



Pedro de Brito Quental Caramujo

Licenciado em Ciências de Engenharia e Gestão Industrial

**Controlo Estatístico do Processo de
Injeção de um Fabricante de
*Intercoolers***

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

Orientador: Professor Doutor Izunildo Fernandes Cabral, Professor
Auxiliar Convidado, Faculdade de Ciências e Tecnologia,
Universidade Nova de Lisboa

Coorientador: Professor Doutor José Fernando Gomes Requeijo,
Professor Auxiliar, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade
Nova de Lisboa

Júri:

Presidente: Professora Doutora Ana Paula Ferreira Barroso
Arguente: Professor Doutor António João Pina da Costa Feliciano Abreu
Vogal: Professor Doutor Izunildo Fernandes Cabral



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

dezembro, 2018

Controlo Estatístico do Processo de Injeção de um Fabricante de *Intercoolers*.

Copyright © Pedro de Brito Quental Caramujo, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

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 simboliza um trabalho cujo desenvolvimento não seria executável sem o contributo de diversas pessoas e entidades.

À Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, agradeço a formação ao longo destes cinco anos, que me possibilitou desenvolver não só competências de base, mas também competências complementares. Em particular, agradeço aos professores Izunildo Cabral e José Requeijo, pela orientação e a disponibilidade, que me permitiram manter a direção no sentido da conclusão do projeto e a motivação para explorar diferentes abordagens.

À empresa João de Deus & Filhos, S.A., agradeço a forma gentil como acolheram o presente projeto de investigação. Em especial: à Engenheira Sónia Oliveira, por me ter proporcionado a oportunidade de desenvolver o estudo na empresa; à Engenheira Lília Mendes, pela orientação e por ter assegurado as condições necessárias para a realização do estudo no setor de injeção; ao Engenheiro Vasco Ezequiel, pelo auxílio prestado e sugestões efetuadas ao longo da minha passagem pela empresa; e ao experiente técnico de injeção Paulo Ribeiro, pelas informações valiosas acerca da área de injeção, que me encaminharam para um conhecimento aprofundado da mesma.

O meu profundo agradecimento aos meus amigos de sempre e de faculdade, que, ao longo do meu percurso académico, demonstraram o seu companheirismo e amizade em diversos momentos.

À Raquel, agradeço o carinho genuíno e o apoio incansável que me permitiram ultrapassar todas as adversidades e alcançar os meus objetivos, contribuindo de forma marcante para o meu desenvolvimento enquanto pessoa.

Por fim, pretendo agradecer à minha família, em especial aos meus pais, irmã e avós, pelo acompanhamento próximo ao longo da minha vida, particularmente no decorrer dos cinco anos de faculdade, e por me terem instruído com valores e princípios que me permitem ser uma pessoa cada vez mais feliz.

Resumo

O presente trabalho teve como objetivo a melhoria das operações de injeção da unidade fabril da empresa João de Deus & Filhos, S.A.. Para tal, propõe-se controlar estatisticamente o processo de Moldação por Injeção, através de uma metodologia apoiada em diversas ferramentas estatísticas, tais como: Testes de Kolmogorov-Smirnov (K-S e K-S 2), Análise da Variância, Diagrama de Ishikawa, Diagrama de Pareto, Histogramas e Cartas de Controlo para aplicação no Controlo Estatístico Univariado e Multivariado.

O estudo iniciou-se com o estabelecimento de uma fase preparatória, na qual se estudou o teor de humidade presente na matéria-prima, que constitui a principal fonte de possíveis variações dimensionais nas “caixas” resultantes do processo de Moldação por Injeção. No decorrer desta fase, efetuaram-se dois tipos de análise ao teor de humidade presente na matéria-prima — Análises Pré-Secagem e Pós-Secagem. Na Análise Pré-Secagem, recorreu-se à Análise da Variância para averiguar possíveis diferenças significativas entre o teor de humidade presente em cinco *big bags* que se preparavam para ser utilizados para a produção. Esta análise permitiu concluir que existem diferenças significativas entre as médias de teor de humidade na matéria-prima contida em cada um dos cinco *big bags*. Na Análise Pós-Secagem, efetuou-se um controlo estatístico do processo de secagem da matéria-prima, monitorizando o teor de humidade presente no material à saída da estufa, onde foi possível concluir que o processo de secagem da matéria-prima não se encontra sob controlo estatístico, constatando-se a ocorrência de causas invulgares.

O Controlo Estatístico do Processo de Moldação por Injeção foi realizado segundo duas abordagens distintas — Estudo Univariado (controlo isolado de cada característica em estudo) e Estudo Multivariado (controlo simultâneo das cinco características em estudo). Com o auxílio de cartas de controlo estatístico, assim como outras ferramentas estatísticas, foi possível formular conclusões acerca da estabilidade dos processos das “caixas” analisadas e sobre a aptidão dos mesmos em produzirem de acordo com as especificações exigidas (i.e., estudo da capacidade do processo).

Por fim, os resultados obtidos no Estudo Univariado e Multivariado foram comparados, tendo sido identificadas oportunidades de melhoria no setor de injeção, propostas ações corretivas e sugeridos trabalhos futuros.

Palavras Chave: Ferramentas Estatísticas, Variabilidade, Controlo Estatístico do Processo Univariado, Controlo Estatístico do Processo Multivariado, Capacidade do Processo, Causas de Variação

Abstract

The purpose of this study was to optimize the injection sector of the manufacturing unit of João de Deus & Filhos, SA. For this purpose, the statistical control of the Injection Molding process is proposed, using a methodology based on several statistical tools, such as: Kolmogorov-Smirnov (KS and KS 2) tests, Analysis of Variance, Ishikawa Diagram, Pareto Diagram, Histograms and Control Charts for application in Univariate and Multivariate Statistical Control.

The study began with the establishment of a preparatory phase, in which the moisture content present in the raw material was studied, which is the main source of possible dimensional variations in the “tanks” that are produced by the Injection Molding process. During this phase, two types of analysis were performed on the moisture content present in the raw material — Pre-Drying and Post-Drying Analysis. In the Pre-Drying, the Analysis of Variance was used to investigate possible significant differences between the moisture content present in five big bags that were prepared to be used for the production. This analysis allowed to conclude that there are significant differences between the averages of moisture content in the raw material contained in each of the five big bags. In the Post-Drying analysis, a statistical control of the drying process of the raw material was carried out, monitoring the moisture content present in the material at the exit of the heater. It was possible to conclude that the drying process of the raw material is not under statistical control.

The Statistical Control of the Injection Molding Process was performed according to two different approaches - Univariate Study (individual control of each characteristic) and Multivariate Study (simultaneous control of the five characteristics). With the aid of statistical charts, and other statistical tools, it was possible to conclude about the stability of the processes of the “tanks” analyzed, and about the processes ability to produce according to the required specifications (i.e., process capability study).

Finally, the results in the Univariate and Multivariate Study were compared, opportunities for improvement in the injection sector were identified and corrective actions were proposed.

Key-Words: Statistical Tools, Variability, Univariate Statistical Process Control, Multivariate Statistical Process Control, Process Capacity, Causes of Variation

Índice

1. Introdução	1
1.1. Enquadramento e Motivações	1
1.2. Objetivos.....	2
1.3. Metodologia.....	3
1.4. Estrutura da Dissertação	3
2. Fundamentação Teórica.....	5
2.1. Evolução Histórica da Qualidade	5
2.2. Técnicas Estatísticas no Âmbito da Gestão da Qualidade	8
2.2.1. Teste de Kolmogorov-Smirnov – <i>One Sample Test</i>	8
2.2.2. Teste de Kolmogorov-Smirnov – <i>Two Samples Test</i>	9
2.2.3. Análise da Variância	10
2.3. Controlo Estatístico de Processos – Abordagem Tradicional	14
2.3.1. Variabilidade dos Processos.....	14
2.3.2. Ferramentas Básicas de Gestão da Qualidade	15
2.3.3. Princípios das Cartas de Controlo Tradicionais	16
2.3.4. Detecção de Padrões Não Aleatórios no Processo.....	17
2.3.5. Tipos de Cartas de Controlo	19
2.3.6. Condições de Utilização de Cartas de Controlo de Variáveis.....	23
2.3.7. Estudo da Capacidade do Processo.....	25
2.4. Controlo Estatístico para “Pequenas Produções”	30
2.4.1. Cartas de Controlo Z e W	30
2.4.2. Cartas de Controlo Q.....	33
2.5. Controlo Estatístico do Processo Multivariado	36
2.5.1. Cartas para Controlo das Médias de Amostras	37
2.5.2. Interpretação das Cartas Multivariadas	40
2.5.3. Capacidade Multivariada do Processo	41
3. Caracterização da Empresa e da Área de Injeção	45
3.1. Introdução à empresa João de Deus & Filhos, S.A. (JDEUS)	45
3.2. Estrutura Organizacional.....	47
3.3. Certificações.....	48
3.4. Produtos	48
3.5. O Conceito de Intercooler.....	49
3.5.1. Processo Produtivo de <i>Intercoolers</i>	50
3.6. Caracterização da Área de Injeção - Processo Produtivo de Caixas	51
3.6.1. Preparação da Matéria-Prima.....	52

3.6.2.	Moldação por Injeção	54
3.6.3.	Inspeção e Armazenagem.....	59
4.	Componente Experimental.....	61
4.1.	Caso de Estudo - Metodologia	61
4.2.	Análise do Teor de Humidade na Matéria Prima	62
4.2.1.	Equipamento de Medição e Método de Amostragem	63
4.2.2.	Diagrama de Pareto.....	64
4.2.3.	Análise Pré-Secagem	66
4.2.4.	Análise Pós-Secagem	70
4.2.5.	Diagrama de <i>Ishikawa</i>	74
4.3.	Controlo Estatístico do Processo de Moldação por Injeção.....	75
4.3.1.	Produtos e Características em Estudo	75
4.3.2.	Plano de Controlo	76
4.3.3.	Estudo Univariado do Processo – Fase I.....	78
4.3.4.	Estudo Univariado do Processo - Fase II	90
4.3.5.	Estudo Multivariado do Processo – Fase I.....	92
4.3.6.	Estudo Multivariado do Processo – Fase II.....	96
4.3.7.	Confrontação dos Resultados Obtidos em ambos os Estudos.....	97
5.	Conclusões e Recomendações.....	101
5.1.	Conclusões Finais	101
5.2.	Recomendações para Trabalhos Futuros.....	104
	Referências Bibliográficas.....	107
	Anexos	111
	Anexo A: Tabelas do Teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S).....	111
	Anexo B: Tabela do Teste de Kolmogorov-Smirnov para comparação de duas amostras (K-S 2).....	113
	Anexo C: Constantes e Fatores para as Cartas de Controlo de Variáveis Tradicionais.....	115
	Anexo D: Dados Recolhidos.....	116
	Anexo E: Cartas de Controlo Univariadas para a Fase I do <i>SPC</i>	132
	Anexo F: Histogramas para o estudo da Normalidade	142
	Anexo G: Tabelas para deteção de Padrões não aleatórios	147
	Anexo H: Cartas de Controlo para a Fase II do <i>SPC</i>	153
	Anexo I: Carta de Controlo para a Fase II do <i>MSPC</i>	164

Índice de Figuras

Figura 2.1 - Causas Comuns e Causa Especiais de Variação.....	15
Figura 2.2 - Exemplo de uma Carta de Controlo.....	17
Figura 2.3 - Regras para Detecção de Causas Especiais.....	18
Figura 2.4 - Evolução da Capacidade de um Processo.....	26
Figura 2.5 - Definição do Índice de Capacidade Superior.....	28
Figura 2.6 - Região do Processo, da Especificação e Modificada.....	42
Figura 3.1 - Sede da JDEUS.....	45
Figura 3.2 - Ramos de atividade do grupo JDEUS.....	46
Figura 3.3 - Distribuição Geográfica do grupo JDEUS.....	47
Figura 3.4 - Organigrama da empresa JDEUS.....	47
Figura 3.5 - Exemplo de Intercooler.....	48
Figura 3.6 - Outros Produtos.....	48
Figura 3.7 - Relação entre Turbocompressor- <i>Intercooler</i> -Motor.....	50
Figura 3.8 - Etapas de Produção de um Intercooler.....	50
Figura 3.9 - Intercooler e seus Componentes.....	51
Figura 3.10 - Caixa de Entrada de Ar.....	52
Figura 3.11 - Estufa.....	53
Figura 3.12 - Big Bag de Matéria Prima.....	53
Figura 3.13 - Tubagens de Alimentação da Matéria Prima.....	53
Figura 3.14 - Molde.....	54
Figura 3.15 - Máquina de Injeção.....	54
Figura 3.16 - Ciclo de Injeção.....	54
Figura 3.17 - Tapete Transportador.....	55
Figura 3.18 - Máquina de Injeção e Unidades Funcionais.....	56
Figura 3.19 - Partes constituintes de um Molde.....	57
Figura 3.20 - Parâmetros Principais por Etapa do Ciclo de Injeção.....	59
Figura 4.1 - Metodologia para a Análise do Teor de Humidade.....	61
Figura 4.2 - Balança Analisadora de Humidade.....	63
Figura 4.4 – Saco para Recolha de Material.....	64
Figura 4.3 – Base de Alumínio e Espátula.....	64
Figura 4.5 – Equipamento em funcionamento.....	64
Figura 4.6 – Diagrama de Pareto.....	65
Figura 4.7 – Verificação da Normalidade dos Resíduos.....	68
Figura 4.8 – Verificação da Homogeneidade das Variâncias.....	68
Figura 4.9 – Verificação da Independência dos Resíduos.....	69
Figura 4.10 – Carta de Controlo Q(X) para Análise Pós-Secagem.....	71
Figura 4.11 – Carta de Controlo Q(MR) para Análise Pós-Secagem.....	71
Figura 4.12 – Verificação da Normalidade dos dados da Análise Pós-Secagem.....	73

Figura 4.13 – Diagrama de Ishikawa	74
Figura 4.14 – Produtos e Características em estudo	75
Figura 4.15 – Cotas para medição nas Caixas.....	76
Figura 4.16 – Paquímetro Eletrônico.....	77
Figura 4.17 – Balança Eletrônica	77
Figura 4.18 – Cartas da Média e do Desvio Padrão para a Massa - A94 501	79
Figura 4.19 – Histograma dos dados obtidos para a Massa – A94 501	80
Figura 4.20 – Simplificação do Molde da referência A94 501	81
Figura 4.21 – Funções de Distribuições Acumuladas para C1.....	83
Figura 4.22 - Cartas da Média e do Desvio Padrão para L1 – D72 501	85
Figura 4.23 - Cartas da Média e do Desvio Padrão para L1 – D72 502.....	86
Figura 4.24 – Carta T_2 para a referência D72 501	92
Figura 4.25 - Carta T_2 para a referência D72 502.....	93
Figura 4.26 - Carta T_2 Revista para a referência D72 501.....	93
Figura 4.27 - Carta T_2 Revista para a referência D72 502.....	94
Figura E.1 – Cartas da Média e do Desvio Padrão para C1 - A94 501	132
Figura E.2 - Cartas da Média e do Desvio Padrão para C2 - A94 501	132
Figura E.3 - Cartas da Média e do Desvio Padrão para L1 - A94 501	133
Figura E.4 - Cartas da Média e do Desvio Padrão para L2 - A94 501	133
Figura E.5 - Cartas da Média e do Desvio Padrão para a Massa – D72 501	134
Figura E.6 - Cartas da Média e do Desvio Padrão Revistas para a Massa – D72 501	134
Figura E.7 - Cartas da Média e do Desvio Padrão para C1 – D72 501.....	135
Figura E.8 - Cartas da Média e do Desvio Padrão para C2 – D72 501.....	135
Figura E.9 - Cartas da Média e do Desvio Padrão para L2 – D72 501	136
Figura E.10 - Cartas da Média e do Desvio Padrão Revistas para L2 – D72 501.....	137
Figura E.11 - Cartas da Média e do Desvio Padrão para a Massa – D72 502.....	137
Figura E.12 - Cartas da Média e do Desvio Padrão Revistas para a Massa – D72 502	138
Figura E.13 - Cartas da Média e do Desvio Padrão para C1 – D72 502.....	138
Figura E.14 - Cartas da Média e do Desvio Padrão Revistas para C1 – D72 502	139
Figura E.15 - Cartas da Média e do Desvio Padrão para C2 – D72 502.....	139
Figura E.16 - Cartas da Média e do Desvio Padrão Revistas para C2 – D72 502	140
Figura E.17 - Cartas da Média e do Desvio Padrão para L2 – D72 502	141
Figura E.18 - Cartas da Média e do Desvio Padrão Revistas para L2 – D72 502.....	141
Figura F.1 – Estudo da Normalidade dos dados da Massa – D72 501	142
Figura F.2 - Estudo da Normalidade dos dados de C1 – D72 501	142
Figura F.3 - Estudo da Normalidade dos dados de C2 – D72 501	143
Figura F.4 - Estudo da Normalidade dos dados de L1 – D72 501.....	143
Figura F.5 - Estudo da Normalidade dos dados de L2 – D72 501.....	144
Figura F.6 - Estudo da Normalidade dos dados da Massa – D72 502.....	144
Figura F.7 - Estudo da Normalidade dos dados de C1 – D72 502.....	145

Figura F.8 - Estudo da Normalidade dos dados de C2 – D72 502.....	145
Figura F.9 - Estudo da Normalidade dos dados de L1 – D72 502.....	146
Figura F.10 - Estudo da Normalidade dos dados de L2 – D72 502.....	146
Figura G.1 – Padrões não aleatórios da carta da média da Massa – D72 501	147
Figura G.2 - Padrões não aleatórios da carta do desvio padrão da Massa – D72 501	147
Figura G.3 - Padrões não aleatórios da carta da média de C1 – D72 501.....	147
Figura G.4 - Padrões não aleatórios da carta do desvio padrão de C1 – D72 501	148
Figura G.5 - Padrões não aleatórios da carta da média de C2 – D72 501.....	148
Figura G.6 - Padrões não aleatórios da carta do desvio padrão de C2 – D72 501	148
Figura G.7 - Padrões não aleatórios da carta da média de L1 – D72 501	148
Figura G.8 - Padrões não aleatórios da carta do desvio padrão de L1 – D72 501.....	149
Figura G.9 - Padrões não aleatórios da carta da média de L2 – D72 501	149
Figura G.10 - Padrões não aleatórios da carta do desvio padrão de L2 – D72 501.....	149
Figura G.11 - Padrões não aleatórios da carta da média da Massa – D72 502.....	150
Figura G.12 - Padrões não aleatórios da carta do desvio padrão da Massa – D72 502	150
Figura G.13 - Padrões não aleatórios da carta da média de C1 – D72 502.....	150
Figura G.14 - Padrões não aleatórios da carta do desvio padrão de C1 – D72 502	150
Figura G.15 - Padrões não aleatórios da carta da média de C2 – D72 502.....	151
Figura G.16 - Padrões não aleatórios da carta do desvio padrão de C2 – D72 502	151
Figura G.17 - Padrões não aleatórios da carta da média de L1 – D72 502	151
Figura G.18 - Padrões não aleatórios da carta do desvio padrão de L1 – D72 502.....	152
Figura G.19 - Padrões não aleatórios da carta da média de L2 – D72 502	152
Figura G.20 - Padrões não aleatórios da carta do desvio padrão de L2 – D72 502.....	152
Figura H.1 – Carta Z para a Massa	153
Figura H.2 – Carta Z Aproximada para a Massa	154
Figura H.3 – Carta Z para C1	155
Figura H.4 - Carta Z para C2.....	156
Figura H.5 - Carta Z para L1	157
Figura H.6 - Carta Z para L2	158
Figura H.7 - Carta W para a Massa.....	159
Figura H.8 - Carta W para C1.....	160
Figura H.9 - Carta W para C2.....	161
Figura H.10 - Carta W para L1	162
Figura H.11 - Carta W para L2	163
Figura I.1 – Carta para a Fase II do <i>MSPC</i>	164

Índice de Tabelas

Tabela 2.1 - ANOVA One Way.....	12
Tabela 2.2 - Cartas de Controlo de Variáveis.....	19
Tabela 2.3 Limites de Controlo das Cartas para a Fase II do SPC	23
Tabela 2.4 - Valores Mínimos Recomendáveis para Índices de Capacidade	28
Tabela 3.1 - Principais Clientes da JDEUS	49
Tabela 4.1 – Fases da Análise do Teor de Humidade	63
Tabela 4.2 – Tabela de Auxílio ao Diagrama de Pareto.....	65
Tabela 4.3 – Resultados da Medição Pré-Secagem	66
Tabela 4.4 – ANOVA: Análise Pré-Secagem	67
Tabela 4.5 – Resultados obtidos no Teste de Bartlett.....	69
Tabela 4.6 – Resultados obtidos da Verificação da Normalidade da Análise Pós-Secagem	74
Tabela 4.7 – Condições de Recolha e Medição	78
Tabela 4.8 – Estatísticas Básicas.....	82
Tabela 4.9 – Resultados obtidos nos Testes de Kolmogorov Smirnov (K-S 2)	83
Tabela 4.10 – Pontos fora dos Limites de Controlo na Fase I do SPC	87
Tabela 4.11 – Testes de Kolmogorov-Smirnov para ajustamento a uma Normal ($\alpha = 5\%$).....	88
Tabela 4.12 - Estimação dos Parâmetros dos Processos.....	88
Tabela 4.13 - Limites de Especificação Técnica	89
Tabela 4.14 - Estudo da Capacidade dos Processos na Fase I do SPC	89
Tabela 4.15 - Pontos fora dos Limites de Controlo na Fase II do SPC	91
Tabela 4.16 – Valores finais e Estatísticas calculadas na Fase I do MSPC da Ref. D72 501.....	93
Tabela 4.17 - Valores finais e Estatísticas calculadas na Fase I do MSPC da Ref. D72 502	94
Tabela 4.18 - Estudo da Capacidade Multivariada dos Processos	95
Tabela 4.19 – Resultados obtidos pelo método da estatística d para o instante $t = 16$	96
Tabela 4.20 - Resultados obtidos pelo método da estatística d para todos os instantes	97
Tabela 4.21 – Resumo da Fase I do SPC e MSPC para a referência D72 501	98
Tabela 4.22 - Resumo da Fase I do SPC e MSPC para a referência D72 502.....	99
Tabela 4.23 – Característica(s) responsável(eis) pelas causas especiais na Fase II do SPC e MSPC.....	100
Tabela A.1 - Valores críticos da distribuição da estatística $D = \sup S(x) - F_0(x) $ para amostras de dimensão n e populações Normais com parâmetros conhecidos.....	111
Tabela A.2 - Valores críticos da distribuição da estatística $D = \sup S(x) - F_0(x) $ para populações Normais e parâmetros estimados a partir de amostras de dimensão n	112
Tabela B.1 - Valores críticos para o Teste K-S 2	113
Tabela C.1 – Constantes e Fatores para Cartas de Controlo de Variáveis.....	115
Tabela D.1 – Dados Recolhidos para a Análise Pós-Secagem	116
Tabela D.2 – Dados recolhidos para a Massa da referência A94 501	117

Tabela D.3 - Dados recolhidos para comprimento C1 da referência A94 501	118
Tabela D.4 - Dados recolhidos para comprimento C2 da referência A94 501	119
Tabela D.5 - Dados recolhidos para largura L1 da referência A94 501.....	120
Tabela D.6 - Dados recolhidos para largura L2 da referência A94 501.....	121
Tabela D.7 - Dados recolhidos para a Massa da referência D72 501	122
Tabela D.8 - Dados recolhidos para o comprimento C1 da referência D72 501	123
Tabela D.9 - Dados recolhidos para o comprimento C2 da referência D72 501	124
Tabela D.10 - Dados recolhidos para a largura L1 da referência D72 501	125
Tabela D.11 - Dados recolhidos para a largura L2 da referência D72 501	126
Tabela D.12 - Dados recolhidos para a Massa da referência D72 502	127
Tabela D.13 - Dados recolhidos para o comprimento C1 da referência D72 502	128
Tabela D.14 - Dados recolhidos para o comprimento C2 da referência D72 502	129
Tabela D.15 - Dados recolhidos para a largura L1 da referência D72 502	130
Tabela D.16 - Dados recolhidos para a largura L2 da referência D72 502	131

Lista de Siglas

<i>ARL</i>	<i>Average Run Length</i>
<i>CUSUM</i>	Somas acumuladas
<i>DOE</i>	Desenho de Experiências
EPI	Equipamento de Proteção Individual
<i>EWMA</i>	Média Móvel Exponencialmente Amortecida
FAC	Função de Autocorrelação
FACP	Função de Autocorrelação Parcial
g.l.	Graus de Liberdade
JDEUS	João de Deus & Filhos, S.A.
<i>JUSE</i>	União de Cientistas e Engenheiros Japoneses
K-S	Kolmogorov-Smirnov
K-S 2	Kolmogorov-Smirnov para comparação de duas amostras
LC	Linha Central
LIC	Limite Inferior de Controlo
LIE	Limite Inferior de Especificação
LIP	Limite Inferior do Processo
LSC	Limite Superior de Controlo
LSE	Limite Superior de Especificação
LSP	Limite Superior do Processo
<i>MSPC</i>	Controlo Estatístico do Processo Multivariado
PIB	Produto Interno Bruto
SGQ	Sistema de Gestão da Qualidade
<i>SPC</i>	Controlo Estatístico do Processo
TLC	Teorema do Limite Central
<i>TQM</i>	<i>Total Quality Management</i>

Lista de Símbolos

a	Número de níveis
b_1	Coefficiente de assimetria
b_2	Coefficiente de <i>curtose</i>
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 um processo multivariado
D	Estatística de Teste para o Teste de Kolmogorv-Smirnov (K-S)
$D_{critico}$	Valor crítico para os testes de Kolmogorov-Smirnov
d_j	Estatística d para cada variável/característica j
$D_{m,n}$	Estatística de Teste para o Teste de Kolmogorv-Smirnov (K-S 2)
e_{ij}	Variável aleatória relativa ao erro associado à observação j do nível i
$F_0(x)$	Função Distribuição teórica de frequências relativas acumuladas
$F_{1,\nu}$	Função de Distribuição de Fisher, sendo $\nu = \frac{r}{2} - 1$
$F_{\alpha;(a-1); (N-a) g.l.}$	Função de Distribuição de Fisher com $(a - 1)$ e $(N - a)$ graus de liberdade
$F_{\alpha;p,mn-m-p+1}$	Percentil à direita, para um nível de significância α , da Distribuição de Fisher p e $(mn - m - p + 1)$ graus de liberdade
G_{r-2}	Função de Distribuição de <i>t-student</i> , com $(r - 2)$ graus de liberdade
H_0	Hipótese Nula
H_1	Hipótese Alternativa
k	Número de classes

LI	Índice de capacidade de um processo multivariado
m	Número de amostras
N	Número de observações
n	Dimensão da amostra ou número de réplicas
MR	Amplitude móvel
\overline{MR}	Amplitude móvel média
MR_r	Amplitude móvel correspondente ao instante r
MS_B	Desvio quadrático médio entre os níveis
MS_W	Desvio quadrático médio do erro
PV	Índice de capacidade de um processo multivariado
$Q_r(MR_r)$	Estatística Q , no instante r , em função da amplitude móvel MR nesse instante
$Q_r(X_r)$	Estatística Q , no instante r , em função da observação X nesse instante
$((\hat{Q}_I)_r)_j$	Índice de capacidade inferior para as cartas Q , no instante r do produto j
$((\hat{Q}_S)_r)_j$	Índice de capacidade superior para as cartas Q , no instante r do produto j
R	Amplitude das observações de uma amostra
\bar{R}	Amplitude média
S	Desvio padrão amostral num dado instante
\mathbf{S}	Matriz das covariâncias amostrais
\bar{S}	Desvio padrão médio
S^{-1}	Matriz das covariâncias inversa
S_{jhk}	Covariância entre as características da qualidade j e h na amostra ou instante k
S_{jk}^2	Variância da característica da qualidade j na amostra ou instante k
S_{r-1}	Desvio padrão de $(r - 1)$ observações

SS_B	Fonte de variação entre níveis
SS_T	Variação Total
SS_W	Variação Residual
$S(x)$	Função de Distribuição Amostral de uma amostra
$(T^2)_k$	Valor da estatística T^2 no instante k
X	Valor da observação num dado instante
X_{ijk}	Observação i da característica da qualidade j na amostra ou instante k
X_r	Observação relativa ao instante r
\bar{X}	Média das observações de uma amostra
\bar{X}_{jk}	Média da característica da qualidade j na amostra ou instante k
\bar{X}_k	Vetor constituído pelas médias das p características da amostra k
\bar{X}_{r-1}	Média das observações até ao instante $(r - 1)$
$\bar{\bar{X}}$	Média das médias amostrais
$\bar{\mathbf{X}}$	Vetor média
y_{ij}	Valor observado de uma determinada variável y em análise, relativo à réplica j do nível i
$Y..$	Soma da totalidade de N observações
$(Z_i)_j$	Estatística Z para uma determinada amostra i e produto j
$((\hat{Z}_I)_r)_j$	Índice de capacidade inferior para as cartas Z , no instante r do produto j
$((\hat{Z}_S)_r)_j$	Índice de capacidade superior para as cartas Z , no instante r do produto j
α	Nível de significância
α_i	Risco do tipo I para a variável i
μ	Média de uma dada população
$\hat{\mu}$	Média estimada

σ	Desvio padrão de uma população
$\hat{\sigma}$	Desvio padrão estimado
σ_i^2	Variância relativa à população i
Φ^{-1}	Inverso da Distribuição Normal
$\hat{\Sigma}$	Matriz das covariâncias estimada
$\chi_{\alpha;p}^2$	Percentil à direita da Distribuição Qui-Quadrado, para um nível de significância α e para p graus de liberdade
τ_i	Efeito do nível i

1. Introdução

O atual capítulo constitui a primeira divisão da presente dissertação. Pretende-se expor o seu enquadramento e motivações, os objetivos que se propõem alcançar, a metodologia de investigação e, por fim, a descrição da estrutura do documento.

1.1. Enquadramento e Motivações

A indústria metalomecânica é, atualmente, o setor industrial mais exportador da economia portuguesa, sendo a sua atividade absolutamente crucial para o país. No período compreendido entre os anos de 2005 e 2017, as exportações do setor transitaram de 27% para 45% do PIB, tendo sido exportado cerca de 16,4 mil milhões de euros em 2017 (Notícias ao Minuto, 2018). Representa, por isso, um setor em profundo crescimento e expansão, no qual a melhoria contínua dos processos é fundamental para assegurar a inovação e a competitividade pretendidas.

Particularmente desde o início do século XX, as organizações da indústria metalomecânica, assim como a grande generalidade das restantes indústrias, têm vindo a tomar consciência da importância associada à gestão da qualidade dos seus processos. Face à crescente competitividade existente no mercado, os consumidores são cada vez mais minuciosos e detalhistas aquando da seleção de um produto, sendo a consistência da qualidade desse produto um fator claramente diferenciador. Para alcançar essa regularidade, os processos produtivos das empresas necessitam de se apresentar estáveis, isto é, de operarem com um mínimo de variabilidade em torno do *output* exigido.

Todos os processos possuem uma variabilidade intrínseca. Para uma organização, conhecer a oscilação natural dos seus processos é preponderante quando o objetivo é minimizar a variabilidade inerente aos mesmos e eliminar a variabilidade exterior e involuntária. Para tal, a aplicação de métodos estatísticos como auxílio ao estudo do comportamento dos processos revela-se bastante pertinente.

A implementação do Controlo Estatístico do Processo (*SPC*) vem permitir a distinção entre variabilidade inerente e variabilidade não inerente ao processo. Inicialmente, é efetuado um estudo retrospectivo, ao longo do qual é inferida a estabilidade do processo e são estimados os parâmetros do processo que traduzem essa estabilidade. Posteriormente, o processo é monitorizado em tempo real, analisando-se, à medida que se recolhem dados do sistema produtivo, potenciais ocorrências anómalas de modo a que se possam tomar medidas corretivas, assim que possível, e prevenir a produção de produto não conforme. Esta técnica, para além de auxiliar no estudo da variabilidade do processo, permite também averiguar se o processo produz de acordo com as especificações pré-definidas, definindo-se como “capaz” um processo que possua essa aptidão.

O presente projeto de investigação foi desenvolvido na unidade fabril da empresa João de Deus & Filhos (JDEUS), localizada em Samora Correia. A empresa insere-se na indústria metalomecânica ligeira, estando vocacionada para a produção de sistemas térmicos para automóveis, principalmente *intercoolers*. Este trabalho incide sobre o setor de injeção da unidade fabril da empresa, onde são fabricados dois dos principais componentes de um *intercooler* — as caixas de entrada e de saída de ar.

A proposta para melhorar o setor de Injeção surge com a necessidade da empresa em controlar o processo produtivo das caixas, em tempo real, e reduzir consideravelmente a percentagem de produção não conforme. Sendo a JDEUS uma organização de referência no desenvolvimento e produção de *intercoolers*, garantir o máximo rigor na conceção dos seus produtos é fundamental para continuar a ser percebida pelos seus clientes como um *partner* fiável e capaz de fornecer com um nível de qualidade absoluto.

1.2. Objetivos

O foco de estudo da presente dissertação insere-se na área de injeção da unidade fabril da empresa JDEUS, com o intuito de melhorar o processo de fabrico das caixas de entrada e saída de ar.

As caixas são constituídas por material plástico, com reforço de fibra de vidro, que chega à fábrica em forma de granulado e armazenado em *big bags*. Este material passa por uma estufa, previamente à admissão nas máquinas de injeção, de modo a que seja retirado um possível excesso de humidade do mesmo. Posteriormente, aquando da entrada do material na máquina de injeção, ocorre o processo de Moldação por Injeção, após o qual a caixa toma a sua forma final.

Os principais objetivos deste trabalho consistem, numa primeira instância, em analisar o teor de humidade da matéria-prima antes e após a secagem do material na estufa e, numa segunda instância, estudar e controlar estatisticamente o processo de Moldação por Injeção, segundo duas abordagens distintas: Univariada (controlo individual de cada variável em estudo) e Multivariada (controlo simultâneo das variáveis em estudo). A meta da presente investigação consiste em fortalecer o setor de injeção da fábrica, através da implementação do *SPC* e, desta forma, minimizar a variabilidade inerente à produção de caixas. Como auxílio, pretende-se utilizar diversas técnicas estatísticas e ferramentas da Qualidade que facilitem a avaliação dos casos em estudo.

Estando completado o trabalho proposto, pretende-se identificar oportunidades com potencial de melhoria, assim como sugerir trabalhos que complementem o *SPC*.

1.3. Metodologia

A metodologia adotada para o desenvolvimento da presente dissertação divide-se em quatro etapas distintas: definição do caso de estudo e dos objetivos, pesquisa e revisão da literatura, implementação da metodologia e, por fim, análise e discussão dos resultados obtidos.

Num primeiro momento, foram identificadas áreas e atividades da unidade fabril da empresa com elevado potencial de serem melhoradas, através de reuniões com responsáveis da empresa. Com base nas atividades identificadas, procedeu-se à análise das operações mais relevantes para o estudo académico e uma consequente elaboração de propostas de melhoria.

Numa segunda fase, foi realizada uma revisão da literatura relativa às temáticas a aplicar no presente projeto de investigação, recorrendo a autores que contribuíram de forma determinante para o desenvolvimento das mesmas.

A componente experimental tem início com a implementação da metodologia de estudo desenvolvida. Propõe-se estudar o processo de Injeção segundo duas etapas distintas, mas interligadas. Na primeira fase, foram analisadas as condições de humidade na matéria-prima, aplicando-se ferramentas como Diagrama de Pareto, Análise da Variância e Cartas de Controlo. A segunda fase consistiu no Controlo Estatístico do Processo de Moldação por Injeção, ao longo do qual se analisou a sua estabilidade, através de cartas de controlo, e se estimou os parâmetros que refletem a estabilidade do mesmo. Posteriormente, monitorizou-se o processo com o propósito de identificar potenciais causas anómalas e proceder à sua eliminação. Em ambas as fases do Controlo Estatístico, o estudo foi realizado segundo duas abordagens: Univariada e Multivariada. As cartas de controlo elaboradas foram complementadas com outras técnicas e ferramentas estatísticas, tais como o Diagrama de Ishikawa, Histogramas e Testes de Kolmogorov-Smirnov.

A etapa final do presente trabalho consistiu em efetuar uma análise crítica dos resultados obtidos, identificando oportunidades de melhoria e sugerindo trabalhos futuros a desenvolver no setor de injeção da unidade fabril.

1.4. Estrutura da Dissertação

A presente dissertação encontra-se estruturada em cinco principais capítulos, possuindo alguns Anexos nas últimas divisões do documento. A escolha dos cinco capítulos foi realizada com o intuito de proporcionar ao leitor uma linha de orientação que possibilite uma compreensão adequada dos objetivos e do trabalho desenvolvido ao longo do projeto de investigação.

No primeiro capítulo, intitulado por “Introdução”, é feito um enquadramento do tema e uma apresentação das motivações para a realização do presente projeto. São também clarificados os principais objetivos da dissertação, apresentada a metodologia de investigação e exposta a estrutura do presente documento.

No segundo capítulo, designado por “Fundamentação Teórica”, é feita uma descrição da revisão bibliográfica dos principais conceitos aplicados ao longo da dissertação, sobretudo relativamente ao *SPC* Univariado e Controlo Estatístico Multivariado (*MSPC*). Inicialmente, é feita uma contextualização histórica do conceito de Qualidade, sendo de seguida apresentado um conjunto de técnicas estatísticas aplicadas à Gestão da Qualidade, que se revelam bastante importantes para complementar a implementação do Controlo Estatístico do Processo. A introdução à temática do Controlo Estatístico do Processo é realizada posteriormente, onde são detalhados os conceitos e metodologias referentes ao *SPC* Univariado e *MSPC*.

O terceiro capítulo, denominado por “Caracterização da Empresa e da Área de Injeção”, abrange uma breve apresentação da empresa de acolhimento do projeto de investigação, do seu ramo de atuação e principais produtos, seguindo-se de uma descrição detalhada da área de injeção da unidade fabril da empresa, que constitui o setor onde se foca o presente trabalho.

O quarto capítulo, intitulado por “Componente Experimental”, apresenta, inicialmente, a metodologia proposta para melhorar o setor de Injeção, sendo posteriormente aplicadas as ferramentas e técnicas necessárias, e analisados e discutidos os resultados obtidos.

Por fim, no capítulo 5, denominado por “Conclusões e Recomendações”, são expostas as principais conclusões obtidas ao longo do trabalho desenvolvido, bem como sugeridos trabalhos para desenvolvimento futuro na área de injeção da empresa.

