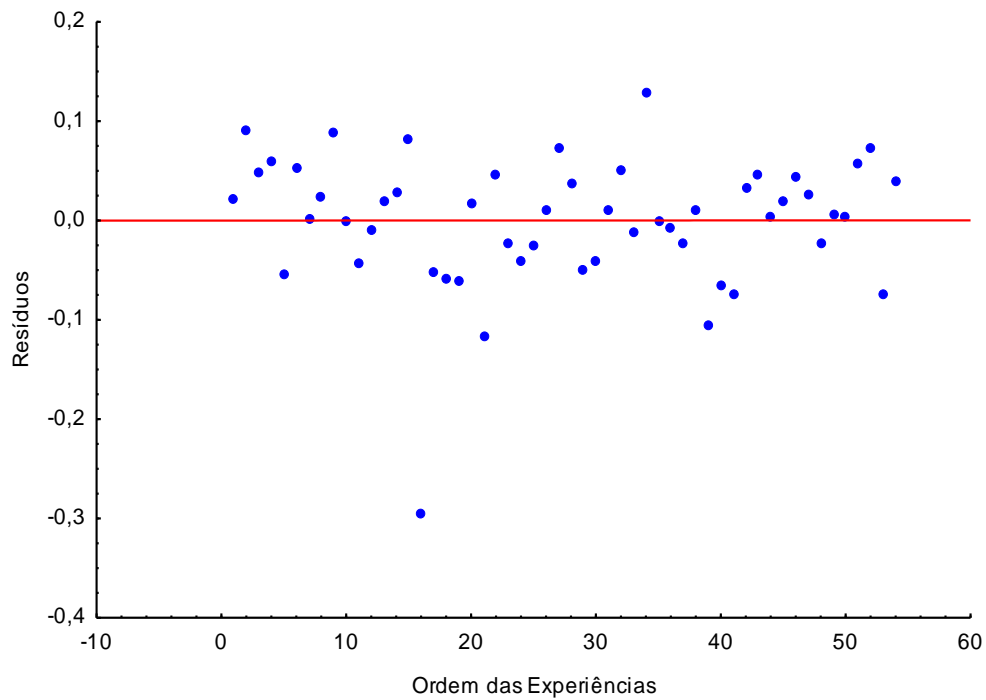


Figura 3. 43 - Resíduos vs. Sequência de Experiências (Cavidade 2)

O último pressuposto a ser verificado é a homogeneidade. A figura 3.44 consiste na representação gráfica de resíduos vs. Valores previstos para a cavidade 2.

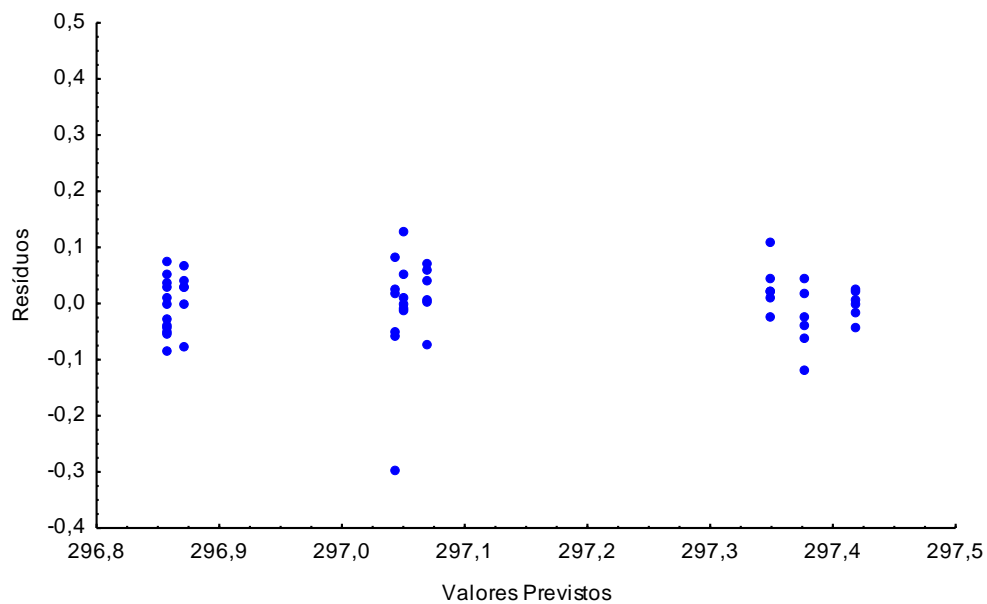


Figura 3. 44 - Resíduos vs. Valores Previstos (Cavidade 2)

O gráfico dos resíduos não aparenta violar o pressuposto da homogeneidade, pois os valores encontram-se dispostos por uma ordem especial.

Os resultados obtidos para a cavidade 2 encontram-se representados na tabela 3.21.

Tabela 3. 21 - Valores de Resposta (Cavidade 2)

Experiência			Cavidade 2					
	A	B	y7	y8	y9	y10	y11	y12
1	-1	-1	296,872	296,941	296,900	296,911	296,796	296,903
2	-1	0	297,372	297,393	297,458	297,370	297,326	297,361
3	-1	1	297,061	297,070	297,125	296,747	296,991	296,984
4	0	1	297,316	297,394	297,260	297,423	297,355	297,337
5	0	-1	296,832	296,868	296,932	296,895	296,809	296,818
6	0	0	297,061	297,100	297,039	297,179	297,048	297,042
7	1	-1	296,855	296,889	296,773	296,814	296,805	296,911
8	1	1	297,444	297,402	297,416	297,441	297,424	297,375
9	1	0	297,077	297,074	297,128	297,142	296,996	297,109

A tabela 3.22 corresponde à ANOVA para a cavidade 2.

Tabela 3. 22 - Tabela ANOVA (Cavidade 2)

	SS	g.l.	MS	F	valor P
A	0,007	2	0,004	0,804	0,453
B	2,480	2	1,240	272,640	0
AB	0,010	1	0,010	2,272	0,138
Erro	0,218	48	0,004		
Total	2,716	53			

Analisando a tabela 3.22 verifica-se que o fator A, isolado, é não significativo mas o fator B já é significativo. Por sua vez, a interação dos dois fatores também não é significativa. O critério desta afirmação é idêntico ao da cavidade 1. A escolha dos melhores níveis assenta na mesma característica da qualidade, quanto mais nominal melhor.

A figura 3.46 corresponde às médias das respostas para as experiências.

O melhor nível de 2ª pressão corresponde ao nível 1 (1200 psi). Uma vez que a percentagem de matéria-prima reciclada não apresenta qualquer influência na dimensão da peça, pode ser utilizado qualquer um dos 3 níveis, porém o nível alto é o que apresenta uma resposta mais próximo do nominal. Estes resultados estão em concordância com os da cavidade 1, não sendo expectável a existência de diferenças entre níveis, entre as duas cavidades.

Do mesmo modo que foi verificado o aspeto visual na cavidade 1, este também foi tido em consideração para a cavidade 2. A presença de rebarbas era visível para o nível alto de 2ª pressão, não sendo possível trabalhar neste nível. Como tal, o melhor nível de 2ª pressão é o nível médio.

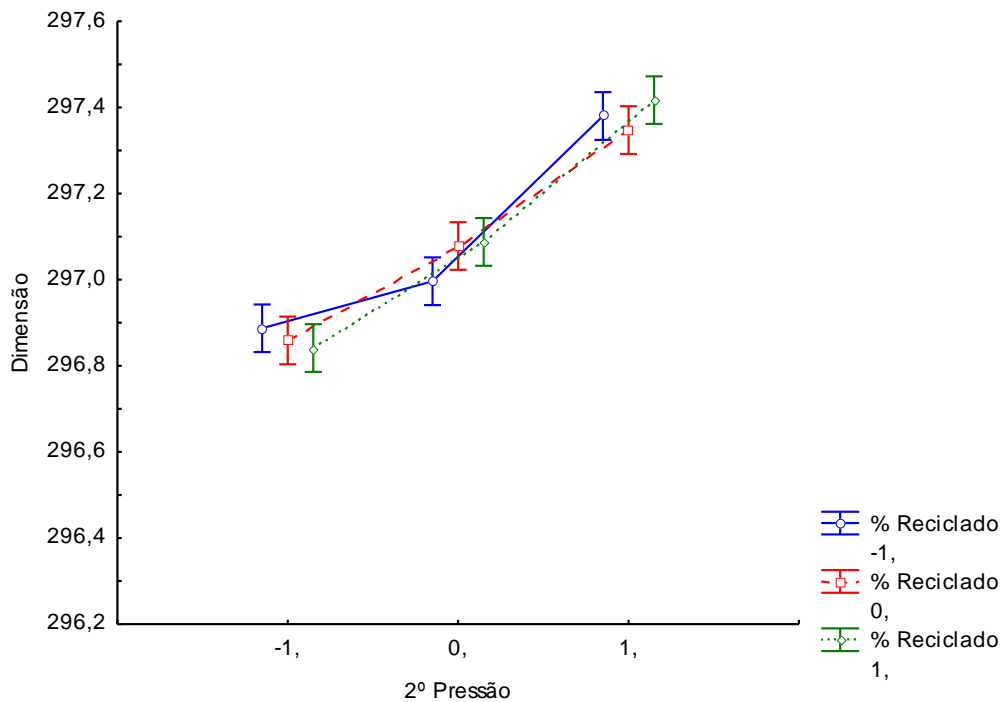


Figura 3. 45 – Valores médios da Resposta (Cavidade 2)

A tabela 3.29 apresenta os melhores níveis de trabalho para os fatores em estudo.

Tabela 3. 23 - Tabela resumo com os melhores níveis para os parâmetros (Cavidade 2)

Parâmetro	Fator	Nível	Valor
% de Reciclado	A	1	50%
2ª Pressão	B	0	900 psi

Fazendo um análise global, pode-se afirmar que o fator 2ª pressão, isolado, é significativo enquanto o fator isolado, percentagem de matéria-prima reciclada e a interação entre ambos não são significativos. Relativamente aos melhores níveis de trabalho, considerando uma característica da qualidade quanto mais nominal melhor, os níveis de trabalho que permitem obter peças que satisfaçam a característica da qualidade, são os níveis altos. Através de uma análise visual das peças verifica-se a existência de rebarbas, fator de rejeição das peças. Como tal é necessário trabalhar num nível médio de 2ª pressão. Por esta razão é necessário verificar a existência de um método que permita reduzir ou eliminar a presença de rebarba nas peças, de modo a poder utilizar-se o nível alto para o fator B.

4. Conclusões e Recomendações

Sendo o principal objetivo deste projeto a implementação de controlo estatístico num processo produtivo de um produto da empresa, tratando-se de um processo sequencial, é necessário fazer a separação do estudo nas suas várias fases.

A primeira fase consistiu na análise preliminar de dados, abrangido um estudo de *outliers* e variâncias. Com a análise de *outliers* verificou-se a presença de erros de medição por parte dos operadores, erros que advêm de uma lacuna causada pela falta de formação para a utilização do equipamento de medição. Através da análise de variâncias detetou-se a diferença entre as medições dos vários turnos.

Os resultados obtidos com a análise preliminar de dados, levantaram suspeitas sobre várias fontes de variação do processo e o seu controlo. Destacam-se o sistema de medição e a matéria-prima utilizada. Devido à inexistência de um equipamento que permita estudar o comportamento da matéria-prima, prosseguiu-se com o estudo Repetibilidade e Reprodutibilidade.