2. Fundamentação Teórica

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica relacionada com os temas a aplicar na dissertação. Inicialmente, é realizada uma revisão da literatura relativa à evolução histórica da Qualidade, na qual são apresentados os autores que mais contribuíram para a evolução do conceito de Qualidade. Posteriormente, apresentam-se algumas técnicas e ferramentas estatísticas no âmbito da Gestão da Qualidade, seguindo-se uma descrição detalhada dos conceitos associados à temática do *SPC* Univariado e *MSPC*.

2.1. Evolução Histórica da Qualidade

A relevância dada pelo Homem à execução de tarefas de forma cuidadosa e eficaz remonta às civilizações ancestrais, que, desde logo, revelavam a preocupação em assegurar o bom funcionamento dos produtos que concebiam para consumo próprio. Face ao aparecimento e crescimento de aglomerados populacionais, a figura do “artesão” atinge uma posição bastante importante, particularmente em relação à identificação das necessidades da população, concebendo os produtos e, posteriormente, vendendo-os aos seus clientes, que inspecionavam o produto final aquando da sua aquisição (Pereira e Requeijo, 2012).

Após o surgimento das primeiras fábricas, maioritariamente referentes à indústria têxtil e de cerâmica, a influência por parte dos sistemas artesanais foi decrescendo de forma substancial. As inovações no transporte e na comunicação permitiram às empresas alcançar regiões mais distantes, e, assim, expandir os seus negócios locais. Nas últimas décadas do século XIX, já se colocavam no mercado produtos a preços muito reduzidos, dada a produção em massa que se verificava nesta altura. O foco na qualidade era pouco intenso, sendo o principal objetivo produzir tanto quanto possível, ao menor custo (Mast, 2008).

No decorrer da época do fabrico em massa, Frederick Winslow Taylor desenvolveu, através da observação e análise de como as tarefas eram realizadas nas unidades fabris, um sistema que permite otimizar a produtividade de cada trabalhador, separando o planeamento das tarefas da execução das mesmas e seguindo-se pelo princípio básico de *“nunca assumir que a melhor maneira de fazer algo é a maneira como tem sido feito desde sempre”*. Neste período, os dois focos principais constituíam o volume de produção e a produtividade (Mast, 2008).

Em 1908, William Gosset, por muitos considerado o primeiro estatístico industrial, estava empregado na empresa Guinness onde realizava experiências com cevada, usando métodos estatísticos para selecionar os lotes que evidenciavam as condições especificadas para a produção. Durante este período, e sob o pseudónimo *“Student”*, publicou um artigo no qual formula as bases do t-teste, que, anos mais tarde, possibilitou o desenvolvimento de métodos estatísticos como Testes de Hipóteses, Análises de Variâncias e Análises de Regressões (Mast, 2008).

Durante o século XX, particularmente no período entre as duas Grandes Guerras, foram diversos os desenvolvimentos estatísticos que se verificaram, acompanhando a evolução industrial que decorria. Sendo que a partir de 1924, foi introduzido na *Electric's Bell Telephone Laboratories*, por Walter Shewhart, o conceito de Cartas de Controlo. Shewart vem realçar a importância de um processo se encontrar sob controlo estatístico, de modo a que se possa prever o seu comportamento futuro (Quesenberry, 1997).

Após a 2ª Guerra Mundial, o Japão iniciou uma crise económica e social intensa. Surgiu então a necessidade de se implementarem estratégias que permitissem o fabrico de produtos a baixo custo, mas de alta qualidade, com elevada ênfase na exportação. Com a formação da União de Cientistas e Engenheiros Japoneses (JUJSE), cuja organização convidou W. Edwards Deming e Joseph Juran para divulgar princípios no âmbito da Qualidade, o Japão conseguiu melhorias notáveis na qualidade e no custo dos produtos (Pereira e Requeijo, 2012).

Gomes (2004) refere-se a W. Edwards Deming como “o guru da qualidade mais famoso, e verdadeiro precursor do movimento de qualidade a nível mundial”. Deming (1986) define Qualidade como conformidade de um produto com as especificações técnicas. Enuncia que, para uma organização manter a ênfase necessária na qualidade, é imprescindível o empenho continuado da gestão de topo, tendo formulado 14 princípios de melhoria contínua da Qualidade.

Juran (1999) descreve a Qualidade em termos da adequação de um produto ao uso pretendido. Tal definição, confere ao conceito de qualidade a dependência da perspectiva do utilizador. Juran apresenta também um modelo de custos da qualidade que podem ser reduzidos através de investimentos na inspeção e prevenção (Gomes, 2004).

Feigenbaum (1981) refere que embora a maior parte das falhas relativas à qualidade continuem a ser descobertas previamente ao envio do produto para o cliente, as técnicas usadas para a sua identificação resultam num custo bastante elevado e desnecessário. Durante a década de 1950, Feigenbaum introduz o conceito de Qualidade Total, um sistema de gestão que integra os esforços de todos os grupos que compõem uma organização.

Além dos autores mencionados anteriormente, também Philip Crosby se destaca no domínio da Gestão da Qualidade. Crosby (1979) retrata a Qualidade como sendo “*mais semelhante ao ballet do que ao hóquei*”, devido ao planeamento, ao perfeccionismo e aos ensaios que são necessários. Introduce a ideia de que a qualidade é grátis, e que é a “não qualidade” que tem custos associados. Defende ainda que produzir bem à primeira é a chave para a melhoria da Qualidade.

Montgomery (2009) opta por uma definição mais moderna da Qualidade, definindo-a como sendo inversamente proporcional à variabilidade. Salienta ainda que a variabilidade utilizada neste conceito é uma variabilidade indesejada, pois existem situações onde a mesma não é prejudicial.

No Japão, a década de 1970 marca o início da utilização da ferramenta designada por Diagrama de Causa-e-Efeito, introduzida em 1943 por Karou Ishikawa. Tal diagrama permite um auxílio na identificação de possíveis causas que levam a um processo não estar sob controlo, sendo uma

ferramenta importante quando se utilizam cartas de controlo, fornecendo diretrizes claras para a correção das anomalias observadas num determinado processo (Mitra, 2016).

A partir de 1980, os métodos formulados por Genichi Taguchi começam a ser divulgados nos países ocidentais. Taguchi realça a importância da redução da variabilidade nos processos, defendendo ainda que se deve assegurar a qualidade dos produtos através do design dos mesmos (Gomes, 2004). De acordo com Taguchi, existe uma “*perda para a sociedade*” que aumenta exponencialmente com a diminuição da consistência de um processo. Isto é, a perda é tanto maior quanto mais distante o valor da característica em estudo estiver do valor alvo, independentemente de se encontrar, ou não, dentro dos limites de especificação (Doty, 1996).

Ainda durante os anos 80, é introduzido o conceito de Gestão pela Qualidade Total (TQM, *Total Quality Management*), incorporando como bases as filosofias de Deming (1986) e Juran (1999). Através da implementação desta filosofia de gestão, a Qualidade assume um carácter transversal, conduzindo a uma mudança cultural nas organizações que a adotam, no sentido de assegurar, ou até exceder, as expectativas dos clientes (Pereira e Requeijo, 2012). Face ao elevado desenvolvimento informático que se verificou nesta década, chega ao mercado uma grande abundância softwares de controlo da qualidade. A relevância dada ao conceito de Gestão pela Qualidade Total evolui rapidamente, sendo que empresas como a Ford Motor Company e a General Motors Corporation começam a exigir aos seus fornecedores documentações relativas ao controlo estatístico dos processos, de modo a assegurar que os produtos recebidos se encontram estáveis e dentro das especificações pretendidas (Mitra, 2016).

A orientação de esforços no sentido de assegurar a satisfação dos clientes e a melhoria do desempenho, através da implementação de métodos e princípios da Qualidade, leva à constituição de um Sistema de Gestão da Qualidade (SGQ) pelas organizações. Este sistema permite o controlo de uma organização ao nível da Qualidade, com o intuito de garantir que os requisitos predefinidos são satisfeitos, podendo o sistema ser certificado por uma entidade acreditada. A primeira referência internacional sobre Sistemas da Qualidade foi a série ISO 9000, composta por normas que podem ser aplicadas a diferentes tipos de organizações, e que se referem à qualidade dos processos destas. As empresas que aplicam as normas da ISO 9000 asseguram, desde logo, um acréscimo na credibilidade face a concorrentes que não as apliquem (Pereira e Requeijo, 2012).

Todas as filosofias anteriormente descritas realçam a necessidade da integração da Qualidade em modelos de gestão. Tal inclusão tem contribuído de forma marcante para o aumento da produtividade e da competitividade das organizações. O envolvimento de todos os grupos que compõem uma organização é, por isso, crucial para responder eficazmente às várias adversidades com que a mesma se depara, por forma a alcançar a excelência. “*Somos aquilo que repetidamente fazemos. A excelência, portanto, não é um ato, mas sim um hábito*” (Durant, 1927).

2.2. Técnicas Estatísticas no Âmbito da Gestão da Qualidade

No atual tópico são apresentados e desenvolvidos alguns conceitos básicos de técnicas estatísticas complementares ao *SPC*, e que são aplicadas ao longo da presente dissertação: Teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S), Teste de Kolmogorov-Smirnov para comparação de duas amostras (K-S 2) e Análise da Variância.

2.2.1. Teste de Kolmogorov-Smirnov – *One Sample Test*

O teste de Kolmogorov-Smirnov (Teste K-S) foi concebido pelos matemáticos Andrey Kolmogorov e Vladimir Smirnov. O principal objetivo consiste em averiguar se os dados de uma determinada amostra contínua podem ser considerados como provenientes de uma população com uma dada distribuição. Para tal, é inferido estatisticamente se existem diferenças significativas entre as frequências observadas da amostra e as frequências esperadas, que caracterizam a distribuição teórica a que se pretendem ajustar os dados (Ross, 2004).

Assim sendo, considera-se a seguinte hipótese nula:

H₀: A amostra é proveniente de uma população com uma dada distribuição.

Para uma dada variável aleatória X , seja $S(x)$ a Função de Distribuição Amostral de uma amostra com N observações, definida por $S(x) = P(X \leq x)$, correspondendo esta à distribuição empírica de frequências acumuladas relativas. E seja $F_0(x)$ a Função Distribuição teórica de frequências acumuladas, à qual se pretende ajustar $S(x)$. A Hipótese Nula e a Hipótese Alternativa podem então ser especificadas da seguinte maneira (Pereira e Requeijo, 2012):

$$\begin{aligned} H_0: S(x) &= F_0(x) \\ H_1: S(x) &\neq F_0(x) \end{aligned} \tag{2.1}$$

Caso H_0 não seja rejeitada, é concluído que $S(x)$ e $F_0(x)$ não diferem de forma significativa, e que, por isso, a amostra pode ser considerada como proveniente de uma população com a distribuição em estudo.

Após detalhadas as hipóteses nula e alternativa, a seguinte etapa consiste em retirar da população uma amostra aleatória constituída por N observações. Posteriormente, ordena-se por ordem crescente os dados amostrais obtidos e, para cada valor, estimam-se as frequências acumuladas relativas $S(x)$ e as frequências relativas esperadas $F_0(x)$.

A estatística de teste (D) é definida por:

$$D = \sup_x | S(x) - F_0(x) | \quad (2.2)$$

Para um determinado nível de significância α (na presente dissertação, $\alpha = 5\%$ é o valor definido para todos os estudos), o valor da estatística de teste D é comparado com o respectivo valor crítico ($D_{crítico}$). Quando os parâmetros da população são conhecidos, o valor crítico é dado pela tabela da Distribuição da Estatística D , presente na Tabela A.1 do Anexo A. Se os parâmetros da população são estimados através dos dados amostrais, utiliza-se a Tabela A.2 do Anexo A, desenvolvida por Lilliefors (1976) para a Distribuição da Estatística D .

A Hipótese Nula é rejeitada no caso de o valor da estatística D ser superior ao valor crítico correspondente (isto é, $D > D_{crítico}$). Na circunstância em que $D < D_{crítico}$, a hipótese nula não é rejeitada, concluindo-se que não existe evidência estatística, para um certo nível de significância α , que permita rejeitar a hipótese da amostra ser proveniente de uma população com a distribuição em causa.

2.2.2. Teste de Kolmogorov-Smirnov – *Two Samples Test*

O Teste de Kolmogorov-Smirnov para duas amostras (Teste K-S 2) é um teste não paramétrico que procura inferir estatisticamente se duas amostras independentes foram retiradas da mesma população. Para tal, é analisada a proximidade entre as duas amostras através da comparação entre as frequências acumuladas de ambas. Aconselha-se a consulta de Siegel e Castellan (1988), Conover (1999) e Guimarães e Cabral (2007) para uma descrição mais detalhada deste teste.

A hipótese nula pode ser descrita da seguinte forma:

$$H_0: \text{As duas amostras possuem a mesma distribuição.}$$

Considerando $S_m(x)$ a distribuição acumulada observada de uma amostra de dimensão m , definida por $S_m(x) = \frac{k}{m}$, onde k representa o número de dados inferior ou igual a x . Seja $S_n(x)$ a distribuição acumulada observada da restante amostra. A hipótese nula e a hipótese alternativa são então:

$$\begin{aligned} H_0: S_m(x) &= S_n(x) \\ H_1: S_m(x) &\neq S_n(x) \end{aligned} \quad (2.3)$$

Após a identificação das hipóteses nula e alternativa, procede-se à ordenação conjunta, por ordem crescente, dos valores de ambas as amostras. Posteriormente, obtém-se o valor da Função de Distribuição Acumulada para cada amostra, e calcula-se a diferença entre as duas distribuições, em cada ponto. A estatística de teste ($D_{m,n}$) representa o maior valor de tal diferença, ou seja:

$$D_{m,n} = \supremo_x | S_m(x) - S_n(x) | \quad (2.4)$$

Para $\alpha = 5\%$, e no caso de $m > 25$ ou $n > 25$, o valor crítico ($D_{crítico}$) é dado pela Equação 2.5.

$$D_{crítico} = 1,36 \sqrt{\frac{m+n}{mn}} \quad (2.5)$$

Quando $m \leq 25$ ou $n \leq 25$, recorre-se à tabela de Valores Críticos para amostras pequenas, representada na Tabela B.1 do Anexo B e mencionada em Siegel e Castellan (1988).

Caso o valor da estatística de teste seja inferior ao valor crítico, conclui-se que não existe evidência estatística, ao nível de significância α , que permita rejeitar a hipótese de ambas as amostras serem provenientes de uma mesma população.

2.2.3. Análise da Variância

A metodologia de Análise da Variância foi inicialmente desenvolvida por Fisher (1955) e, ao longo dos anos, tem-se revelado de extrema importância em diferentes tipos de investigações levadas a cabo nas mais diversas áreas de estudo (Sahai e Ageel, 2000). Através da aplicação de um simples Teste de Hipóteses é possível proceder-se à comparação entre parâmetros de duas populações. No entanto, tal método de inferência estatística não permite a comparação de parâmetros de mais de duas populações, devendo-se, por isso, aplicar o método de Análise da Variância (*Analysis Of Variance, ANOVA*).

A Análise da Variância é então um método estatístico que possibilita a comparação entre parâmetros, de mais de duas populações, que envolve a repartição da variabilidade total de um conjunto de observações pelas diversas partes geradoras de variabilidade, possibilitando a identificação das componentes que são estatisticamente significativas (Pereira e Requeijo, 2012).

De seguida, são apresentados alguns conceitos importantes no âmbito da ANOVA:

- Resposta – Variável dependente. Característica da qualidade que se pretende estudar;

- Fatores – Variáveis controláveis e independentes. Representam os critérios sob os quais vão ser analisadas as populações;
- Níveis – Representam os diferentes tratamentos que um fator pode apresentar, i.e., as populações em estudo;
- Réplicas – Número de repetições das experiências ou medições relativas a cada nível, em condições semelhantes.

Quando o objetivo do estudo é analisar apenas um fator a vários níveis, utiliza-se o método mais simples da ANOVA — *One-Way Classification*. Em situações onde se pretenda estudar mais de um fator, utiliza-se um método mais complexo – *Two-Way Classification*. No domínio do presente estudo, apenas existirá a necessidade de utilizar o método *One-Way*.

a) ANOVA - One-Way

Considerando um estudo de um fator com a diferentes níveis, cada um contendo n réplicas ou observações, o número total de observações é dado por $N = na$. Cada nível representa um tratamento ou população que se pretende analisar, sendo cada réplica uma observação dessa mesma população. O valor observado de uma determinada variável Y em análise, relativo à réplica j do nível i , representa-se por y_{ij} , sendo adequadamente descrito pelo seguinte modelo de análise da variância (Sahai e Ageel, 2000):

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + e_{ij} \quad (i = 1, \dots, a; j = 1, \dots, n), \quad (2.6)$$

Onde μ corresponde à média geral de todas as populações; τ_i ao parâmetro associado ao efeito do nível i ; e e_{ij} a uma variável aleatória relativa ao erro associado à observação j do nível i .

Pretende-se, com esta análise, estimar os valores esperados correspondentes aos diferentes níveis ou populações (μ_i), de modo a aferir a semelhança entre os mesmos, avaliando se existe ou não evidência estatística que permita rejeitar a hipótese dos efeitos τ_i não serem significativamente diferentes de zero. Tal estudo pode ser traduzido pelo seguinte teste de hipóteses (Pereira e Requeijo, 2012):

$$\begin{aligned} H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0 \\ H_1: \tau_i \neq 0, \text{ pelo menos para um nível } i \end{aligned} \quad (2.7)$$

No caso de um efeito de um determinado nível ser significativamente diferente de zero, a hipótese nula é consequentemente rejeitada, para um certo nível de significância α .

O mesmo será afirmar que se pretende averiguar a existência de evidência estatística que permita rejeitar que as médias, ou valores esperados, dos diferentes níveis, ou populações, não sejam significativamente diferentes:

$$\begin{aligned}
 H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_a \\
 H_1: \mu_i \neq \mu_k, \text{ pelo menos para um par } (i, k)
 \end{aligned}
 \tag{2.8}$$

Para um determinado nível de significância α , a hipótese nula será rejeitada caso exista, pelo menos, um par de médias de populações que difere significativamente.

A Análise da Variância pode ser sumariada através da Tabela ANOVA (Tabela 2.1):

Tabela 2.1 – ANOVA One Way

Fonte de Variação	SS (Sum of Squares)	Graus de Liberdade	MS (Mean Square)	F_0
Entre Níveis (Between)	SS_B	$a - 1$	MS_B	$\frac{MS_B}{MS_W}$
Por Nível (Within)	SS_W	$N - a$	MS_W	
Total	SS_T	$N - 1$		

A soma dos quadrados dos desvios de todas as observações em relação à média geral constitui a *Varição Total* dos dados recolhidos (SS_T , *Total Sum of Squares*):

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{Y})^2 \tag{2.9}$$

O que é equivalente à Equação 2.10.

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 - \frac{(Y_{..})^2}{N} \tag{2.10}$$

Em que

$Y_{..}$ corresponde à soma da totalidade das N observações

y_{ij} corresponde ao valor da resposta da observação j do nível i

A *Varição Total*, por sua vez, é repartida em dois componentes de variação:

1. Fonte de variação entre níveis ou populações (SS_B , *Between Sum Of Squares*). Define-se como a soma ponderada dos quadrados dos desvios entre as médias dos níveis ou populações e a média geral:

$$SS_B = \sum_{i=1}^a \frac{Y_i^2}{n} - \frac{(Y_{..})^2}{N} \tag{2.11}$$

2. Fonte de variação dentro dos níveis ou populações (SS_W , *Within Sum Of Squares*), também denominada por Variação Residual ou Erro. Consiste na soma dos desvios das observações em relação às médias dos(as) respetivos(as) níveis/populações:

$$SS_W = SS_T - SS_B = \sum_{i=1}^a \frac{Y_i^2}{n} - \frac{(Y_{..})^2}{N} \quad (2.12)$$

A Equação 2.13 traduz os componentes integrantes da Variação Total SS_T .

$$SS_T = SS_B + SS_W \quad (2.13)$$

Na tabela ANOVA (Tabela 2.1), MS_B e MS_W correspondem às variâncias, denominadas por *Desvios Quadráticos Médios*. As variâncias são estimadas através dos quocientes entre as duas variações (SS_B e SS_W) e o respetivo número de graus de liberdade, como demonstram as Equações 2.14-2.15.

$$MS_B = \frac{SS_B}{a-1} \quad (2.14)$$

$$MS_W = \frac{SS_W}{N-a} \quad (2.15)$$

Para testar a hipótese nula, i.e., averiguar se as médias dos diferentes níveis não são significativamente diferentes, recorre-se à estatística de teste F_0 , dada pelo quociente MS_B/MS_W . Após o seu cálculo, compara-se o valor obtido com o valor crítico da distribuição de Fisher, exibido na Expressão 2.16, com $(a - 1)$ e $(N - a)$ graus de liberdade:

$$F_{\alpha; (a-1); (N-a) \text{ g.l.}} \quad (2.16)$$

Na situação em que se verifique que o valor de F_0 não excede o valor crítico da distribuição de Fisher, torna-se possível concluir que não existe evidência estatística que permita rejeitar a hipótese nula, para um dado nível de significância α selecionado. Em caso contrário, a hipótese nula é consequentemente rejeitada, evidenciando a existência de, pelo menos, um par de médias de níveis cujas médias diferem.

Os resultados provenientes do teste *One-Way ANOVA* só serão válidos após a confirmação dos pressupostos da Normalidade dos resíduos, independência dos resíduos e homogeneidade da variância. Na presente dissertação, será utilizado o teste de *Bartlett* para avaliar a homogeneidade da variância. O teste tem por objetivo testar se as variâncias dos diversos níveis em estudo, ou populações, são significativamente diferentes. As hipóteses nula e alternativa são as seguintes:

$$H_0: \sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \dots = \sigma_a^2$$

$$H_1: \sigma_i^2 \neq \sigma_k^2, \text{ para, pelo menos, um par } (i, k)$$

Quando os pressupostos necessários à aplicabilidade do teste *One-Way ANOVA* não forem cumpridos, os resultados obtidos não são válidos para análise. Deverá, assim, recorrer-se a outras técnicas estatísticas para comparação de médias de diversas populações, como o teste do Qui-Quadrado ou o teste de Kruskal-Wallis.

2.3. Controlo Estatístico de Processos – Abordagem Tradicional

Um processo consiste numa rede de atividades interrelacionadas que transformam um conjunto de entradas em saídas. De acordo com a perspetiva de Oakland (2003), um processo:

- Requer compreensão;
- Contém uma variação associada;
- Deve ser controlado, de forma apropriada;
- Possui uma Capacidade;
- Necessita de melhorias.

O Controlo Estatístico do Processo, comumente designado por *SPC* (*Statistical Process Control*), possibilita a monitorização dos processos, através da elaboração de cartas de controlo, identificando causas especiais de variação e analisando, a partir de estimativas dos parâmetros do processo, a capacidade do mesmo em produzir de acordo com as especificações. Montgomery (2009) refere-se ao *SPC* como um dos maiores desenvolvimentos tecnológicos do século XX, em virtude de ser apoiado em princípios fundamentais sólidos, ser de simples uso, ter um impacto expressivo e poder ser aplicado em qualquer processo.

Tipicamente, o *SPC* é implementado em duas Fases: Fase I, que consiste numa fase de análise retrospectiva ou preliminar do processo, e Fase II, na qual se dá início à monitorização do mesmo. Na primeira fase, são recolhidos dados do processo, com o objetivo de garantir a estabilidade do mesmo e, posteriormente, estimar os seus respetivos parâmetros (média e variância). Na segunda fase, e tendo já conhecimento dos parâmetros do processo, este é então controlado em tempo real, ou seja, à medida que se recolhem dados do sistema produtivo.

2.3.1. Variabilidade dos Processos

A variabilidade é partilhada por todos os processos produtivos e impossível de evitar. São alguns os fatores que influenciam um sistema produtivo e que podem, deste modo, ser vistos como fontes de variação que afetam as características da qualidade a estudar.

Tais fontes de variação, representadas na Figura 2.1, podem constituir (Pereira e Requeijo, 2012):

- **Causas comuns de variação.** Representam a oscilação inerente ao processo, que se enquadra na distribuição estatística natural do processo. Um processo considera-se sob controlo estatístico quando somente está sujeito a causas comuns de variação, devendo estas ser minimizadas ao máximo.
- **Causas especiais de variação.** São causas não aleatórias, exteriores ao processo e que não se inserem na distribuição estatística natural do mesmo. Estas ocorrências evidenciam a presença de um comportamento invulgar e indicam que o processo não se encontra estável. As causas especiais de variação devem ser identificadas e eliminadas através da implementação de medidas corretivas.

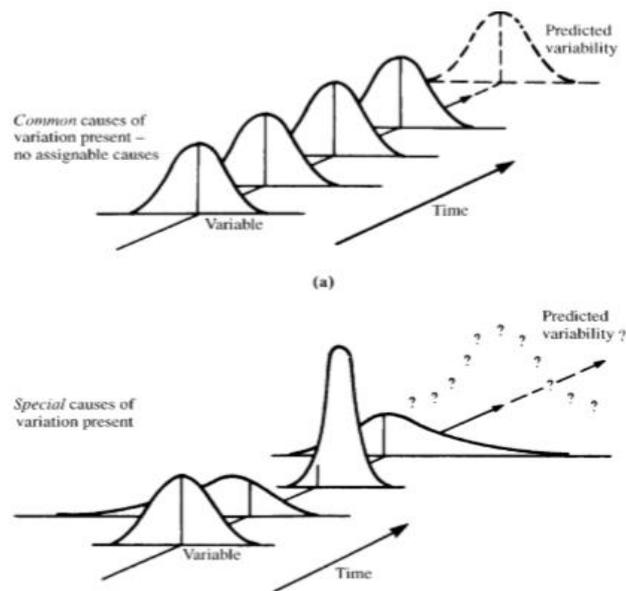


Figura 2.1 – Causas Comuns e Causa Especiais de Variação (Fonte: Oakland, 2003)

A minimização de causas comuns e, principalmente, a eliminação de causas especiais são ações cruciais para garantir a estabilidade de um processo. O comportamento associado a um processo que se encontra sob controlo estatístico pode ser previsto, devido à estabilidade do mesmo. A diminuição das causas comuns de variação envolve, normalmente, a decisão de altos níveis de gestão, tais como a compra de novos equipamentos ou a mudança de fornecedores. A eliminação das causas especiais de variação é realizada por operadores que estão diretamente relacionados com o processo produtivo.

2.3.2. Ferramentas Básicas de Gestão da Qualidade

Como importante auxílio ao SPC, existe um conjunto de ferramentas cuja aplicação permite um estudo mais detalhado e rigoroso acerca dos dados a analisar. Tais ferramentas, que alguns

autores designam por “*sete magnificas*”, são apresentadas e descritas em diversas obras. A título de exemplo: Ishikawa (1982), Kolarik (1995), Doty (1996), Juran (1999), Montgomery (2009) e Pereira e Requeijo (2012). As ferramentas encontram-se brevemente descritas de seguida:

1. Fluxograma: permite ilustrar sequencialmente as variáveis, entradas e saídas que vão contribuir para alcançar determinado produto/resultado;
2. Histograma: consiste num gráfico de barras que ilustra a distribuição seguida por uma determinada variável;
3. Diagrama de Pareto: constitui um gráfico de barras que demonstra a contribuição relativa de cada causa para o problema em estudo;
4. Diagrama de Ishikawa: representação gráfica que permite analisar quais as possíveis causas-raiz de um problema, de modo a orientar esforços no sentido implementar as medidas corretivas adequadas.
5. Folha de Registo e Verificação: formulário que possibilita a reunião de informações relevantes para determinados contextos, tornando a tomada de decisão baseada em factos objetivos;
6. Diagrama de Dispersão: permite visualizar a relação entre variáveis e analisar a dependência entre as mesmas.
7. Carta de Controlo: principal ferramenta utilizada no controlo de processos, que permite uma distinção entre a variabilidade natural do processo e a variabilidade provocada pela presença de causas involgares, através do controlo da evolução temporal do processo.

Na Secção que se segue, são detalhados os conceitos referentes às cartas de controlo tradicionais, que constituem uma das principais ferramentas utilizadas no presente trabalho e a principal ferramenta do *SPC*.

2.3.3. Princípios das Cartas de Controlo Tradicionais

Uma Carta de Controlo consiste na representação gráfica da evolução temporal de uma estatística referente a uma determinada característica da qualidade. No eixo das ordenadas apresentam-se os valores observados relativos à estatística da característica em estudo, e no eixo das abcissas o número ou instante relativo à amostra ou subgrupo correspondente (Montgomery e Runger, 2003). A Figura 2.2 representa um exemplo de uma carta de controlo.

Na carta são ainda representados o limite superior de controlo estatístico (LSC), o limite inferior de controlo estatístico (LIC) e a linha central (LC). Um processo evidencia não estar sob controlo estatístico caso um ou mais pontos não pertença ao intervalo [LIC, LSC], ou se verifique algum padrão não aleatório no intervalo existente entre os dois limites de controlo. Isto é, na eventualidade de se observar a ocorrência de causas especiais de variação, assume-se que o processo não se encontra controlado estatisticamente. As razões de tal ocorrência devem ser identificadas e investigadas de modo a que sejam implementadas ações corretivas que as eliminem (Pereira e Requeijo, 2012).

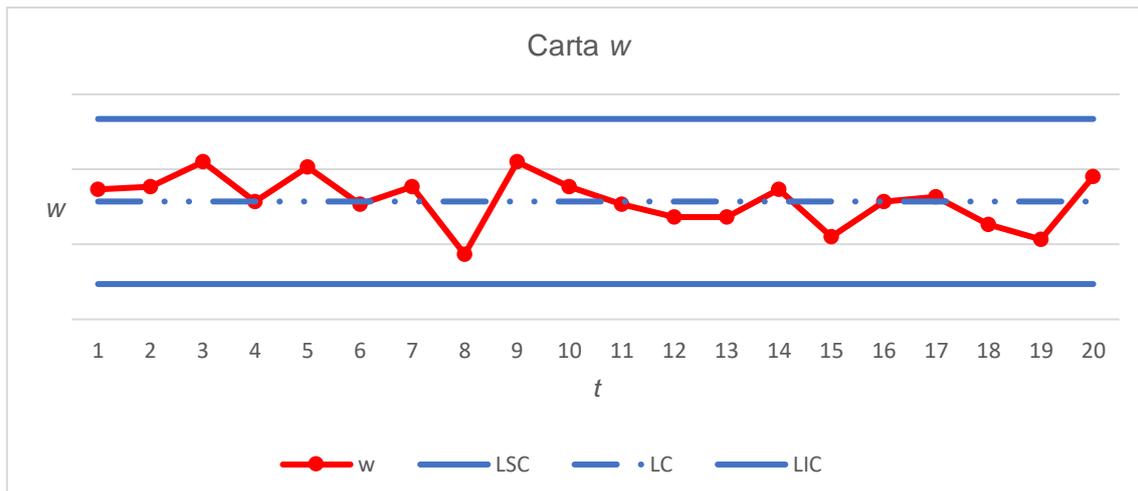


Figura 2.2 – Exemplo de uma Carta de Controle

Pressupondo que a distribuição de valores de uma estatística w , relativa a uma determinada característica da qualidade a estudar, se assemelha a uma Normal, Shewart (1931) estabelece que os limites de controlo estatístico correspondentes estão localizados a $+3\sigma_w$ (LSC) e $-3\sigma_w$ (LIC) em relação à linha central. A linha central (LC), por sua vez, constitui o valor médio dos valores da estatística w (μ_w). Deste modo, a probabilidade de um ponto se posicionar no intervalo delimitado pelos limites de controlo é de 99,73%, incorrendo-se, por isso, num risco α de valor 0,27% (Erro do Tipo I, i.e., Risco do Produtor) de se assumir que um ponto constitui uma causa especial de variação, quando, na realidade, o mesmo se enquadra na distribuição seguida pela característica. Tal significa que, em média, de 370 em 370 pontos/observações existirá uma situação onde se assumirá erradamente a existência de uma causa invulgar de variação. Ao número médio de pontos que precedem a ocorrência de um “*falso alarme*”, designa-se por ARL (*Average Run Length*). Pretende-se, então, que o seu valor seja tão maior quanto possível, quando o processo se encontra sob controlo estatístico, e tanto menor quanto possível, quando o processo não se encontra sob controlo estatístico.

2.3.4. Detecção de Padrões Não Aleatórios no Processo

Como referido anteriormente, a identificação de um ponto fora dos limites de controlo evidencia a ocorrência de uma causa especial de variação, pois tal reflete um comportamento não aleatório do processo. Down et al. (2005) enunciam algumas potenciais razões para que um ponto não se enquadre dentro dos limites de controlo num determinado momento:

1. Os Limites de Controlo foram calculados incorretamente;
2. A variabilidade entre, ou dentro de, cada subgrupo aumentou, de forma significativa;
3. O sistema ou instrumento de medição foi alterado;
4. A discriminação do sistema ou instrumento de medição não é adequada.

Uma causa especial pode também constituir um padrão não aleatório incorporado no intervalo definido pelos limites de controlo estatístico. Ou seja, o facto de nenhum ponto se localizar fora dos limites de controlo não significa que o processo esteja estável.

Com o intuito de aumentar a sensibilidade das cartas de controlo de Shewart, foram desenvolvidas, ao longo dos anos, algumas regras de deteção de causas especiais de variação. O presente projeto de investigação baseia-se nas regras referenciadas na norma ISO 78702:2013, que substitui a antiga norma ISO 8258:1991. Para a aplicação das regras, são constituídas seis zonas no intervalo delimitado pelos limites de controlo, designadas por zona A, B e C. Cada uma das seis zonas tem uma largura equivalente a $1\sigma_w$, sendo simétricas em relação à linha central. As oito regras estão descritas de seguida e ilustradas na Figura 2.3:

- Regra 1: Um qualquer ponto fora dos limites de controlo;
- Regra 2: Nove pontos consecutivos na zona C ou para além da zona C, do mesmo lado da linha central;
- Regra 3: Seis pontos consecutivos no sentido ascendente ou descendente;
- Regra 4: Catorze pontos consecutivos crescendo e decrescendo alternadamente;
- Regra 5: Dois de três pontos consecutivos na zona A ou para além da zona A, do mesmo lado da linha central;
- Regra 6: Quatro de cinco pontos consecutivos na zona B ou A ou além desta zona, do mesmo lado da linha central;
- Regra 7: Quinze pontos consecutivos na zona C acima e abaixo da linha central;
- Regra 8: Oito pontos consecutivos de ambos os lados da linha central, sem nenhum na zona C.

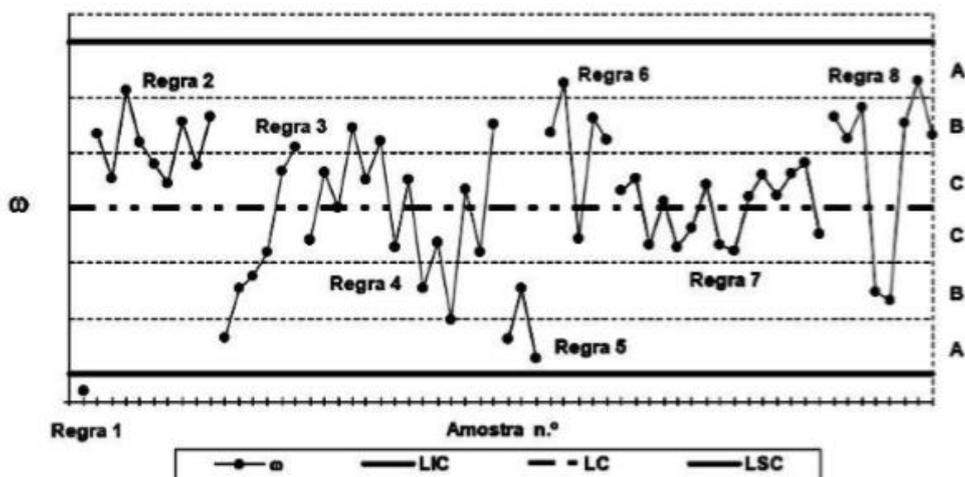


Figura 2.3 - Regras para Deteção de Causas Especiais (retirado de Pereira e Requeijo, 2012)

2.3.5. Tipos de Cartas de Controle

Shewart (1931) diferencia dois tipos de cartas de controle: Cartas de Controle de Variáveis e Cartas de Controle de Atributos. As primeiras utilizam-se quando as características em estudo podem ser expressas numa escala contínua (como dimensões ou pesos). As segundas são aplicadas quando a característica assume apenas valores discretos (como o número de unidades não conformes ou o número de defeitos). No âmbito deste estudo, apenas serão abordadas as cartas de controle de variáveis, pois as variáveis em estudo são contínuas. Uma variável contínua contém muito mais informação que uma variável discreta, sendo favorável a utilização de cartas de controle de variáveis sempre que for economicamente viável (Pereira e Requeijo, 2012).

Na Tabela 2.2, encontram-se mencionadas e caracterizadas as cinco cartas de controle de variáveis.

Tabela 2.2 – Cartas de Controle de Variáveis

Cartas de Controle de Variáveis	Controlo do Parâmetro de Localização	Controlo do Parâmetro de Dispersão
Média e Amplitude	Carta \bar{X}	Carta R
Média e Desvio Padrão	Carta \bar{X}	Carta S
Média e Variância	Carta \bar{X}	Carta S^2
Mediana e Amplitude	Carta \tilde{X}	Carta R
Observações Individuais e Amplitudes Móveis	Carta X	Carta MR

De entre as cartas referenciadas na tabela anterior, as mais utilizadas são as de controlo da Média e Amplitude, Média e Desvio Padrão e Observações Individuais e Amplitudes Móveis.

2.3.5.1. Cartas de Controle – Fase I do SPC

A primeira fase do Controlo Estatístico (fase retrospectiva) caracteriza-se pelo desconhecimento dos parâmetros do processo em estudo. Nesta etapa, são recolhidos dados do processo, constituindo amostras ou observações individuais, e, quando se atingir um número de dados suficiente (sendo recomendável a recolha de, pelo menos, 100 observações), são calculados os limites de controlo correspondentes. Caso se verifique que o processo está sob controlo estatístico, i.e., não se verifique a ocorrência de nenhuma causa especial nas cartas elaboradas, são então estimados os parâmetros do processo.

Neste t3pico, descrevem-se as principais cartas de controlo de vari3veis e os m3todos para a elabora33o de cada uma delas.

a) Cartas de Controlo da M3dia (\bar{X}) e da Amplitude (R)

A elabora33o destas cartas pressup3e a constitui33o de amostras, com a mesma dimens3o n , durante a recolha dos dados. Inicialmente, 3 necess3rio calcular a m3dia e amplitude de cada uma das amostras, sendo a m3dia calculada de forma aritm3tica e a amplitude calculada pela diferen3a entre o valor m3ximo e o valor m3nimo. Ou seja:

$$\bar{X}_i = \frac{\sum_{j=1}^n X_{ij}}{n} \quad (2.17)$$

$$R_i = X_{m3x} - X_{m3n} \quad (2.18)$$

Para a determina33o dos limites de controlo de cada carta, e tendo-se j3 obtido as m3dias e amplitudes das m amostras, calculam-se primeiramente a m3dia global (m3dia das m3dias amostrais) e a amplitude m3dia. As express3es de c3lculo est3o representadas de seguida:

$$\bar{\bar{X}} = \frac{\sum_{i=1}^m \bar{X}_i}{m} \quad (2.19)$$

$$\bar{R} = \frac{\sum_{i=1}^m R_i}{m} \quad (2.20)$$

Os Limites de Controlo das cartas s3o calculados atrav3s das Equa33es 2.21-2.22.

$$LSC_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} + A_2 \bar{R} \quad LC_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} \quad LIC_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} - A_2 \bar{R} \quad (2.21)$$

$$LSC_R = D_4 \bar{R} \quad LC_R = \bar{R} \quad LIC_R = D_3 \bar{R} \quad (2.22)$$

A_2 , D_3 e D_4 s3o constantes que dependem unicamente da dimens3o da amostra. Na Tabela C.1 do Anexo C encontram-se os valores de cada uma das constantes para diferentes dimens3es amostrais.

Ap3s a constru33o das cartas, 3 analisada a estabilidade do processo. Sempre que se verifique a exist3ncia de causas especiais de varia33o, os pontos associados a essas causas dever3o ser exclu3dos de ambas as cartas, obrigando a um novo c3lculo dos limites de controlo, n3o tendo em considera33o os pontos eliminados. No momento em que se verifique que o processo apenas est3 sujeito 3 ocorr3ncia de causas comuns de varia33o, s3o estimados os par3metros do processo atrav3s das seguintes express3es:

$$\hat{\mu} = \bar{X} \quad (2.23)$$

$$\hat{\sigma} = \frac{\bar{R}}{d_2} \quad (2.24)$$

b) Cartas de Controlo da Média (\bar{X}) e do Desvio-Padrão (S)

Caso a dimensão de cada amostra seja suficientemente grande, a estatística mais adequada para quantificar a dispersão amostral é o desvio padrão. Para a construção destas cartas, são inicialmente constituídas amostras de igual dimensão e calculados a média, através da Equação 2.17, e o desvio padrão, através da Equação 2.25.

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

Tal como nas cartas da média e da amplitude, procede-se ao cálculo da média global (Equação 2.19) e, neste caso, do desvio-padrão médio, através da Equação 2.26.

$$\bar{S} = \frac{\sum_{i=1}^m S_i}{m} \quad (2.26)$$

Os limites de controlo da carta da média são dados por:

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

$$LSC_S = B_4\bar{S} \quad LC_S = \bar{S} \quad LIC_S = B_3\bar{S} \quad (2.28)$$

Os valores de B_3 e B_4 dependem apenas da dimensão da amostra, e podem ser encontrados também na Tabela C.1 do Anexo C.

Assegurada a estabilidade do processo, é possível estimar os parâmetros do mesmo através das expressões:

$$\hat{\mu} = \bar{X} \quad (2.29)$$

$$\hat{\sigma} = \frac{\bar{S}}{c_4} \quad (2.30)$$

c) Cartas de Observações Individuais (X) e Amplitudes Móveis (MR)

Quando não é possível ou desejável a recolha de amostras com mais de uma observação, tem de se recorrer, conseqüentemente, a observações individuais (Carta X). Obtendo-se apenas uma observação por amostra, a dispersão do processo torna-se incontrolável a partir de uma estatística, como a amplitude ou o desvio padrão. Para mitigar este problema, a medida de dispersão num determinado instante determina-se pela Amplitude Móvel (Carta MR), que se calcula pela diferença entre o valor observado nesse instante e o valor observado no instante imediatamente anterior (Equação 2.31).

$$|MR_i| = |X_i - X_{i-1}| \quad (2.31)$$

A média das observações e a média das amplitudes móveis são calculadas pelas expressões:

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^m X_i}{m} \quad (2.32)$$

$$\overline{MR} = \frac{\sum_{i=1}^{m-1} MR_i}{m-1} \quad (2.33)$$

Os limites de controlo das cartas são dados pelas seguintes equações:

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

$$LSC_{MR} = D_4 \overline{MR} \quad LC_{MR} = \overline{MR} \quad LIC_{MR} = D_3 \overline{MR} \quad (2.35)$$

Nestas cartas, os valores das constantes d_2 , D_3 e D_4 dependem do número de observações usadas para calcular a amplitude móvel, que neste caso são duas ($n = 2$).

A estimação dos parâmetros do processo é realizada segundo as Equações 2.36-2.37.

$$\hat{\mu} = \bar{X} \quad (2.36)$$

$$\hat{\sigma} = \frac{\overline{MR}}{d_2} \quad (2.37)$$

2.3.5.2. Cartas de Controlo – Fase II do SPC

Nesta etapa, dá-se início à monitorização do processo. Tendo-se já verificado a estabilidade do processo e estimado os respetivos parâmetros na Fase I, interessa, nesta fase, controlar o processo em tempo real. Os limites de controlo calculados na Fase I mantêm-se caso a dimensão da amostra não sofra alterações. Caso se pretenda modificar a dimensão da amostra, será necessário recalculá-los, conforme as estimativas dos parâmetros do processo (Pereira e Requeijo, 2012). Na Tabela 2.3, são exibidas as expressões de cálculo dos limites de controlo para a Fase II, referentes às cartas de controlo anteriormente descritas.

Tabela 2.3 – Limites de Controlo das Cartas para a Fase II do SPC

Limites de Controlo	Cartas da Média e da Amplitude		Cartas da Média e do Desvio Padrão		Cartas de Observações Individuais e Amplitudes Móveis	
	Carta \bar{X}	Carta R	Carta \bar{X}	Carta S	Carta X	Carta MR
LSC	$\mu + A\sigma$	$D_2\sigma$	$\mu + A\sigma$	$B_6\sigma$	$\mu + 3\sigma$	$D_2\sigma$
LC	μ	$d_2\sigma$	μ	$c_4\sigma$	μ	$d_2\sigma$
LIC	$\mu - A\sigma$	$D_1\sigma$	$\mu - A\sigma$	$B_5\sigma$	$\mu - 3\sigma$	$D_1\sigma$

As constantes A , B_5 , B_6 , D_1 , D_2 e d_2 só dependem da dimensão da amostra (Tabela C.1, Anexo C).

2.3.6. Condições de Utilização de Cartas de Controlo de Variáveis

Numa abordagem tradicional, a aplicação de Cartas de Controlo de Variáveis pressupõe algumas condições associadas aos dados recolhidos, nomeadamente a Normalidade, a independência e a aleatoriedade dos mesmos. Os dados relativos à característica a controlar devem, por isso, ser independentes e identicamente distribuídos, seguindo uma distribuição Normal de média μ e variância σ^2 .

a) Pressuposto da Normalidade dos dados

A hipótese de os dados seguirem uma distribuição Normal pode ser analisada tanto graficamente como analiticamente.

Numa primeira instância, a construção de um histograma revela-se adequada para verificar se a distribuição dos dados amostrais se assemelha a uma Normal. Neste gráfico de barras, os dados são agrupados em classes que contêm um determinado intervalo de valores, sendo cada barra representativa de uma classe (Ishikawa, 1982). Na presente dissertação, o número de classes é determinado recorrendo à Regra de Sturges, através da Expressão 2.38.

$$k = 1 + 3,322 \log (N) \quad (2.38)$$

Sendo k o número de classes do histograma e N o número de observações utilizadas para a sua construção. No eixo das ordenadas, representa-se a frequência absoluta correspondente a cada classe de valores. No final da sua elaboração, é possível verificar a forma de tal distribuição e as potenciais semelhanças a uma Normal.

A elaboração de um Gráfico Q-Q (Quantil-Quantil) da Distribuição Normal constitui também uma ferramenta útil para análise gráfica. Neste gráfico, os quantis amostrais são representados no eixo das abcissas, e os quantis esperados (para a Distribuição Normal) no eixo das ordenadas. Quando a configuração dos pontos no gráfico se aproxima a uma reta, conclui-se que não existe evidência para rejeitar o pressuposto da Normalidade dos dados.

De modo a analisar analiticamente a Normalidade dos dados, poderá recorrer-se, por exemplo, ao Teste de Kolmogorov-Smirnov (ver Secção 2.2.1.) ou ao Teste do Qui-Quadrado. Dado um certo nível de significância α , é inferido estatisticamente se os dados recolhidos podem ser descritos através de uma distribuição Normal. Em caso afirmativo, conclui-se que não existe evidencia estatística que permita rejeitar a hipótese de a distribuição da população, de onde tais dados provêm, se assemelhar a uma Normal de média μ e variância σ^2 . Em caso negativo, existem alguns procedimentos passíveis de ser abordados. Realizaram-se muitos desenvolvimentos e estudos sobre a não Normalidade e o seu impacto na eficiência em cartas de controlo, tais como: Burr (1967), Rigdon et al. (1994), Chou et al. (1998) e Woodall (2000). Pereria e Requeijo (2012) sugerem as seguintes abordagens:

- Através dos dados disponíveis, identificar a distribuição da característica da qualidade em estudo, determinando os limites de controlo com base nos percentis de 0,135% e de 99,865%;
- Transformar os dados disponíveis, de modo a que a variável transformada seja Normalmente distribuída, através, por exemplo, do método de Transformação Box-Cox, proposta por Box e Cox (1964), ou do Sistema de Distribuições de Johnson. Os limites de controlo são posteriormente calculados para a variável transformada;
- Utilizar o Método da Variância Ponderada, para distribuições assimétricas.

b) Pressuposto da Aleatoriedade dos dados

A aleatoriedade dos dados pressupõe que estes não seguem um determinado padrão, apresentando, por isso, um comportamento não sistemático.

São algumas as fontes que provocam a não aleatoriedade dos dados, destacando-se a mistura de populações diferentes e a correlação entre observações consecutivas ou desfasadas no tempo. De modo a verificar a aleatoriedade dos dados, é usual utilizar os métodos do Teste das

Sequências, o Teste das Sequências Ascendentes e Descendentes e o Teste Modificado do Quadrado Médio das Diferenças Sucessivas (Pereira e Requeijo, 2012).

c) Pressuposto da Independência dos dados

A análise da independência dos dados é fundamental para a escolha da melhor abordagem para o controlo dos mesmos. Desta análise, poderão ocorrer duas conclusões: os dados recolhidos são independentes ou são auto correlacionados. A independência dos dados indica que o valor que a variável em estudo toma no instante t não depende do seu valor no instante anterior ($t-1$), nem do valor obtido em qualquer instante desfasado de k instantes ($t-k$) (Pereira e Requeijo, 2012).

Para analisar a hipótese de existência de auto correlação entre os dados, Pereira e Requeijo (2012) fazem referência a aplicação da Função de Auto Correlação (FAC) e da Função de Auto Correlação Parcial (FACP).

2.3.7. Estudo da Capacidade do Processo

Como demonstrado anteriormente, através da construção de cartas de controlo estatístico torna-se possível averiguar a estabilidade do processo. A ausência de causas especiais de variação nas cartas sugere que o processo está apenas sujeito à variabilidade que lhe é inerente, encontrando-se, nesse momento, sob controlo estatístico. Porém, tal estabilidade não garante que o processo é capaz de produzir de acordo com as especificações que lhe são exigidas, mas somente que o seu comportamento futuro pode ser adequadamente previsto.

No final da Fase I, tal como regularmente durante a Fase II, é realizada a análise da capacidade do processo, com o intuito de estudar a aptidão que o processo revela em produzir de acordo com as especificações pré-estabelecidas. O estudo da capacidade do processo baseia-se na comparação entre a distribuição de uma determinada característica do produto e as especificações que lhe são impostas. A Figura 2.4 mostra um processo que se encontra sob controlo estatístico, mas cuja variabilidade inicial ainda se apresentava elevada face ao intervalo das especificações estabelecidas (sendo os limites superior e inferior de especificação representados pelas linhas a tracejado). Observa-se que a variabilidade foi minimizada ao longo do tempo, tornando o processo capaz de produzir de acordo com as especificações.

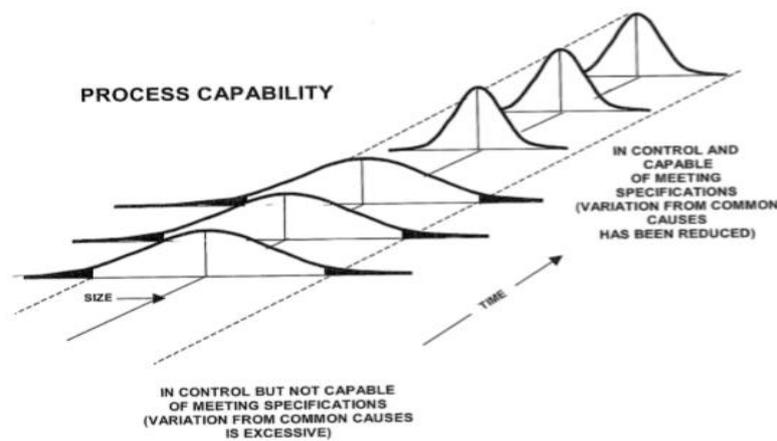


Figura 2.4 – Evolução da Capacidade de um Processo (extraído de Down et al., 2005)

Através dos resultados obtidos da análise da capacidade de um processo, torna-se possível (Montgomery, 2009):

- Prever se o processo produz de acordo com as especificações exigidas;
- Auxiliar responsáveis pelo desenvolvimento do produto a selecionar ou modificar um processo;
- Auxiliar na definição da frequência de amostragem durante a monitorização do processo;
- Especificar requisitos de performance para novos equipamentos;
- Selecionar fornecedores;
- Reduzir a variabilidade do processo.

Normalmente, a capacidade de um determinado processo é avaliada recorrendo-se ao cálculo dos índices de capacidade do processo, que permitem verificar de que modo o processo está a produzir face às especificações, e cujos conceitos são aprofundados nos tópicos que se seguem.

2.3.7.1. Estudo da Capacidade do Processo para Dados Normalmente Distribuídos

Garantido o pressuposto de os dados de uma característica relativa a um determinado processo seguirem uma distribuição Normal, significa então que 99,73% dos valores dessa característica estão compreendidos entre $\mu \pm 3\sigma$, em que μ e σ são, respetivamente, a média e o desvio padrão do processo. Considera-se, por isso, que a variação aceitável para o processo é igual a 6σ (seis vezes o desvio padrão do processo).

No caso de as características em estudo possuírem uma especificação bilateral, o Índice de Capacidade Potencial (C_p) é indicado para uma análise inicial. Este relaciona a amplitude da especificação (calculada pela diferença entre os limites superior e inferior de especificação) com a amplitude/variação do processo (6σ). O índice C_p é definido pela Equação 2.39, onde LSE

designa o Limite Superior de Especificação e LIE designa o Limite Inferior de Especificação (Chandra, 2001).

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{6\sigma} \quad (2.39)$$

Pretende-se que o seu valor seja tão elevado quanto possível, pois tal reflete a potencial capacidade do processo em satisfazer os requisitos. No entanto, o índice C_p apenas avalia se a variabilidade do processo é adequada à amplitude da especificação técnica, não fornecendo indicações acerca da localização da média do processo. Deste modo, um processo pode possuir um índice de capacidade potencial satisfatório e não ser capaz de produzir de acordo com o *target* pretendido.

Por conseguinte, surgiram novos índices de avaliação de desempenho do processo que consideram não só a variabilidade do processo como também a localização da média. Kane (1986) sugere o índice de capacidade C_{pk} , que tem em conta o desvio da média em relação aos limites de especificação, podendo ser utilizado quando as características do processo possuem especificações bilaterais ou unilaterais (Pereira e Requeijo, 2012). O índice C_{pk} é definido por:

$$C_{pk} = \min((C_{pk})_I, (C_{pk})_S) \quad (2.40)$$

com

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

$$(C_{pk})_S = \frac{LSE - \mu}{3\sigma} \quad (2.42)$$

No caso de a especificação ser unilateral, o índice de capacidade do processo é definido:

- Pela equação 2.41, quando a característica apenas contém um limite inferior de especificação, sendo do tipo quanto-maior-melhor;
- Pela equação 2.42, quando a característica apenas tem de ser inferior a um limite superior de especificação, sendo do tipo quanto-maior-melhor. A Figura 2.5 representa graficamente a definição do índice $(C_{pk})_S$.

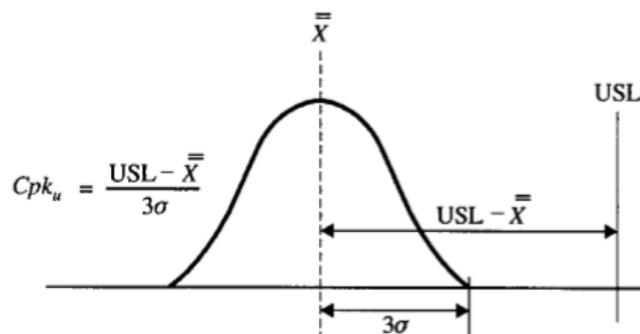


Figura 2.5 – Definição do Índice de Capacidade Superior (extraído de Oakland, 2003)

Quanto mais elevado for o valor do índice C_{pk} , maior será a aptidão do processo em se enquadrar dentro dos requisitos pré-definidos. Para especificações bilaterais, conclui-se que o processo se encontra centrado com o valor nominal/target quando $(C_{pk})_I = (C_{pk})_S$, evidenciando que a média coincide com o valor nominal especificado.

Na Tabela 2.4, representam-se valores mínimos recomendáveis para os índices de capacidade C_p e C_{pk} , tendo em conta diferentes contextos e a bilateralidade ou unilateralidade das especificações (Montgomery, 2009).

Tabela 2.4 – Valores Mínimos Recomendáveis para Índices de Capacidade (Montgomery, 2009)

Contexto	Especificação Bilateral	Especificação Unilateral
	Processos Existentes	1,33
Novos Processos	1,50	1,45
Características de Segurança, de Resistência ou Críticas em processos existentes.	1,50	1,45
Características de Segurança, de Resistência ou Críticas em novos processos.	1,67	1,60

Tendo em consideração o contexto e o tipo de especificação, caso se obtenha um valor de C_p superior ao mínimo recomendado conclui-se que o processo possui capacidade potencial, pois a variabilidade é adequada à especificação técnica. Caso o seu valor seja inferior ao recomendado, o processo não possui capacidade potencial e será então necessário implementar

ações que visem a redução da variação associada ao processo. Relativamente ao índice C_{pk} , se o valor obtido for superior ao mínimo recomendado, conclui-se que o processo tem capacidade para cumprir as especificações, e o inverso caso o valor seja inferior. A verificação da centralização do processo é também relevante para o estudo, de modo a verificar se a média é significativamente diferente do valor nominal pretendido.

No presente projeto, os valores mínimos aceitáveis considerados para os índices de capacidade são 1,33 e 1,25, para especificações bilaterais e unilaterais, respetivamente.

2.3.7.2. Estudo da Capacidade do Processo para Dados não Normais

Na circunstância em que os dados referentes a uma determinada característica da qualidade não sigam uma distribuição Normal, os índices de capacidade referidos anteriormente não podem ser utilizados. De modo a que seja possível analisar a capacidade do processo, existem duas principais alternativas a que se pode recorrer (Pereira e Requeijo, 2012):

1. Transformar os dados e estudar a capacidade do processo recorrendo aos índices mencionados na Secção 2.3.7.1; ou
2. Estudar a capacidade do processo aplicando outros índices mais adequados à distribuição dos dados.

Optando-se pela primeira alternativa, a transformação dos dados pode ser feita recorrendo, por exemplo, ao Sistema de Distribuições de Johnson ou ao Método de Transformação Box-Cox. Os limites de especificação necessitam também de ser transformados, utilizando o mesmo método. No seguimento da transformação dos dados, efetua-se o controlo estatístico da variável transformada através da carta de controlo mais adequada, com o objetivo de analisar a estabilidade do processo. No momento em que se concluir que o processo se encontra sob controlo estatístico, inicia-se então o estudo da capacidade através dos índices referidos na Secção 2.3.7.1.

Relativamente à segunda alternativa, existem diversas publicações que fazem alusão ao desenvolvimento de índices mais apropriados à distribuição dos dados, tais como: Clements (1989), Pearn e Chen (1995), Schneider *et al.* (1995), Wright (1995), Zwick (1995), Pearn *et al.* (1999), McCormack *et al.* (2000) e Kotz e Johnson (2002). Tendo em conta as referidas abordagens, Pereira e Requeijo (2012) sugerem a utilização dos seguintes índices:

$$C_p = \frac{LSE - LIE}{5,15\sigma} \quad (2.43)$$

$$C_{pk} = \min \left(\frac{\mu - LIE}{2,575 \sigma} ; \frac{LSE - \mu}{2,575 \sigma} \right) \quad (2.44)$$

Como se observa nas Expressões 2.43-2.44, a única alteração em relação aos índices de capacidade para dados Normais são os denominadores das equações. Assume-se, deste modo, que a probabilidade de um valor da variável em estudo se enquadrar no intervalo $\mu \pm 2,575\sigma$ é de 99%.

Os valores mínimos recomendados, quantificados na Tabela 2.4, são também válidos para estes novos índices de capacidade.

2.4. Controlo Estatístico para “Pequenas Produções”

A fim de evitar desperdícios, as empresas optam cada vez mais por minimizar a existência de stocks, focando-se na produção e venda imediata dos produtos. Neste contexto, podem surgir situações de “Pequenas Produções” (*Short Run*), nas quais uma das seguintes situações pode acontecer (Pereira e Requeijo, 2012):

- O número de unidades produzidas de cada vez é muito pequeno;
- O número de unidades fabricadas é elevado, mas com uma duração de produção muito reduzida;
- Ao longo do tempo, existem lotes específicos e em número limitado para a execução da produção.

Nas Secções que se seguem, é realizada uma apresentação às cartas para “Pequenas Produções” utilizadas neste trabalho: Cartas Z e W e Cartas Q.

2.4.1. Cartas de Controlo Z e W

As cartas de controlo Z e W vêm responder às limitações associadas às situações de “Pequenas Produções”, permitindo controlar numa única carta várias características de diferentes produtos, através da transformação dos dados de cada característica de modo a que os seus valores se tornem adimensionais. Os dados são transformados com base nos parâmetros estimados na Fase I, sendo, por isso, estas cartas utilizadas essencialmente na Fase II do Controlo Estatístico. Desta forma, é então possível representar na mesma carta de controlo todas as estatísticas de qualquer produto, permitindo um controlo dos processos de forma mais eficiente, no sentido em que permite reduzir o número de cartas de controlo a elaborar (que seriam necessárias caso se controlasse produto a produto).

Os fundamentos para a elaboração das cartas Z e W são os mesmo das cartas tradicionais de Shewart, sendo necessário que os dados recolhidos sejam independentes e Normalmente distribuídos e aplicadas as regras de deteção de padrões aleatórios nas cartas.

a) Cartas da Média ($Z_{\bar{X}}$) e do Desvio Padrão (W_S)

Nos casos em que a intenção seja controlar os parâmetros dos processos respeitantes às características de cada produto, utilizando médias e desvios padrão de amostras, procede-se ao cálculo das estatísticas Z e W através das Equações 2.45-2.46 (Pereira e Requeijo, 2012).

$$(Z_i)_j = \left(\frac{\bar{X}_i - \mu}{\frac{\sigma}{\sqrt{n_i}}} \right)_j \quad (2.45)$$

$$(W_i)_j = \left(\frac{S_i}{c_4 \sigma} \right)_j \quad (2.46)$$

Nas quais:

- $(\bar{X}_i)_j$ representa a média da amostra i , relativa ao produto j
- $(\mu)_j$ representa a média do processo para o produto j , relativamente a uma dada característica
- $(\sigma)_j$ representa o desvio padrão do processo para o produto j , relativamente a uma dada característica
- $(n_i)_j$ representa a dimensão da amostra i , relativa ao produto j
- $(S_i)_j$ representa o desvio padrão da amostra i , relativa ao produto j
- c_4 representa o fator constante, dependendo exclusivamente da dimensão da amostra

Os valores dos limites de controlo das cartas $Z_{\bar{X}}$ e W_S são dados pelas Equações 2.47-2.48, respetivamente. Os limites de controlo da carta Z não dependem da dimensão da amostra, sendo sempre iguais a 3 ou -3. Quanto à carta W, os valores dos limites dependem da dimensão amostral (Pereira e Requeijo, 2012).

$$\begin{aligned} LSC_Z &= 3 \\ LC_Z &= 0 \\ LIC_Z &= -3 \end{aligned} \quad (2.47)$$

$$\begin{aligned} LSC_W &= B_4 \\ LC_W &= 1 \\ LIC_W &= B_3 \end{aligned} \quad (2.48)$$

B_3 e B_4 são constantes cujos valores dependem unicamente da dimensão da amostra (Tabela C.1, Anexo C)

Ambas as cartas de controlo são construídas representando-se cada ponto por ordem cronológica, independentemente do produto.

2.4.1.1. Capacidade dos Processos

Uma vez assegurado que os processos em estudo se encontram sob controlo estatístico, na Fase I, e que apresentam aptidão para produzir de acordo com as especificações técnicas, a capacidade dos processos na Fase II é estudada em tempo real, ou seja, à medida que se recolhem os dados da produção (Pereira e Requeijo, 2012).

Os índices de capacidade, designados por Z_I e Z_S , constituem transformações apropriadas dos índices $(C_{pk})_I$ e $(C_{pk})_S$ e são determinados em cada instante correspondente à recolha de dados, sendo representados graficamente na própria carta Z. Para além de fornecerem conclusões relativamente à capacidade dos processos, permitem analisar, em cada instante, se os processos estão centrados com o seu valor nominal, através da comparação dos dois índices (Z_I e Z_S) e assim concluir sobre a sua simetria.

Tendo em conta as estimativas dos parâmetros dos processos (média e desvio padrão) referentes a cada produto j , em cada instante r , os índices de capacidade são estimados através das seguintes expressões:

$$((\hat{Z}_I)_r)_j = \left(\frac{LIE - \hat{\mu}_r}{k \hat{\sigma}_r} \right)_j \quad (2.49)$$

$$((\hat{Z}_S)_r)_j = \left(\frac{LSE - \hat{\mu}_r}{k \hat{\sigma}_r} \right)_j \quad (2.50)$$

O valor de k depende do tipo de especificação do processo em estudo. No caso de se estar perante uma especificação unilateral, é normalmente utilizado $k = 1,25$. Quando a especificação é bilateral, $k = 1,33$. Para especificações bilaterais, considera-se que processo referente ao produto j é capaz apenas se se verificarem, em simultâneo, as seguintes condições:

$$(Z_I)_j \leq -3 \quad (2.51)$$

$$(Z_S)_j \geq 3 \quad (2.52)$$

Para a obtenção dos índices de capacidade, em cada instante r , é necessário estimar os valores de $\hat{\mu}_r$ e $\hat{\sigma}_r$ (Expressões 2.53-2.54) atualizados com os dados que vão sendo recolhidos do produto em questão, desde que esses dados não correspondam a causas especiais de variação.

$$\hat{\mu}_r = \bar{\bar{X}}_r \quad (2.53)$$

$$\hat{\sigma}_r = \frac{\bar{S}_r}{c_4} \quad (2.54)$$

Em que

$$\bar{\bar{X}}_r = \frac{1}{r} [(r-1)\bar{\bar{X}}_{r-1} + \bar{X}_r] \quad (2.55)$$

$$\bar{S}_r = \frac{1}{r} [(r-1)\bar{S}_{r-1} + S_r] \quad (2.56)$$

De notar que no caso de ocorrência de causas especiais, os dados correspondentes a essas causas não são usados para a estimação futura dos parâmetros do processo, nem são estimados os índices de capacidade no(s) instante(s) do surgimento dessa(s) causa(s) invulgar(es).

2.4.2. Cartas de Controlo Q

As cartas Q são de elevada utilidade quando não existem dados suficientes para estimar convenientemente os parâmetros do processo. A metodologia para a elaboração destas cartas, desenvolvida por Charles Quesenberry, consiste na transformação da característica da qualidade X numa variável Q, em que X é uma variável contínua e Q segue aproximadamente uma distribuição Normal reduzida (média zero e variância unitária). Assume-se também que os valores da característica X são independentes e identicamente distribuídos, segundo uma distribuição Normal (Pereira e Requeijo, 2012).

Tal como nas cartas Z e W, os princípios fundamentais subjacentes ao desenvolvimento das cartas tradicionais de Shewart aplicam-se, por inteiro, às cartas Q.

a) Cartas para Observações Individuais (Q_X) e Amplitudes Móveis (Q_{MR})

Quando não é executável ou possível a recolha de amostras de um determinado processo, é comum recolher dados de modo a constituir observações individuais (X) referentes a uma certa característica da qualidade. Em situações onde não existem dados suficientes, utiliza-se a estatística Q para a construção da carta com os valores obtidos que, ao longo do tempo, vão permitir o controlo da média do processo. Deste modo, a estatística Q, no instante r, calcula-se em função da estatística X nesse instante, através da Expressão 2.57.

$$Q_r(X_r) = \Phi^{-1} \left(G_{r-2} \left(\sqrt{\frac{r-1}{r}} \left(\frac{X_r - \bar{\bar{X}}_{r-1}}{S_{r-1}} \right) \right) \right), \quad r = 3, 4, \dots \quad (2.57)$$

Em que,

Φ^{-1} representa o inverso da Distribuição Normal;

G_{r-2} representa a Função de Distribuição de *t-student*, com $(r - 2)$ graus de liberdade;

X_r representa a observação relativa ao instante r ;

\bar{X}_{r-1} representa a média das observações até ao instante $(r - 1)$;

S_{r-1} representa o desvio padrão de $(r - 1)$ observações.

Analogamente ao que acontece nas cartas tradicionais, o controlo da dispersão do processo é normalmente feito determinando a amplitude móvel de duas observações consecutivas. Deste modo, a estatística Q obtida em função da estatística MR , em cada instante r , é definida pela Equação 2.58 (Pereira e Requeijo, 2012).

$$Q_r(MR_r) = \Phi^{-1} \left(F_{1,v} \left(\frac{v (MR)_r^2}{(MR)_2^2 + (MR)_4^2 + \dots + (MR)_{r-2}^2} \right) \right), \quad r = 4, 6, \dots \quad (2.58)$$

Em que

$F_{1,v}$ representa a Função de Distribuição de Fisher, sendo $v = \frac{r}{2} - 1$;

MR_r representa a amplitude móvel correspondente ao instante r .

Para os cálculos da média, variância amostral e amplitude móvel são utilizadas as Equações 2.59-2.61.

$$\bar{X}_r = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r X_j \quad (2.59)$$

$$S_r^2 = \frac{1}{r-1} \sum_{j=1}^r (X_j - \bar{X}_r)^2 \quad (2.60)$$

$$MR_r = |X_r - X_{r-1}| \quad (2.61)$$

Dado que as variáveis $Q(X)$ e $Q(MR)$ seguem aproximadamente uma Normal reduzida $N(0,1)$, os limites de controlo para ambas as cartas são dados por:

$$LSC_{Q(x)} = LSC_{Q(MR)} = 3 \quad (2.62)$$

$$LC_{Q(x)} = LC_{Q(MR)} = 0 \quad (2.63)$$

$$LIC_{Q(x)} = LIC_{Q(MR)} = -3 \quad (2.64)$$

2.4.2.1. Capacidade do Processo

À semelhança do que acontece nas cartas Z, o estudo da capacidade dos processos nas cartas Q(X) é realizado em cada instante, sendo os valores obtidos, para os índices, representados nas próprias cartas de controlo. A análise da capacidade é feita recorrendo aos índices Q_I e Q_S , definidos por (Pereira e Requeijo, 2012):

$$((\hat{Q}_I)_r)_j = \left(\frac{LIE - \hat{\mu}_r}{k \hat{\sigma}_r} \right)_j \quad (2.65)$$

$$((\hat{Q}_S)_r)_j = \left(\frac{LSE - \hat{\mu}_r}{k \hat{\sigma}_r} \right)_j \quad (2.66)$$

A estimação dos valores dos parâmetros, no instante r , é efetuada através das Equações 2.67-2.68.

$$\hat{\mu}_r = \bar{X}_r \quad (2.67)$$

$$\hat{\sigma}_r = \frac{S_r}{c_4} \quad (2.68)$$

Para casos de especificação bilateral ($k = 1,33$), o processo é considerado capaz, no instante r , quando se verificam simultaneamente as seguintes condições:

$$(Q_I)_r \leq -3 \quad (2.69)$$

$$(Q_S)_r \geq 3 \quad (2.70)$$

2.5. Controlo Estatístico do Processo Multivariado

Na grande maioria dos casos, quando se pretende implementar ou aplicar o *SPC*, interessa controlar mais do que uma característica da qualidade de cada um dos produtos em estudo. O Controlo Estatístico Multivariado (*MSPC*) possibilita o controlo simultâneo de várias características da qualidade, analisando os dados de cada característica conjuntamente e reduzindo assim o número de documentos que seriam necessários caso se elaborassem cartas de controlo isoladamente para cada uma das variáveis. Adicionalmente, vem permitir a identificação de possíveis alterações na correlação entre as variáveis, sendo de elevada relevância para a análise da estabilidade dos processos (Pereira e Requeijo, 2012).

Tendo por base de estudo os fundamentos apresentados por Hotelling (1947), os artigos de Alt (1985) e Jackson (1985) constituem referências da temática do controlo estatístico multivariado, representando duas das maiores contribuições para o seu desenvolvimento. Os estudos envolvem o controlo da média e das variâncias-covariâncias das diferentes características.

As cartas de controlo multivariadas, quando comparadas com as cartas tradicionais univariadas, requerem uma apreciação mais detalhada, pois é necessário analisar qual(ais) a(s) variável(eis) responsável(eis) sempre que ocorram causas invulgares de variação (causas especiais) e investigar se essas causas se devem a uma alteração na correlação entre as diferentes características/variáveis.

Quando se controla somente uma característica (controlo univariado), o risco de ocorrência de falsos alarmes (erro tipo I) é igual a 0,27%. Quando se controla simultaneamente duas características, a probabilidade de um ponto se encontrar para lá dos limites de controlo é igual a $(0,0027) \times (0,0027)$, perfazendo um total de 0,000729%. Para p características independentes a controlar, e sendo α_i o risco do tipo I para a variável i , o risco do tipo I (α) é dado por

$$\alpha = 1 - \prod_{i=1}^p (1 - \alpha_i) \quad (2.71)$$

Assim, a probabilidade de, em simultâneo, todos os pontos pertencerem aos intervalos definidos pelos limites de controlo é dada por

$$P(\text{todos os pontos entre os limites de controlo}) = \prod_{i=1}^p (1 - \alpha_i) \quad (2.72)$$

Analogamente ao estudo univariado, também no estudo multivariado se podem elaborar cartas para controlar a média e a dispersão do processo. A presente dissertação apenas se refere a cartas para o estudo multivariado das médias de amostras.

O *MSPC*, baseado em médias de amostras, divide-se em duas fases: Fase I e Fase II. Na Fase I, é construída uma carta T^2 , analisada a estabilidade do processo e estimados os respetivos parâmetros (vetor média e matriz das covariâncias) para as p características em análise. Na

Fase II, dá-se início à monitorização, e existem duas situações ou períodos. No período imediatamente após a Fase I, controla-se o processo através de uma carta T^2 , na qual os limites de controlo são determinados com base nas estimativas obtidas para os parâmetros do processo, na Fase I, e nos dados utilizados para a estimação dos parâmetros. O período posterior caracteriza-se pelo reconhecimento da estabilidade do processo, pelo que o controlo se realiza recorrendo-se a uma carta χ^2 , cujos limites dependem unicamente do número de características p e do nível de significância α (Pereira e Requeijo, 2012).

Para o controlo da média, é possível elaborar cartas tendo em conta se os dados constituem amostras ou observações individuais. No desenvolvimento da presente dissertação apenas se aplicam as cartas para controlo da média, pois apenas são constituídas amostras ao longo do controlo, sendo os conceitos associados a estas cartas abordados de seguida.

2.5.1. Cartas para Controlo das Médias de Amostras

Como referido anteriormente, para o desenvolvimento do presente projeto de investigação foram utilizadas cartas baseadas em médias de amostras. Tal como nas cartas da média do estudo univariado, estas também se baseiam em alguns pressupostos. Nomeadamente, a distribuição conjunta das p características deve seguir uma distribuição Normal multivariada $N_p(\mu, \Sigma)$, com vetor média $\mu' = (\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_p)$ e matriz das covariâncias Σ . Assume-se também que as variáveis X_1, X_2, \dots, X_p são independentes e identicamente distribuídas segundo distribuições Normais (Pereira e Requeijo, 2012).

De seguida apresentam-se os conceitos associados à elaboração das cartas de controlo baseadas em médias de amostras, na Fase I e Fase II.

2.5.1.1. Fase I

Nesta primeira fase, são recolhidas m amostras, de dimensão n , sendo recomendável a recolha de no mínimo 100 observações de cada característica da qualidade p . As médias, as variâncias e as covariâncias amostrais são determinadas a partir das observações individuais X_{ijk} ($i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, p; k = 1, 2, \dots, m$), sendo definidas por

$$\bar{X}_{jk} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_{ijk} \quad (2.73)$$

$$S_{jk}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_{ijk} - \bar{X}_{jk})^2 \quad (2.74)$$

$$S_{jhk} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_{ijk} - \bar{X}_{jk})(X_{ihk} - \bar{X}_{hk}) \quad ; \quad j \neq h \quad (2.75)$$

Em que:

X_{ijk} representa a observação i da característica da qualidade j na amostra ou instante k ;

\bar{X}_{jk} representa a média da característica da qualidade j na amostra ou instante k ;

S_{jk}^2 representa a variância da característica da qualidade j na amostra ou instante k ;

S_{jhk} representa a covariância entre as características da qualidade j e h na amostra ou instante k .