A realização do estudo R&R confirmou uma das suspeitas anteriores, a de que o sistema de medição não é adequado para o caso, não tendo reprodutibilidade. Porém a existência de um operador mais preciso nas medições levou à realização de um novo estudo, com blocos padrão, que por sua vez revelou que o equipamento apresenta repetibilidade. Como tal concluiu-se que o sistema de medição não é robusto. Apesar do sistema de medição não ser o adequado, deu-se continuidade ao estudo utilizando apenas o melhor operador. O próximo passo foi a determinação dos parâmetros do processo com recurso à construção de cartas de controlo $\bar{X} - S$ na Fase I.

Após a construção das cartas e garantia que o processo se encontrava sob controlo estatístico, na Fase I, calculou-se a capacidade para os quatro componentes. Dois dos componentes revelaram ser capazes de produzir de acordo com a especificação, apresentando-se os restantes como não capazes. Contudo nenhum dos processos se encontrava centrado. A aplicação das cartas *EWMA* revelou que os processos não se encontravam estáveis o suficiente para a aplicação de cartas mais sensíveis, pois foram detetadas alterações na média dos processos ao fim de poucas observações. A confirmação de existência desta oscilação na média provou-se com a aplicação de um teste-*t*, onde foram comparadas as médias da fase I e fase II dos processos, havendo diferenças significativas entre estas. Como tal, a fase II serviu apenas para obter uma estimativa do comportamento dos mesmos.

Devido à diferença existente nas médias entre a fase I e fase II do *SPC* e às diferenças existentes entre cavidades e entre turnos em alguns dos componentes, tornou-se pertinente aplicar um desenho de experiências para se estudar o comportamento de dois fatores e da sua interação, tendo-se como resposta o comprimento total da peça.

Para isso, aplicou-se um desenho de experiências 3^2 , para os fatores percentagem de matéria-prima reciclada e 2ª pressão. Os resultados revelaram não haver relação entre a dimensão das peças e a percentagem de matéria-prima reciclada, sendo o fator significativo a 2ª pressão. A ausência de relação entre a percentagem de matéria-prima reciclada e a dimensão da peça, demonstra ser, do ponto de vista empresarial, um fator positivo uma vez que permite a reciclagem de grande parte da produção que não esteja conforme.

Em suma, foi possível a construção de cartas de controlo para verificar a aplicabilidade do controlo estatístico ao processo. De acordo com os resultados obtidos na Fase II do controlo estatístico, verificou-se que o processo não é estável o suficiente para aplicação do mesmo, sendo crucial tomar medidas que reduzam as potenciais fontes de variação existentes ao longo de todo o processo.

Como sugestões para a melhoria do processo, destaca-se a formação dos operadores no que diz respeito à utilização do equipamento de medição, para evitar a existência de valores estranhos ao processo causados por erros de medição. Associado a este fator encontra-se também a utilização de um equipamento robusto às variações introduzidas pelos operadores e pela amostra.

Outro fator bastante importante e que deve ser controlado é a matéria-prima, uma vez que as suas características vão afetar o produto final, sendo necessário garantir que a matéria-prima fornecida está de acordo com as especificação e normas a ela afetas.

Atualmente e não havendo qualquer tipo de controlo estatístico implementado na organização, sugere-se a aplicação de cartas de controlo $\bar{X} - S$ para monitorização do processo. A escolha demonstrou ser uma opção viável, uma vez que foram detetadas causas especiais no processo. Apesar do cálculo do desvio padrão ser mais complexo que o da amplitude, como o cálculo é feito com recurso a *softwares* especializados não é necessário dar formação aos operadores.

A implementação de controlo regular de parâmetros de modo a poder justificar determinados comportamentos observados nas cartas de controlo também é bastante importante, uma vez que não existe nenhum registo de alterações feitas aos parâmetros e consequente justificação das mesmas.

Deste modo será possível tentar implementar novamente o controlo estatístico, recorrendo às cartas *EWMA* e obter resultados positivos que vão ao encontro da política da qualidade da empresa e consequentes requisitos do cliente.

Bibliografia

- ANSI – American National Standards Institute, ISO 7870-1/3:2013 Control Charts: Shewhart Control Charts
- ANSI – American National Standards Institute, ISO/TS 16949:2009 Quality management systems—Particular requirements for the application of ISO 9001:2008 for automotive production and relevant service part organizations
- Aggarwal, C. C. (2013). *Outlier Analysis*. Nova Iorque: Springer.
- Altan, M. (2010). Reducing shrinkage in injection moldings via the Taguchi, ANOVA and neural network methods. *Materials and Design*, 599-604.
- Anderson, M. J., & Whitcomb, P. J. (2007). *DOE Simplified - Pratical Tools for Effective Experimentation*. Nova Iorque: Productivity Press.
- Azaman, M. D., Sapuan, S., Sulaiman, S., Zainudin, E. S., & Khalina, A. (2013). Shrinkages and warpage in the processability of wood-filled polypropylene composite thin-walled parts formed by injection molding. *Materials and Design*, 1018-1026.
- Ben-gal, I. (2005). Outlier detection. *Data Mining and Knowledge Discovery Handbook*, 131-146.
- Chen, C.-P., Chuang, M.-T., Hsiao, Y.-H., Yang, Y.-K., & Tsai, C.-H. (2009). Simulation and experimental study in determining injection molding process parameters for thin-shell plastic parts via design of experiments analysis. *Expert Systems with Applications*, 10752-10759.
- Corporation, Visteon (Julho de 2014). Documento Interno
- Dang, X.-P. (2014). General frameworks for optimization of plastic injection molding process parameters. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 15-27.
- Down, M. H., Kerkstra, T., Cvetkovski, P., & Benham, D. R. (2005). *Statistical Process Control (SPC) - Reference Manual*. Carwin England: Carwin Continuous Ltd
- Down, M., Czubak, F., Gruska, G., Stahley, S., & Benham, D. (2010). *Measurment System Analysis - Reference Manual*. England: Carwin Continuous Ltd
- FCT. (4 de Fevereiro de 2014) Obtido em 20 de Setembro de 2014, de web site da Fundação para a Ciência e Tecnologia
https://www.fct.pt/esp_inteligente/docs/Automoveis_ENEI_Evora.pdf
- Global, a. P. (2013). Obtido em 20 de Setembro de 2014, de Portugal Global:
<http://www.portugalglobal.pt/EN/Biblioteca/Documents/AutomotiveSector.pdf>
- Gu, F., Hall, P., Miles, N. J., Ding, Q., & Wu, T. (2014). Improvement of mechanical properties of recycled plastic blends via optimizing processing parameters using the Taguchi method and principal component analysis. *Materials and Design*, 189-198.
- Harper, C. A. (2006). *Handbook of Plastic Processes*. Maryland: Wiley.

- Hawkins, D. M. (1980). *Identification of Outliers*. Nova Iorque: Chapman and Hall.
- Howard, J. S. (20 de Junho de 2014). Obtido em 23 de Setembro de 2014, de Department of Statistics - Carnegie Mellon University:
<http://www.stat.cmu.edu/~hseltman/309/Book/Book.pdf>
- Kaya, A. (2010). Statistical modelling for outlier factors. *Ozean Journal of Applied Sciences*, 185-194.
- Kovács, J. G., & Sikló, B. (2011). Test method development for deformation analysis of injection moulded plastic parts. *Polymer Testing*, 543-547.
- Kurt, M., Kamber, O. S., Kaynak, Y., Atakok, G., & Girit, O. (2009). Experimental investigation of plastic injection molding: Assessment of the effects of cavity pressure and mold temperature on the quality of the final products. *Materials and Design*, 3217-3224.
- Mehat, N. M., & Kamaruddin, S. (2011). Optimization of mechanical properties of recycled plastic products via optimal processing parameters using the Taguchi method. *Journal of Materials Processing Technology*, 1989-1994.
- Montgomery, D. C. (2009). *Introduction to Statistical Quality Control*. Arizona: Wiley.
- Oehlert, G. W. (2010). *A First Course in Design and Analysis of Experiments*. Minnesota: W. H. Freeman
- Outliers*. (2012). Obtido em 18 de Setembro de 2014, de Web site de IBM Corporation:
http://www-01.ibm.com/support/knowledgecenter/SS3RA7_15.0.0/com.ibm.spss.modeler.help/ts_outliers_overview.htm
- Ozcelik, B., & Sonat, I. (2009). Warpage and structural analysis of thin shell plastic in the plastic injection molding. *Materials and Design*, 367-375.
- Ozcelik, B., Ozbay, A., & Demirbas, E. (2010). Influence of injection parameters and mold materials on mechanical properties of ABS in plastic injection molding. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 1359-1365.
- Pereira, Z. L., & Requeijo, J. G. (2012). *Planeamento e Controlo Estatístico de Processos*. Caparica: Fundação da Faculdade de Ciências e Tecnologia.
- Rahimi, M., Esfahanian, M., & Moradi, M. (2014). Effect of reprocessing on shrinkage and mechanical properties of ABS and investigating the proper blend of virgin and recycled ABS in injection molding. *Journal of Materials Processing Technology*, 2359-2365.
- Rosato, D. V., Rosato, D. V., & Rosato, M. G. (2000). *Injection Molding Handbook*. Boston/Dordrecht/London: Kluwer Academic Publisher.
- Sun, L., & Liu, X. (2011). Control Analysis of Production and Apparent Quality of Automobile Large Plastic Parts. *Procedia Engineering*, 438-443.
- Vocabulário Internacional de Metrologia*. (2012). Instituto Português da Qualidade.

- Wang, X., Zhao, G., & Wang, G. (2013). Research on the reduction of sink mark and warpage of the molded part in rapid heat cycle molding process . *Materials & Design*, 779-792.
- Wang, Y.-q., Kim, J.-g., & Song, J.-i. (2014). Optimization of plastic injection molding process parameters for manufacturing a brake booster valve body. *Materials and Design*, 313-317.

Anexos

Anexo I

Tabela I. 1 - Valores de d_2^* para o cálculo da repetibilidade (Retirado de Pereira & Requeijo, 2012, pág.426)

Número de Operadores	Número de unidades (m)	Nº de medições por peça (r)	d_2^*	$1/d_2^*$
1	10 ou 11	5	2,34	0,427
		8	2,86	0,350
		10	3,09	0,324
	12 ou 13	5	2,34	0,427
		8	2,86	0,350
		10	3,09	0,324
	14 ou 15	5	2,34	0,427
		8	2,86	0,350
		10	3,09	0,324
2	5	3	1,72	0,581
		5	2,34	0,427
		8	2,86	0,350
		10	3,09	0,324
	6	3	1,71	0,585
		5	2,34	0,427
		8	2,86	0,350
		10	3,09	0,324
	7	3	1,71	0,585
		5	2,34	0,427
		8	2,86	0,350
		10	3,09	0,324
3	5	3	1,71	0,585
		5	2,34	0,427
		8	2,86	0,350
		10	3,09	0,324

Tabela I. 2 - Valores de d_2^* para a reprodutibilidade Retirado de Pereira & Requeijo, 2012, pág. 431)

Número de operadores	d_2^*	$1/d_2^*$
2	1,41	0,709
3	1,91	0,524
4	2,24	0,446
5	2,48	0,403
6	2,67	0,375
7	2,83	0,353
8	2,96	0,338
9	3,08	0,325
10	3,18	0,314

Tabela I. 3 - Valores de d_2^* para o cálculo da variação das unidades do produto Retirado de Pereira & Requeijo, 2012, pág. 433)