A partir das expressões anteriores, é possível determinar as seguintes estatísticas amostrais

$$\bar{\bar{X}}_j = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \bar{X}_{jk} \quad (2.76)$$

$$\bar{S}_j^2 = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m S_{jk}^2 \quad (2.77)$$

$$\bar{S}_{jh} = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m S_{jhk} \quad ; \quad j \neq h \quad (2.78)$$

O vetor média $\bar{\bar{\mathbf{X}}}$ (Equação 2.79) é constituído pelas médias das médias amostrais, de cada uma das p características. A matriz das covariâncias \mathbf{S} (Equação 2.80) é constituída pelas variâncias e covariâncias amostrais.

$$\bar{\bar{\mathbf{X}}} = (\bar{\bar{X}}_1, \bar{\bar{X}}_2, \dots, \bar{\bar{X}}_p)' \quad (2.79)$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \bar{S}_{11} & \bar{S}_{12} & \bar{S}_{13} & \dots & \bar{S}_{1p} \\ \bar{S}_{21} & \bar{S}_{22} & \bar{S}_{23} & \dots & \bar{S}_{2p} \\ \bar{S}_{31} & \bar{S}_{32} & \bar{S}_{33} & \dots & \bar{S}_{3p} \\ \bar{S}_{p1} & \bar{S}_{p2} & \bar{S}_{p3} & \dots & \bar{S}_{pp} \end{bmatrix} \quad (2.80)$$

O vetor $\bar{\mathbf{X}}_k$, definido pela Expressão 2.81, é constituído pelas médias das p características da amostra k .

$$\bar{\mathbf{X}}_k = (\bar{X}_{1k}, \bar{X}_{2k}, \dots, \bar{X}_{pk})' \quad (2.81)$$

Para a elaboração da carta de controlo, determina-se, no instante k , uma variável T^2 (*Hotelling* T^2), definida por

$$(T^2)_k = n (\bar{\mathbf{X}}_k - \bar{\bar{\mathbf{X}}})' \mathbf{S}^{-1} (\bar{\mathbf{X}}_k - \bar{\bar{\mathbf{X}}}) \quad (2.82)$$

Os limites da carta de controlo T^2 são dados por

$$LSC_{T^2} = \frac{p(m-1)(n-1)}{mn-m-p+1} \cdot F_{\alpha;p,mn-m-p+1} \quad (2.83)$$

$$LIC_{T^2} = 0 \quad (2.84)$$

Em que $F_{\alpha;p,mn-m-p+1}$ representa o percentil à direita da Distribuição de Fisher, com nível de significância α e graus de liberdade p e $mn-m-p+1$.

No momento em que o processo se encontrar estabilizado, i.e., sob controlo estatístico, é possível estimar os parâmetros do processo, sendo $\bar{\bar{X}}$ estimador de μ e S o estimador de Σ :

$$\hat{\mu} = \bar{\bar{X}} \quad (2.85)$$

$$\hat{\Sigma} = S \quad (2.86)$$

2.5.1.2. Fase II

Imediatamente após o término da primeira fase, inicia-se o controlo do processo em tempo real, à medida que os dados são recolhidos da produção. A estatística T^2 a representar na carta é determinada pela Equação 2.82, à semelhança do que acontece na primeira fase. Relativamente aos limites de controlo, são determinados tendo em conta as m amostras recolhidas e utilizadas para a estimação dos parâmetros na primeira fase, sendo dados por (Pereira e Requeijo, 2012):

$$LSC_{T^2} = \frac{p(m+1)(n-1)}{mn-m-p+1} \cdot F_{\alpha;p,mn-m-p+1} \quad (2.87)$$

$$LIC_{T^2} = 0 \quad (2.88)$$

Quando $(T^2)_k > LSC_{T^2}$, tal indica que se está na presença de uma causa especial de variação. É necessário identificar a origem da sua ocorrência, através do estudo da característica responsável por essa situação ou de uma possível alteração na correlação entre as p características (aplicando o método da estatística d , por exemplo).

Finalmente, quando o processo se mantiver estável durante um largo período de tempo, considera-se que os seus parâmetros, μ e Σ , são conhecidos e estáveis. O controlo passa a ser feito através da estatística χ^2 , definida por

$$(\chi^2)_k = n(\bar{X}_k - \mu)' \Sigma^{-1} (\bar{X}_k - \mu) \quad (2.89)$$

O vetor média e matriz das covariâncias do processo são dados por

$$\mu = (\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_p)' \quad (2.90)$$

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} & \dots & \sigma_{1p} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} & \dots & \sigma_{2p} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} & \dots & \sigma_{3p} \\ \sigma_{p1} & \sigma_{p2} & \sigma_{p3} & \dots & \sigma_{pp} \end{bmatrix} \quad (2.91)$$

Os limites de controlo da carta χ^2 são definidos em função do número de características p e do nível de significância α :

$$LSC_{\chi^2} = \chi_{\alpha;p}^2 \quad (2.92)$$

$$LIC_{\chi^2} = 0 \quad (2.93)$$

Em que $\chi_{\alpha;p}^2$ representa o percentil à direita da Distribuição Qui-Quadrado, para um nível de significância α e para p graus de liberdade.

Assim como na carta T^2 da Fase II, quando se deteta uma causa especial de variação na carta χ^2 , deve proceder-se à identificação das variáveis responsáveis dessas situações e ao estudo de uma possível alteração da correlação entre as variáveis.

2.5.2. Interpretação das Cartas Multivariadas

Quando ocorre uma situação fora de controlo numa carta multivariada é necessário identificar qual(ais) a(s) variável(eis) responsável(eis) por essa causa invulgar, de modo a que se possam seleccionar convenientemente as medidas corretivas mais apropriadas. Foram desenvolvidas diversas técnicas e métodos que procuram facilitar a identificação dessas variáveis e/ou correlações. Alt (1985) recomenda a utilização de cartas univariadas das p características, com limites baseados nas desigualdades de Bonferroni. Jackson (1980, 1981a, 1981b, 1985) sugere a decomposição de T^2 em componentes principais, enquanto que Mason *et al* (1995) recomendam a decomposição em componentes ortogonais. Quanto a Hayter e Tsui (1994), sugerem o Método do Ponto Crítico. Na presente dissertação, será utilizado o Método da estatística d , abordado em Runger *et al* (1996), por ser um método de simples aplicação e bastante eficaz, encontrando-se descrito no tópico que se segue.

2.5.2.1. Método da Estatística d

Este método constitui uma técnica bastante prática para a determinação da(s) variável(eis) responsável(eis) por uma situação fora de controlo. A estatística d é definida, para cada variável/característica j , por

$$d_j = T^2 - T_j^2, \quad j = 1, 2, \dots, p \quad (2.94)$$

Esta técnica baseia-se na decomposição da estatística T^2 de modo a determinar a contribuição isolada de cada característica. Na Equação 2.94, o valor da estatística T^2 é calculado com base nas p variáveis, e o de T_j^2 determinado a partir de $(p - 1)$ variáveis (i.e., com base em todas as p variáveis à exceção da variável j).

Quando $d_j > \chi_{\alpha;1}^2$ considera-se que a variável j contribui significativamente para a situação fora de controlo observada. Se ocorrer uma situação em que tal não se verifique para qualquer característica, considera-se que a situação anómala ocorreu devido a uma alteração da correlação entre as p características/variáveis.

2.5.3. Capacidade Multivariada do Processo

Partindo do princípio que X segue uma distribuição Normal multivariada $N_p(\mu, \Sigma)$, o estudo multivariado da capacidade do processo baseia-se na comparação de áreas (quando estão em estudo duas características, $p = 2$) ou de volumes (quando $p = 3$). No presente projeto, serão aplicados os três índices de capacidade para especificações bilaterais desenvolvidos por Shahriari *et al* (1995).

2.5.3.1. Índices de Capacidade para Especificações Bilaterais

De seguida, são apresentados os índices de capacidade C_{pM} , PV e LI .

Analogamente ao índice C_p do estudo Univariado, o índice C_{pM} constitui um indicador da capacidade potencial do processo. Este índice compara o volume da região referente à especificação com o volume da região relativa ao processo, sendo definido por

$$C_{pM} = \left(\frac{\text{Volume da região referente à especificação}}{\text{Volume modificado referente ao processo}} \right)^{\frac{1}{p}} \quad (2.95)$$

A região definida pela especificação técnica depende do número de p características. A região é um retângulo quando $p = 2$, um prisma quando $p = 3$ e um p -retângulo quando $p \geq 4$. Quanto à região definida pelo processo, constitui um p -elipsoide desde que o processo siga uma distribuição Normal multivariada $N_p(\mu, \Sigma)$. O volume modificado referente ao processo (denominador do índice C_{pM}) não é o p -elipsoide mas sim o menor p -retângulo que contém esse elipsoide, de modo a que se torne possível a comparação com a região da especificação. A Figura 2.6 permite uma visualização clara da região modificada do processo.

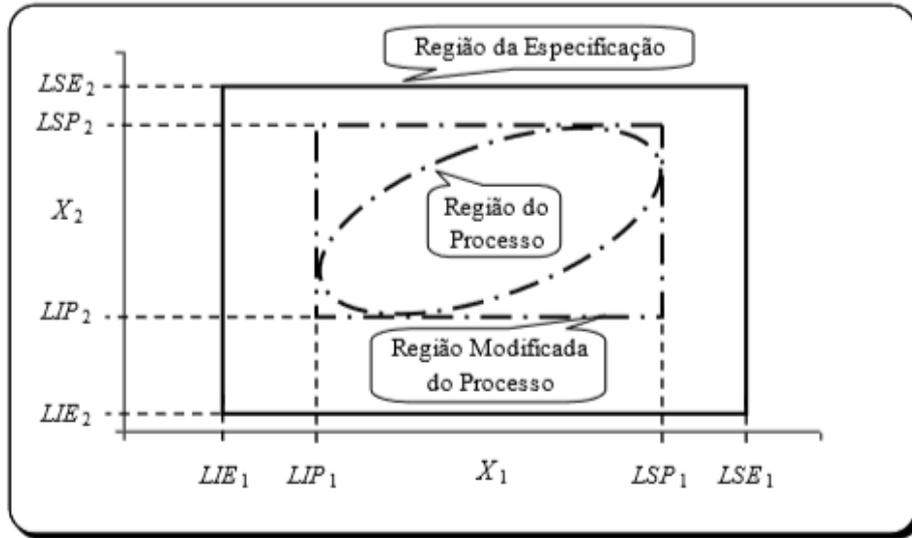


Figura 2.6 – Região do Processo, da Especificação e Modificada (extraído de Pereira e Requeijo, 2012)

Considerando LIP e LSP como os limites inferior e superior do processo, respetivamente, a Equação 2.95 pode ser traduzida na seguinte

$$C_{pM} = \left(\frac{\prod_{i=1}^p (LSE_i - LIE_i)}{\prod_{i=1}^p (LSP_i - LIP_i)} \right)^{\frac{1}{p}} \quad (2.96)$$

Em que

$$LSP_i = \mu_i + \sqrt{\frac{\chi_{\alpha;p}^2 \det(\Sigma_i^{-1})}{\det(\Sigma_i^{-1})}} \quad (2.97)$$

$$LIP_i = \mu_i - \sqrt{\frac{\chi_{\alpha;p}^2 \det(\Sigma_i^{-1})}{\det(\Sigma_i^{-1})}} \quad (2.98)$$

Onde Σ_i corresponde à matriz das covariâncias desprezando a coluna i e a linha i da matriz Σ e $\chi_{\alpha;p}^2$ corresponde ao percentil à direita, para probabilidade α , da distribuição do χ^2 com p graus de liberdade.

O seguinte índice de capacidade denomina-se por PV . Fundamentalmente, este índice considera como valor alvo (*target*) o centro da especificação técnica (vetor T). O objetivo é verificar em que medida o vetor média do processo coincide com o vetor T . É definido por:

$$PV = P\left(T^2 > \frac{p(N-1)}{N-p} F_{p,N-p}\right) \quad (2.99)$$

Em que N representa o número de observações usadas para estimação dos parâmetros do processo. A estatística T^2 , presente na Equação 2.100, é dada por

$$T^2 = n(\hat{\mu} - T)' \Sigma^{-1} (\hat{\mu} - T) = n(\bar{X} - T)' S^{-1} (\bar{X} - T) \quad (2.100)$$

Por fim, o índice LI compara o intervalo da especificação ($[LIE, LSE]$) com o intervalo do processo ($[LIP, LSP]$), para as p características da qualidade em estudo, sendo definido por

$$LI = \begin{cases} 1 & \text{se a região do processo está contida na região da especificação} \\ 0 & \text{outra situação} \end{cases} \quad (2.101)$$

Para p características em análise, considera-se um processo como capaz quando se verificam as seguintes três condições:

$$C_{pM} \geq 1,33 \quad (2.102)$$

$$PV \cong 1 \quad (2.103)$$

$$LI = 1 \quad (2.104)$$

3. Caracterização da Empresa e da Área de Injeção

O presente capítulo pretende fornecer uma breve apresentação da empresa de acolhimento do projeto de investigação. Inicialmente é realizada uma introdução ao seu ramo de atuação e principais produtos, seguindo-se de uma descrição breve do processo produtivo de *intercoolers*. Posteriormente, é efetuada uma apresentação detalhada da área de injeção da unidade fabril da empresa, que constitui o setor onde se foca o presente trabalho.

3.1. Introdução à empresa João de Deus & Filhos, S.A. (JDEUS)

A JDEUS é uma empresa do setor metalomecânico ligeiro que conta já com mais de 100 anos de existência. Pertence, desde 2001, ao grupo multinacional *DENSO* — líder de mercado na produção de componentes para a indústria automóvel. Possui a sua principal unidade fabril localizada em Samora Correia (Figura 3.1), dedicando-se ao desenvolvimento e produção de equipamentos térmicos de alta qualidade, sobretudo *intercoolers* e radiadores, para aplicação em veículos ligeiros e pesados, máquinas industriais e agrícolas e equipamentos fixos.



Figura 3.1 - Sede da JDEUS (Fonte: JDEUS, 2014)

Desde o seu ano de fundação (1914), a JDEUS tem vindo a crescer como fabricante de sistemas térmicos para automóveis. Atualmente, assume-se como um grupo constituído por duas empresas industriais e seis comerciais, estando distribuídas em oito localizações distintas e que se podem dividir em duas áreas principais: Produção e Rede Comercial, como representado na Figura 3.2. Na Figura 3.3 é possível observar a distribuição geográfica das empresas constituintes do grupo JDEUS: a sede, em Samora Correia; a Fábrica da JDEUS em Setúbal, que é especialista na produção e desenvolvimento de moldes, ferramentas e máquinas; e seis distribuidoras comerciais (quatro em Portugal e duas em Espanha), que se focam no negócio de *Aftermarket*.

A JDEUS representa o centro de desenvolvimento, industrialização e produção de *intercoolers* dentro do grupo de Sistemas Térmicos da *DENSO* na Europa. A fabricação de *intercoolers* é realizada consoante as especificações dos seus clientes, produzindo mais de 1,7 milhões de *intercoolers* por ano para os mais prestigiados fabricantes automóveis. No caso dos radiadores, estes são fabricados sobretudo para *Aftermarket*.

O presente projeto de investigação foi desenvolvido na fábrica principal, situada em Samora Correia. Atualmente, as instalações possuem uma área coberta de 19 751 m², equipamento e software de alta tecnologia e mais de 480 colaboradores.

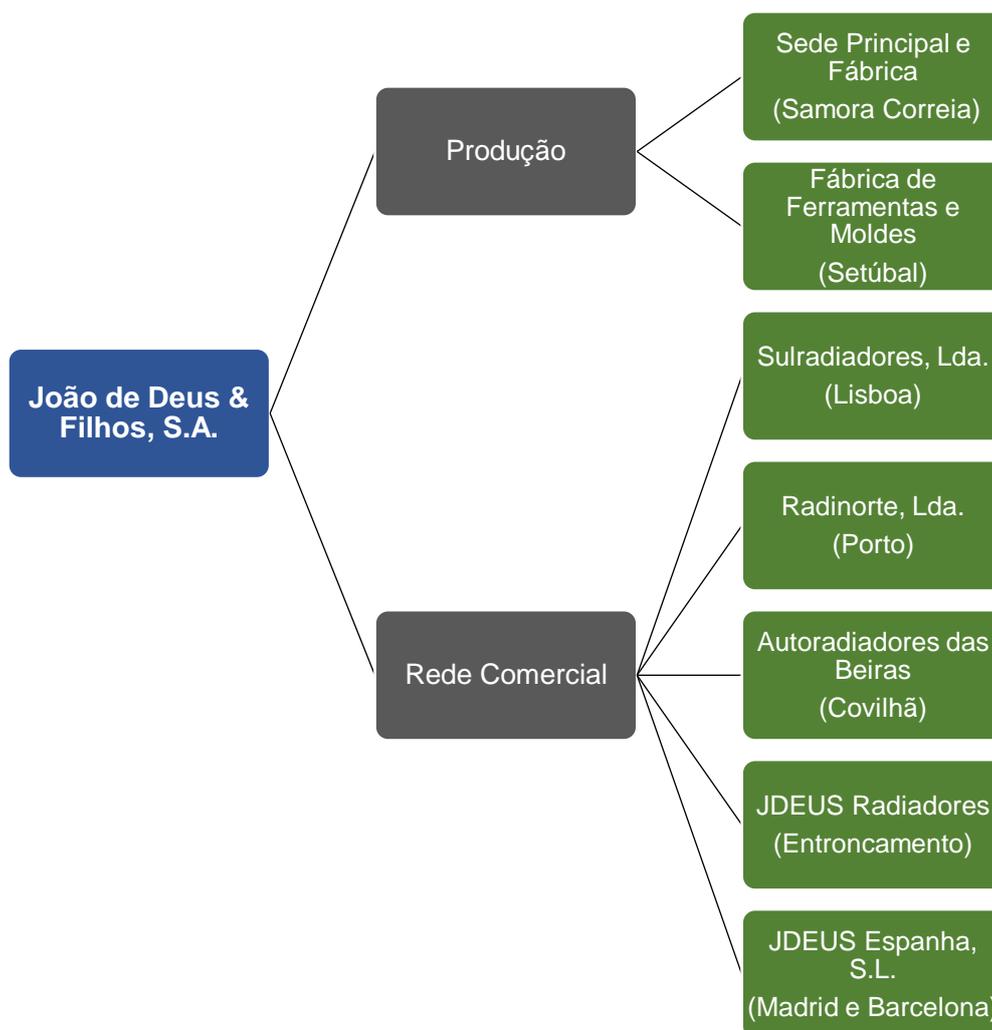


Figura 3.2 - Ramos de atividade do grupo JDEUS

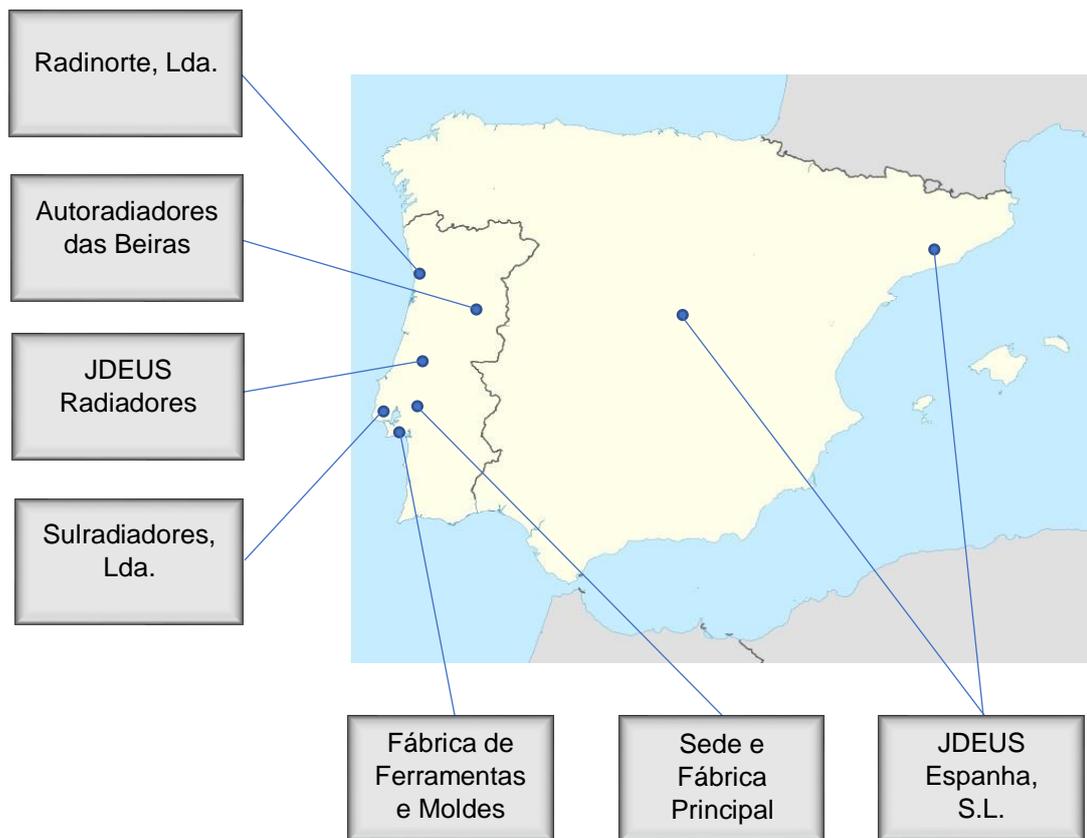


Figura 3.3 - Distribuição Geográfica do grupo JDEUS

3.2. Estrutura Organizacional

A estrutura organizacional da empresa está representada na Figura 3.4. A presente investigação decorreu no departamento de Qualidade do Produto, que, entre outras funções, tem a responsabilidade por assegurar a conformidade dos produtos finais.

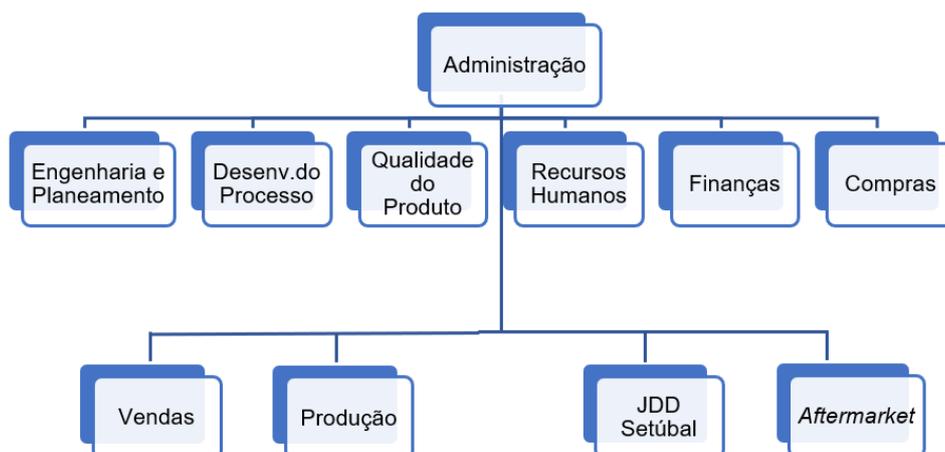


Figura 3.4 - Organigrama da empresa JDEUS

3.3. Certificações

A empresa possui o seu Sistema de Gestão de Qualidade, encontrando-se atualmente certificada pelas normas ISO 9001:2000 e ISO/TS 16949:2002, e alguns certificados complementares, como os de Reconhecimento de Qualidade da Toyota, Honda, Volkswagen e Mitsubishi. Estas certificações são apenas atribuídas a empresas que cumprem requisitos especiais de Qualidade nos seus produtos, processos de produção e serviços.

Para além do reconhecimento que detém no âmbito da Qualidade, a JDEUS possui também certificações relativas ao Sistema de Gestão Ambiental e ao Sistema de Gestão de Segurança e Saúde no Trabalho, através das normas ISO 14001:2004 e OHSAS 18001:2007, respetivamente.

3.4. Produtos

Além de *intercoolers* (Figura 3.5), a empresa fabrica outros equipamentos térmicos (Figura 3.6) como radiadores e, em menor número, condensadores, evaporadores e aquecedores (*heaters*).



Figura 3.5 - Exemplo de *Intercooler* (Fonte: JDEUS, 2014a)



Figura 3.6 - Outros Produtos (Fonte: JDEUS, 2014a)

A presente dissertação incidirá sob a produção do principal produto da JDEUS: o *intercooler*.

Alguns dos prestigiantes fabricantes automóveis para os quais a JDEUS produz *intercoolers* estão identificados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Principais Clientes da JDEUS

Clientes da JDEUS	
Alfa Romeo	Maserati
Audi	Mitsubishi
Bentley	Opel
Citroën	Peugeot
Chrysler	Porsche
Fiat	Renault
Ford	Seat
Honda	Suzuki
Lamborghini	Toyota
Lancia	Volkswagen

3.5. O Conceito de Intercooler

A potência máxima de um motor está fortemente relacionada com a quantidade de combustível que se pode queimar eficientemente no interior dos cilindros. Aumentando a quantidade de ar que entra nos cilindros do motor, aumenta-se também a quantidade de combustível que se pode queimar e, conseqüentemente, o motor torna-se mais potente.

Normalmente, existem duas alternativas para elevar a potência de um motor. A primeira consiste em aumentar a cilindrada, possibilitando a entrada de mais ar no motor. No entanto, motores com maior cilindrada são mais pesados e contêm dimensões elevadas. O ideal seria ter um motor leve e pequeno, que pudesse ter a mesma potência que um motor de elevada cilindrada. A segunda alternativa procura então responder a essa necessidade, que consiste na utilização de *intercoolers*.

O *intercooler* é um permutador de calor que tem como principal finalidade arrefecer o ar, aumentando a densidade do mesmo, imediatamente antes da sua entrada nos cilindros do motor. Ar mais denso ocupa menos espaço, o que significa que, para um dado volume, é possível ter uma maior massa de ar no motor.

O ar que sai do turbocompressor de um veículo vem com uma temperatura elevada e uma densidade reduzida, devido ao processo de compressão que sofreu. Através do posicionamento de um *intercooler* entre o turbocompressor e o motor do veículo (Figura 3.7), o ar proveniente do turbocompressor é arrefecido, tornando-se mais denso e, assim, ocupando menos espaço aquando da sua admissão no motor. Desta forma, é possível ter uma maior massa de ar nos cilindros do motor para o processo de combustão, o que significa ter mais moléculas de oxigénio por unidade de volume. Tal resulta numa maior quantidade de combustível a arder, tornando o motor do automóvel mais potente.



Figura 3.7 - Relação entre Turbocompressor-Intercooler-Motor (Fonte: Autotech, 2016)

3.5.1. Processo Produtivo de *Intercoolers*

O processo de produção de um *intercooler* pode-se repartir em cinco principais etapas, ilustradas na Figura 3.8. O presente projeto de investigação insere-se na primeira etapa: “Produção de Componentes”, nomeadamente, no setor de injeção para a produção de caixas.



Figura 3.8 - Etapas de Produção de um *Intercooler*

A JDEUS produz todos os componentes necessários ao fabrico do *intercooler* (representado na Figura 3.9). Cada *intercooler* tem na sua constituição duas “Chapas-Testa”, dois “Lados” e duas “Caixas”. O número de “Tubos com Alhete Interno” e de “Alhetes Externos” varia consoante as dimensões do *intercooler* que se pretende fabricar. O conjunto constituído por Chapas-Testa, Tubos, Alhetes e Lados designa-se por “Ninho”.

Os componentes que formam o ninho são compostos por alumínio, enquanto que as caixas têm na sua constituição materiais poliméricos, nomeadamente termoplásticos.

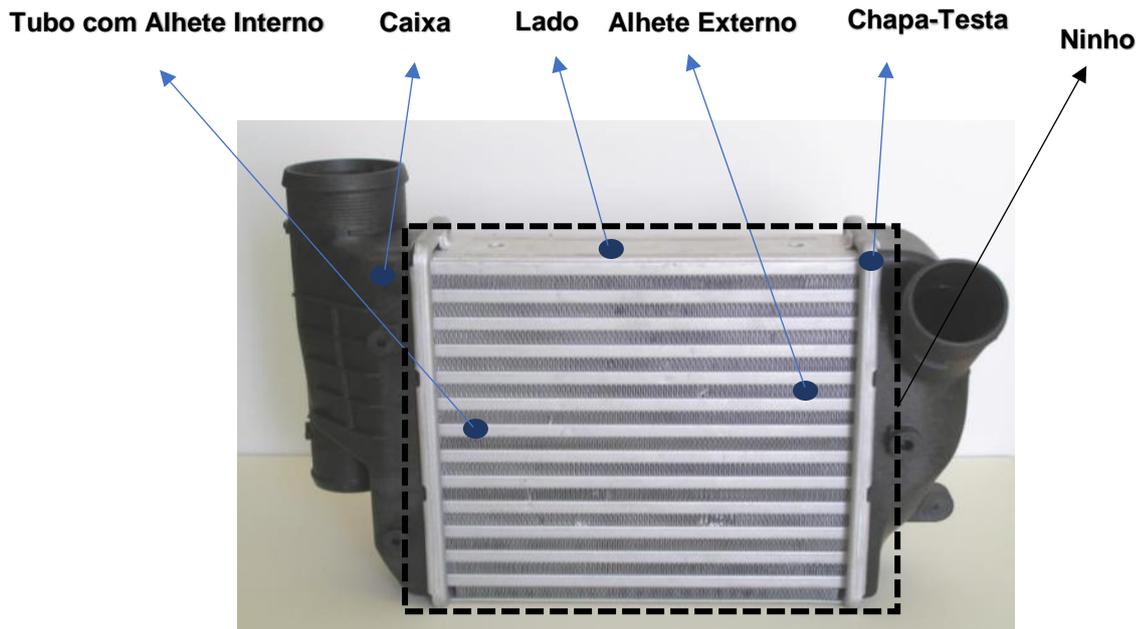


Figura 3.9 - *Intercooler* e seus Componentes

Após a produção de cada componente, procede-se à montagem do Ninho através de máquinas próprias desenvolvidas para a sua montagem. Posteriormente, o Ninho passa pelo processo de Brasagem, durante o qual é inicialmente aplicado um desengordurador para retirar o óleo usado no fabrico dos componentes, e de seguida aplicado um fluxo para facilitar a brasagem do Ninho. No fim do processo, os componentes estão completamente unidos, sendo arrefecidos até à temperatura ambiente. Finalizada esta etapa, dá-se o início do processo de Cravação das Caixas de plástico, através de prensas de Cravação. Entre o Ninho e cada uma das duas Caixas existe uma junta de vedação, que possibilita o acoplamento mecânico entre os componentes, permitindo a sua fixação e assegurando a estanquicidade do sistema. Obtido o produto final, realizam-se testes de validação, destacando-se os Testes de Estanquicidade que permitem avaliar possíveis fugas no interior do *intercooler*.

3.6. Caracterização da Área de Injeção - Processo Produtivo de Caixas

Cada unidade de *intercooler* possui na sua estrutura duas caixas: uma para entrada (Figura 3.10) e outra para saída de ar, sendo designadas por “caixa de entrada” e “caixa de saída”, respetivamente. Estas caixas são constituídas por material plástico e produzidas através do processo de Moldação por Injeção. O sistema de produção das caixas pode ser sintetizado em três etapas:

1. Preparação da Matéria-Prima;
 - Secagem dos grânulos de plástico.

2. Moldação por Injeção;
 - Transformação da matéria-prima no produto final: Caixa.

3. Inspeção e Armazenagem.
 - Verificação da conformidade do produto acabado;
 - Armazenamento das peças finais em caixotes próprios.



Figura 3.10 - Caixa de Entrada de Ar

3.6.1. Preparação da Matéria-Prima

Os termoplásticos, mais concretamente poliamidas ou *nylon*, têm sido cada vez mais utilizados na indústria automóvel, devido, sobretudo, à resistência a altas temperaturas, ao baixo custo de processamento e à versatilidade que apresentam. Com o intuito de melhorar o comportamento mecânico e químico dos termoplásticos, começaram a adicionar-se materiais de reforço, principalmente fibras de vidro, o que conduziu à substituição dos metais por termoplásticos reforçados em muitas indústrias. No entanto, apesar das vantagens que apresentam em termos de rigidez, resistência e durabilidade, as poliamidas têm uma forte propensão para absorver água, podendo resultar em elevadas taxas de teor de humidade, com efeitos negativos nas propriedades mecânicas do material e no processamento do mesmo. Deste modo, torna-se crucial a secagem dos grânulos deste material previamente ao início do seu processamento (Rosato e Rosato, 2000).

A viscosidade do plástico fundido durante o processo de injeção constitui um fator importante, pois determina os valores de alguns parâmetros importantes, como a pressão de injeção ou o tempo de injeção. Deve-se, por isso, ter em conta as reações químicas que poderão ocorrer, resultantes do excesso de humidade na matéria-prima. Quanto mais elevado for o teor de humidade, menor será a viscosidade do material fundido, causando uma perda de peso molecular e de tenacidade (Bryce, 1998).

O termoplástico usado no fabrico das caixas em estudo é formado por uma liga, reforçada em 30% de fibra de vidro, que constitui duas poliamidas (PA): PA 6 e PA 6,6. O material chega à fábrica dentro de *big bags* (Figura 3.12) e em forma de granulado.

Com o objetivo de garantir que a matéria-prima utilizada se encontra com as propriedades adequadas, o granulado passa por uma estufa (Figura 3.11) antes da entrada na respetiva máquina de injeção. O material sai diretamente do *big bag* para a estufa, onde é aquecido de modo a retirar o possível excesso de humidade presente no granulado.



Figura 3.12 - *Big Bag* de Matéria Prima



Figura 3.11 - Estufa

A estufa é constituída por um desumidificador, onde é feita a secagem do material, e um filtro de sílica de modo a ajudar a aspirar a humidade. Após a secagem, o material é conduzido através de tubagens (Figura 3.13) até às máquinas de injeção, onde é feita a alimentação de matéria-prima, dando-se início ao processo de moldação por injeção.



Figura 3.13 - Tubagens de Alimentação da Matéria Prima

3.6.2. Moldação por Injeção

Essencialmente, moldação por injeção consiste num processo no qual material plástico (sob a forma de granulado) é fundido e injetado, sob pressão, para as cavidades que incorporam um certo molde, no interior das quais solidifica e toma a forma desejada (Rosato e Rosato, 2000).

No seguimento da secagem do granulado na estufa, este é admitido na máquina de injeção (Figura 3.15), através de um funil/tremonha de alimentação. O material é aquecido, fundido e de seguida forçado, através de uma rosca, a entrar para o interior de um molde (Figura 3.14). Estando o material incorporado nas cavidades do molde, inicia-se um processo de refrigeração, no qual o material endurece e solidifica, recuperando a sua rigidez e tomando a sua forma final. Posteriormente, é aberto o molde e extraído o produto final para um tapete transportador, que faz a ligação entre a máquina de injeção e a zona de inspeção e armazenagem. No momento em que a peça final é extraída do molde, que coincide com a abertura do molde, tem início um novo ciclo de produção.



Figura 3.15 - Máquina de Injeção



Figura 3.14 - Molde

O ciclo que ocorre entre a produção de duas peças consecutivas pode ser dividido nas seguintes fases:

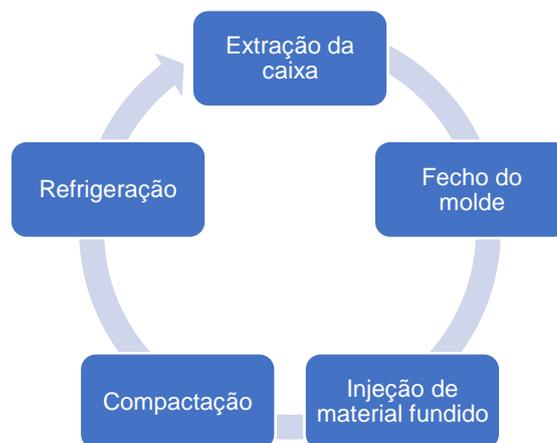


Figura 3.16 – Ciclo de Injeção

O ciclo tem início com a abertura do molde, onde se dá a extração/ejeção da peça final, que, como já referido, sai diretamente para um tapete transportador (Figura 3.17). Segue-se o fecho do molde e a injeção do material termoplástico fundido (que inicialmente se encontra sob a forma de grânulos) de modo a preencher a(s) cavidade(s) do molde. Ao entrar em contacto com o molde, o material sofre uma contração, devido ao arrefecimento, dado que o molde se encontra a uma temperatura muito inferior decorrente dos fluxos de água de baixa temperatura que o atravessam. Assim, na fase de compactação, procura-se compensar a contração do material, mantendo o material compactado no interior do molde através de uma “pressão de recalque”. Esta fase de transição, de pressão de injeção para pressão de recalque, é muito importante para assegurar a conformidade do produto final. A próxima etapa consiste na refrigeração, na qual durante um determinado período de tempo (designado por tempo de arrefecimento) o material solidifica, atingindo a estabilidade dimensional pretendida. Finalmente, efetua-se a abertura do molde, do qual se retira a peça final (caixa) com a forma especificada, iniciando-se um novo ciclo.



Figura 3.17 – Tapete Transportador

Em suma, o processo caracteriza-se por ser simples, rápido e preciso. Atualmente, estima-se que 35% do total de unidades compostas por plástico sejam produzidas por processos de moldação por injeção (Bryce, 1998).

Para além da matéria-prima, os dois principais fatores que influenciam o processo são a máquina de injeção e o molde, que representam os dois equipamentos que intervêm diretamente no fabrico das caixas. Por conseguinte, torna-se importante obter um conhecimento mais aprofundado sobre os mesmos, particularmente naquilo que se refere às suas funcionalidades e parametrizações.

a) Máquina de Injeção

Uma máquina de injeção, ou máquina injetora, é constituída por duas principais unidades funcionais:

Unidade de Injeção: Unidade responsável pela alimentação do material desde a entrada (no funil) até ao cilindro de plastificação, o qual contém uma rosca cujo movimento, aliado às resistências de aquecimento presentes no exterior, permite a fusão do material. Esta unidade encarrega-se ainda da homogeneização e transporte do material até ao bico de injeção (a partir do qual se faz a interface entre a unidade de injeção e o molde), bem como a subsequente injeção.

Unidade de Fixação: Unidade responsável pela fixação e movimentação do molde, mantendo o molde fechado durante as fases de injeção, compactação e refrigeração. É constituída por uma placa fixa, uma placa móvel e um pistão hidráulico para abertura e fecho da placa móvel.

Na Figura 3.18 é representada uma máquina de injeção, com as respetivas unidades funcionais e dispositivos necessários ao seu funcionamento.

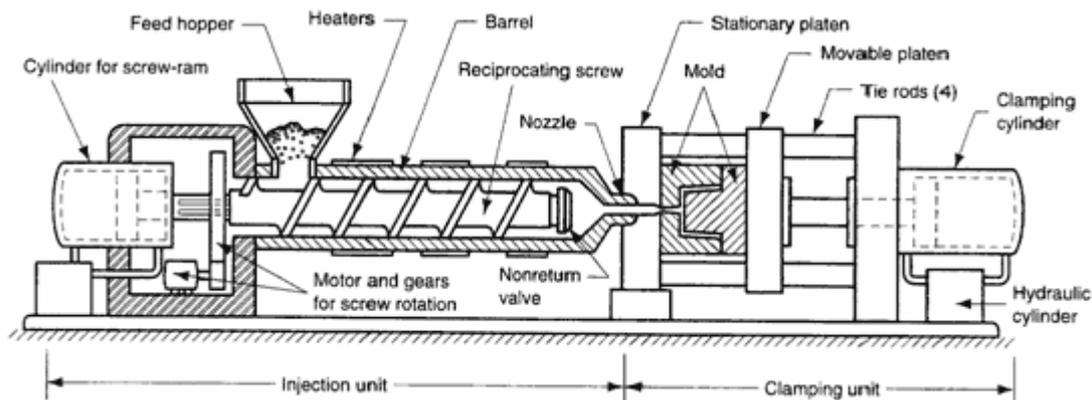


Figura 3.18 – Máquina de Injeção e Unidades Funcionais (Fonte: Design for Manufacture, 2012)

De modo a garantir o seu bom funcionamento, existem ainda outras duas unidades acopladas à máquina e não menos importantes: Unidade de Potência e Unidade de Controlo. A Unidade de Potência fornece, através de um motor elétrico, a energia necessária a todos os atuadores da máquina, enquanto que a Unidade de Controlo permite ao operador realizar a monitorização e controlo dos diversos parâmetros do processo.

b) Molde

“O produto plástico inicia a sua vida no molde” (Bryce, 1998). O molde é a ferramenta que confere a forma final da peça, sendo desenvolvido tendo em conta algumas restrições, tais como o número de peças que se pretende fabricar e a capacidade da máquina de injeção (isto é, o peso máximo de material plástico fundido que pode ser injetado) (Harada, 2004).

A fábrica da JDEUS localizada em Setúbal desenvolve e fabrica os moldes que são utilizados nos processos de moldação por injeção na fábrica principal.

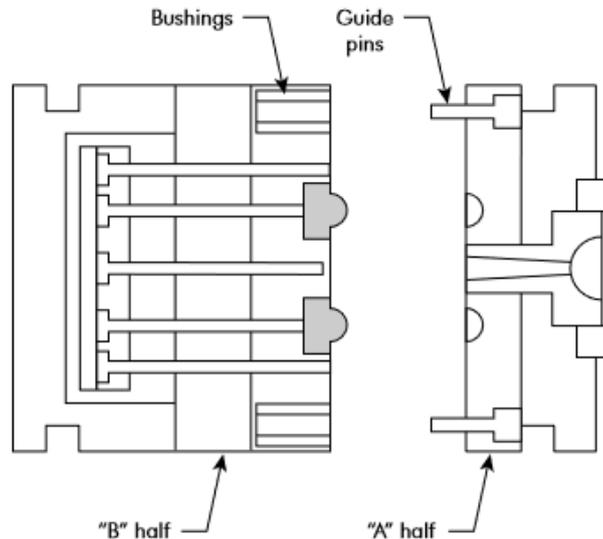


Figura 3.19 – Partes constituintes de um Molde (extraído de Bryce, 1998)

Na Figura 3.19, está representado um molde aberto com as duas partes constituintes, designadas, neste caso, por parte A e parte B, e as peças finais prontas para serem extraídas (a cinzento). As partes A e B são mantidas fechadas durante as fases de injeção, compactação e refrigeração, abrindo posteriormente no momento da extração da peça final. O fecho do molde é realizado através de um sistema hidráulico, que movimenta a placa B (móvel) na direção da placa A (fixa). Note-se que, ao contrário do que está representado na figura 3.18, onde a injeção é feita da esquerda para a direita, na figura 3.19 o molde está representado no sentido contrário, sendo o material plástico injetado na parte A (da direita para a esquerda).

Para além de definir a geometria do produto final, o molde é também responsável pelo arrefecimento e extração do mesmo, sendo composto pelos seguintes conjuntos/sistemas:

1. **Canais de Alimentação:** Permitem a distribuição do polímero fundido no interior das cavidades. O material entra pelo “gito” e é distribuído pelas matrizes do molde.
2. **Sistema de Escape de Gases:** Permite a saída do ar existente nas cavidades, imediatamente antes do início do enchimento, de modo a que o material possa preencher na totalidade as cavidades do molde.
3. **Sistema de Arrefecimento:** Através da passagem de correntes de água geladas junto à superfície do molde, o material fundido incorporado nas cavidades é arrefecido até solidificar por completo.

4. **Sistema de Extração:** Após atingido o estado de rigidez pretendido, o sistema de extração é acionado: o molde é aberto e ejetada a peça final.

3.6.2.1. Parâmetros de Relevância no Processo

Existe um conjunto extenso de variáveis que se deve ter em consideração para o adequado funcionamento do processo de moldação por injeção. Na presente dissertação, porém, serão abordadas somente as mais relevantes para o estudo.

Durante a fase de fecho do molde, a “pressão de fecho” necessita de ser suficiente para manter as duas partes do molde encostadas na perfeição. No caso de não se encontrarem completamente encostadas, o material entrará na abertura entre as partes e formará uma rebarba, ou saliência, na peça final.

Na fase de injeção do material fundido, o valor da “pressão de injeção” depende das características do plástico, do tipo de máquina de injeção, da temperatura de fundição e das dimensões dos canais de alimentação do molde. É um parâmetro de extrema importância, intervindo diretamente nas características finais da caixa. Um valor de pressão de injeção demasiado elevado poderá resultar num aperto excessivo do material no interior das cavidades, dificultando a extração e originando rebarbas. Por outro lado, uma pressão de injeção reduzida poderá ocasionar o não preenchimento a 100% do volume das cavidades, originando uma instabilidade dimensional e a não conformidade da peça. Para obter bons resultados, a pressão de injeção necessita de ser conjugada com o “tempo de injeção”.

Na etapa de Compactação, destacam-se os parâmetros “pressão de recalque” e “tempo de recalque”. Como referido anteriormente, a pressão de recalque visa compactar o material no interior da cavidade, compensando a contração do mesmo devido ao seu arrefecimento, evitando assim defeitos visuais e dimensionais na caixa final. O tempo de recalque refere-se ao período programado para a realização da pressão de recalque, devendo ser estabelecido conforme as características do produto.

Durante a fase de Refrigeração, os parâmetros “tempo de arrefecimento” e “temperatura do molde” são de elevada importância para a estabilidade geométrica da peça. Com o intuito de tornar os processos mais eficientes, e apesar de existir algum risco associado, é comum procurar reduzir o tempo de ciclo, através, principalmente, da redução do tempo de arrefecimento. Para tal, pode-se optar por baixar a temperatura das correntes de água que percorrem o interior do molde, reduzindo assim a temperatura do molde e não sendo necessário (teoricamente) tanto tempo de arrefecimento.

Em síntese, os parâmetros do processo considerados essenciais no âmbito da presente dissertação estão representados na Figura 3.20.

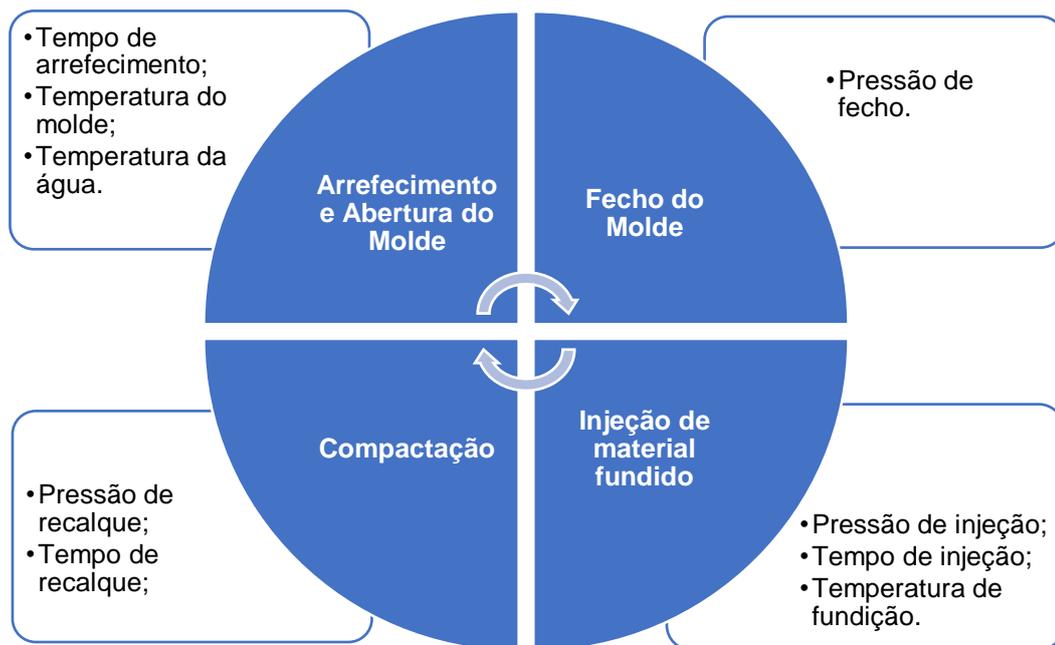


Figura 3.20 – Parâmetros Principais por Etapa do Ciclo de Injeção

3.6.3. Inspeção e Armazenagem

Após a obtenção da caixa final, esta é transportada através de um tapete rolante até à zona de Inspeção e Armazenagem. Nesta etapa, são efetuadas inspeções visuais para determinar a qualidade das peças, e armazenadas, em caixotes próprios, as que se encontrem em conformidade com os requisitos. Os quatro principais defeitos visuais passíveis de surgimento nas caixas são:

Rebarbas: A avaliação visual permite detetar pequenas saliências de plástico na caixa, i.e., rebarbas. Na maior parte dos casos, as rebarbas são finas e podem ser retiradas pelo operador. No caso de não ser possível a correção por parte do operador, o produto é colocado numa zona referenciada para peças não conformes.

Marcas de queimadura: Estas marcas podem ocorrer nas peças sob a forma de plástico carbonizado ou escuro causado por gás preso, e são normalmente acompanhadas por um cheiro a queimado característico. Reduzir a força de fechamento para melhorar a ventilação constitui uma das possíveis soluções para colmatar o aparecimento destas marcas.

Peças incompletas: Devido ao preenchimento incompleto das cavidades do molde, podem ser fabricadas caixas subdimensionadas, sendo estas posteriormente detetadas nesta fase e classificadas como produto não conforme.

Descoloração: Uma das maneiras de detetar uma contaminação superficial é através da perceção da descoloração da peça, face à sua tonalidade real, e da não uniformidade da cor ao

longo da peça. Estas peças, naturalmente, não devem ser reaproveitadas. Uma possível causa pode ser a contaminação do funil na zona de alimentação da máquina.

Os defeitos podem ser corrigidos, alterando a parametrização do processo, e prevenidos, realizando manutenções ao molde e à máquina de injeção numa periodicidade adequada. Em alguns casos de produto não conforme é efetuada uma análise microscópica, nos laboratórios da qualidade da empresa, de modo a inspecionar detalhes não visíveis (e.g., vazios, cristalinidade e contaminação).

4. Componente Experimental

No presente capítulo, apresenta-se a aplicação e desenvolvimento dos conceitos necessários à melhoria das operações de injeção da unidade fabril da JDEUS, assim como a discussão dos resultados obtidos. Para tal, é inicialmente introduzida a metodologia que foi proposta e implementada no setor de injeção.

4.1. Caso de Estudo - Metodologia

A metodologia utilizada pode ser decomposta em duas partes principais: Análise do Teor de Humidade da Matéria Prima e Estudo do Processo de Moldação por Injeção. Inicialmente, procede-se à análise de uma das principais fontes de variação do processo de Moldação por Injeção: a matéria prima. A elaboração de um Diagrama de Pareto permite relacionar a percentagem de referências de matéria prima com a percentagem de consumo médio diário, e, deste modo, priorizar as referências de matéria-prima tendo em conta os valores de consumo. Com foco na referência de matéria-prima com o consumo mais elevado, realizam-se duas análises distintas ao teor de humidade presente nesse material — Análises Pré-Secagem e Pós-Secagem. Na primeira análise, recorre-se a uma tabela ANOVA - *One Way* para averiguar possíveis diferenças significativas entre o teor de humidade presente em cinco *big bags* que contêm o material plástico, antes do início da secagem na estufa. Na segunda análise, efetua-se um controlo estatístico do processo de Secagem, analisando o teor de humidade presente no material à saída da estufa, através de cartas de controlo Q(X) e Q(MR) devido ao número restrito de dados passíveis de recolha. Na Figura 4.1, está representado o fluxograma que ilustra a sequência processual para a Análise do Teor de Humidade da Matéria Prima.

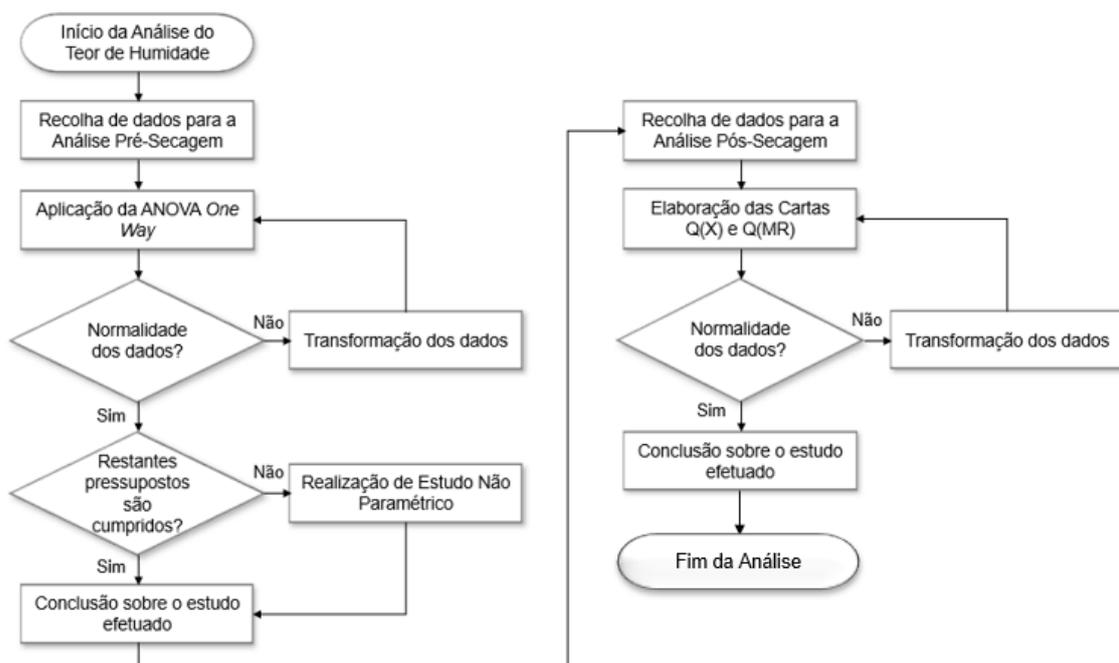


Figura 4.1 – Metodologia para a Análise do Teor de Humidade

No seguimento da análise da matéria-prima, dá-se início ao controlo estatístico do processo de Moldação por Injeção. Seleccionam-se as referências de caixas para controlo e definem-se algumas características consideradas relevantes. Após a definição de um plano para a recolha de amostras e identificados os sistemas de medição, inicia-se o controlo estatístico do processo através da elaboração de cartas de controlo segundo duas abordagens distintas — Estudo Univariado (controlo isolado de cada característica) e Estudo Multivariado (controlo simultâneo de todas as características). Na abordagem univariada, utilizam-se cartas da média e desvio padrão para a Fase I, e cartas $Z_{\bar{X}}$ e W_S para a Fase II, enquanto que na abordagem multivariada utilizam-se cartas T^2 para o controlo da média na Fase I e na Fase II. Relativamente à estrutura do Estudo do Processo de Moldação por Injeção, rege-se pelos conceitos e procedimentos aprofundados nas secções 2.3-2.5, acerca da aplicação do SPC Univariado, SPC de “Pequenas Produções” e MSPC.

4.2. Análise do Teor de Humidade na Matéria Prima

O teor de humidade presente na matéria-prima constitui um fator de variação importante, sendo crucial para a estabilidade das propriedades mecânicas do material. Representa um indicador da quantidade de água presente no material, expresso em percentagem. Pode ser definido como a relação entre a massa de água contida no material e a massa do material no estado seco, traduzindo-se na Equação 4.1.

$$\text{Teor de Humidade (\%)} = \frac{m_a - m_s}{m_s} \times 100 \quad (4.1)$$

Em que: m_a - Massa da amostra húmida (em gramas)

m_s - Massa da amostra seca (em gramas)

Como anteriormente mencionado, a medição do teor de humidade no material será realizada segundo dois contextos distintos: Antes da entrada na estufa (Pré-Secagem) e à saída da estufa (Pós-Secagem). A Análise Pré-Secagem efetuar-se-á recolhendo amostras de material de cinco diferentes *big bags* que se preparam para ser utilizados de modo a analisar possíveis diferenças entre o teor de humidade presente em cada *big bag*. A Análise Pós-Secagem realizou-se recolhendo amostras de material à saída da estufa para medição do teor de humidade, com o intuito de monitorizar o processo de secagem através da aplicação de cartas de controlo estatístico.

A Tabela 4.1 sintetiza as duas abordagens descritas anteriormente.

Tabela 4.1 – Fases da Análise do Teor de Humidade

Análise do Teor de Humidade (%)	
Pré-Secagem Análise de possíveis diferenças entre o teor de humidade presente em cada <i>big bag</i> (ANOVA <i>One-Way</i>)	Pós-Secagem Acompanhamento do processo de secagem - Controlo Estatístico do Processo (Cartas de Controlo)

4.2.1. Equipamento de Medição e Método de Amostragem

Para a correta medição do teor de humidade foi utilizada a Balança Analisadora de Humidade (Figura 4.2), que a empresa possui no Laboratório da Qualidade. Este equipamento permite estimar o teor de humidade, em percentagem, presente no granulado do material plástico. O granulado é aquecido no seu interior, e no momento em que se encontrar no estado completamente seco é determinado, automaticamente, o valor percentual de teor de humidade, através da diferença de massas resultante, segundo a Equação 4.1.



Figura 4.2 - Balança Analisadora de Humidade

A recolha de material, tanto na “Análise Pré-Secagem” como na “Análise Pós-Secagem”, foi realizada numa periodicidade de 1 hora. Para a sua recolha, foi utilizado um pequeno saco com fecho (Figura 4.4), para que o material não absorvesse humidade durante o transporte desde a zona de injeção até ao Laboratório da Qualidade, onde se realiza a medição.

Para a colocação do material no equipamento de medição, utilizou-se como auxílio uma espátula para o correto preenchimento do material na base de alumínio (Figura 4.3). Na Figura 4.5, é

possível observar o equipamento de medição em funcionamento, nomeadamente na fase de aquecimento/secagem do granulado.



Figura 4.4 – Saco para Recolha de Material



Figura 4.3 – Base de Alumínio e Espátula



Figura 4.5 – Equipamento em funcionamento

Após o término das análises, o material foi reaproveitado, sendo colocado no *big bag* que, no momento, esteja a ser utilizado para a produção.

4.2.2. Diagrama de Pareto

Na área de injeção da JDEUS existem sete referências distintas de materiais plásticos utilizadas para o processo de injeção. Observando a Tabela 4.2 e o Diagrama de Pareto, na Figura 4.6, constata-se que 77% da quantidade média total de material consumida diariamente corresponde a 29% da totalidade de referências de materiais plásticos utilizadas para a produção de caixas.

Tabela 4.2 – Tabela de Auxílio ao Diagrama de Pareto

Ref.	Material	Qtd. média/dia (ton.)	Acum. Qtd.	Acum. Nº Material
A	AK PA6+PA6,6 30% FV	1,5	50,0%	14,3%
B	AK PA6 + PA6,6 50% FV	0,8	76,7%	28,6%
C	ZY PA6 + PA6,6 30% FV	0,3	86,7%	42,9%
D	ST PA4,6 30% FV	0,1	90,0%	57,1%
E	ST PA4,6 40% FV	0,1	93,3%	71,4%
F	GR PA6 + PA6,6 30% FV	0,1	96,7%	85,7%
G	ST PA4,6 50% FV	0,1	100,0%	100,0%
Total	-	3		-

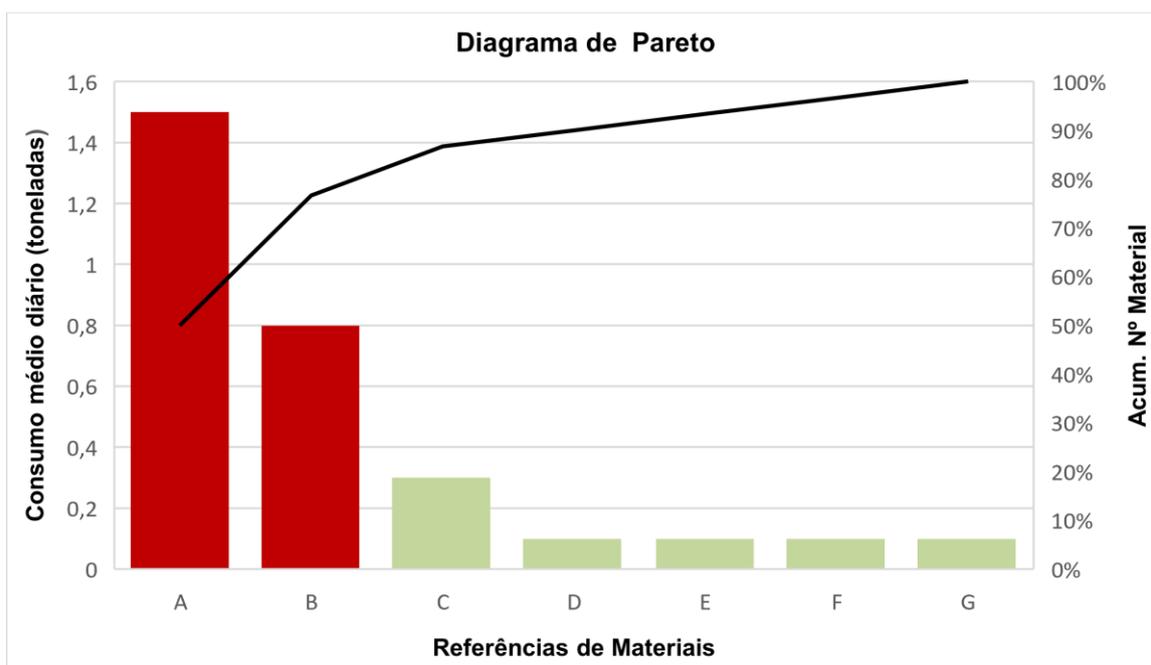


Figura 4.6 – Diagrama de Pareto

A vermelho, estão representados os consumos médios diários dos dois materiais que mais são utilizados (referências “A” e “B”). Juntos representam quase 80% da matéria-prima consumida diariamente, devendo, por isso, serem reconhecidos como importantes e prioritários. A verde, representam-se os consumos médios diários dos restantes materiais, que representam aproximadamente 20% da matéria-prima consumida por dia.

Dos sete diferentes tipos de materiais plásticos usados como matéria-prima para a produção de caixas, será estudado o material de referência “A” — AK PA6 + PA6,6 30% FV. Este material é composto por dois tipos de polímero: poliamida 6 (PA6) e poliamida 6,6 (PA6,6), reforçadas com 30% de fibra de vidro. Ambas as poliamidas apresentam elevada resistência ao impacto e boa resistência mecânica. Em média, aproximadamente 50% quantidade total de matéria-prima utilizada diariamente provém deste material (cerca de 1500 Kg por dia, equivalente a 1,5 toneladas).

4.2.3. Análise Pré-Secagem

Com o objetivo de analisar possíveis diferenças no teor de humidade no material em estudo, foram analisados cinco *big bags*, no momento em que estavam a ser utilizados para produção de caixas. Foram recolhidas sete amostras de material dentro de cada *big bag* e efetuada a medição no Medidor/Balança de Teor de Humidade. Os resultados obtidos estão representados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Resultados da Medição Pré-Secagem

Nº obs.	Teor de Humidade (%)				
	<i>Big Bag 1</i>	<i>Big Bag 2</i>	<i>Big Bag 3</i>	<i>Big Bag 4</i>	<i>Big Bag 5</i>
1	0,0346	0,0599	0,0545	0,1235	0,0651
2	0,0501	0,0424	0,0554	0,1145	0,0602
3	0,0488	0,0338	0,0497	0,1123	0,0704
4	0,0406	0,0498	0,0621	0,1089	0,0554
5	0,0546	0,0611	0,0434	0,1163	0,0636
6	0,0519	0,0534	0,0427	0,1255	0,0689
7	0,0489	0,0502	0,0706	0,1122	0,0542

O estudo foi realizado recorrendo à Análise da Variância. De modo a averiguar se as médias de teor de humidade do material presente em cada *big bag* apresentavam diferenças significativas, foi construída uma tabela ANOVA (Tabela 4.4). As hipóteses do estudo, nula e alternativa, são expressas por:

$$H_0: \mu_{bigbag1} = \mu_{bigbag2} = \dots = \mu_{bigbag5}$$

$$H_1: \mu_{bigbagi} \neq \mu_{bigbagk}, \text{ para, pelo menos, um par } (i, k)$$

Tabela 4.4 – ANOVA: Análise Pré-Secagem

Fonte de Variação	SS	g.l.	MS	F ₀
Entre <i>big bags</i>	0,02298	4	0,00575	90,205
Erro	0,00191	30	0,00006	
Total	0,02489	34	-	

O valor crítico da distribuição de Fisher é dado por: $F_{5\%;4; 30g.l.} = 2,690$.

Analisando os resultados obtidos, observa-se que a estatística de teste ($F_0 = 90,205$) é bastante superior ao valor crítico da distribuição de Fisher. Isto é, $F_0 > F_{5\%;4; 30g.l.}$. Tal constatação, permite concluir que existe evidência estatística que permite rejeitar a hipótese nula. Ou seja, ao nível de significância de 5%, é possível afirmar que as médias de teor de humidade no material contido em cada um dos cinco *big bags* diferem significativamente. Torna-se então aceitável presumir que o teor de humidade da matéria-prima depende do *big bag* do qual provém.

4.2.3.1. Verificação dos Pressupostos da ANOVA

Os resultados obtidos apenas são validados caso os pressupostos da Normalidade dos resíduos, homogeneidade das variâncias e independência dos resíduos sejam cumpridos.

Recorrendo ao software *Statistica*, procedeu-se à construção de um histograma, na Figura 4.7, e à realização do teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S), de modo a analisar o pressuposto da Normalidade dos resíduos. O teste hipóteses considerado foi o seguinte:

H_0 : Os resíduos são provenientes de uma distribuição Normal.

H_1 : A distribuição dos resíduos não se assemelha a uma Normal.

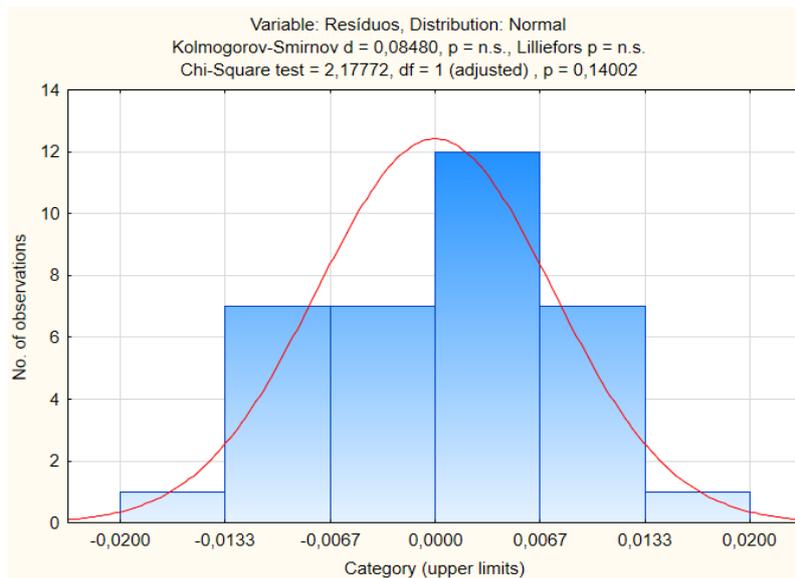


Figura 4.7 – Verificação da Normalidade dos Resíduos

O valor crítico é calculado de acordo com a Tabela A.2 do anexo A. Para um nível de significância $\alpha = 5\%$, o valor crítico é dado pela Equação 4.2:

$$D_{crit} = \frac{0,886}{\sqrt{N}} \quad (4.2)$$

, sendo N o número total de resíduos (N = 35).

Após o seu cálculo, obteve-se $D_{crit} = 0,1498$. Verifica-se então que, para um nível de significância de 5%, o valor da estatística de teste ($D = 0,08480$) é inferior ao valor crítico ($D < D_{crit}$). A hipótese de os resíduos seguirem uma distribuição Normal não é, por isso, rejeitada.

Garantido o pressuposto da Normalidade dos resíduos, deu-se seguimento à validação do pressuposto da homogeneidade das variâncias. Um método gráfico simples para verificar se a variância é constante consiste na elaboração de um gráfico (e.g. recorrendo ao *Excel*) dos resíduos em função dos valores previstos ou estimados.



Figura 4.8 – Verificação da Homogeneidade das Variâncias

Observando a Figura 4.8, não é notória a existência de qualquer estrutura especial (particularmente, em forma de funil), o que permite concluir que existem indícios do cumprimento do pressuposto da homogeneidade da variância. Para validar o pressuposto com uma maior objetividade, realizou-se uma análise analítica através da aplicação do Teste de *Bartlett*, que permite comparar as cinco variâncias e concluir sobre a sua homogeneidade. As hipóteses nula e alternativa do teste são as seguintes:

$$H_0: \sigma_{bigbag1}^2 = \sigma_{bigbag2}^2 = \dots = \sigma_{bigbag5}^2$$

$$H_1: \sigma_{bigbagi}^2 \neq \sigma_{bigbagk}^2, \text{ para, pelo menos, um par } (i, k)$$

Tabela 4.5 – Resultados obtidos no Teste de *Bartlett*

Estatística de Teste (χ_B^2)	P-value	Graus de Liberdade (g.l.)
2,503	0,644	4

Admitindo $\alpha = 5\%$, o valor crítico do teste de Bartlett é dado por: $B_{crit} = \chi_{0,05; 4 g.l.}^2 = 9,488$.

Como o valor da estatística de teste é inferior ao valor crítico ($\chi_B^2 < B_{crit}$), conclui-se que, para um nível de significância de 5%, não existe evidência estatística que permita rejeitar a hipótese nula. Ou seja, é aceitável presumir que as variâncias dos 5 *big bags* não diferem significativamente. Por conseguinte, o pressuposto da homogeneidade das variâncias é validado.

Por fim, resta avaliar a independência dos resíduos. Para tal, procedeu-se à construção de um gráfico no *Excel* dos resíduos em função da ordem aleatória de execução das experiências (Figura 4.9).

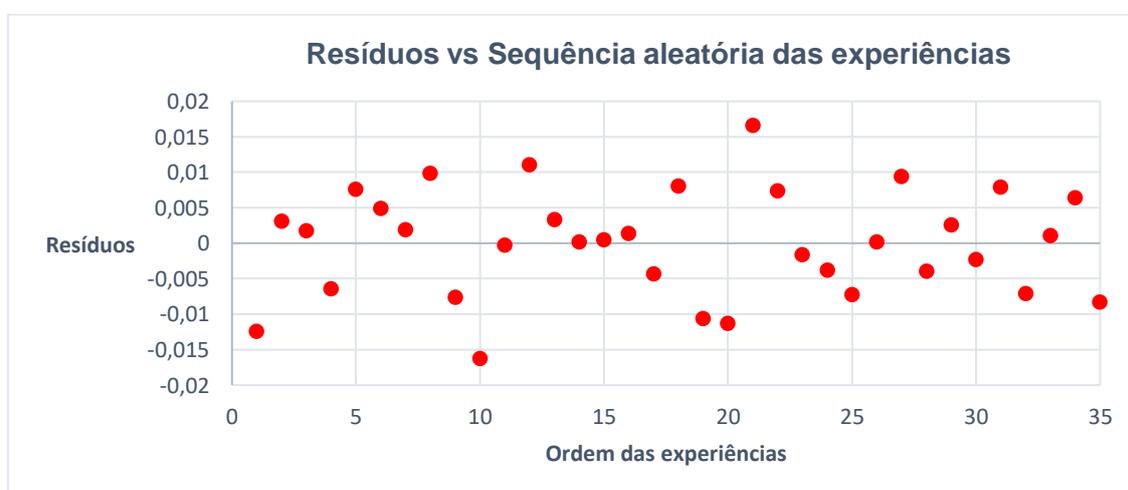


Figura 4.9 – Verificação da Independência dos Resíduos

Como se pode verificar na Figura 4.9, os resíduos dispõem-se no gráfico de forma completamente aleatória, sem demonstrarem qualquer tendência discrepante. Desta forma, assume-se que o pressuposto da independência dos resíduos não é violado.

Desta forma, os três pressupostos necessários à validação dos resultados obtidos pela *One-Way* ANOVA são cumpridos, pelo que as conclusões retiradas de tal análise podem ser consideradas para o desenvolvimento da presente dissertação.

4.2.4. Análise Pós-Secagem

Sabendo do impacto que o teor de humidade possui nas propriedades mecânicas do produto final, torna-se relevante acompanhar o processo de secagem da matéria-prima através da aplicação de cartas de controlo. Importa salientar que, previamente ao presente projeto de investigação, a JDEUS não realizava o controlo estatístico do processo de secagem nem a medição do teor de humidade da matéria-prima.

Na estufa, a secagem do material em estudo (AK PA6 + PA6,6 30% FV) é realizada a uma temperatura de 80°C, sendo o tempo recomendado de secagem entre 4 e 6 horas antes de ser conduzido, através de tubagens, até às respetivas máquinas de injeção. Atualmente, a JDEUS encontra-se em fase de estudo para a determinação de qual a especificação de teor de humidade a impor, no entanto todos os produtos são aprovados de acordo com a especificações do cliente, sendo recomendável um limite máximo de 0,15%.

Imediatamente antes da saída do material da estufa, foram recolhidas amostras de material seco, numa periodicidade de 1 hora. Após cada recolha, procedeu-se à medição do teor de humidade contido na amostra, no Laboratório da Qualidade da empresa. Em cada instante, foram registados os valores individuais e construídas as cartas de controlo adequadas.

Os dados recolhidos estão registados na Tabela D.1 do Anexo D. Devido ao número reduzido de dados que foi possível recolher (24 observações), foram elaboradas cartas de controlo Q para observações individuais e amplitudes móveis — Cartas Q(X) e Q(MR) — para o estudo característica “teor de humidade”, adotando-se a metodologia desenvolvida por Charles Quesenberry. Deste modo, foi possível monitorizar o processo de secagem em tempo real, analisando, em cada instante, a estabilidade e a capacidade do processo em se enquadrar dentro da especificação recomendada.

As cartas de controlo foram construídas recorrendo ao *Excel* e encontram-se nas Figuras 4.10-4.11.

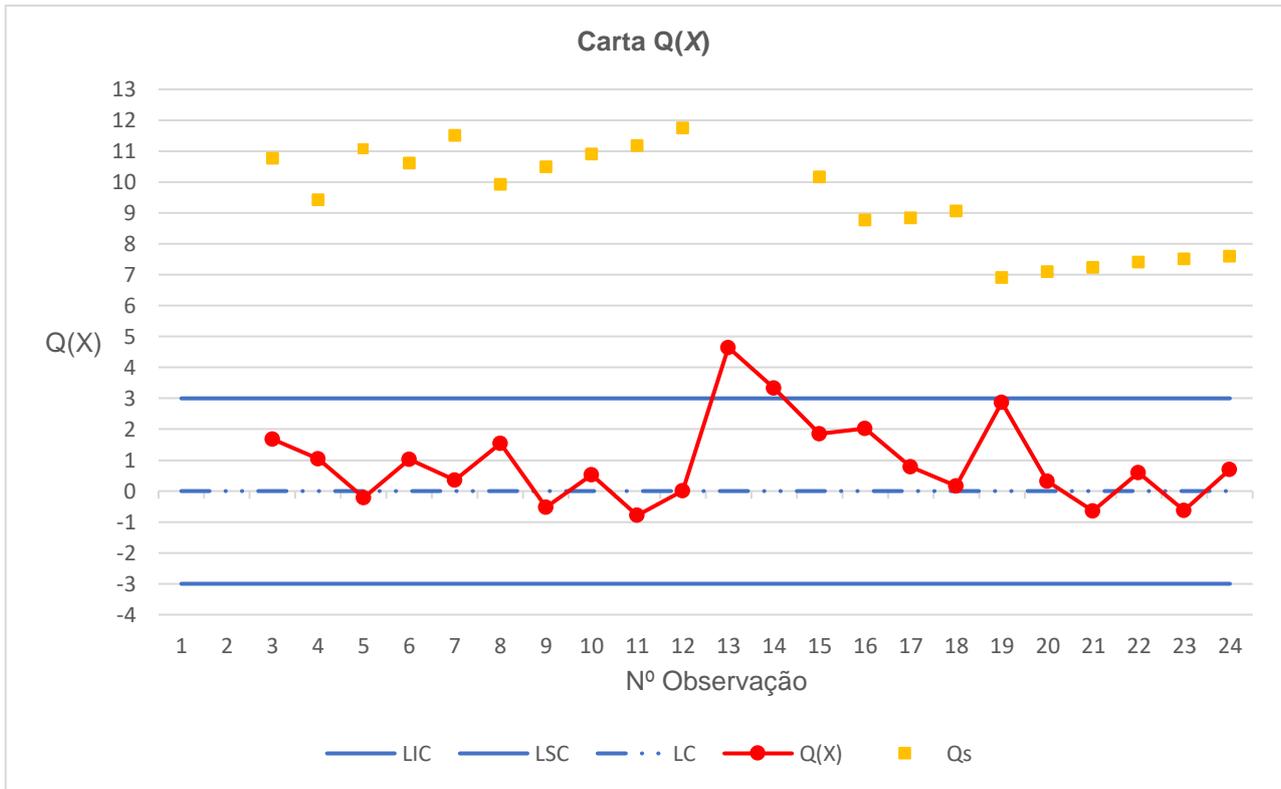


Figura 4.10 – Carta de Controlo Q(X) para Análise Pós-Secagem

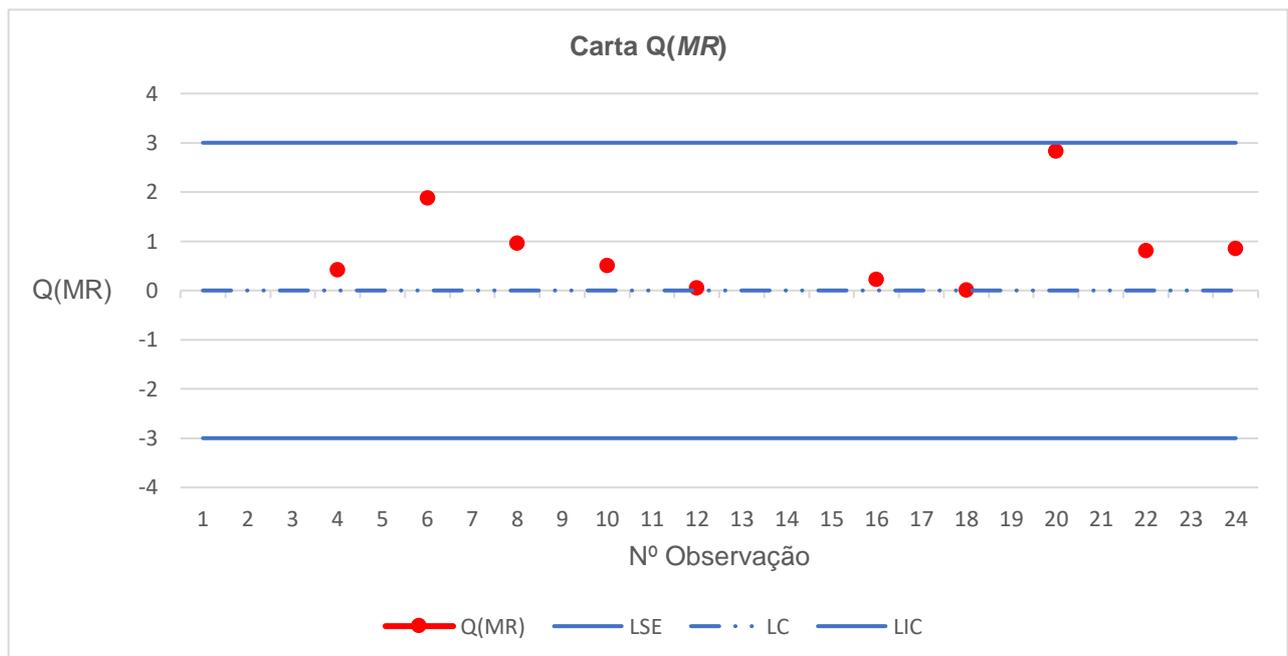


Figura 4.11 – Carta de Controlo Q(MR) para Análise Pós-Secagem

Em suma, por observação das cartas anteriores, verifica-se a existência de duas causas especiais de variação na carta Q para observações individuais — carta Q(X) — nos instantes correspondentes às observações nº13 e nº14 (pontos fora dos limites de controlo, Regra 1). No que se refere à dispersão do processo — carta de controlo Q(MR) — não se verifica qualquer causa especial de variação.