Número de operadores	d_2^*	$1/d_2^*$
5	2,48	0,403
6	2,67	0,375
7	2,83	0,353
8	2,96	0,338
9	3,08	0,325
10	3,18	0,314
11	3,27	0,306
12	3,35	0,299
13	3,42	0,292
14	3,49	0,287
15	2,55	0,392

Tabela I. 4 - Constantes para as Cartas Tradicionais de Variáveis (Adaptado de Pereira & Requeijo, 2012, pág. 729)

Dimensão Amostra <i>n</i>	Carta da Média			Carta do Desvio Padrão						Carta da Amplitude				
	Fatores Limites Controlo			Fatores Linha Central		Fatores para Limites de Controlo				Fatores para Limites de Controlo				
	A	A ₂	A ₃	d ₂	c ₄	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	d ₃	D1	D2	D3	D4
2	0,121	1,881	2,659	1,128	0,7979	0	3,267	0	2,606	0,853	0	3,686	0	3,276
3	1,732	1,023	1,954	1,693	0,8862	0	2,568	0	2,276	0,888	0	4,358	0	2,574
4	1,500	0,729	1,628	2,059	0,9213	0	2,266	0	2,088	0,880	0	4,698	0	2,282
5	1,342	0,577	1,427	2,326	0,9400	0	2,089	0	1,964	0,864	0	4,918	0	2,114
6	1,225	0,483	1,287	2,534	0,9515	0,030	1,970	0,029	1,874	0,848	0	5,078	0	2,004
7	1,134	0,419	1,182	2,704	0,9594	0,118	1,882	0,113	1,806	0,833	0,204	5,204	0,076	1,924
8	1,061	0,373	1,099	2,847	0,9650	0,185	1,815	0,179	1,751	0,820	0,388	5,306	0,136	1,864
9	1,000	0,337	1,032	2,970	0,9693	0,239	1,761	0,232	1,707	0,808	0,547	5,393	0,184	1,816
10	0,949	0,308	0,975	3,078	0,9727	0,284	1,716	0,276	1,669	0,797	0,687	5,469	0,223	1,777
11	0,905	0,285	0,927	3,173	0,9754	0,321	1,679	0,313	1,637	0,787	0,811	5,535	0,256	1,744
12	0,866	0,266	0,886	3,258	0,9776	0,354	1,646	0,346	1,610	0,778	0,922	5,594	0,283	1,717
13	0,832	0,249	0,850	3,336	0,9794	0,382	1,618	0,374	1,585	0,770	1,025	5,647	0,307	1,1,693
14	0,802	0,235	0,817	3,407	0,9810	0,406	1,594	0,399	1,563	0,763	1,118	5,696	0,328	1,672
15	0,775	0,223	0,789	3,472	0,9823	0,428	1,572	0,421	1,544	0,756	1,203	5,741	0,347	1,653
16	0,750	0,212	0,763	3,532	0,9835	0,448	1,552	0,440	1,526	0,750	1,282	5,782	0,363	1,637
17	0,728	0,203	0,739	3,588	0,9845	0,466	1,534	0,458	1,511	0,744	1,356	5,820	0,378	1,622
18	0,707	0,194	0,718	3,640	0,9854	0,482	1,518	0,475	1,496	0,739	1,424	5,856	0,391	1,608
19	0,688	0,187	0,698	3,689	0,9862	0,487	1,503	0,490	1,483	0,734	1,487	5,891	0,403	1,597
20	0,671	0,180	0,680	3,735	0,9869	0,510	1,490	0,504	1,470	0,729	1,549	5,921	0,415	1,585
21	0,655	0,173	0,663	3,778	0,9876	0,523	1,477	0,516	1,459	0,724	1,605	5,951	0,425	1,575
22	0,640	0,167	0,647	3,819	0,9882	0,534	1,466	0,528	1,448	0,720	1,659	5,979	0,434	1,566
23	0,626	0,162	0,633	3,858	0,9887	0,545	1,455	0,539	1,438	0,716	1,710	6,006	0,443	1,557
24	0,612	0,157	0,619	3,895	0,9892	0,555	1,445	0,549	1,429	0,712	1,759	6,031	0,451	1,548
25	0,600	0,153	0,606	3,931	0,9896	0,565	1,435	0,559	1,420	0,708	1,806	6,056	0,459	1,541

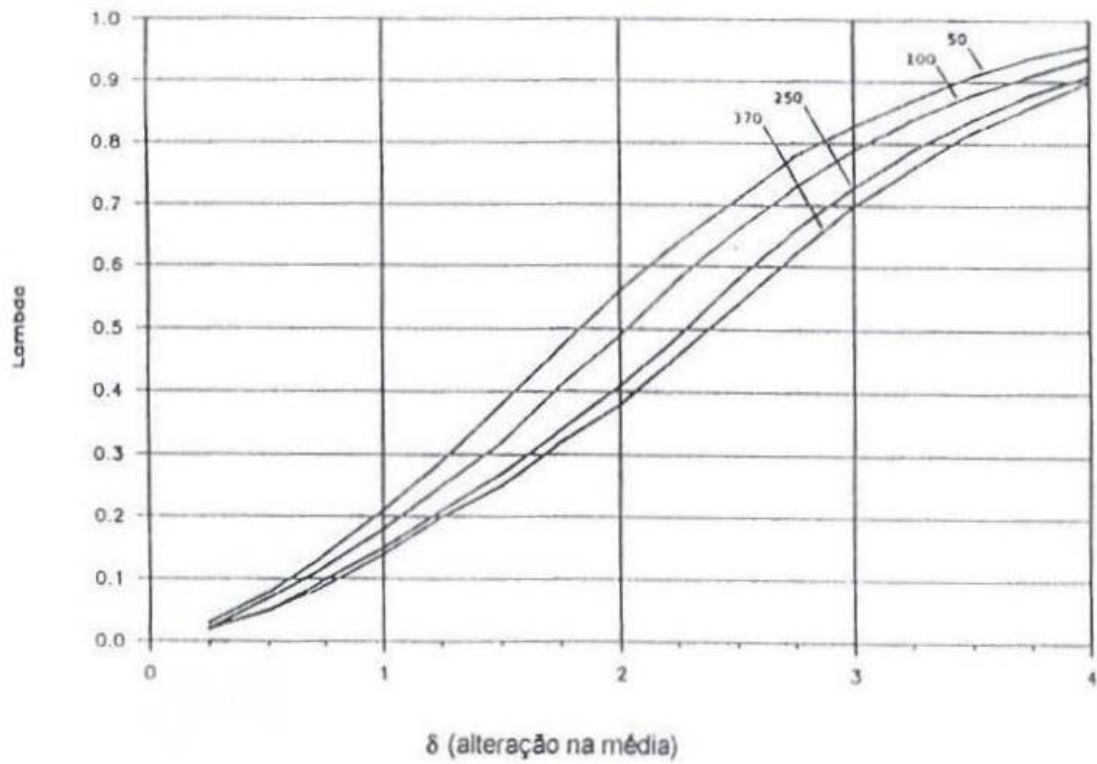


Figura I. 1 - Valor ótimo de λ da carta de controle EWMA, para vários valores de $ARL_{Em\ Controlado}$

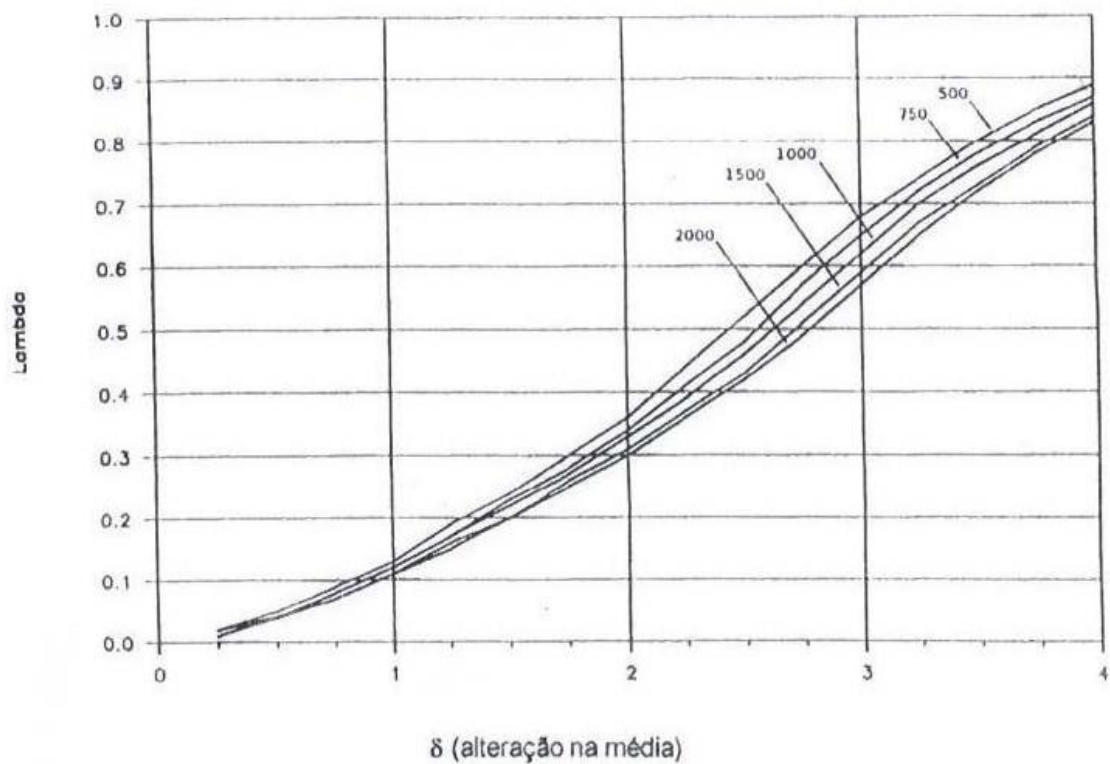


Figura I. 2 - Valor ótimo de λ da carta de controle EWMA, para vários valores de $ARL_{Em\ Controlado}$

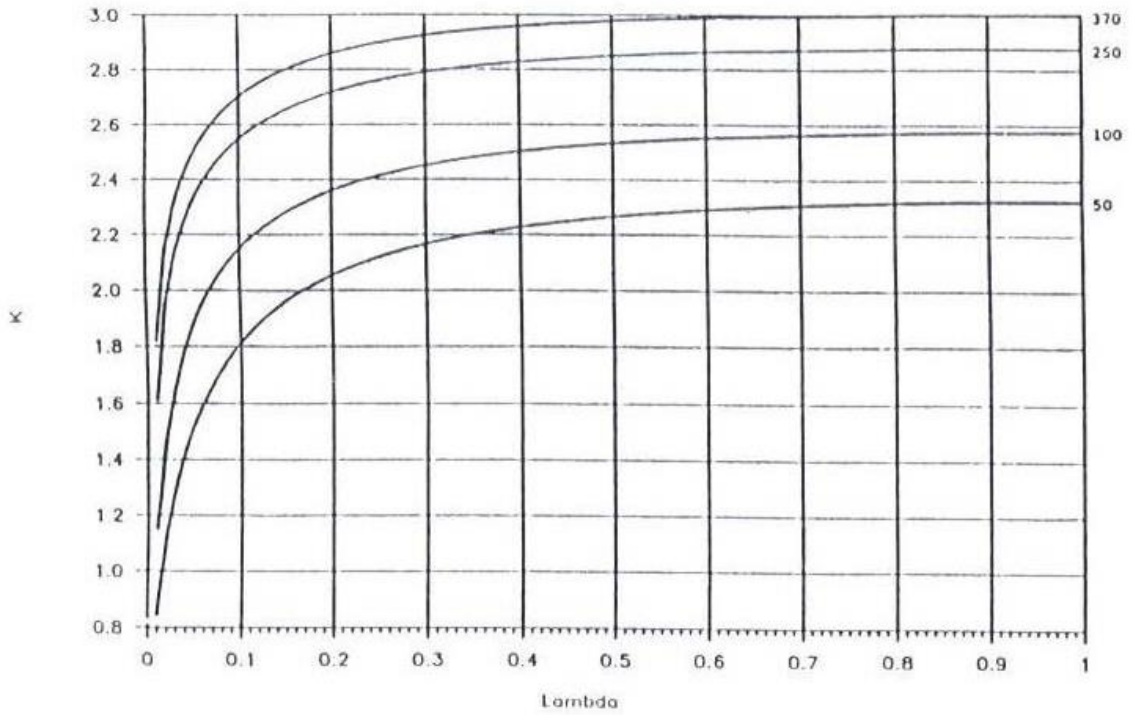


Figura I. 3 - Valor ótimo de λ e K , da carta de controlo EWMA, para vários valores de $ARL_{Em Controlo}$