Analisando pormenorizadamente a carta de controlo Q(X), verifica-se que o processo possui capacidade em todos os instantes ($Q_S > +3$), com valores de índices de capacidade bastante elevados. Como a especificação técnica (recomendável) do teor de humidade é do tipo unilateral (LSE = 0,15), a carta apenas possui índices de capacidade superior (Q_S), exceto nos instantes correspondentes às causas especiais de variação, onde não foi estimada a capacidade do processo por constituírem causas que não são inerentes ao processo. De notar que os instantes em que surgiram as causas especiais coincidiram com um período em que houve um aumento do número de máquinas de injeção a consumir esta matéria-prima para o fabrico de caixas. Este incremento do uso do material pode ter como consequência a diminuição do tempo de secagem do mesmo na estufa, devido ao aumento da cadência do seu consumo, o que torna o processo de secagem menos eficaz.

No seguimento da passagem da informação a um dos responsáveis da área de injeção sobre o sucedido, foi confirmada a possibilidade dessas causas especiais estarem associadas ao facto anteriormente mencionado. Após este período de 2 horas de produção intensiva, o número de máquinas de injeção a consumir o material diminuiu, voltando ao número que se encontrava inicialmente. É curioso verificar que os índices de capacidade sofrem alguns decréscimos após o momento da ocorrência das causas especiais, particularmente nos instantes correspondentes às observações nº16 (primeiro decréscimo considerável) e nº19 (segundo decréscimo considerável), sendo que a partir da observação nº19 os índices vão sofrendo pequenos incrementos até ao término do controlo. Apesar de, ainda assim, o processo possuir uma capacidade bastante satisfatória, tais decréscimos na capacidade do processo devem ser tidos em conta. Na ótica do autor da presente dissertação, as diminuições visualizadas nos índices de capacidade do processo podem ser devidas a duas principais causas:

1. As diferenças existentes entre o teor de humidade do material presente em cada *big bag*. Aquando da mudança de *big bags*, as diferenças significativas nos valores de humidade presentes no material podem ser críticas para o processo de secagem. Caso as diferenças sejam realmente elevadas, o tempo de secagem necessário para “aspirar” uma mesma quantidade de água presente no material poderá ser diferente. Ou, para um mesmo tempo de secagem, poderá ser necessário diferentes níveis de temperatura consoante o teor de humidade presente no material a secar.

2. O possível desgaste do filtro de sílica presente na estufa. O filtro auxilia na aspiração da humidade, retendo o acumular de condensados presentes no interior da estufa. O filtro presente nas estufas da JDEUS tem uma capacidade de retenção bastante elevada, no entanto tais evidências podem sugerir que pode estar na iminência de necessitar de ser substituído.

4.2.4.1. Normalidade e Independência dos dados

Após a análise da estabilidade do processo, procede-se então à verificação dos pressupostos necessários à correta aplicação das cartas de controlo estatístico: Normalidade e independência dos dados.

De modo a analisar o ajustamento dos dados a uma distribuição Normal, recorreu-se ao software *Statistica* para a realização do teste Kolmogorov-Smirnov (K-S), representado na Figura 4.12.

O pressuposto da independência dos dados foi assumido como válido.

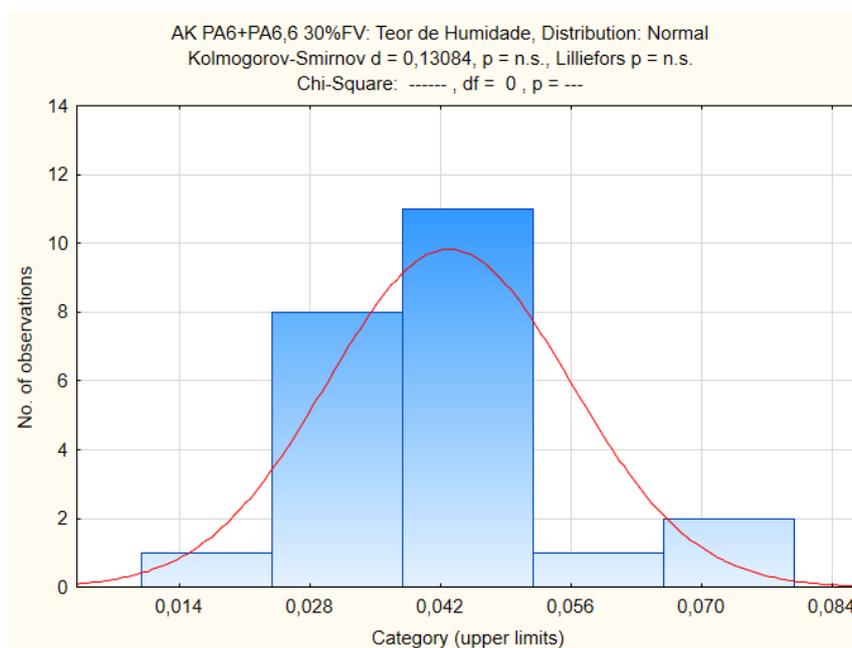


Figura 4.12 – Verificação da Normalidade dos dados da Análise Pós-Secagem

De acordo com a Tabela A.2 do anexo A, o valor crítico, para um nível de significância $\alpha = 5\%$, é aproximadamente igual a 0,180 ($D_{crit} = 0,180$). A estatística de teste (D) tem o valor de 0,1308 como se pode verificar na Figura 4.12.

Na Tabela 4.6, estão indicados os dois valores obtidos relativos ao teste Kolmogorov-Smirnov.

Tabela 4.6 – Resultados obtidos da Verificação da Normalidade da Análise Pós-Secagem

Valor Crítico (D_{crit})	Estatística de Teste (D)
0,180	0,131

Como o valor da estatística de teste é inferior ao valor crítico ($D < D_{crit}$), conclui-se que, ao nível de significância de 5%, é aceitável presumir que os dados relativos ao teor de humidade do material à saída da estufa seguem uma distribuição Normal.

4.2.5. Diagrama de Ishikawa

No seguimento da monitorização do processo de secagem foi possível concluir que o processo apresenta aptidão para se enquadrar dentro da especificação técnica recomendável. No entanto, o processo não apresenta estabilidade em todos os instantes analisados, tendo ocorrido duas causas especiais na carta de controlo Q(X). Além disso, é também possível observar que a capacidade do processo de secagem sofreu um notório decréscimo nos instantes finais do controlo estatístico.

De modo a reunir potenciais causas de instabilidade do processo de secagem, foi elaborado um Diagrama de Ishikawa (ou Diagrama de Causa e Efeito) que junta alguns fatores potencialmente geradores de variabilidade no processo de secagem:

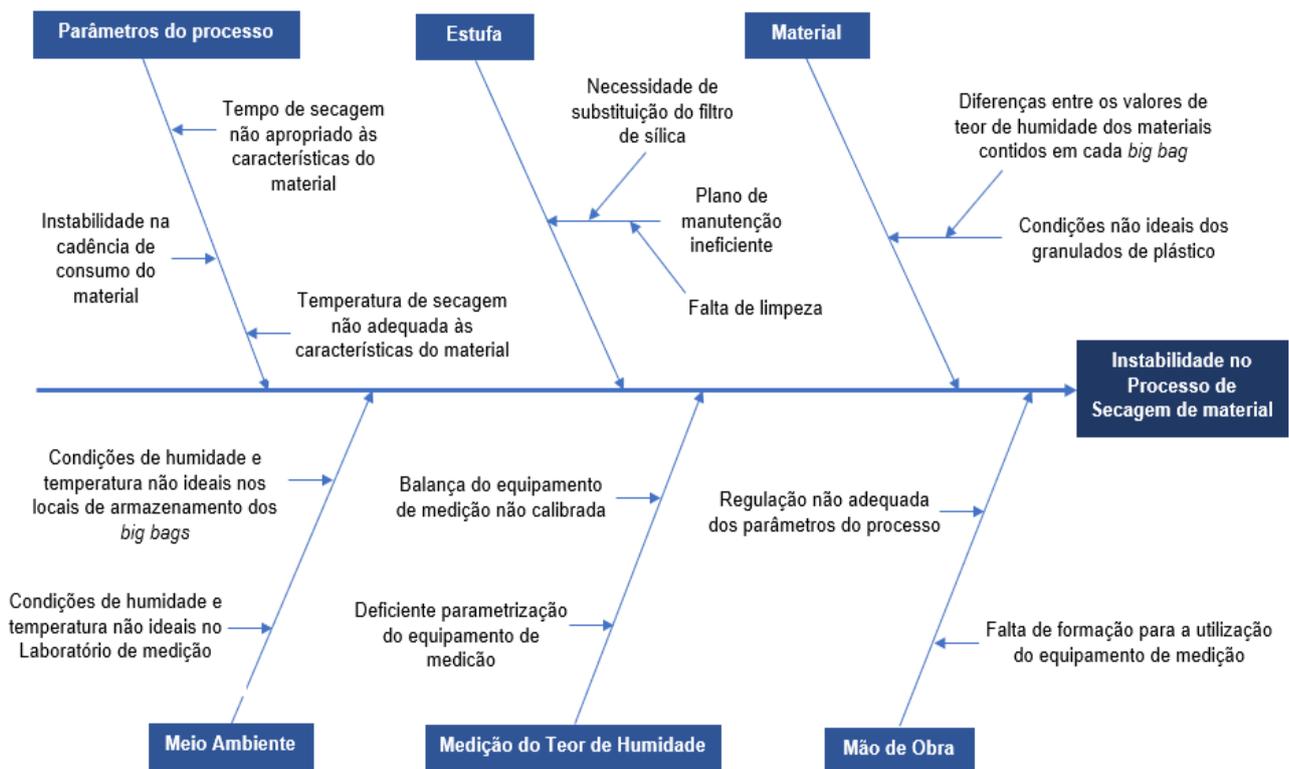


Figura 4.13 – Diagrama de Ishikawa

4.3. Controlo Estatístico do Processo de Moldação por Injeção

4.3.1. Produtos e Características em Estudo

Na presente investigação são estudadas cinco características de três diferentes referências de caixas (Figura 4.14). As cinco características da qualidade em análise correspondem à massa (em gramas), a duas cotas importantes de comprimento ("C1" e "C2", em milímetros) e a duas cotas importantes de largura ("L1" e "L2", em milímetros). Os três produtos alvos de estudo constituem duas caixas de entrada de ar (referências A94 501 e D72 501) e uma caixa de saída de ar (referência D72 502). Em cada produto são analisadas as cinco características mencionadas.

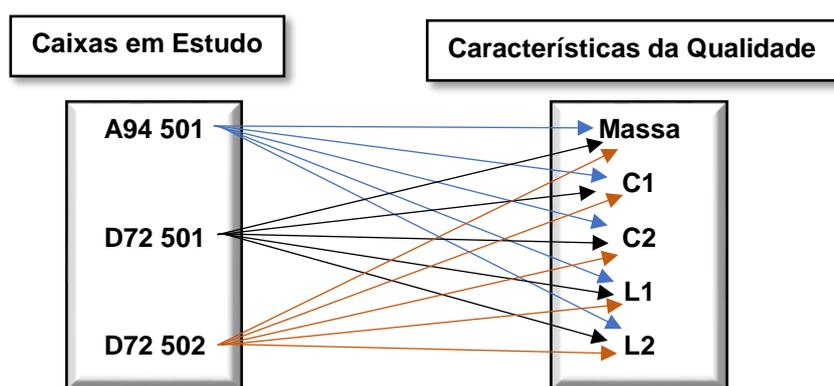


Figura 4.14 – Produtos e Características em estudo

Mensalmente, as referências de caixas D72 501 e D72 502 são produzidas em muito maior quantidade, comparativamente à referência A94 501. Porém, em fase de produção, esta última possui uma cadência de produção mais elevada (em termos de unidades produzidas por hora). Tal facto deve-se à diferença entre o número de cavidades nos moldes destinados à produção das caixas referidas. Enquanto que no molde das referências D72 501 e D72 502 existe uma cavidade por referência, no molde da referência A94 501 existem duas cavidades. Ou seja, ao passo que no primeiro caso é produzida uma caixa por ciclo de injeção, no segundo caso são produzidas duas caixas por ciclo de injeção.

O processo de Cravação, descrito na Secção 3.5.1, exige o máximo de rigorosidade relativamente ao dimensionamento das cotas C1, C2, L1 e L2 das caixas (Figura 4.15), provenientes do processo de moldação por injeção, de modo a que não seja comprometida a sua fixação no Ninho. Estas cotas, em conjunto com a massa, constituem características decisivas para a conformidade e estanquicidade do *intercooler* final.

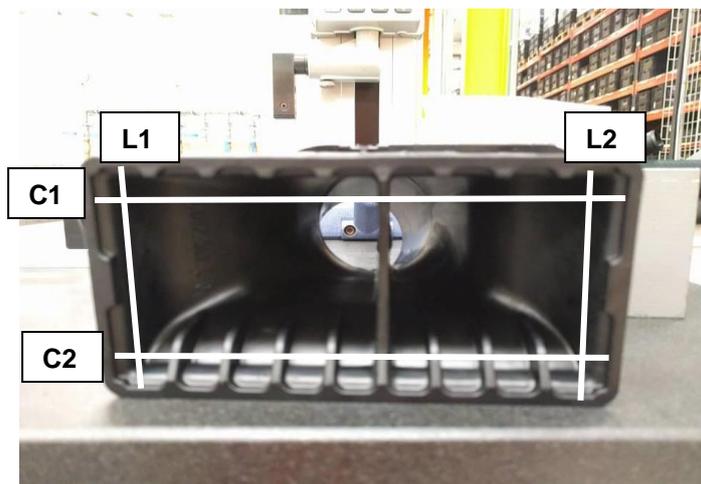


Figura 4.15 – Cotas para medição nas Caixas

4.3.2. Plano de Controlo

Definidas as características da qualidade, é essencial desenvolver um plano de controlo que estabeleça diretrizes para o processo de recolha de dados, no qual conste a dimensão da amostra, a frequência de amostragem, os equipamentos de medição e as condições da recolha e da medição.

a) Dimensão das Amostras e Frequência de Amostragem

A definição da dimensão de cada amostra e do intervalo entre as recolhas são de extrema importância para a adequada implementação do Controlo Estatístico do Processo.

Para a seleção da dimensão da amostra, foi tido em consideração a necessidade de se detetar pequenas alterações no processo, devido à criticidade das características em estudo, sabendo que à medida que a dimensão da amostra aumenta melhor é a sensibilidade das cartas de controlo de Shewart em detetar pequenas alterações. Deste modo, foi decidido compilar amostras de 6 unidades para a análise da estabilidade do processo e posterior estimação dos respetivos parâmetros (numa primeira fase), assim como para a monitorização do processo (numa fase posterior).

Relativamente à frequência de amostragem, esta foi estabelecida de modo a que cada amostra fosse representativa de potenciais alterações do processo, provocadas por causas invulgares de variação. Isto é, foi definida de modo a maximizar a probabilidade de se detetarem diferenças entre as amostras recolhidas, e minimizar a probabilidade de se detetarem diferenças dentro das amostras. Para tal, foi estabelecido um intervalo regular de 1 hora entre a recolha de amostras. A seleção deste intervalo foi feita tendo em conta não só os requisitos mencionados anteriormente, mas também com o intuito de precaver a recolha de dados correlacionados (isto é, a recolha de dados não independentes entre si), que invalidaria a aplicação das cartas de controlo de Shewart convencionais.

b) Instrumentos de Medição

Para a correta medição das características da qualidade, utilizaram-se dois equipamentos de medição. Para a medição da massa, em gramas, das caixas recolhidas, o equipamento de medição utilizado foi uma balança eletrônica (Figura 4.17). Enquanto que para mensurar as quatro cotas, duas referências de comprimento (C1 e C2) e duas de largura (L1 e L2), foi utilizado um paquímetro eletrônico (Figura 4.16). Os valores obtidos através das medições foram registados numa folha de registos apropriada.

Importa também frisar que os equipamentos de medição utilizados foram sempre mantidos, não havendo alternância entre as balanças e os paquímetros disponíveis, evitando-se assim a mistura de medições entre equipamentos com eventuais diferenças de Repetibilidade.



Figura 4.17 – Balança Eletrônica



Figura 4.16 – Paquímetro Eletrónico

c) Condições de Recolha e Medição

Definidas a dimensão da amostra e frequência de amostragem, e selecionados os equipamentos de medição, é importante esclarecer de forma clara as condições em que são realizadas a recolha de amostras e a medição das características em estudo.

Após a extração da peça final do molde, esta apresenta ainda uma temperatura considerável apesar do arrefecimento a que é sujeita nos instantes anteriores à sua ejeção. Estima-se que somente após 30 a 40 minutos desde a extração a peça possa atingir a sua estrutura final, devido às contrações que, nesse período, ainda vai apresentando. Deste modo, após a recolha de cada amostra, foram aguardados 40 minutos antes de iniciar as medições das cinco características nas seis unidades, assegurando assim que as peças se encontravam no seu estado dimensional final no momento das medições. A recolha de cada amostra foi efetuada no momento em que as peças chegavam à zona de Inspeção e Armazenagem. Foram utilizadas luvas anti corte como Equipamento de Proteção Individual (EPI), para garantir a segurança das mãos face às temperaturas ainda elevadas das caixas, durante a recolha das mesmas, assim como para prevenir a ocorrência de cortes acidentais, durante a medição das mesmas. As medições foram

realizadas no Posto da Qualidade, que se situa num local adjacente à zona de Inspeção e Armazenagem e onde se encontram os respetivos equipamentos de medição. Após o término das medições em cada peça, as caixas foram sempre recolocadas na zona de Inspeção e Armazenagem.

Em modo de síntese, apresenta-se, na Tabela 4.7, o plano de controlo estabelecido.

Tabela 4.7 – Condições de Recolha e Medição

Plano de Controlo	
Critério	Informação
Dimensão das Amostras	6 unidades por amostra
Frequência de Amostragem	1 amostra por hora
Local de Recolha	Zona de Inspeção e Armazenagem
Equipamentos de Medição	Balança Eletrónica e Paquímetro Eletrónico
Local de Medição	Posto da Qualidade

4.3.3. Estudo Univariado do Processo – Fase I

Depois de analisada uma das principais fontes de variação do processo de moldação por injeção — a matéria prima — e elaborado o plano de controlo para a implementação do *SPC*, deu-se início à recolha de dados para os Estudos Univariado e Multivariado do processo.

O Estudo Univariado caracteriza-se pela análise da evolução temporal dos dados isolados de cada característica, de cada referência de produto, a fim de minimizar a variabilidade dos processos e averiguar a sua capacidade em produzir de acordo com as especificações exigidas.

Como todas as características em estudo são passíveis de serem expressas numa escala contínua, elaboraram-se Cartas de Controlo de Variáveis. Para o controlo do parâmetro de localização, foram construídas, para todas as características em análise, Cartas de Controlo da Média (Carta \bar{X}). Quanto ao controlo do parâmetro de dispersão, foram elaboradas, para todas as características em estudo, Cartas de Controlo do Desvio Padrão (Carta *S*) em detrimento de Cartas de Controlo da Amplitude (Carta *R*), dado que o desvio padrão é uma estatística que abrange os valores das 6 unidades contidas na amostra, enquanto que a amplitude apenas considera os valores extremos da amostra, ignorando assim grande parte da informação nela contida.

Nesta primeira fase, os parâmetros dos processos das cinco características de cada uma das três referências de caixas são desconhecidos. Foram recolhidas 30 amostras de cada referência e construídas cartas de controlo, com o objetivo de aferir a estabilidade dos processos e se proceder à estimação dos respetivos parâmetros. O estudo foi realizado por produto e por característica, tendo sido construídas 10 cartas de controlo por referência de produto (5 cartas de controlo da média e 5 cartas de controlo do desvio padrão). Os dados recolhidos apresentam-se no Anexo D.

4.3.3.1. Referência A94 501

a) Análise das Cartas de Controlo

No seguimento da recolha de dados das cinco características da referência de produto A94 501, foram então elaboradas as cartas de controlo estatístico mais apropriadas, recorrendo-se ao software *Statistica*. Na Figura 4.18 estão representadas as cartas de controlo da média (carta \bar{X}) e do desvio padrão (carta S) para a característica Massa. No Anexo E é possível encontrar as cartas de controlo para as restantes quatro características – C1, C2, L1 e L2.

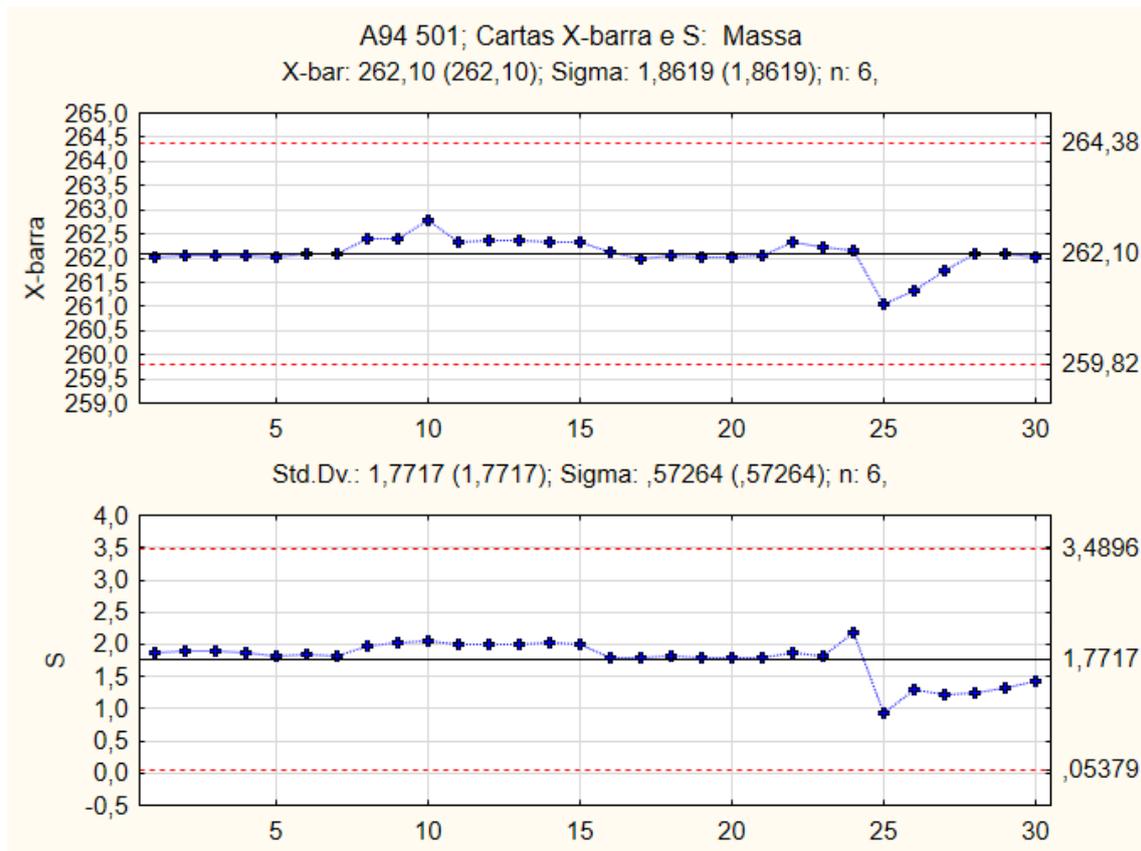


Figura 4.18 – Cartas da Média e do Desvio Padrão para a Massa - A94 501

Por observação das cartas anteriores, é possível concluir que todos os pontos se encontram dentro do intervalo definido pelos limites de controlo, em ambas as cartas. No entanto, é claramente visível uma situação de estratificação, caracterizada pela disposição da grande maioria dos pontos em torno da linha central, constituindo um padrão que não se considera aleatório. Tendo os limites de controlo sido calculados de maneira correta, esta situação alerta para uma possível recolha de amostras com unidades heterogéneas. Ou seja, as unidades constituintes de cada amostra podem não ser provenientes da mesma distribuição, o que resulta em valores muito distintos dentro de cada amostra, culminando em desvios padrão amostrais acentuados. Como os limites de controlo, tanto na carta de controlo da média como na carta de controlo do desvio padrão, são calculados com base no desvio padrão médio, os seus valores resultantes apresentar-se-ão mais afastados da linha central. Deste modo, a variabilidade interior a cada amostra é superior à variabilidade existente entre cada amostra.

Através da observação do histograma dos dados da Massa (Figura 4.19), elaborado recorrendo ao software *Statistica*, é possível concluir que existe a possibilidade de se estar na presença de duas distribuições distintas.

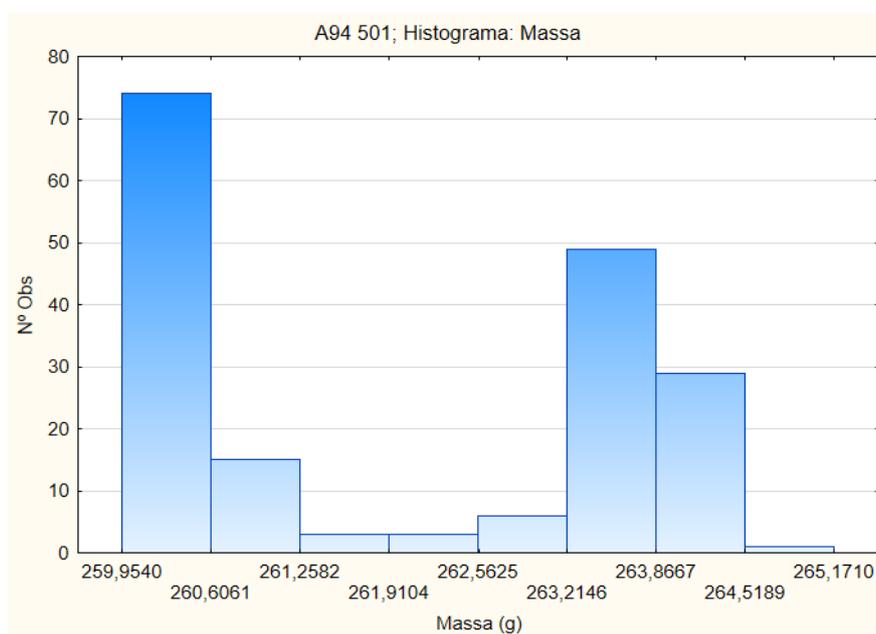


Figura 4.19 – Histograma dos dados obtidos para a Massa – A94 501

Relativamente às cartas de controlo das restantes características, presentes no Anexo E, não se observam pontos fora dos limites de controlo e são visíveis comportamentos análogos, mas não tão expressivos, em particular nas cartas de controlo das características L1 e L2. Tais factos evidenciam que as irregularidades observadas são independentes da característica em análise.

b) Análise das Anomalias Observadas

Para uma correta estimação dos parâmetros de um processo é necessário garantir a estabilidade do mesmo, sendo necessário assegurar que os dados utilizados são pertencentes a uma única distribuição.

O molde da referência de produto A94 501 caracteriza-se por possuir duas cavidades para a produção da mesma referência (Figura 4.20). No momento da extração das peças, estas são libertadas para um tapete transportador, que faz a conexão com a zona de Inspeção. Ao longo da recolha de amostras para a Fase I do Controlo Estatístico constituíram-se 6 unidades por amostra, nas quais três unidades pertencem a uma cavidade e as outras três à restante cavidade. Junto dos valores registados, foi sempre identificada qual a cavidade associada ao valor observado da unidade recolhida (Anexo D).

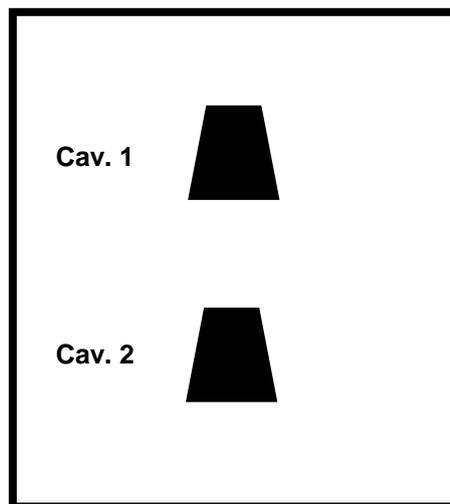


Figura 4.20 – Simplificação do Molde da referência A94 501

Face às suspeitas da constituição de amostras com unidades de diferentes distribuições, procedeu-se à análise das caixas provenientes de cada uma das cavidades do molde. Numa abordagem inicial, calcularam-se algumas estatísticas básicas relativas às cinco características das caixas provenientes de cada cavidade, representadas na Tabela 4.8. Para além das médias (\bar{X}), desvios padrão (S) e amplitudes amostrais (R), foram determinados os coeficientes de assimetria (b_1) e de curtose (b_2), recorrendo ao *Excel*. No total, foram analisadas 90 caixas por cavidade.

Tabela 4.8 – Estatísticas Básicas

	Massa (g)		C1 (mm)		C2 (mm)		L1 (mm)		L2 (mm)	
	Cav 1	Cav 2	Cav 1	Cav 2	Cav 1	Cav 2	Cav 1	Cav 2	Cav 1	Cav 2
\bar{X}	260,487	263,711	118,050	117,990	118,000	117,860	55,910	56,070	56,140	55,930
S	0,239	0,562	0,020	0,033	0,052	0,040	0,044	0,046	0,063	0,055
R	1,725	3,551	0,100	0,180	0,290	0,230	0,310	0,350	0,370	0,380
b_1	1,634	-1,424	-0,173	0,110	-0,918	0,147	1,285	1,108	-1,308	1,107
b_2	9,564	6,492	3,529	3,435	5,061	3,884	7,484	8,096	5,840	7,081

Analisando os resultados estatísticos da Tabela 4.8, facilmente se constata a diferença entre as médias amostrais das cinco características de caixas provenientes de cada cavidade. Ainda assim, as médias da característica C1 apresentam-se mais próximas do que as das restantes características. De notar que, com exceção da característica L1, os desvios padrão amostrais apresentam-se com diferenças também notórias, tendo em conta as amplitudes de valores que as amostras apresentam. É interessante verificar que os coeficientes de assimetria, apesar das dessemelhanças observadas, não manifestam diferenças acentuadas entre si, sobretudo na característica L1 onde se apresentam relativamente idênticos. Nos restantes casos, os pares de cavidades contêm sempre um coeficiente de assimetria positivo e outro negativo. Isto significa que numa cavidade existe uma maior concentração de dados nos valores mais baixos (assimetria positiva, ou à direita), e na outra uma maior concentração nos valores mais altos (assimetria negativa, ou à esquerda). Quanto aos coeficientes de *curtose* calculados, estes apresentam valores distintos entre as cavidades na maioria dos casos, o que demonstra a existência de diferentes graus de achatamento nas distribuições dos dados provenientes de cada uma das cavidades.

c) Testes Kolmogorov-Smirnov para comparação de duas amostras

Face às evidências de desigualdades observadas entre os valores das estatísticas básicas das duas cavidades, foram realizados cinco testes de Kolmogorov-Smirnov (K-S 2) para comparação de cada par de amostras, cujo procedimento está descrito na Secção 2.2.2.

Na Figura 4.21, apresenta-se um gráfico com as funções de distribuições acumuladas de cada cavidade (“S_1” e “S_2”, das cavidades 1 e 2, respetivamente) relativas à característica C1.

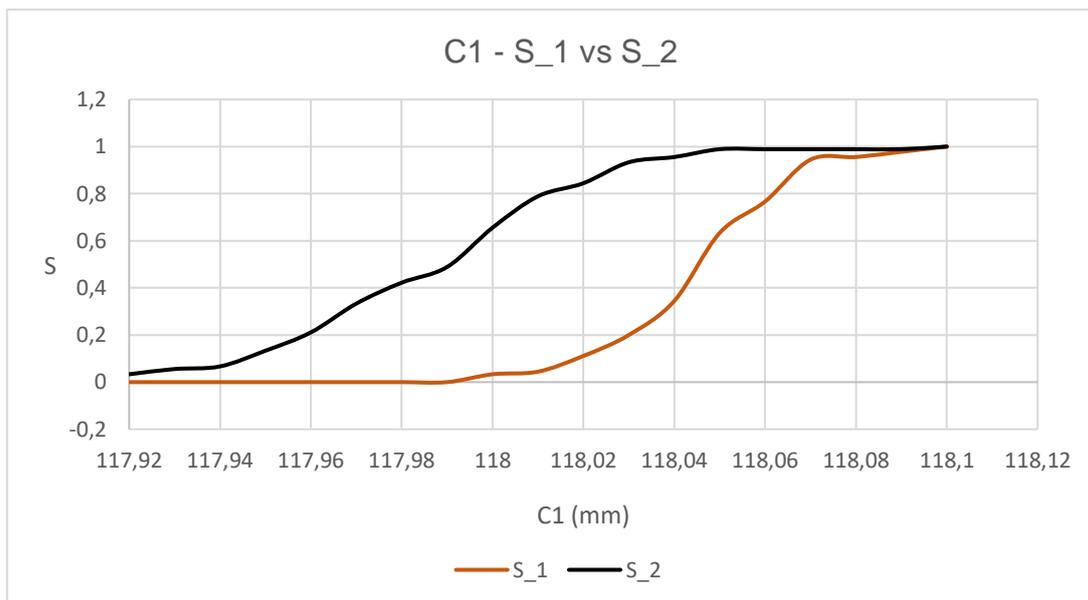


Figura 4.21 – Funções de Distribuições Acumuladas para C1

Analisando o gráfico anterior, verifica-se uma diferença considerável entre as duas funções de distribuição. Constata-se, por exemplo, que a cavidade 2 apresenta uma maior predominância em valores reduzidos, em comparação com a cavidade 1. Na ótica da ordem crescente dos dados, observa-se que o domínio de valores da cavidade 1 inicia-se quando o intervalo de valores da cavidade 2 já inclui aproximadamente 50% dos seus valores totais. Deste modo, será provável que as distribuições não se possam considerar iguais, dada a desproporção verificada entre as funções de distribuição acumulada.

Com o intuito de corroborar as deduções realizadas, apresentam-se na Tabela 4.9 os valores obtidos no Teste Kolmogorov-Smirnov (K-S 2) para as cinco características, com o seguinte teste de hipóteses:

$$H_0: S_{Cav1}(x) = S_{Cav2}(x)$$

$$H_1: S_{Cav1}(x) \neq S_{Cav2}(x)$$

Tabela 4.9 – Resultados obtidos nos Testes de Kolmogorov Smirnov (K-S 2)

	Massa	C1	C2	L1	L2
Estatística do Teste (D)	0,989	0,744	0,867	0,956	0,956
D crítico (α = 5%)	0,203	0,203	0,203	0,203	0,203
Conclusão sobre H₀	Rejeita-se	Rejeita-se	Rejeita-se	Rejeita-se	Rejeita-se

Dado que cada par de amostras contem 90 observações/amostra, o valor crítico dos cinco testes é dado por:

$$D_{\text{crítico}} = 1,36 \sqrt{\frac{90+90}{90.90}} = 0,203$$

Ao nível de significância de 5%, existem claras evidências estatísticas que permitem rejeitar H_0 nos cinco testes realizados ($D > D_{\text{crítico}}$). Desta forma, conclui-se que é admissível presumir que os dados recolhidos das caixas das cavidades 1 e 2 não são provenientes da mesma população, pois possuem distribuições diferentes.

d) Determinação de Eventuais Fontes de Variação

Perante a comprovação da recolha de amostras com unidades heterogéneas, não se torna possível assegurar a estabilidade dos processos da referência A94 501, o que, conseqüentemente, inviabiliza o cálculo dos parâmetros e o seguimento do controlo estatístico. Como resultado da necessidade em adotar medidas que permitam eliminar as diferenças entre as cavidades, foram identificadas algumas causas, após discussão com alguns operadores, e comunicadas aos responsáveis de Injeção. De todas as eventuais causas, destacam-se as seguintes três:

1. **Fonte I:** O molde poderá possuir cavidades com características diferentes, devido à sua conceção original ou a desgaste, o que resulta em caixas com dimensões e massas distintas.
- **Solução I:** Os moldes utilizados para a produção de caixas são fabricados pela fábrica de moldes da JDEUS, localizada em Setúbal, sendo que a comunicação entre as duas unidades da empresa não constitui qualquer obstáculo. Deste modo, no caso de se validar a Fonte I, deverá reportar-se o problema à fábrica de moldes, para que seja desenvolvido um novo molde ou se proceder à correção do atual, tendo sempre em vista uma resolução eficiente do problema.
2. **Fonte II:** As temperaturas de extração das peças do molde poderão ser demasiado elevadas. Nesta situação, a queda das peças diretamente no tapete transportador poderá ter um impacto negativo nas propriedades dimensionais, dado que possivelmente as caixas não apresentam uma condição de rigidez ideal.
- **Solução II:** Uma possível solução passa pela diminuição da temperatura de extração e/ou o aumento do tempo de arrefecimento. Outra alternativa pode passar pela utilização de manuseadores automáticos/robôs para a extração das peças das cavidades e a colocação das mesmas no tapete transportador, evitando-se assim queda das peças aquando das suas ejeções.