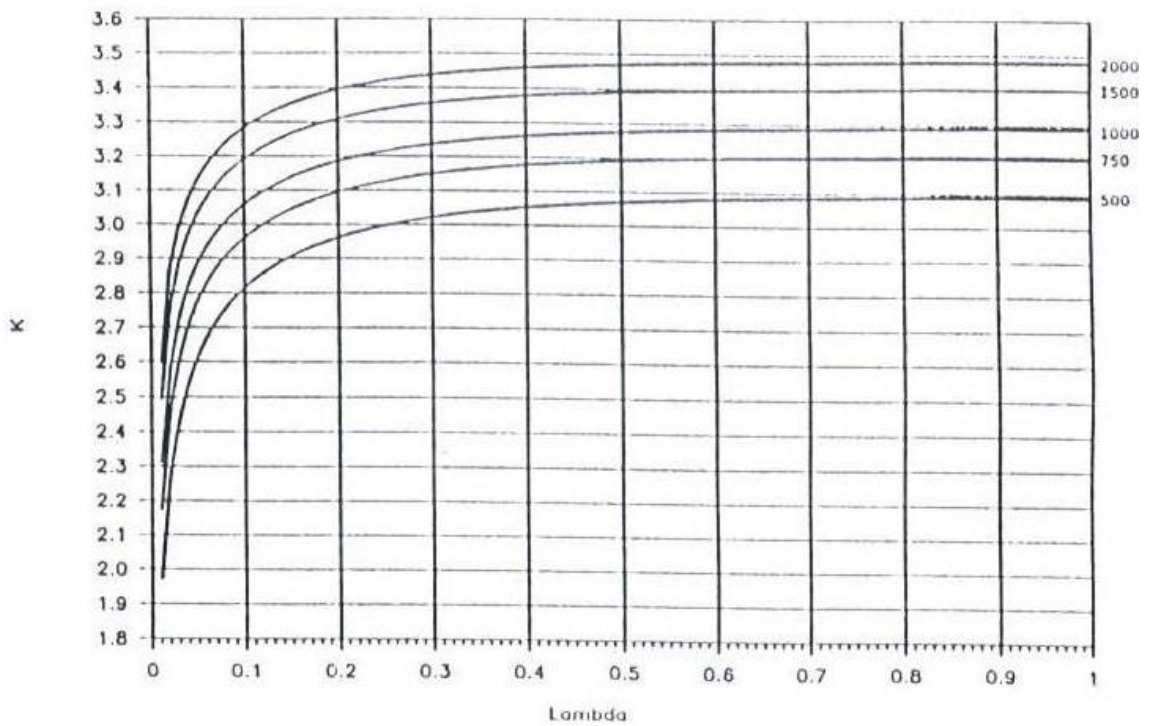


Figura I. 4 - Valor ótimo de λ e K , da carta de controlo EWMA, para vários valores de $ARL_{Em Controlo}$

Anexo II

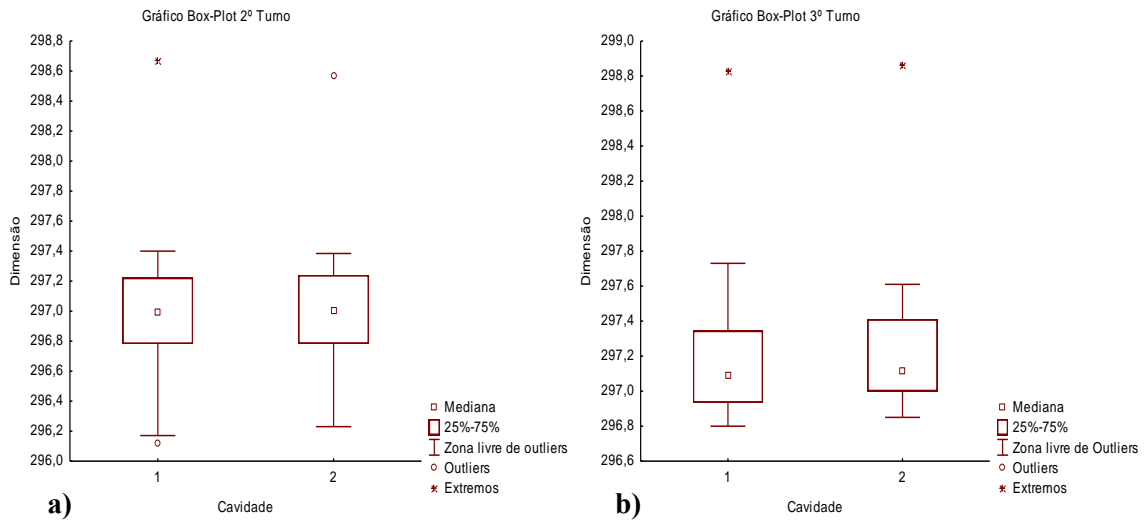


Figura II. 1 - Box-Plot Componente 1, 1ª Janela; a) 2º Turno, b) 3º Turno

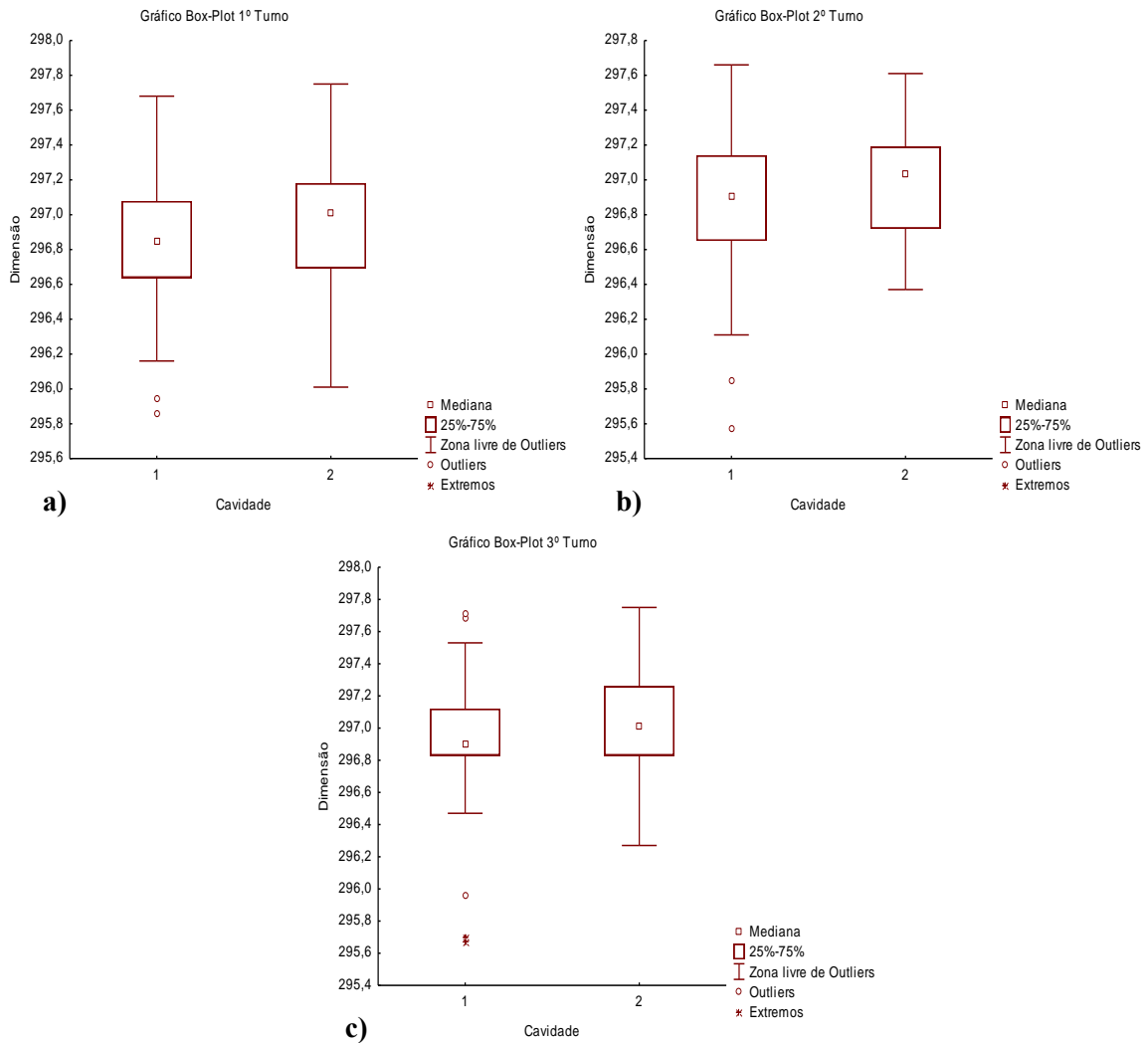


Figura II. 2 - Box-Plot Componente 1, 2ª Janela; a) 1º Turno, b) 2º Turno, c) 3º Turno