3. **Fonte III:** A injeção de material para o interior das cavidades pode não ser realizada de modo uniforme. Tal desproporção na quantidade que é injetada para cada cavidade, possivelmente resultaria em caixas com dimensões e massas diferentes.
- **Solução III:** O problema pode ser eventualmente corrigido aumentando o tempo de recalque ou a pressão de injeção, no entanto tal poderia causar o sobreenchimento de, pelo menos, uma das cavidades e consequentes rebarbas. Deste modo, a solução poderá passar pela comunicação do problema à entidade de fabrico das máquinas de injeção de modo a que possam dar diretrizes para a correção do problema ou, em último caso, proceder à substituição da máquina.

4.3.3.2. Referências D72 501 e D72 502

a) Análise das Cartas de Controlo

Na Fase I das referências D72 501 e D72 502, foram então recolhidas as 30 amostras por referência e elaboradas as cartas de controlo cada uma das cinco características. Nas Figuras 4.22-4.23 estão representadas as cartas de controlo da média e do desvio padrão de D72 501 e D72 502, respetivamente, para a característica L1. As cartas de controlo construídas para as restantes características apresentam-se no Anexo E.

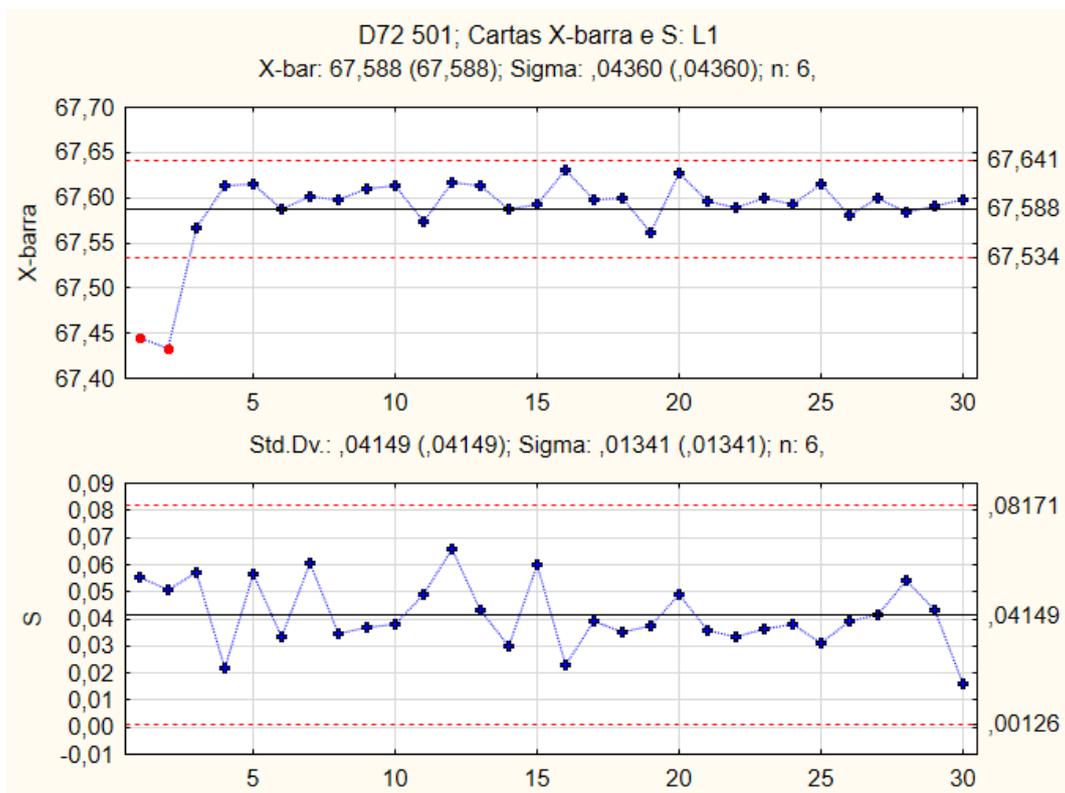


Figura 4.22 - Cartas da Média e do Desvio Padrão para L1 – D72 501

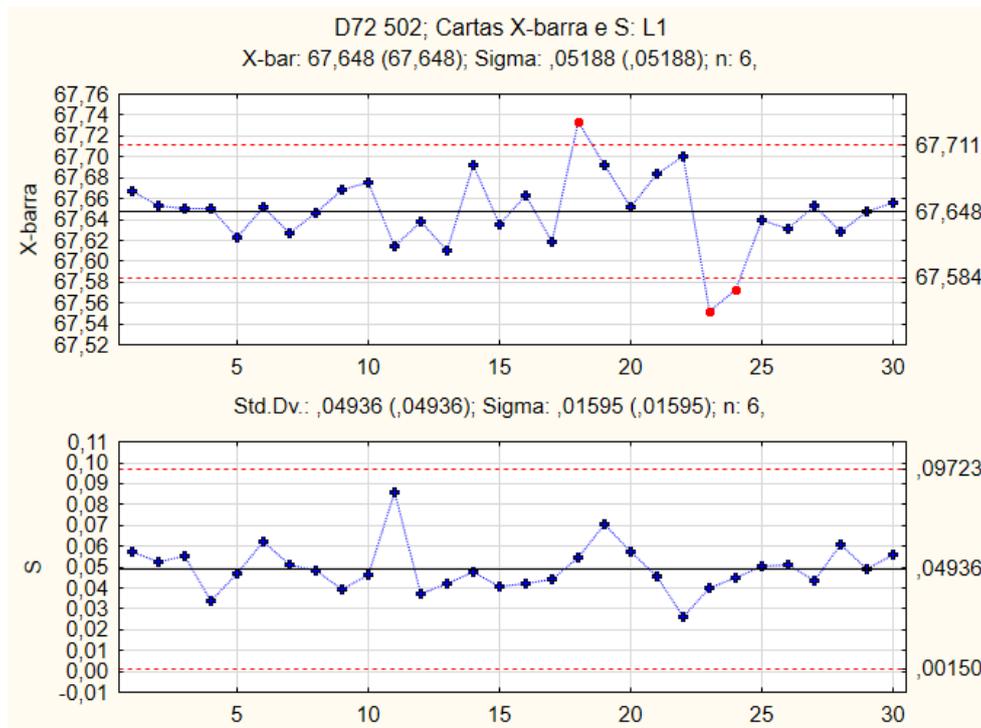


Figura 4.23 - Cartas da Média e do Desvio Padrão para L1 – D72 502

Analisando a carta de controlo da média da referência D72 501, constata-se a ocorrência de duas causas especiais de variação (Regra 1) nas duas primeiras amostras. O surgimento destas causas deveu-se à produção de caixas com as características dimensionais incompletas, em particular nas larguras (L1 e L2), refletindo-se nos valores da massa. Tal conduziu, no momento, ao aumento da pressão e da velocidade de injeção, por parte do operador, de modo a retificar o processo. Relativamente à carta de controlo do desvio padrão, da referência D72 501, não se verificam quaisquer pontos fora dos limites de controlo.

Através da observação das cartas de controlo da referência D72 502, verifica-se a presença de 3 pontos fora do intervalo delimitado pelos limites de controlo (Regra 1), na carta da média, nos instantes correspondentes às amostras nº18, nº23 e nº24. A amostra nº18 caracterizou-se pelo aparecimento de caixas com rebarbas assinaláveis e dimensões superiores às amostras recolhidas anteriormente. As causas especiais das amostras nº23 e nº24 poderão estar relacionadas com uma diminuição excessiva da pressão de injeção após o sobredimensionamento verificado em no instante correspondente à amostra nº18. Após a amostra nº24, o processo apresenta somente causas comuns de variação até ao fim do controlo.

Visualizando a Tabela 4.10, verifica-se que as 3 causas especiais que ocorrem na característica L1, surgiram também nas cartas da média das características C1 e C2. Verifica-se também que com exceção da carta da média da característica C2, a amostra nº 18 constitui uma causa especial em todas as restantes características.

Tabela 4.10 – Pontos fora dos Limites de Controlo na Fase I do SPC

Característica	D72 501		D72 502	
	Carta \bar{X}	Carta S	Carta \bar{X}	Carta S
Massa	Amostras nº1 e nº2	-	Amostra nº18	Amostra nº18
C1	-	-	Amostras nº18, nº23 e nº24	-
C2	-	-	Amostras nº23 e nº24	-
L1	Amostras nº1 e nº2	-	Amostras nº18, nº23 e nº24	-
L2	Amostras nº1 e nº2	-	Amostra nº18	-

Após retirados os pontos fora dos limites de controlo das cartas das cinco características das duas referências de produto, procedeu-se à verificação da existência de padrões aleatórios, através do software *Statistica*. Não se detetou qualquer padrão não aleatório após a correção das cartas das cinco características de cada referência, como se pode verificar no Anexo G, onde estão representados os testes efetuados. As cartas de controlo revistas estão representadas no Anexo E.

Assim, os processos das cinco características de cada referência de produto encontram-se sob controlo estatístico, estando apenas sujeitos a causas comuns de variação.

b) Normalidade e Independência dos Dados

A Normalidade dos dados individuais não é uma condição fundamental quando se controla a média através de amostras com uma dimensão elevada, como é o caso ($n = 6$), porque, segundo o Teorema do Limite Central (TLC), \bar{X} segue uma distribuição Normal. No entanto, para o cálculo dos índices de capacidade convencionais é necessário validar o pressuposto da Normalidade dos dados. Foi assumido como válido o pressuposto da independência dos dados.

Recorrendo, novamente, ao software *Statistica*, realizou-se o teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S) para o ajustamento dos dados de cada referência e característica em estudo a uma Normal. Os resultados obtidos estão representados na Tabela 4.11. Os gráficos elaborados no *Statistica* com os valores das estatísticas de teste (D) estão representados no Anexo F. O valor crítico, para um nível de significância 5% ($\alpha = 0,05$), é determinado recorrendo à Tabela A.1 do anexo A. Dado que $N > 30$ em todos os testes, tal valor é dado pela Equação 4.2.

Tabela 4.11 – Testes de Kolmogorov-Smirnov para ajustamento a uma Normal ($\alpha = 5\%$)

Característica	D72 501		D72 502	
	D	$D_{crítico}$	D	$D_{crítico}$
Massa	0,057	0,068	0,064	0,067
C1	0,059	0,066	0,068	0,070
C2	0,049	0,066	0,062	0,068
L1	0,058	0,068	0,069	0,070
L2	0,062	0,068	0,066	0,067

Por observação da tabela anterior, conclui-se que, ao nível de significância de 5%, não se rejeitam as hipóteses de os dados de cada uma das características de cada referência seguirem uma distribuição Normal, dado que $D < D_{crítico}$ em todos os casos analisados. Desta forma, o pressuposto da Normalidade dos dados é validado, podendo o estudo da capacidade de cada processo ser realizado recorrendo aos índices de capacidade tradicionais.

c) Estimação dos Parâmetros dos Processos e Estudo das Capacidades

Uma vez assegurada a estabilidade dos processos, torna-se possível estimar os parâmetros dos mesmos (μ e σ), através das estimativas das Expressões 2.29-2.30. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 4.12.

Tabela 4.12 - Estimação dos Parâmetros dos Processos

Característica	D72 501		D72 502	
	$\hat{\mu}$	$\hat{\sigma}$	$\hat{\mu}$	$\hat{\sigma}$
Massa (g)	302,809	0,072	308,316	0,080
C1 (mm)	139,152	0,052	139,129	0,057
C2 (mm)	139,103	0,050	139,209	0,050
L1 (mm)	67,598	0,043	67,651	0,052
L2 (mm)	67,619	0,045	67,578	0,046

As especificações técnicas estabelecidas pela empresa para cada característica de cada referência são do tipo bilateral. Possuem, por isso, um LSE e um LIE, apresentados na Tabela 4.13. O intervalo de especificação para a Massa é de 10 gramas, enquanto que para as características dimensionais é de 0,6 milímetros.

Tabela 4.13 - Limites de Especificação Técnica

Característica	D72 501		D72 502	
	<i>LIE</i>	<i>LSE</i>	<i>LIE</i>	<i>LSE</i>
Massa (g)	298,5	308,5	299	309
C1 e C2 (mm)	138,9	139,5	138,9	139,5
L1 e L2 (mm)	67,4	68	67,3	67,9

Tendo em consideração as especificações técnicas estabelecidas para as características de cada referência e os parâmetros dos respetivos processos, analisou-se a capacidade dos processos em produzir de acordo com as exigências. Procedeu-se então ao cálculo dos índices C_p , numa fase inicial, e C_{pk} , posteriormente, segundo as Expressões 2.39-2.40. Os resultados estão representados na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 - Estudo da Capacidade dos Processos na Fase I do SPC

Característica	D72 501				D72 502			
	C_p	$(C_{pk})_I$	$(C_{pk})_S$	C_{pk}	C_p	$(C_{pk})_I$	$(C_{pk})_S$	C_{pk}
Massa	23,11	19,92	26,31	19,92	20,75	38,67	2,84	2,84
C1	1,92	1,62	2,23	1,62	1,74	1,34	2,16	1,34
C2	1,98	1,34	2,62	1,34	1,99	2,05	1,93	1,93
L1	2,34	1,55	3,13	1,55	1,92	2,24	1,59	1,59
L2	2,22	1,62	2,83	1,62	2,54	2,02	2,34	2,02

Por observação da tabela anterior, constata-se que, em ambas as referências de produto, todas as características apresentam processos capazes, dado que $C_p > 1,33$ e $C_{pk} > 1,33$.

Analisando os processos das características da referência D72 501, verifica-se que os índices de capacidade potencial (C_p) são bastante elevados, em particular na Massa, o que significa que a variabilidade inerente aos processos é adequada à amplitude da especificação técnica. No caso da Massa, o valor exageradamente elevado justifica-se pelo facto do desvio padrão do processo ($\sigma = 0,072$ gramas) possuir um valor ínfimo quando comparado com a amplitude da especificação técnica (10 gramas), o que pode sugerir que a especificação técnica não está ajustada à variação real do processo (6σ). Quanto aos índices de capacidade C_{pk} , para além do valor elevado na Massa, denota-se que a característica C2 está no limiar da não capacidade. De salientar ainda que nenhum processo se encontra centrado, nesta referência de produto,

verificando-se em todos os casos que $(C_{pk})_I < (C_{pk})_S$, o que evidencia que as médias dos valores de cada característica se encontram muito mais próximas dos Limites Inferiores de Especificação (LIE) do que dos Limites Superiores de Especificação (LSE).

Por fim, analisando os processos das características da referência de produto D72 502 verifica-se que, à semelhança do que acontece com a referência D72 501, os valores dos índices de capacidade potencial são elevados, especialmente na característica Massa. Quanto aos índices C_{pk} , de notar que o seu valor na característica C1 é muito próximo de 1,33, apresentando-se na fronteira de ser considerado como um processo não capaz. Analisando a centralidade dos processos, observa-se que salvo o processo da característica C2, onde se verifica a condição $(C_{pk})_I \cong (C_{pk})_S$, as restantes características apresentam processos não centrados com os valores nominais.

4.3.4. Estudo Univariado do Processo - Fase II

Assegurada a estabilidade dos processos das referências D72 501 e D72 502, assim como estimados os seus respetivos parâmetros, interessa nesta fase monitorizar o comportamento dos processos em tempo real. A Fase II do Estudo Univariado realizou-se recorrendo à elaboração de cartas de controlo $Z_{\bar{x}}$ e W_S para cada uma das cinco características em estudo. Optou-se pela construção destas cartas não só pelas vantagens que possuem, mas também porque ambas as referências de caixas são fabricadas em quantidades elevadas e em períodos relativamente próximos.

Foram recolhidas 20 amostras (de dimensão $n = 6$) por característica, de cada referência de caixa, com uma periodicidade de recolha de 1 hora. As cartas foram elaboradas por característica, perfazendo na totalidade cinco cartas Z e cinco cartas W .

a) Análise das Cartas de Controlo $Z_{\bar{x}}$ e W_S

Devido às dimensões que apresentam estas cartas de controlo, apresentam-se as mesmas no Anexo H.

Observando as cartas construídas, é possível identificar algumas causas invulgares de variação que ocorreram durante a monitorização dos processos de todas as cinco características. As anomalias observadas constituíram sempre pontos fora dos limites de controlo, nunca tendo ocorrido padrões não aleatórios no intervalo que compreende os dois limites. Salienta-se o facto de, em todas as cartas e em todos os instantes, os processos possuírem capacidade para produzir de acordo com as especificações técnicas (dado que $(Z_S)_j > 3$ e $(Z_I)_j < 3$), apesar de alguns estarem no limiar de se tornarem não capazes.

A Tabela 4.15 resume de forma clara os instantes (t) em que ocorreram causas especiais ao longo do controlo, em tempo real, de cada característica em análise.

Tabela 4.15 - Pontos fora dos Limites de Controlo na Fase II do SPC

Característica	D72 501		D72 502	
	Carta $Z_{\bar{X}}$	Carta W_S	Carta $Z_{\bar{X}}$	Carta W_S
Massa	$t = 18; 19; 20$	$t = 20$	-	-
C1	$t = 16; 17; 18; 19; 20$	-	-	-
C2	$t = 16; 17; 18; 19; 20$	-	$t = 9$	-
L1	-	-	$t = 9; 10$	-
L2	$t = 19$	-	$t = 9; 10$	-

Analisando a carta Z da Massa (Gráfico H.1 do Anexo H), constata-se, desde logo, os valores muitíssimo elevados dos índices de capacidade para ambas as referências de caixas. Tal reflete as conclusões obtidas na Fase I do SPC, para esta característica, relativamente ao facto de a especificação técnica não estar ajustada à variação real do processo. Além disso, observa-se que os processos se encontram longe de estarem centrados com o valor nominal, pois $(Z_S)_j \neq (Z_I)_j$. Observando a carta Z da Massa na sua forma ampliada (Gráfico H.2 do Anexo H), é possível verificar as causas especiais que ocorreram $((Z_i)_j < LIC_Z)$, nos instantes identificados na Tabela 4.15. Estas causas involgares estão relacionadas com uma instabilidade dimensional nas peças D72 501, que coincidiram com três das causas especiais observadas nas cartas Z das características C1 e C2 e com uma das causas especiais que ocorreram na característica L2. As anomalias foram corrigidas através do aumento da pressão de injeção e do tempo de arrefecimento, resultando num incremento do tempo de ciclo. Na carta W da Massa, ocorreu uma causa especial em $t = 20$ $((W_i)_j > LSC_W)$, que pode ser explicada pelo facto de, nesse momento, os valores da característica Massa estarem a retornar à “normalidade”, mas ainda existirem peças com valores anómalos, o que resultou numa elevada dispersão no interior dessa mesma amostra.

As cartas Z das características de largura L1 e L2, representadas nos Gráficos H.3-H.4 do Anexo H, respetivamente, vêm evidenciar uma situação de sobredimensionamento que ocorreu na referência D72 502, nos instantes $t = 9$ e $t = 10$, onde se verifica que $(Z_i)_j > LSC_Z$. Com o objetivo de estabilizar o processo, a pressão de injeção sofreu um decréscimo, para diminuir a força com que o material é injetado, e foi aumentado o valor de pressão de fecho do molde, para garantir que as duas partes do molde se encontram perfeitamente encostadas e assim não originar saliências/rebarbas, tendo o processo voltado a estabilizar a partir do instante $t = 11$. Visualizando os índices de capacidade estimados em cada instante, constata-se que, na característica L1, os processos estão longe de estarem centrados com o *target*. Observa-se também que apenas a referência D72 502 apresenta um processo aproximadamente centrado na característica L2.

Por análise das cartas Z das características de comprimento C1 e C2, representadas nos Gráficos H.5-H.6 do Anexo H, respetivamente, é possível identificar as causas especiais assinaladas na Tabela 4.15. Analisando os valores dos índices de capacidade ao longo do controlo, verifica-se que na característica C1 a referência D72 502 apresenta índices de capacidade inferiores $(Z_I)_j$ muito próximos de -3, estando na iminência de se tornar num processo não capaz. O mesmo se passa com a referência D72 501, mas na carta Z da característica C2. Com exceção do processo da referência D72 502 na característica C2, onde $(Z_S)_j \cong (Z_I)_j$, os processos nas restantes análises encontram-se não centrados com o valor nominal.

4.3.5. Estudo Multivariado do Processo – Fase I

De modo a controlar simultaneamente as cinco características da qualidade em estudo, iniciou-se o Estudo Multivariado do processo. Face às anomalias verificadas no processo da referência A94 501, a peça não foi considerada para este estudo. Na Fase I, foram construídas duas cartas de controlo — uma para cada referência de caixa — e analisados conjuntamente, em cada carta, os dados de cada uma das cinco características. Foram utilizados os mesmos dados amostrais recolhidos para o Estudo Univariado, ou seja, 30 amostras por característica e referência. Tendo-se assegurado, no Estudo Univariado, que os dados seguem uma distribuição Normal e sendo assumida a independência dos mesmos, as condições necessárias para o início da abordagem multivariada do processo são satisfeitas na plenitude. Para a primeira fase (Fase I), construíram-se cartas T^2 para o controlo da média e, aquando da estabilidade do processo, foram estimados os índices de capacidade C_{pM} , PV e LI .

a) Análise das Cartas T^2 para a Fase I

As cartas T^2 para o controlo multivariado da média das características das referências D72 501 e D72 502 foram elaboradas recorrendo ao *Excel*, estando representadas nas Figuras 4.24-4.25, respetivamente.

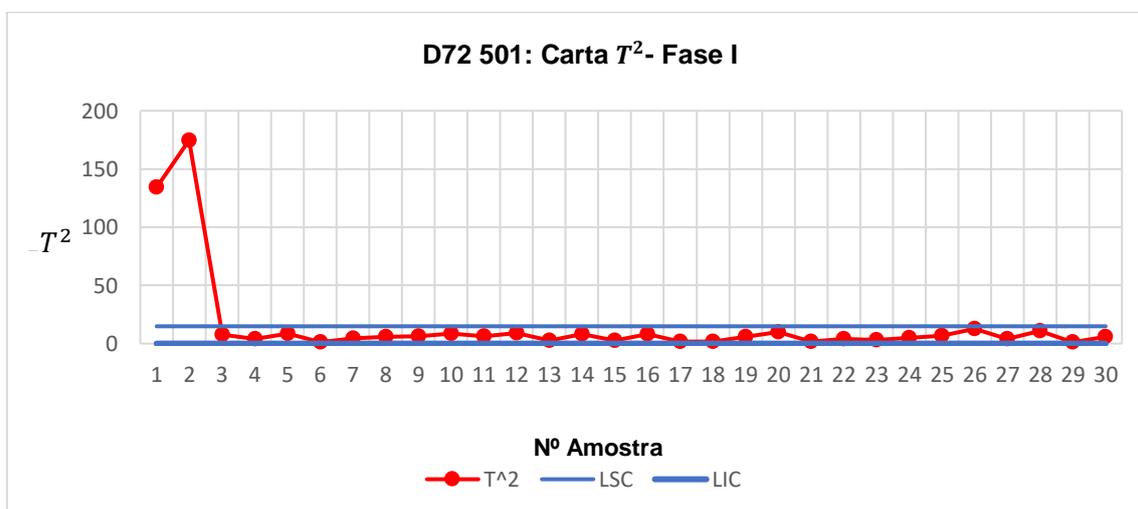


Figura 4.24 – Carta T^2 para a referência D72 501

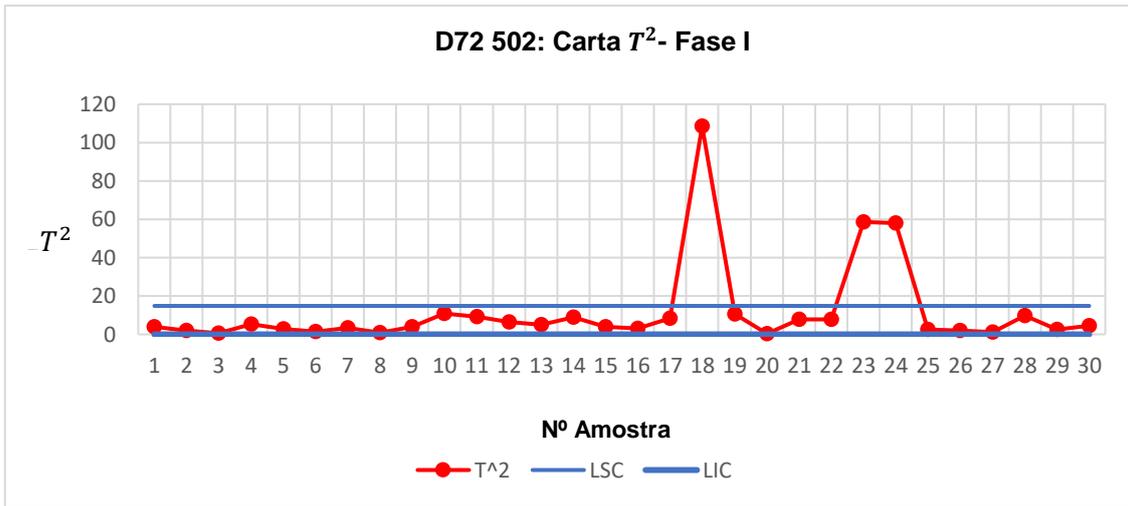


Figura 4.25 - Carta T^2 para a referência D72 502

Por observação das cartas anteriores, facilmente se identificam duas causas especiais na carta T^2 da referência D72 501, correspondentes às amostras nº01 e nº02, assim como três causas especiais na carta T^2 da referência D72 502, correspondentes às amostras nº18, nº23 e nº24.

Após a eliminação das causas involgares existentes, obteve-se as cartas de controlo representadas nas Figuras 4.26-4.27, para a referência D72 501 e D72 502, respetivamente. Nas Tabelas 4.16-4.17, apresentam-se os valores finais, para as cartas de cada referência, das constantes necessárias para os cálculos dos limites de controlo.

Tabela 4.16 – Valores finais e Estatísticas calculadas na Fase I do MSPC da Ref. D72 501

m	n	p	α_i	α	$F_{\alpha,p,mn-m-p+1}$	LSC_{T^2}	LSC_{T^2}
28	6	5	0,27%	1,34%	2,997	14,874	0

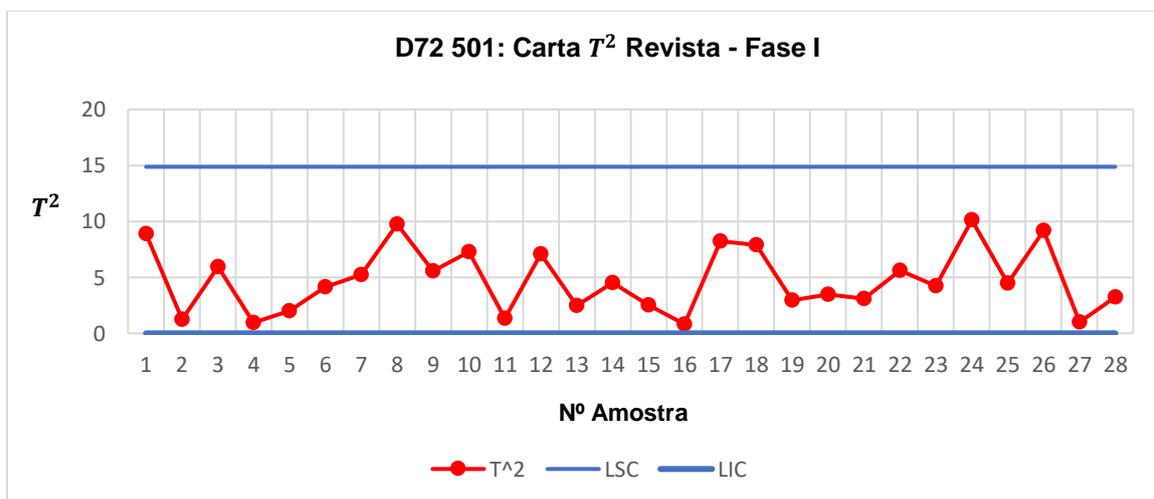


Figura 4.26 - Carta T^2 Revista para a referência D72 501

Tabela 4.17 - Valores finais e Estatísticas calculadas na Fase I do MSPC da Ref. D72 502

m	n	p	α_i	α	$F_{\alpha;p,mn-m-p+1}$	LSC_{T^2}	LSC_{T^2}
27	6	5	0,27%	1,34%	3,002	14,893	0

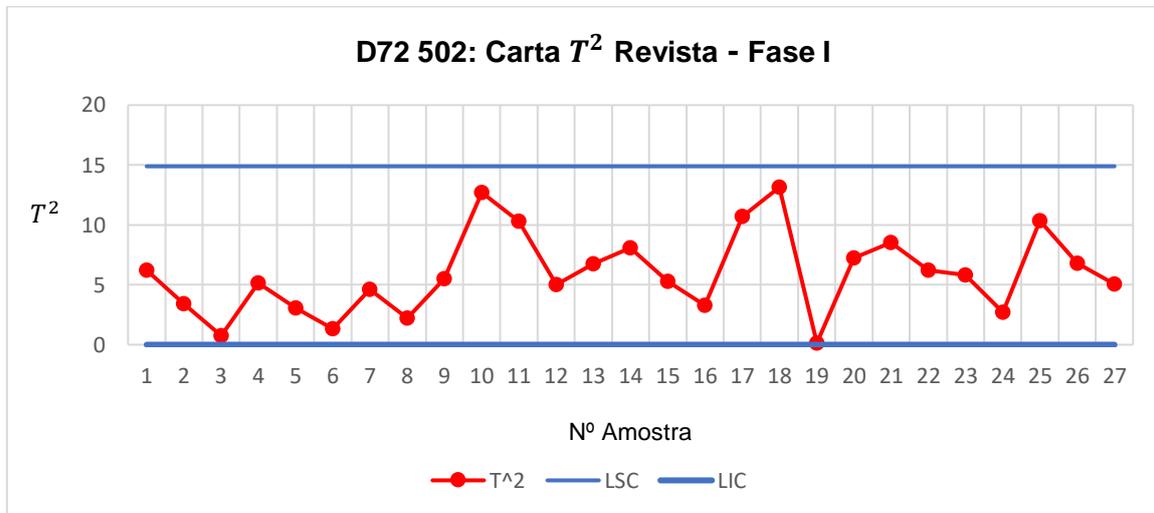


Figura 4.27 - Carta T^2 Revista para a referência D72 502

Observando ambas as cartas, verifica-se que os processos se encontram sob controle estatístico, dado não existirem causas especiais de variação.

b) Estimação dos Parâmetros dos Processos e Estudo das Capacidades

Estando garantida a estabilidade dos processos, reúnem-se as condições necessárias para a estimação dos parâmetros e para o estudo da capacidade dos mesmos. Os parâmetros do processo estimados para o controle multivariado da referência D72 501 apresentam-se de seguida.

$$\hat{\mu} = \bar{\bar{X}} = \begin{bmatrix} 302,808 \\ 139,153 \\ 139,104 \\ 67,598 \\ 67,619 \end{bmatrix}$$

$$\hat{\Sigma} = S = \begin{bmatrix} 0,005030 & 0,000131 & 0,000246 & -0,000279 & -0,000086 \\ 0,000131 & 0,002620 & 0,000190 & -0,000149 & -0,000033 \\ 0,000246 & 0,000190 & 0,002580 & -0,000034 & 0,000376 \\ -0,000279 & -0,000149 & -0,000034 & 0,001800 & -0,000034 \\ -0,000086 & -0,000033 & 0,000376 & -0,000034 & 0,002010 \end{bmatrix}$$

Para a referência D72 502, os parâmetros estimados para o estudo multivariado são os seguintes:

$$\hat{\mu} = \bar{X} = \begin{bmatrix} 308,318 \\ 139,129 \\ 139,210 \\ 67,651 \\ 67,579 \end{bmatrix}$$

$$\hat{\Sigma} = S = \begin{bmatrix} 0,006790 & -0,000170 & -0,000217 & -0,000436 & -0,000029 \\ -0,000170 & 0,003190 & -0,000132 & 0,000254 & -0,000372 \\ -0,000217 & -0,000132 & 0,002590 & -0,000443 & -0,000321 \\ -0,000436 & 0,000254 & -0,000443 & 0,002600 & -0,000443 \\ -0,000029 & -0,000372 & -0,000321 & -0,000443 & 0,002100 \end{bmatrix}$$

Tendo em consideração as especificações técnicas estabelecidas para as características de cada referência, representadas na Tabela 4.13, e as estimativas dos parâmetros dos respectivos processos, procedeu-se à análise da capacidade dos processos em produzir de acordo com as especificações. Procedeu-se então ao cálculo dos índices C_{pM} , PV e LI , segundo as Equações 2.96, 2.99 e 2.101. Obtiveram-se os resultados representados na Tabela 4.18.

Tabela 4.18 - Estudo da Capacidade Multivariada dos Processos

Referência	C_{pM}	PV	LI
D72 501	2,15	0	1
D72 502	2,06	0	1

Observando a Tabela 4.18, verifica-se que ambos os processos apresentam capacidade potencial ($C_{pM} > 1,33$), o que significa que o volume da região do processo é adequado ao volume da região das especificações. Os resultados obtidos para o índice de capacidade PV ($PV \cong 0$) permitem concluir que os processos de ambas as referências não se encontram centrados com o valor nominal ou *target*. Ou seja, o centro da especificação técnica (vetor T) encontra-se longe de coincidir com o vetor média do processo ($\hat{\mu}$). Analisando, por fim, os resultados obtidos para o índice de capacidade LI , constata-se o valor unitário obtido para os processos das duas referências, o que indica que a localização da região definida pelo processo [LIP, LSP] está contida na região da especificação [LIE, LSE].

Uma vez que somente duas das três condições necessárias para se considerar um processo capaz são satisfeitas, nomeadamente $C_{pM} > 1,33$ e $LI = 1$, os processos das referências D72 501 e D72 502 não podem ser classificados como capazes, pois não estão centrados com o *target* (não respeitam a condição $PV \cong 1$). Todavia, foi decidido proceder à recolha dados para

a Fase II, de modo a monitorizar os processos e permitir uma comparação com os resultados obtidos na Fase II univariada.

4.3.6. Estudo Multivariado do Processo – Fase II

Na Fase II do SPC multivariado foi elaborada uma única carta T^2 que contempla as estatísticas multivariadas de ambas as referências de caixas. Foram utilizadas as mesmas amostras recolhidas para a Fase II do estudo univariado, ou seja, 20 amostras, de dimensão igual a 6 unidades ($m = 20$ e $n = 6$), por característica de cada referência. Dada a dimensão considerável da carta elaborada, esta está apresentada no Gráfico I.1 do Anexo I.

a) Análise da Carta T^2 para a Fase II

Analisando a carta T^2 para a Fase II, observa-se a ocorrência de oito causas especiais, nas quais se verifica que $(T^2)_j > LSC_{T^2}$. Seis destas causas são referentes à referência D72 501 — $t \in \{16; 17; 18; 19; 20; 23\}$ — e as restantes duas referem-se à referência D72 502 — $t \in \{9; 10\}$. Por conseguinte, procedeu-se à averiguação de qual(ais) a(s) característica(s) responsável(eis) por cada causa especial observada, através do método da estatística d . Em cada instante, para identificar a característica responsável, foram determinados os valores para a estatística d associados a cada característica. Apresenta-se, de seguida, o exemplo para o instante $t = 16$.

Para identificar a(s) característica(s) responsável(eis) pela causa especial no instante $t = 16$ foram inicialmente determinados os valores de T_1^2 , T_2^2 , T_3^2 , T_4^2 e T_5^2 , correspondentes às características Massa, C1, C2, L1 e L2, respetivamente. O valor de T_j^2 é calculado com base em todas a p características à exceção da característica j . Posteriormente, efetuou-se a subtração entre o valor da estatística multivariada T^2 e a estatística T_j^2 , obtendo-se os valores da estatística d para cada variável — d_1 , d_2 , d_3 , d_4 e d_5 . Comparando os valores obtidos com o valor de $\chi_{\alpha;1}^2$, foi possível atribuir a ocorrência da causa especial a uma ou mais características. Na tabela 4.19, representam-se os resultados obtidos para o instante $t = 16$.

Tabela 4.19 – Resultados obtidos pelo método da estatística d para o instante $t = 16$

Característica	T^2	T_j^2	d_j	$\chi_{\alpha;1}^2$	Responsável?
Massa	33,342	32,045	1,297	7,016	Não
C1	33,342	17,225	16,117	7,016	Sim
C2	33,342	20,555	12,787	7,016	Sim
L1	33,342	36,211	2,870	7,016	Não
L2	33,342	33,111	0,230	7,016	Não

Observando a tabela anterior, conclui-se que as características C1 e C2 são responsáveis pela causa especial ocorrida em $t = 16$, dado que $d_j > \chi_{\alpha;1}^2$.

Na Tabela 4.20, estão identificadas as características responsáveis pelas causas involgares de variação observadas em cada um dos oito instantes (t).

Tabela 4.20 - Resultados obtidos pelo método da estatística d para todos os instantes

Instante da Causa Especial (t)	Referência de Caixa	Característica(s) responsável(eis)
9	D72 502	C1; C2; L1 e L2
10	D72 502	C1; L1 e L2
16	D72 501	C1 e C2
17	D72 501	C1 e C2
18	D72 501	Massa e C1
19	D72 501	Massa, C1 e L2
20	D72 501	C1
23	D72 501	C2

Analisando, de forma objetiva, os resultados obtidos, constata-se que a característica C1 contribuiu para a ocorrência de variações anômalas no processo em sete dos oito casos observados (todos os instantes à exceção de $t = 23$). Em contraste, a Massa apenas contribuiu significativamente para o aparecimento de duas das oito situações fora de controlo verificadas.