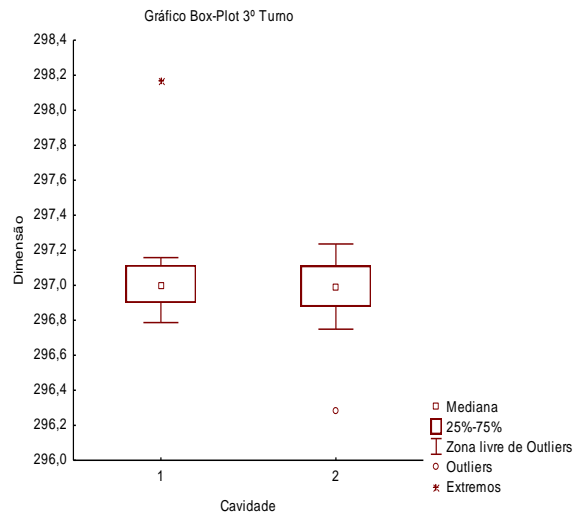


Figura II. 3 - Box-Plot Componente 1, 3º Janela, 2º Turno

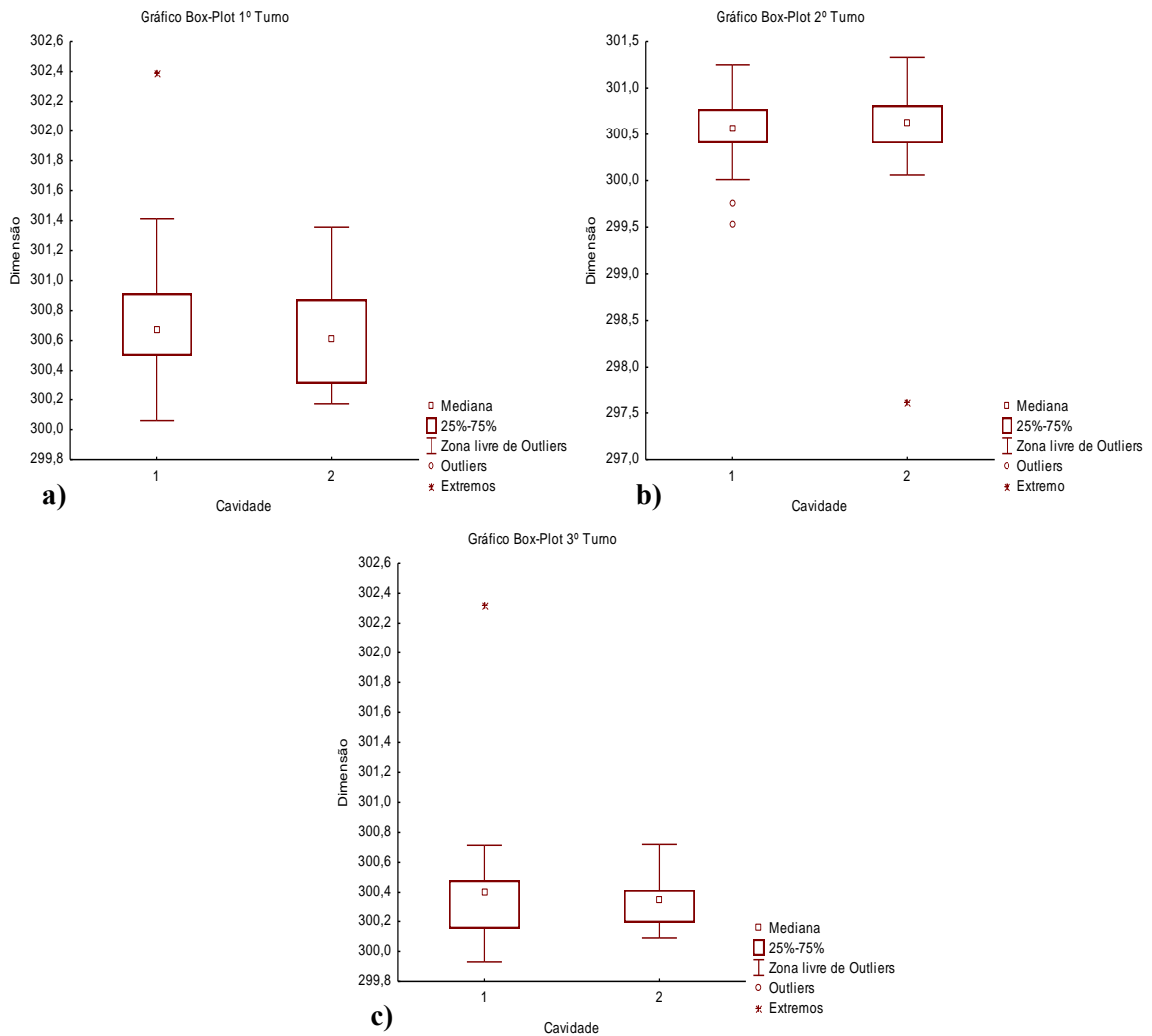


Figura II. 4 - Box-Plot Componente 3, 1ª Janela; a) 1º Turno, b) 2º Turno, c) 3º Turno

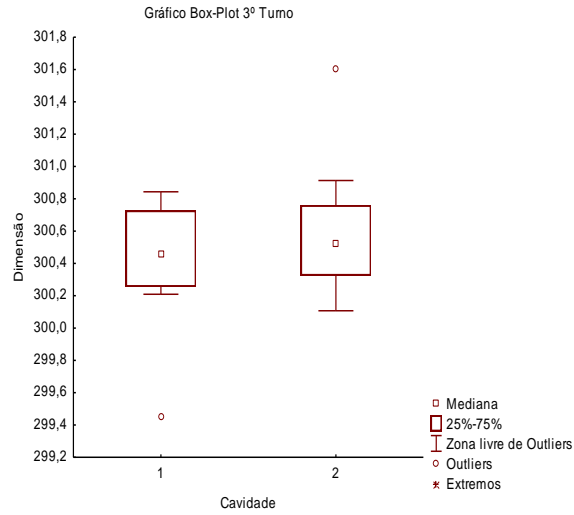


Figura II. 5 - Box-Plot Componente 3, 3ª Janela, 3º Turno

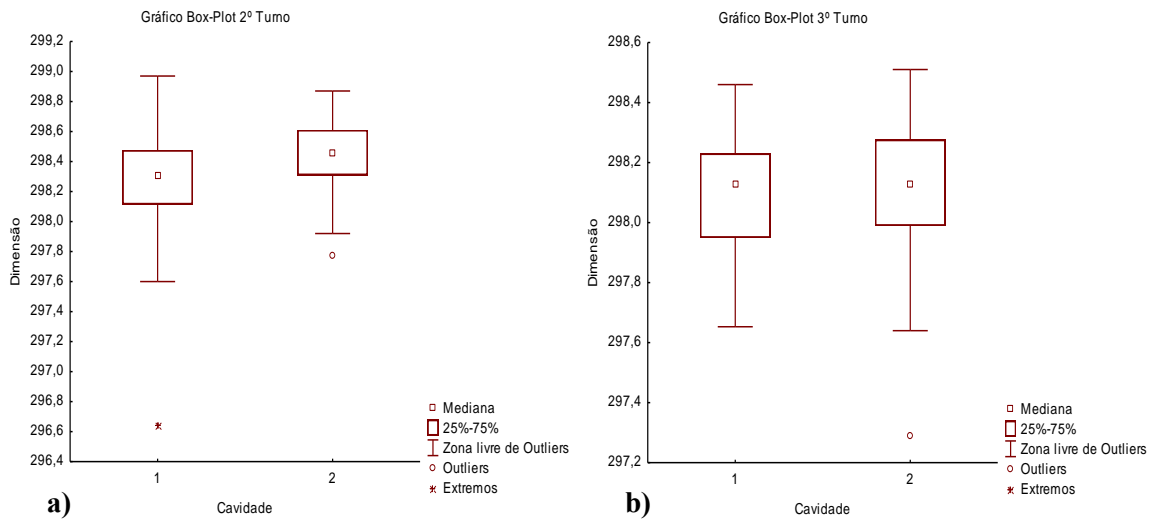


Figura II. 6 - Box-Plot Componente 4, 2ª Janela; a) 1º Turno, b) 2º Turno, c) 3º Turno

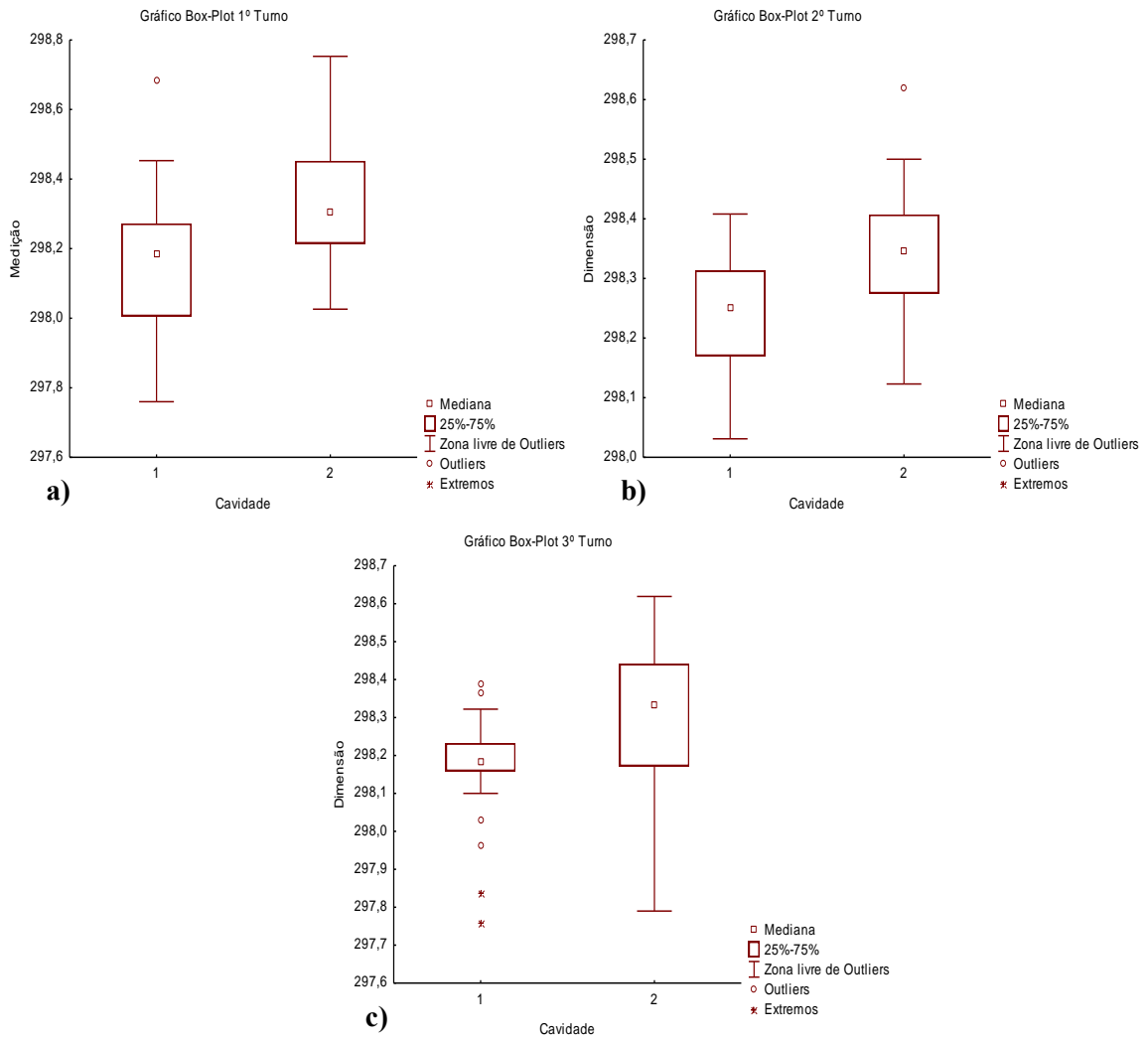


Figura II. 7 - Box-Plot Componente 4, 3ª Janela; a) 1º Turno, b) 2º Turno, c) 3º Turno

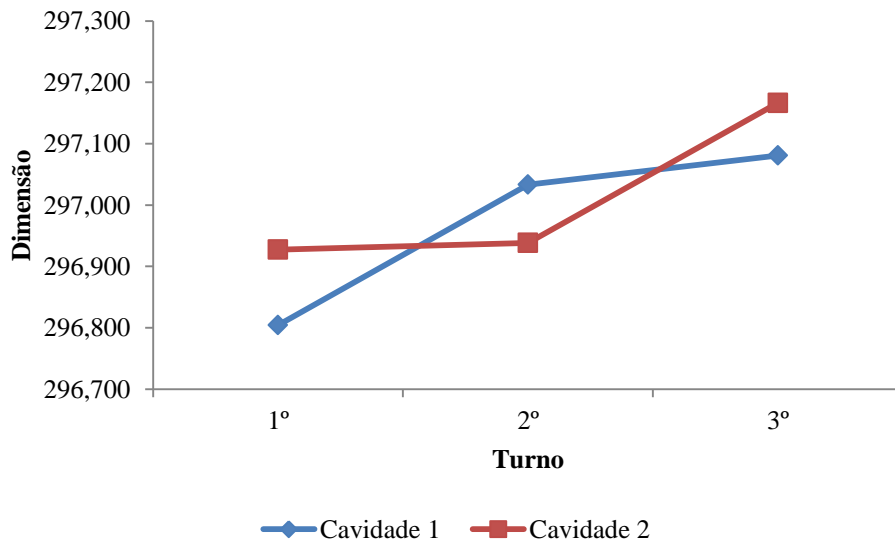


Figura II. 8 - Gráfico das Médias Componente 1, 1ª Janela

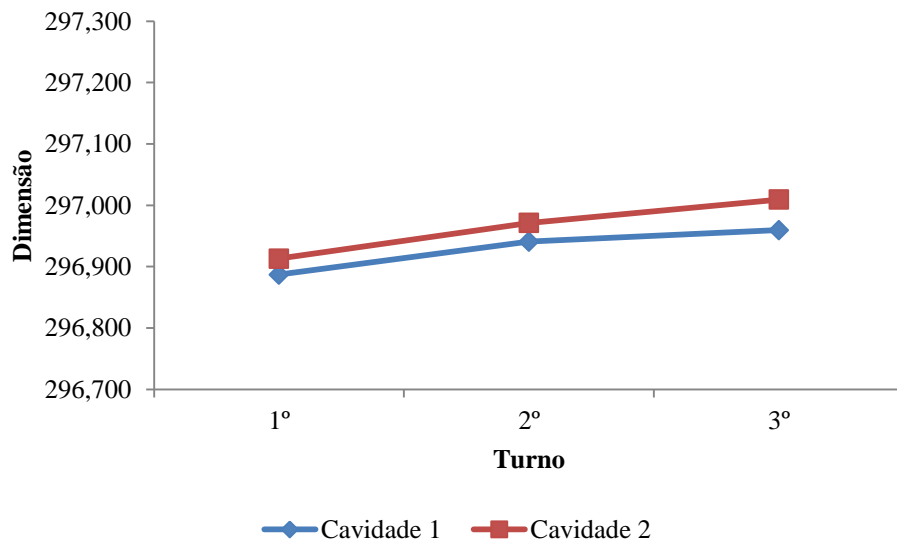


Figura II. 9 - Gráfico das Médias Componente 1, 2ª Janela

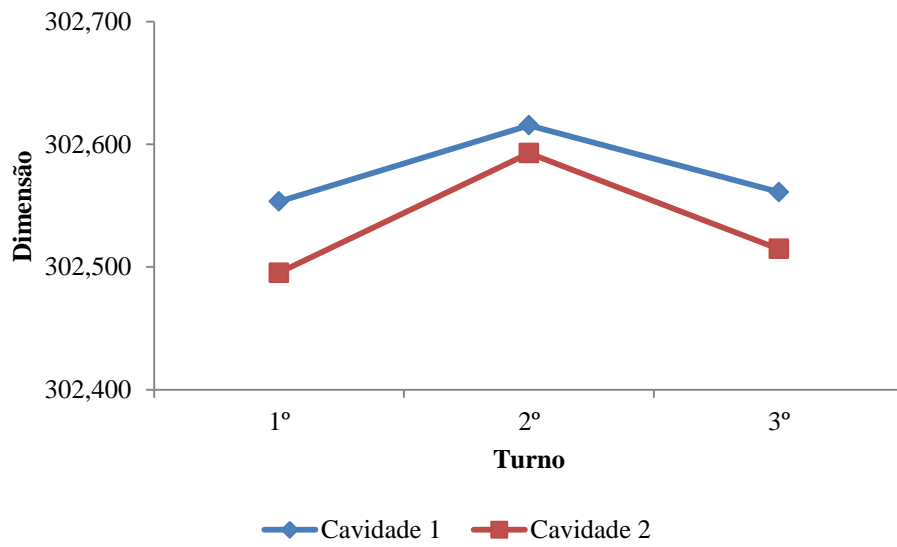


Figura II. 10 - Gráfico das Médias Componente 2, 2ª Janela

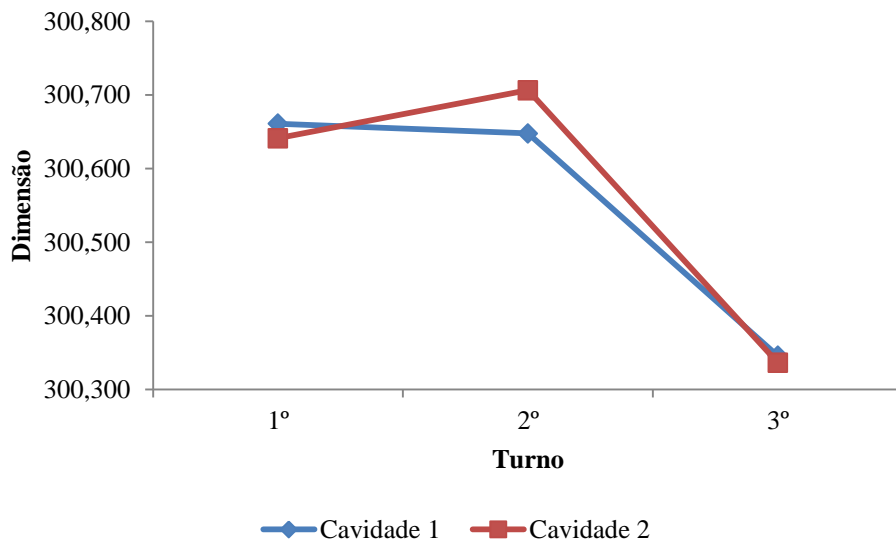


Figura II. 11 - Gráfico das Médias Componente 3, 2ª Janela

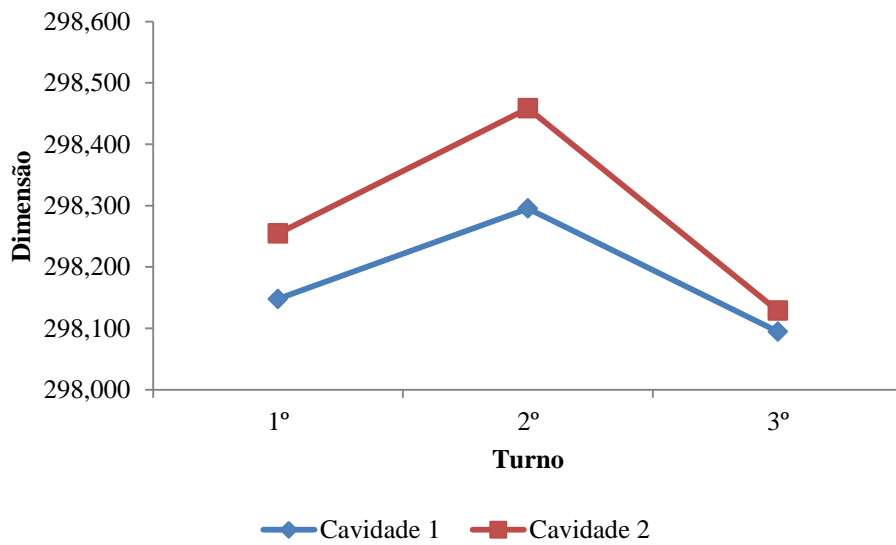


Figura II. 12 - Gráfico das Médias Componente 4, 2ª Janela

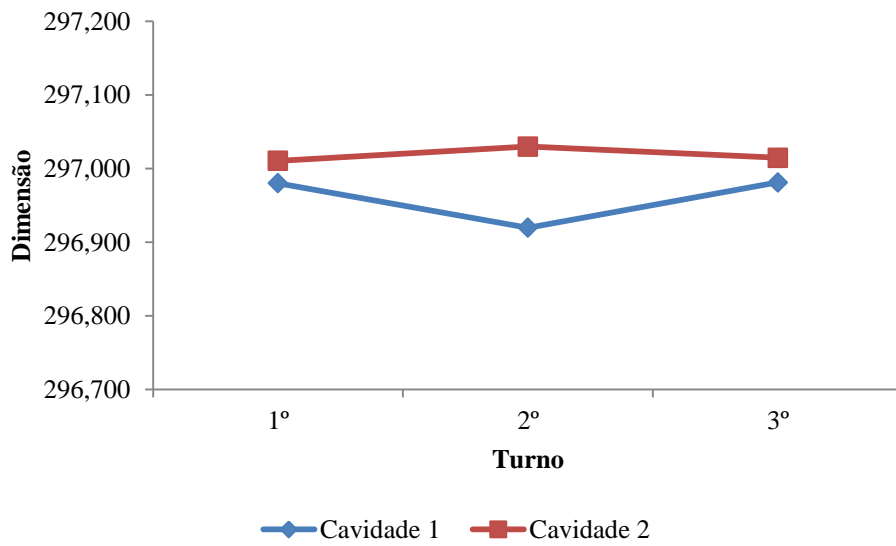


Figura II. 13 - Gráfico das Médias Componente 1, 3ª Janela

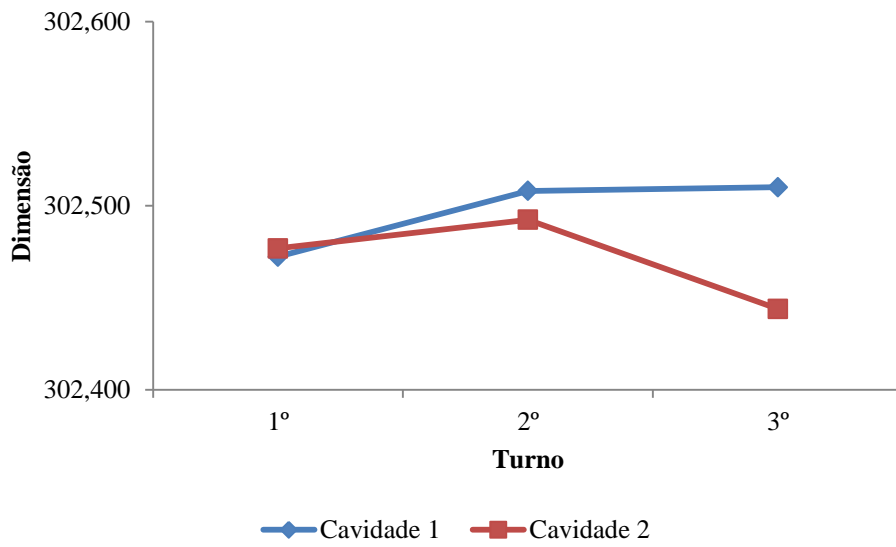


Figura II. 14 - Gráfico das Médias Componente 2, 3ª Janela

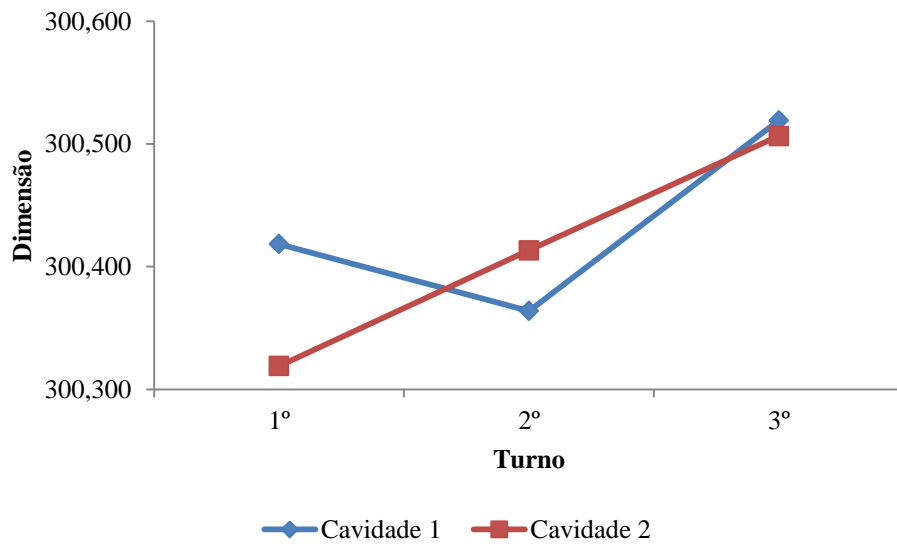


Figura II. 15 - Gráfico das Médias Componente 3, 3ª Janela

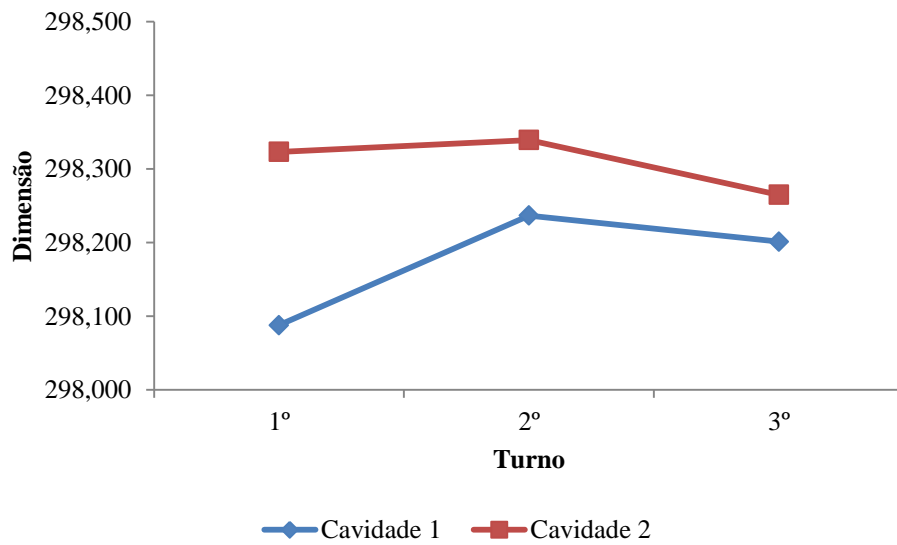


Figura II. 16 - Gráfico das Médias Componente 4, 3ª Janela

Anexo III

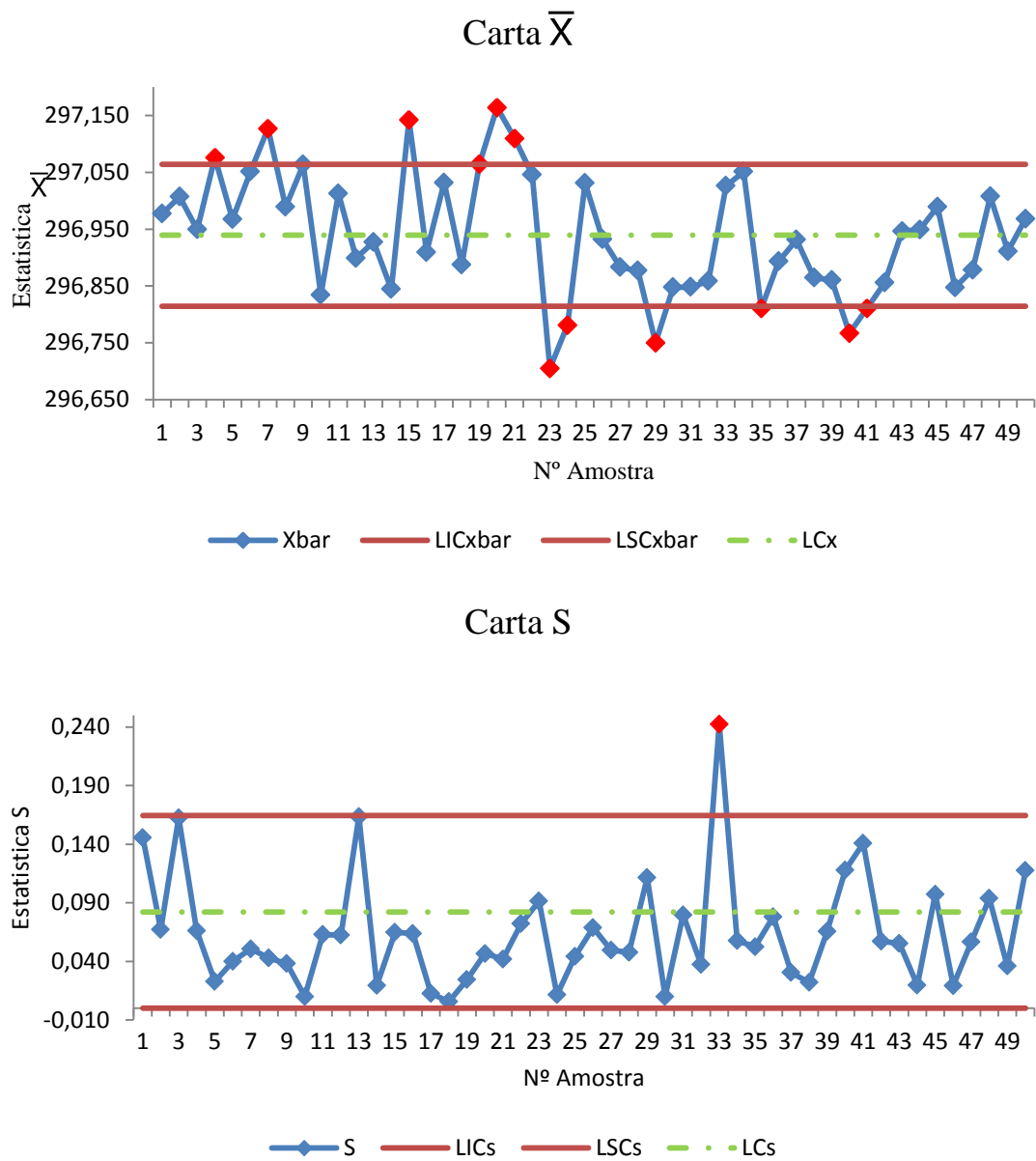


Figura III. 1 - Carta de Controle \bar{X} – S Componente 1

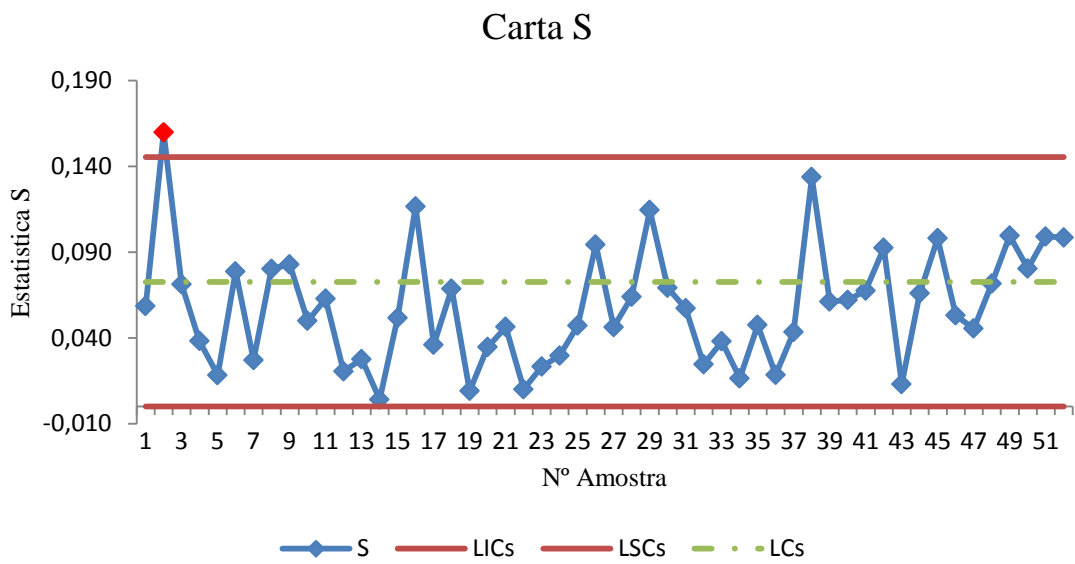
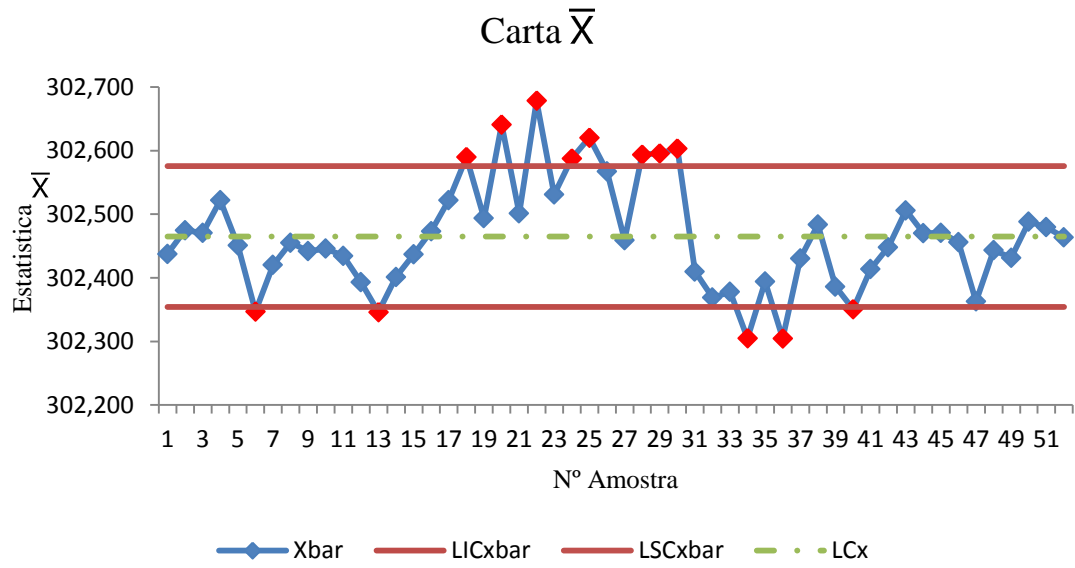


Figura III. 2 - Carta de Controle $\bar{X} - S$ Componente 2

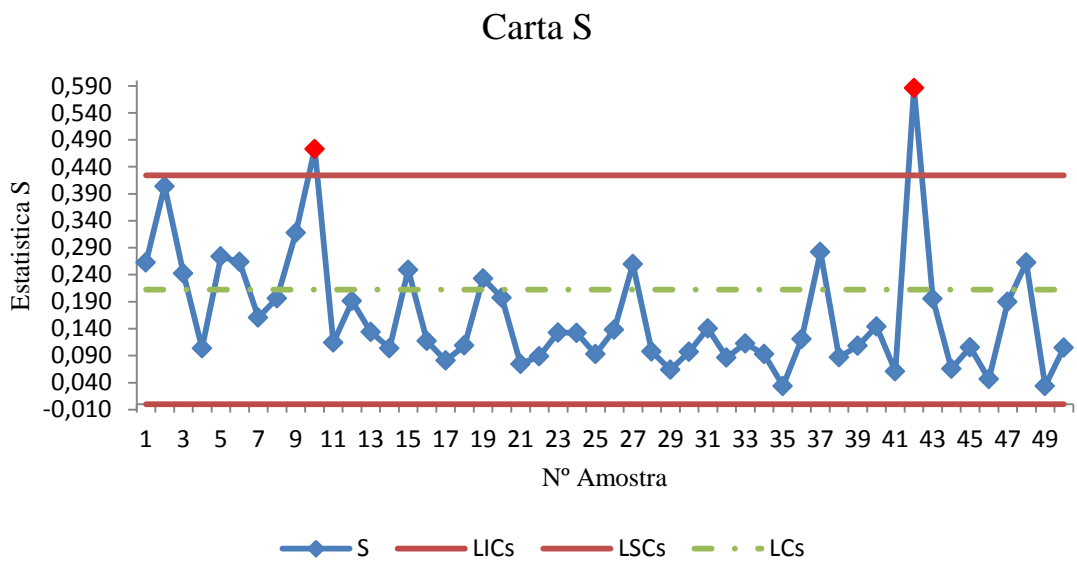
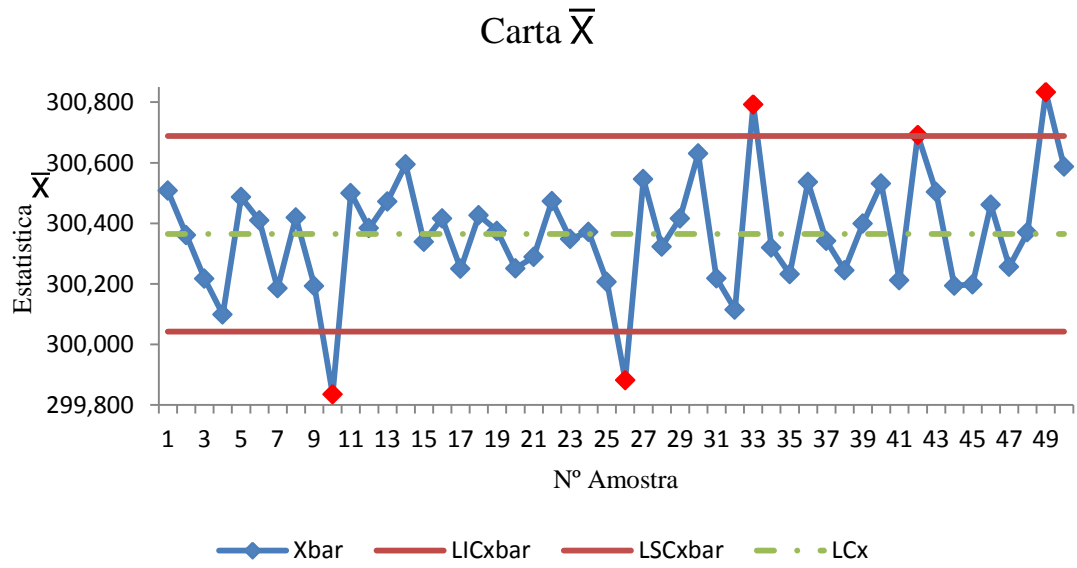


Figura III. 3 - Carta de Controle \bar{X} – S Componente 2

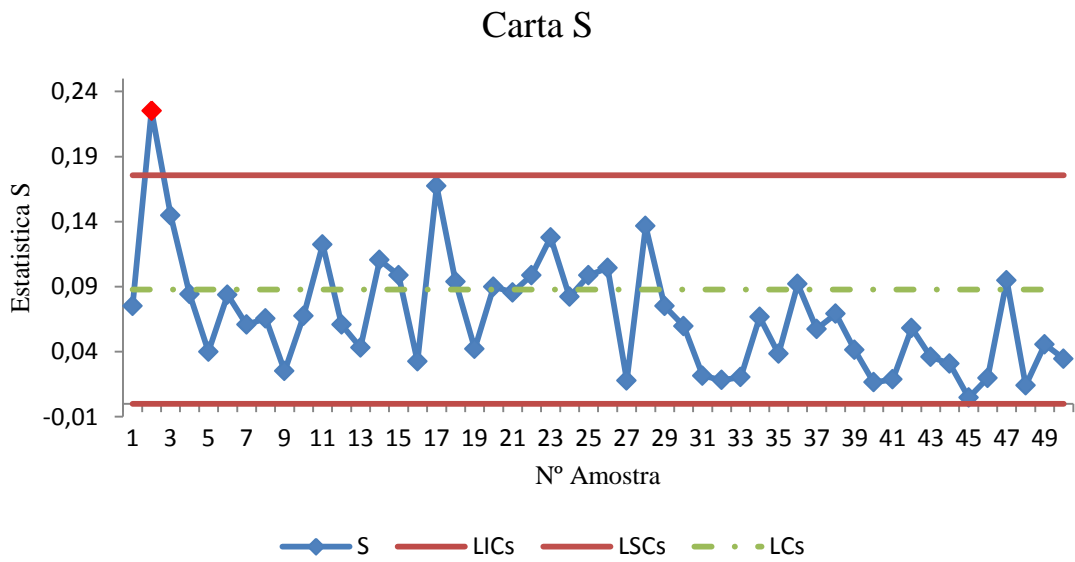
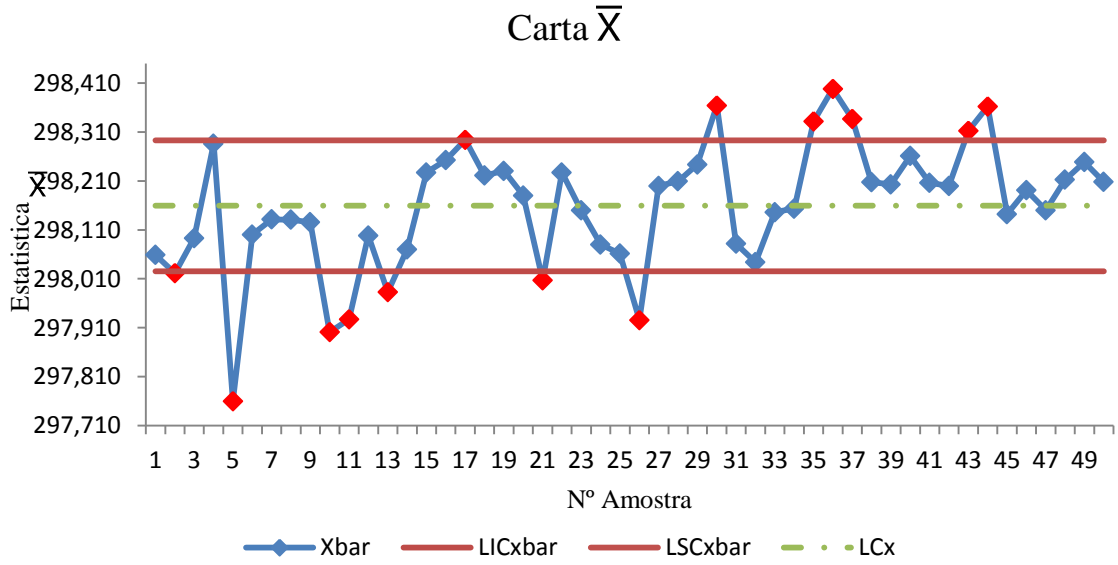


Figura III. 4 - Carta de Controle \bar{X} – S Componente 4 (Cavidade 1)

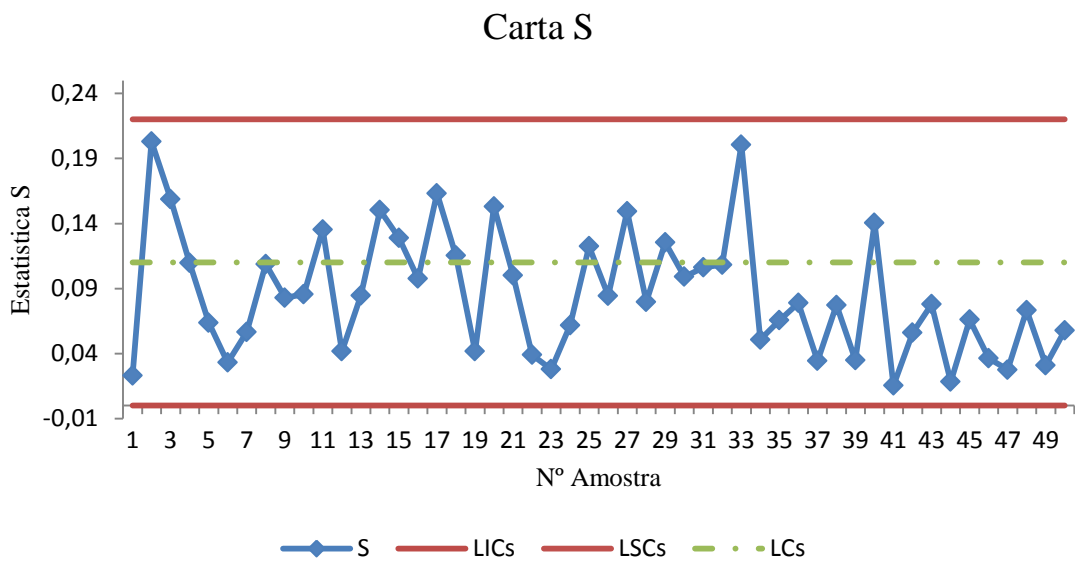
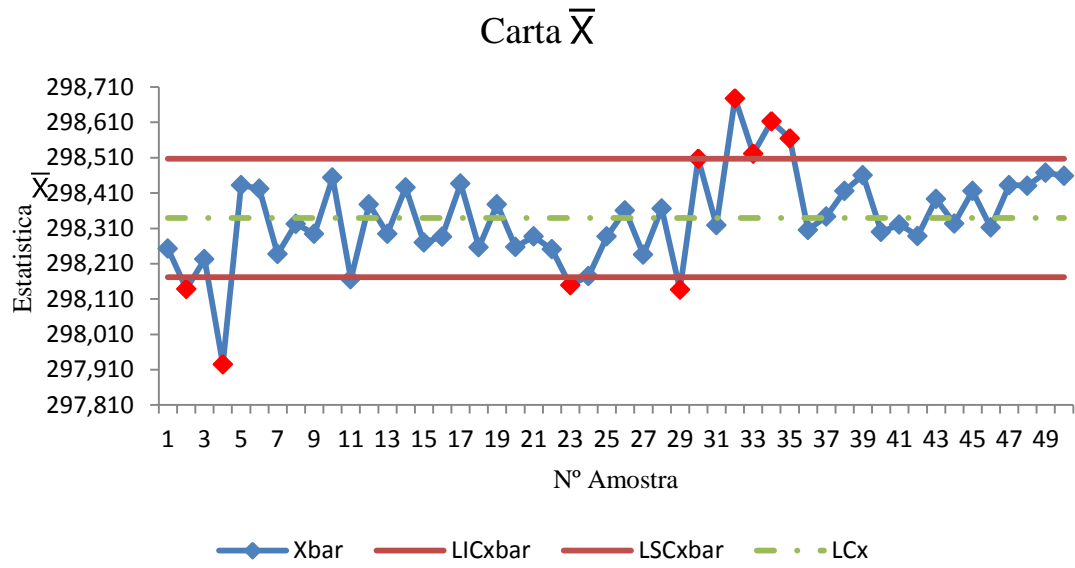


Figura III. 5 - Carta de Controle $\bar{X} - S$ Componente 4 (Cavidade 2)