4.3.7. Confrontação dos Resultados Obtidos em ambos os Estudos

No seguimento da realização do Controlo Estatístico Univariado e Multivariado, efetua-se, de seguida, uma comparação entre os resultados obtidos em ambas as abordagens, tanto na Fase I como na Fase II.

a) Fase I

Na primeira fase do Controlo Estatístico Univariado e Multivariado, foram recolhidas amostras da produção de modo a aferir a estabilidade do processo e estimar os parâmetros do processo que traduzem essa estabilidade. Posteriormente, analisou-se a capacidade dos processos em produzirem de acordo com as especificações. No decorrer desta fase, foram algumas as amostras que, por constituírem causas anômalas de variação, necessitaram de ser excluídas para a correta estimação dos parâmetros.

Referência D72 501

Analisando os resultados obtidos na Fase I Univariada da referência de produto D72 501, constata-se a ocorrência de duas causas especiais de variação (instantes correspondentes às amostras n^o1 e n^o2) nas cartas da média (\bar{X}) das características L1, L2 e Massa. O aparecimento destas anomalias deveu-se à produção de caixas com as características dimensionais incompletas, que levou, no momento, ao aumento da pressão e da velocidade de injeção de modo a retificar o processo. Relativamente às cartas de controlo do desvio padrão, não se verificam quaisquer pontos fora dos limites de controlo em qualquer uma das cinco características. Observando os valores obtidos para os índices de capacidade, verifica-se que, para as cinco características, os processos têm capacidade potencial ($C_p > 1,33$) e são considerados como “capazes”, dado que $C_{pk} > 1,33$. Apesar disso, todos os processos das cinco características não se encontram centrados com o valor nominal.

Analogamente ao Estudo Univariado, os resultados obtidos na Fase I do Controlo Estatístico Multivariado indicam a presença de duas causas especiais na carta T^2 , nos instantes correspondentes às amostras n^o1 e n^o2, refletindo as anomalias verificadas nas características relativas à largura (L1 e L2) e à Massa. No que diz respeito à análise da capacidade, conclui-se que o processo apresenta capacidade potencial, dado que $C_{pM} > 1,33$. Constata-se também que $LI = 1$, respeitando-se outra condição necessária à capacidade do processo. No entanto, $PV \cong 0$ o que indica que o processo está longe de se encontrar centrado. Deste modo, os processos não se podem considerar como capazes, dado que a centralidade dos mesmos é condição necessária no caso Multivariado.

A Tabela 4.21 sumariza as conclusões obtidas na Fase I de ambos os Estudos, para a referência D72 501.

Tabela 4.21 – Resumo da Fase I do SPC Univariado e MSPC para a referência D72 501

Estudo	Fase I - D72 501			
	Causas Especiais	Capacidade Potencial?	Processos Centrados?	Processos Capazes?
Univariado	$t = 1; t = 2$	Sim	Não	Sim
Multivariado	$t = 1; t = 2$	Sim	Não	Não

Referência D72 502

Relativamente à Fase I do Estudo Univariado da referência D72 502, observaram-se causas especiais em todas as cartas da média das cinco características da qualidade. Nomeadamente, no instante correspondente à amostra nº18, nas cartas das características Massa, C1, L1 e L2, e nos instantes correspondentes às amostras nº23 e nº24, nas cartas das características C1, C2 e L1. Tal como acontece na referência D72 501, verifica-se que, para as cinco características, os processos têm capacidade potencial ($C_p > 1,33$), sendo considerados como “capazes”, dado que $C_{pk} > 1,33$. Verifica-se que à exceção da característica C2, onde se verifica a condição $(C_{pk})_I \cong (C_{pk})_S$, as restantes características apresentam processos não centrados com os valores nominais.

No caso do Estudo Multivariado, foram detetadas três causas especiais de variação na carta T^2 , nos instantes correspondentes às amostras nº18, nº23 e nº24. Mais uma vez, as variações anómalas ocorridas em cada uma das cartas univariadas foram refletidas na carta multivariada, que contempla as cinco características. À semelhança do que aconteceu no estudo da capacidade multivariada da referência D72 501, também neste caso o processo apresenta capacidade potencial e apresenta-se completamente longe de se encontrar centrado. Deste modo, a abordagem multivariada não permite considerar como capaz o processo de cada uma das características. A Tabela 4.22, resume os resultados obtidos na Fase I de ambos os estudos.

Tabela 4.22 - Resumo da Fase I do SPC Univariado e MSPC para a referência D72 502

Estudo	Fase I - D72 502			
	Causas Especiais	Capacidade Potencial?	Processos Centrados?	Processos Capazes?
Univariado	$t = 18; t = 23; t = 24$	Sim	Apenas C2	Sim
Multivariado	$t = 18; t = 23; t = 24$	Sim	Não	Não

b) Fase II

Dada por concluída a Fase I, iniciou-se a segunda fase do Controlo Estatístico Univariado e Multivariado. O objetivo, nesta fase, foi controlar o processo em tempo real, monitorizando o seu comportamento à medida que se recolhiam os dados da produção. Foram algumas as causas especiais verificadas, tanto relativas a características da referência D72 501 como da referência D72 502. No caso do Estudo Multivariado, foi necessário recorrer ao método da estatística d para identificar qual(ais) a(s) característica(s) responsável(eis) por tais ocorrências anómalas.

Observando as cartas $Z_{\bar{x}}$ de cada característica (Anexo H), constata-se a ocorrência de três causas especiais na carta da Massa, cinco causas especiais na carta da característica C1, seis causas especiais na carta da característica C2, duas causas especiais na carta de L1 e três causas especiais na carta de L2. Tais ocorrências correspondem a instantes das amostras nº9, nº10, nº16, nº17, nº18, nº19 e nº20. Na carta multivariada T^2 para a Fase II, foram identificadas causas especiais em todos os instantes referidos, acrescidos do instante correspondente à amostra nº23 onde se deu uma ocorrência anómala cuja responsabilidade se atribui à característica C2. Tal facto, demonstra a maior sensibilidade da carta T^2 na deteção de causas especiais, uma vez que detetou mais uma que nas cartas $Z_{\bar{x}}$. Na Tabela 4.23, estão assinalados os instantes de ocorrência de causas especiais (t) tendo em conta a característica associada a essa ocorrência, tanto nas cartas $Z_{\bar{x}}$, através da simples observação das mesmas, como também na carta T^2 , através da aplicação do método da estatística d .

Tabela 4.23 – Característica(s) responsável(eis) pelas causas especiais na Fase II do SPC Univariado e MSPC

Instante da Causa Especial (t)	Cartas $Z_{\bar{x}}$					Carta T^2				
	Massa	C1	C2	L1	L2	Massa	C1	C2	L1	L2
9		x		x	x		x	x	x	x
10				x	x		x		x	x
16		x	x				x	x		
17		x	x				x	x		
18	x	x	x			x	x			
19	x	x	x		x	x	x			x
20	x	x	x				x			
23								x		

Analisando a Tabela 4.23, é possível concluir que, na atribuição da responsabilidade das ocorrências de causas especiais, o Estudo Multivariado nem sempre se revela mais sensível relativamente ao Estudo Univariado. Por exemplo, nos instantes $t = 9$ e $t = 10$, o Estudo Multivariado revelou-se mais sensível que o Estudo Univariado, dado que atribui a responsabilidade dessas ocorrências anómalas a uma maior quantidade de características do que aquelas onde ocorreram causas especiais no Estudo Univariado. Porém, nos instantes $t = 18$, $t = 19$ e $t = 20$ o Estudo Multivariado atribuiu a responsabilidade dessas ocorrências a uma quantidade menor de características do que aquelas que se verificaram no Estudo Univariado, revelando-se, por isso, menos sensível. A causa especial ocorrida em $t = 23$ apenas se fez notar no Estudo Multivariado, denotando neste caso uma maior sensibilidade. O aparecimento desta causa especial na carta T^2 pode-se justificar pelo facto de na carta $Z_{\bar{x}}$ da característica C2, no Estudo Univariado, o valor da estatística Z nesse instante ($Z = 2,99$) se encontrar muito próximo de ultrapassar o Limite Superior de Controlo (LSC = 3).

5. Conclusões e Recomendações

A atual divisão representa o último capítulo da presente dissertação, no qual são expostas as principais conclusões obtidas ao longo do trabalho desenvolvido. Além disso, são sugeridas potenciais oportunidades de melhoria e algumas recomendações para trabalhos futuros.

5.1. Conclusões Finais

O cerne da presente dissertação constituiu na melhoria do setor de Injeção da unidade fabril da JDEUS, através do Controlo Estatístico do Processo de Moldação por Injeção. Para tal, recorreu-se a diversas ferramentas de Estatística aplicada à Gestão da Qualidade, tais como: Análise da Variância, Testes de Kolmogorov-Smirnov (K-S e K-S 2), Diagrama de Pareto, Diagrama de *Ishikawa*, Histogramas e Cartas de Controlo para o Estudo Univariado e Multivariado do processo.

Do processo de Moldação por Injeção, resultam as caixas de entrada e saída de ar, que fazem parte da composição final de um *intercooler*. Para o Controlo Estatístico do processo de Moldação por Injeção foram selecionadas cinco características da qualidade, consideradas como relevantes — Massa, Largura L1, Largura L2, Comprimento C1 e Comprimento C2 — de três referências de caixas — A94 501, D72 501 e D72 502.

Para que a implementação do Controlo Estatístico (Univariado e Multivariado) no processo de Moldação por Injeção fosse realizada com êxito, decidiu-se estabelecer uma fase preparatória na qual se estudou o teor de humidade presente na matéria-prima, que constitui a principal fonte de possíveis variações dimensionais nas caixas de entrada e saída de ar. Devido ao elevado número de referências de matéria-prima que são utilizadas para a produção, e à impossibilidade de estudá-las a todas individualmente, foi elaborado um Diagrama de Pareto de modo a priorizar as referências de matéria-prima tendo em conta o seu consumo médio diário. Realizada esta análise, selecionou-se então uma das referências de matéria-prima para o estudo do teor de humidade, que representa aproximadamente 50% do consumo médio diário total.

No decorrer desta fase preparatória, efetuaram-se dois tipos de análise ao teor de humidade presente na referência de matéria-prima em estudo — Análises Pré-Secagem e Pós-Secagem. Na Análise Pré-Secagem, recorreu-se a uma tabela ANOVA - *One Way* para averiguar possíveis diferenças significativas entre o teor de humidade presente em cinco *big bags* que se preparavam para ser utilizados para a produção, com o intuito de analisar potenciais misturas de matéria-prima com características diferentes. Este estudo permitiu concluir que existem diferenças significativas entre as médias de teor de humidade na matéria-prima contida em cada um dos cinco *big bags*, sendo, por isso, plausível deduzir que o teor de humidade da matéria-prima depende do *big bag* do qual provém. Na Análise Pós-Secagem, efetuou-se um controlo estatístico do processo de secagem da matéria-prima, monitorizando o teor de humidade presente no material à saída da estufa, através da aplicação de cartas de controlo Q(X) e Q(MR) devido ao número restrito de dados passíveis de recolha. Através desta análise, foi possível

concluir que o processo de secagem da matéria-prima não se encontra sob controlo estatístico, tendo ocorrido duas causas especiais na carta Q(X). Face ao aparecimento destas ocorrências involuntárias, foram sugeridas possíveis fontes de instabilidade no processo de secagem, tendo a informação sido sintetizada através da elaboração de um Diagrama de *Ishikawa*. Entre as potenciais causas de instabilidade, estão, por exemplo: as diferenças significativas observadas entre as médias de teor de humidade presente em cada *big bag*; o possível desgaste do filtro de sílica que auxilia na retenção de humidade na estufa; e incrementos inesperados da cadência de consumo de matéria-prima, devido ao aumento do número de máquinas de injeção em utilização, que originam um menor tempo de secagem do material na estufa.

No seguimento das análises relativas à matéria-prima, e da passagem dos resultados obtidos aos responsáveis pela área de injeção, iniciou-se o estudo do processo de Moldação por Injeção. Para a correta implementação do Controlo Estatístico do Processo, foi desenvolvido um plano de controlo no qual se estabeleceram as diretrizes para a recolha de dados da produção, relacionadas com a dimensão amostral, a frequência de amostragem, os equipamentos de medição e as condições da recolha e da medição. Estando todas as informações necessárias acopladas, iniciou-se a recolha de dados das cinco características de cada referência de caixa para a Fase I, num primeiro momento, e para a Fase II, numa etapa posterior, do Controlo Estatístico Univariado e Multivariado. Na Fase I do *SPC* Univariado, foram construídas cartas da média (cartas \bar{X}) e do desvio padrão (cartas S), e na Fase II elaboradas cartas $Z_{\bar{X}}$ e W_S . No caso do *MSPC*, elaboraram-se cartas T^2 para ambas as fases.

Ao longo da Fase I do Controlo Estatístico Univariado, apenas foi possível estimar os parâmetros e estudar a capacidade dos processos das referências de caixas D72 501 e D72 502, devido a irregularidades observadas no caso da referência A94 501. A análise da capacidade dos processos revelou que, em ambas as referências de produto, todas as características apresentam processos capazes, dado que $C_p > 1,33$ e $C_{pk} > 1,33$. Observou-se que à exceção da característica C2 da referência D72 502, onde se verifica a condição $(C_{pk})_I \cong (C_{pk})_S$, as restantes características apresentam processos não centrados com os valores nominais. Tais factos constituem importantes oportunidades de melhoria, que indicam que se deve orientar os esforços para uma regulação adequada da média dos processos, de modo a que aproxime cada vez mais do *target* pretendido.

Como mencionado, não foi possível estimar os parâmetros e analisar a capacidade dos processos das cinco características da referência de caixa A94 501. Através da observação das cartas de controlo da Fase I de cada característica desta referência, foi notória uma situação de estratificação, caracterizada pela disposição da grande maioria dos pontos em torno da linha central. Esta situação alertou para uma possível recolha de amostras com unidades heterogéneas. Dado que para uma correta estimação dos parâmetros de um processo é necessário assegurar que os dados utilizados são pertencentes a uma única distribuição, procedeu-se à análise das caixas provenientes de cada uma das cavidades do molde. Inicialmente, determinaram-se algumas estatísticas básicas relativas às cinco características das

caixas provenientes de cada cavidade, cujos resultados evidenciaram as suposições feitas. Posteriormente, foram realizados cinco testes de Kolmogorov-Smirnov (K-S 2) para comparação de cada par de amostras, que permitiram concluir que os dados recolhidos das caixas de cada uma das cavidades não são provenientes da mesma população, pois possuem distribuições diferentes. Uma vez comprovada a recolha de amostras com unidades heterogéneas, foram identificadas potenciais medidas que permitam eliminar as diferenças observadas, tendo sido comunicadas aos responsáveis da área de injeção. Face às anomalias verificadas na referência A94 501, não foi efetuado o Controlo Estatístico Multivariado nem a monitorização do processo, na Fase II.

No decorrer da Fase I do *MSPC*, foi observada a presença de algumas causas especiais nas cartas T^2 que traduziam as causas invulgares verificadas na Fase I do *SPC* Univariado. Relativamente à análise da capacidade dos processos, conclui-se que, tanto para a referência de produto D72 501 e D72 502, os processos apresentam capacidade potencial, dado que $C_{pM} > 1,33$. Constata-se também que $LI = 1$, respeitando-se outra condição imprescindível à capacidade dos processos. No entanto, $PV \cong 0$ o que sugere que os processos estão bastante longe de se encontrarem centrados, analogamente àquilo que se verificou na Fase I do *SPC* Univariado. Deste modo, os processos não se podem considerar como capazes, dado que a centralidade dos mesmos é condição necessária no Estudo Multivariado. A informação foi transmitida à empresa, porém não foi possível aplicar medidas corretivas, no imediato, de modo a corrigir os processos previamente ao início da Fase II.

Dada por concluída a Fase I de ambos os Estudos, iniciou-se a segunda fase do *SPC* Univariado e *MSPC*, com o intuito de controlar o processo em tempo real, segundo duas abordagens distintas, monitorizando o seu comportamento à medida que se recolhiam os dados da produção. Foram observadas algumas causas especiais, tanto relativas a características da referência D72 501 como da referência D72 502. No caso univariado, observou-se que, em todos os instantes, os processos possuem capacidade para produzir de acordo com as especificações técnicas (dado que $(Z_S)_j > 3$ e $(Z_I)_j < 3$), apesar de se encontrarem quase sempre longe de estarem centrados com o valor nominal. No caso da característica C1, a referência D72 502 apresenta índices de capacidade inferiores $(Z_I)_j$ muito próximos de -3, estando na iminência de se tornar num processo não capaz. O mesmo se passa com a referência D72 501, mas no caso da característica C2. Deste modo, foi aconselhado um acompanhamento próximo e uma atenção redobrada à evolução futura destes processos. Relativamente às causas especiais observadas, de realçar a maior quantidade de anomalias presente nas cartas relativas às características de comprimento (C1 e C2). No caso das características de largura (L1 e L2), foi observado uma situação de sobredimensionamento na referência D72 502, que foi colmatada através da diminuição da pressão de injeção e o aumento do valor de pressão de fecho do molde. No caso do Estudo Multivariado, foi necessário recorrer ao método da estatística d para identificar qual(ais) a(s) característica(s) responsável(eis) por tais ocorrências anómalas. Após essa identificação, constatou-se que as características de comprimento (C1 e C2) foram aquelas que

mais vezes contribuíram para situações invulgares, refletindo, mais uma vez, as ocorrências observadas no Estudo Univariado. Particularmente a característica C1, que contribuiu para a ocorrência de variações anómalas no processo em sete dos oito casos observados. No sentido inverso, a Massa apenas contribuiu significativamente para o aparecimento de duas das oito situações fora de controlo verificadas. Em suma, o Estudo Multivariado revelou-se mais sensível na deteção de causas especiais de variação, pois detetou mais uma irregularidade que o Estudo Univariado, revelando, por isso, um controlo mais preciso do processo. A implementação de cartas de controlo multivariadas demonstra possuir bastantes vantagens, não só na determinação de causas especiais que, nas cartas univariadas, não são detetadas, mas também na redução do número de documentos necessários para o controlo do processo, aglomerando a informação de todas as características numa quantidade menor de cartas, possibilitando um controlo mais eficiente.

Em suma, o presente projeto de investigação permitiu melhorar as operações de injeção da unidade fabril da empresa, em particular no processo de Moldação por Injeção e no processo de Secagem, fornecendo as bases para um melhor funcionamento das atividades deste setor e sensibilizando os responsáveis da mesma para as vantagens da implementação do *SPC*.

5.2. Recomendações para Trabalhos Futuros

Uma vez que as ferramentas estatísticas propostas se revelaram adequadas para o controlo das referências de caixas estudadas, recomenda-se a continuidade da implementação destas ferramentas a outras referências de produto e características que se considerem críticas.

Como estudos futuros, sugerem-se os seguintes:

- Aplicação do Desenho de Experiências (DOE, *Design of Experiments*) no processo de secagem do material na estufa, com fatores de dois ou três níveis, de modo a selecionar os melhores níveis de temperatura e tempo de secagem para cada tipo de material, a fim de evitar a instabilidade no processo que se observou nas análises efetuadas;
- Estudo pormenorizado do processo de injeção da referência A94 501, face à validação da recolha de amostras com unidades heterogéneas (pertencentes a diferentes populações/distribuições). Para tal, sugere-se a investigação das possíveis fontes de variação indicadas no Ponto d) da Secção 4.3.3.1.
- Análise da independência dos dados, através, por exemplo, da aplicação da Função de Auto-Correlação (FAC) e da Função de Auto-Correlação Parcial (FACP), de modo a analisar potenciais relações de dependência entre instantes consecutivos e selecionar as cartas de controlo mais adequadas aos dados recolhidos.

- Uma vez que interessa detetar pequenas alterações nos parâmetros dos processos associados às cinco características da qualidade, sugere-se a aplicação das cartas de controlo de somas acumuladas (CUSUM) e das cartas de controlo de médias móveis exponencialmente amortecidas (EWMA), assim como as cartas multivariadas MCUSUM e MEWMA.
- Por último, recomenda-se uma formação contínua aos colaboradores da empresa, de modo a sensibilizá-los para as vantagens da aplicação do Controlo Estatístico do Processo, não só a nível da redução da quantidade de produto não conforme, mas também na minimização da variabilidade dos processos. Torna-se importante instruir os trabalhadores acerca de como analisar cartas de controlo, principalmente na deteção de causas especiais e padrões não aleatórios, bem como quais as conseqüentes medidas corretivas que necessitam de aplicar no caso da ocorrência dessas irregularidades nos processos.

Referências Bibliográficas

- Alt, F. B. (1985) 'Multivariate Quality Control', Encyclopedia of the Statistical Series, Vol. 6, pp. 110–122.
- Autotech (2016). Intercooler Failures. Acedido a 4 de maio de 2018, disponível em <https://autotechnician.co.uk/intercooler-failures/>
- Box, G. E. P. and Cox, D. R. (1964) 'An Analysis of Transformations', Journal of the Royal Statistical Society, Series B 2, pp. 211–246.
- Bryce, D. M. (1998). Plastic Injection Molding: Mold Design and Construction Fundamentals, Society of Manufacturing Engineers, Vol III.
- Burr, I. W. (1967). "The Effect of Non-Normality on Constants for \bar{X} and R Charts", Industrial Quality Control, Vol. 23, pp. 563-569.
- Chandra, M. J. (2001). Statistical Quality Control, CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Chou, Y-M., Polansky, A. M. e Mason, R. L. (1998). Transforming Non-Normal Data to Normality in Statistical Process Control, Journal of Quality Technology, Vol. 30, No. 2.
- Clements, J. A. (1989). "Process capability calculations for non-normal distributions". Quality Progress, Vol.22, pp.95-100.
- Conover, W. J. (1999). Practical Nonparametric Statistics, 3ª Edição, John Wiley & Sons, Inc.
- Crosby, P. B. (1979) Quality is Free. New York: McGraw-Hill, Inc.
- Deming, W. E. (1986). Out of the Crisis, Center for Advanced Engineering Study, Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology.
- Design for Manufacture (2012). Design Considerations. Acedido a 20 de maio de 2018, disponível em <http://designformanufacture.blogspot.com/2012/11/design-considerations-injection-molding.html>.
- Doty, L. A. (1996), Statistical Process Control, 2ª Edição, Industrial Press, Inc, New York.
- Down, M. H., Kerkstra, T., Cvetkovski, P. e Benham, D. R. (2005). Statistical Process Control: Reference Manual, 2ª Edição, DaimlerChrysler Company, Ford Motor Corporation and General Motors Corporation.
- Durant, W. (1926). The Story of Philosophy: The Lives and Opinions of the Greater Philosophers. Simon & Schuster, New York.

- Feigenbaum, A. V. (1981). Total Quality Control, 3ª Edição, McGraw Hill, Inc.
- Fisher, S. R. (1955). Statistical Methods and Scientific Induction, Journal of the Royal Statistical Society Series B (Methodological), Vol.17 pp. 69-78.
- Gomes, P. J. (2004). "A evolução do conceito de qualidade: dos bens manufacturados aos serviços de informação", Associação Portuguesa de Bibliotecários, Arquivistas e Documentalistas (BAD), N.2, pp. 6-18.
- Guimarães, R. C. e Cabral, J. A. (2007). Estatística, McGraw-Hill.
- Harada, J. (2004). Moldes para Injeção de Termoplásticos: Projetos e Princípios Básicos, Artiber, São Paulo.
- Hayter, A. J., e Tsui, K.-L. (1994). "Identification and quantification in multivariate quality control problems", Journal of Quality Technology, Vol. 26, pp.197-208.
- Hotelling, H. (1947) "Multivariate Quality Control", Techniques of Statistical Analysis. Edited by Eisenhart, Hastay, and Wallis. New York: McGraw-Hill, Inc.
- Ishikawa, K. (1982). Guide to Quality Control, Asian Productivity, New York.
- Jackson, J. E. (1980) "Principal Components and Factor Analysis: Part I - Principal Components", Journal of Quality Technology, Vol. 12, pp. 201–213.
- Jackson, J. E. (1981a) "Principal Components and Factor Analysis: Part II - Additional Topics Related to Principal Components", Journal of Quality Technology, Vol. 13, pp. 46–58.
- Jackson, J. E. (1981b) "Principal Components and Factor Analysis: Part III - Whats is Factor Analysis?", Journal of Quality Technology, Vol. 13, pp. 125–130.
- Jackson, J. E. (1985) "Multivariate Quality Control", Communications in Statistics - Theory and Methods, Vol. 14, pp. 2657–2688.
- JDEUS (2014). A Empresa. Acedido a 28 de abril de 2018, disponível em <http://www.jdeus.com/Company>.
- JDEUS (2014a). Produtos. Acedido a 2 de maio de 2018, disponível em <http://www.jdeus.com/Products>.
- Juran, J. M. (1999). Juran's Quality Control Handbook, 5ª Edição, McGraw-Hill, New York, USA.
- Kane, V. E. (1986). "Process capability indices". Journal of Quality Technology, Vol.18, pp. 41-52.

- Kolarik, W. J. (1995). *Creating Quality: Concepts, systems, Strategies, and tools*. McGRAW-HILL.
- Kotz, S. e Johnson, N. L. (2002) "Process Capability Indices - A Review, 1992-2000", *Journal of Quality Technology*, Vol. 34, pp. 2–19.
- Lilliefors, H. W. (1976). "On the Kolmogorov-Smirnov Test for Normality with Mean and Variance Unknown", *Journal of the American Statistical Association*, Vol.62 (318), pp. 399-402.
- Mason, R. L., Tracy, N. D., e Young, J. C. (1995). "Decomposition of T2 for Multivariate Control Chart Interpretation", *Journal of Quality Technology*, Vol. 27, pp. 99-108.
- Mast, J. d. (2008). "A history of industrial statistics and quality and efficiency improvement. In T. G. S. Coleman", *Statistical Practice in Business and Industry*, John Wiley & Sons, Ltd, West Sussex, pp. 14-27.
- McCormack, D. W., Harris, I. R., Hurwitz, A. M. e Spagon, P. D. (2000) "Capability Indices for Non-Normal Data", *Quality Engineering*, Vol. 12(4), pp. 489–495.
- Mitra, A. (2016) *Fundamentals of Quality Control and Improvement*. 4ª Edição. New York: Wiley & Sons.
- Montgomery, D. C. (2009). *Introduction to Statistical Quality Control*, 6ª Edição, John Wiley & Sons, Inc., New York, USA.
- Montgomery, D. C., e Runger, G. C. (2003). *Applied Statistics and Probability for Engineers*, 3ª Edição, John Wiley & Sons, New York.
- Notícias ao Minuto (2018). *Economia*. Acedido a 1 de junho de 2018, disponível em <https://www.noticiasao minuto.com/economia/1011621/costa-industria-metalomecanica-e-o-principal-setor-exportador-do-pais>
- Oakland, J. S. (2003). *Statistical Process Control*, 5ª Edição, Butterworth-Heinemann, Oxford, UK.
- Pearn, W. L. e Chen, K. S. (1995). "Estimating Process Capability Indices For Non-Normal Pearsonian Populations", *Quality and Reliability Engineering International*, Vol. 11, pp. 386-388.
- Pearn, W. L., Chen, K. S. e Lin, G. H. (1999). "A Generalizations of Clements' Method for Non-Normal Pearsonian Processes with Asymmetric Tolerances", *International Journal of Quality & Reliability Management*, Vol. 16(5), pp. 507-521.

- Pereira, Z. L e Requeijo, J. G. (2012). *Qualidade: Planeamento e Controlo Estatístico de Processos*, 2ª Edição, FFCT – Fundação da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Caparica.
- Quesenberry, C. P. (1997). *SPC methods for quality improvement*. John Wiley & Sons, Inc., New York, USA.
- Rigdon, S. E., Curtis, E. N. e Champ, C. W. (1994). "Design Strategies for Individuals and Moving Range Control Charts", *Journal of Quality Technology*, Vol. 26, pp. 274-287.
- Rosato, D.V. e Rosato, M.G. (2000). *Injection Molding Handbook*, 3ª Edição, Kluwer Academic Publishers, USA.
- Ross, S. M. (2004). *Introduction to Probability and Statistics for Engineers and Scientists*, 3ª Edição, Elsevier Inc.
- Runger, G. C., Alt, F. B. e Montgomery, D. C. (1996) "Contributors to a Multivariate Statistical Process Control Signal", *Communications in Statistics - Theory and Methods*, Vol. 25, pp. 2203–2213.
- Sahai, H. e Ageel, M. I. (2000). *The analysis of variance: fixed, random and mixed models*, Springer Science+Business Media, New York.
- Schneider, H., Pruett, J. e Lagrange, C. (1995). "Uses of Process Capability Indices in the Supplier Certification Process", *Quality Engineering*, Vol. 8(2), pp. 225-235.
- Shahriari, H., Hubele, N. F. e Lawrence, F. P. (1995) "A Multivariate Process Capability Vector", in *Proceedings of the 4th Industrial Engineering Research Conference*. Nashville, pp. 303–308.
- Shewart, W. A. (1931). *Economic Control of Quality of Manufactured Product*, D. Van Nostrand Company, Inc., New York.
- Siegel, S. e Castellan Jr., N. J. (1988). *Nonparametric Statistics for the Behavioral Sciences*, McGraw-Hill.
- Woodall, W. H. (2000). "Controversies and Contradictions in Statistical Process Control". *Journal of Quality Technology*, Vol. 32, pp.341-350.
- Wright, P. A. (1995) 'A Process Capability Index Sensitive to Skewness', *Journal of Statistical Computation and Simulation*, Vol. 52, pp. 195–203.
- Zwick, D. (1995) 'A Hybrid Method for Fitting distributions to Data and its Use in Computing Process Capability Indices', *Quality Engineering*, Vol. 7(3), pp. 601–613.

Anexos

Anexo A: Tabelas do Teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S)

a) Distribuição da Estatística D (Parâmetros Conhecidos)

Tabela A.1 - Valores críticos da distribuição da estatística $D = \sup |S(x) - F_0(x)|$ para amostras de dimensão n e populações Normais com parâmetros conhecidos (Pereira e Requeijo, 2012).

n	α					n	α				
	0,20	0,10	0,05	0,02	0,01		0,20	0,10	0,05	0,02	0,01
1	0,9000	0,9500	0,9750	0,9900	0,9950	21	0,2262	0,2586	0,2872	0,3210	0,3443
2	0,6838	0,7764	0,8419	0,9000	0,9293	22	0,2212	0,2528	0,2809	0,3139	0,3367
3	0,5648	0,6360	0,7076	0,7846	0,8290	23	0,2165	0,2475	0,2750	0,3073	0,3295
4	0,4927	0,5652	0,6239	0,6889	0,7342	24	0,2121	0,2424	0,2693	0,3010	0,3229
5	0,4470	0,5095	0,5633	0,6272	0,6685	25	0,2079	0,2377	0,2640	0,2952	0,3166
6	0,4104	0,4680	0,5193	0,5774	0,6166	26	0,2040	0,2332	0,2591	0,2896	0,3106
7	0,3815	0,4361	0,4834	0,5384	0,5758	27	0,2003	0,2290	0,2544	0,2844	0,3050
8	0,3583	0,4096	0,4543	0,5065	0,5418	28	0,1968	0,2250	0,2499	0,2794	0,2997
9	0,3391	0,3875	0,4300	0,4796	0,5133	29	0,1935	0,2212	0,2457	0,2747	0,2947
10	0,3226	0,3687	0,4093	0,4566	0,4889	30	0,1903	0,2176	0,2417	0,2702	0,2899
11	0,3083	0,3524	0,3912	0,4367	0,4677	31	0,1873	0,2141	0,2379	0,2660	0,2853
12	0,2958	0,3382	0,3754	0,4192	0,4491	32	0,1845	0,2109	0,2342	0,2619	0,2801
13	0,2847	0,3255	0,3614	0,4036	0,4325	33	0,1817	0,2077	0,2308	0,2580	0,2768
14	0,2748	0,3142	0,3489	0,3897	0,4176	34	0,1791	0,2047	0,2274	0,2543	0,2728
15	0,2659	0,3040	0,3376	0,3771	0,4042	35	0,1766	0,2019	0,2243	0,2507	0,2690
16	0,2578	0,2947	0,3273	0,3657	0,3920	36	0,1742	0,1991	0,2212	0,2473	0,2653
17	0,2504	0,2863	0,3180	0,3553	0,3809	37	0,1719	0,1965	0,2183	0,2440	0,2618
18	0,2436	0,2785	0,3094	0,3457	0,3706	38	0,1697	0,1939	0,2154	0,2409	0,2584
19	0,2374	0,2714	0,3014	0,3369	0,3612	39	0,1675	0,1915	0,2127	0,2379	0,2552
20	0,2316	0,2647	0,2941	0,3287	0,3524	40	0,1655	0,1891	0,2101	0,2349	0,2521

Para $n > 40$ os valores críticos de D são determinados aproximadamente por

α				
0,20	0,10	0,05	0,02	0,01
$1,07/\sqrt{n}$	$1,22/\sqrt{n}$	$1,36/\sqrt{n}$	$1,52/\sqrt{n}$	$1,63/\sqrt{n}$

b) Distribuição da Estatística D (Lilliefors)

Tabela A.2 - Valores críticos da distribuição da estatística $D = \sup |S(x) - F_0(x)|$ para populações Normais e parâmetros estimados a partir de amostras de dimensão n (Pereira e Requeijo, 2012).

n	α				
	0,20	0,15	0,10	0,05	0,01
4	0,300	0,319	0,352	0,381	0,417
5	0,285	0,299	0,315	0,337	0,405
6	0,265	0,277	0,294	0,319	0,364
7	0,247	0,258	0,276	0,300	0,348
8	0,233	0,244	0,261	0,285	0,331
9	0,223	0,233	0,249	0,271	0,311
10	0,215	0,224	0,239	0,258	0,294
11	0,206	0,217	0,230	0,249	0,284
12	0,199	0,212	0,223	0,242	0,275
13	0,190	0,202	0,214	0,234	0,268
14	0,183	0,194	0,207	0,227	0,261
15	0,177	0,187	0,201	0,220	0,257
16	0,173	0,182	0,195	0,213	0,250
17	0,169	0,177	0,189	0,206	0,245
18	0,166	0,173	0,184	0,200	0,239
19	0,163	0,169	0,179	0,195	0,235
20	0,160	0,166	0,174	0,190	0,231
25	0,149	0,153	0,165	0,180	0,203
30	0,131	0,136	0,144	0,161	0,187
> 30	$\frac{0,736}{\sqrt{n}}$	$\frac{0,768}{\sqrt{n}}$	$\frac{0,805}{\sqrt{n}}$	$\frac{0,886}{\sqrt{n}}$	$\frac{1,031}{\sqrt{n}}$

Anexo B: Tabela do Teste de Kolmogorov-Smirnov para comparação de duas amostras (K-S 2)

Tabela B.1 - Valores críticos para o Teste K-S 2 (Siegel e Castellan, 1988).

Critical values for two-tailed rejection region $mmD_{m,n} \geq c$. The upper, middle, and lower numbers are $c_{.10}$, $c_{.05}$, and $c_{.01}$ for each (m, n) entry.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
1																										
2					10	12	14	16	18	18	20	22	24	24	26	28	30	32	34	32	34	36	38	38	40	42
3			9	12	15	18	21	21	24	27	30	33	36	33	36	39	42	39	42	45	48	48	48	51	54	57
4			12	16	20	24	28	28	33	36	40	44	48	44	48	52	56	52	56	60	60	60	62	64	68	72
5		10	15	20	25	30	35	35	40	45	50	55	55	60	65	70	70	72	76	80	80	80	84	88	92	97
6		12	18	24	30	36	42	42	48	55	60	66	72	72	78	84	88	88	92	96	96	96	100	104	108	112
7		14	21	28	35	42	48	48	55	62	69	76	82	82	88	94	99	100	104	108	108	112	116	120	124	129
8		16	24	32	40	48	55	55	62	70	78	84	90	90	96	102	108	112	116	120	120	124	128	132	136	141
9		18	27	36	45	54	62	62	70	78	84	90	96	96	102	108	114	118	122	126	126	130	134	138	142	147
10		18	28	38	48	58	66	66	74	82	88	94	100	100	106	112	118	122	126	130	130	134	138	142	146	151
11		20	30	40	50	60	68	68	76	84	90	96	102	102	108	114	120	124	128	132	132	136	140	144	148	153
12		22	33	44	54	64	72	72	80	88	94	100	106	106	112	118	124	128	132	136	136	140	144	148	152	157
13		24	36	48	60	72	80	80	88	96	102	108	114	114	120	126	132	136	140	144	144	148	152	156	160	165

Critical values for two-tailed rejection region $mnD_{m,n} \geq c$. The upper, middle, and lower numbers are $c_{.10}$, $c_{.05}$, and $c_{.01}$ for each (m, n) entry.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
14	24	26	33	38	42	48	56	58	63	68	73	78	78	88	92	96	100	104	110	114	126	124	127	132	136
15	26	28	36	40	44	51	56	60	69	75	84	87	92	105	101	111	108	111	114	125	126	138	142	146	150
16	28	30	39	44	48	54	59	72	69	76	80	88	91	106	101	112	109	116	120	128	130	136	141	145	149
17	30	32	42	48	55	61	68	80	84	89	96	101	106	121	116	128	133	133	133	140	145	150	157	168	167
18	32	34	45	51	58	65	73	84	88	99	106	110	127	134	142	143	136	141	146	151	157	163	168	173	173
19	32	36	48	55	62	70	76	87	94	108	118	126	137	140	147	154	164	164	176	182	189	196	204	216	216
20	34	38	51	58	66	74	80	91	98	113	122	130	138	148	152	160	166	176	180	190	199	204	209	218	224
21	36	40	54	61	69	77	83	94	104	120	127	136	144	154	160	168	173	180	189	199	209	217	227	235	244
22	38	42	57	64	72	80	87	98	107	125	132	141	150	161	166	175	180	189	199	209	219	227	237	244	250
23	40	44	60	67	75	83	91	102	111	130	137	146	156	166	173	180	187	196	204	214	223	232	242	250	256
24	42	46	63	70	78	86	94	106	115	135	142	151	161	170	177	184	190	198	206	216	225	235	245	253	262
25	44	48	66	73	81	89	97	109	118	139	146	155	164	173	180	187	193	200	208	218	228	237	247	256	266
	46	50	69	76	84	92	100	112	121	142	149	157	166	174	181	187	193	200	208	218	228	237	247	256	266
	48	52	71	78	86	94	102	114	123	144	151	159	167	175	182	188	194	200	208	218	228	237	247	256	266
	50	54	74	81	89	97	105	117	126	147	154	162	170	178	185	191	197	203	210	219	228	237	247	256	266
	52	56	77	84	92	100	108	116	124	145	152	160	168	176	183	189	195	201	208	217	226	235	244	253	262
	54	58	80	87	95	103	111	119	127	148	155	163	171	179	186	192	198	204	211	220	229	238	247	256	265
	56	60	83	90	98	106	114	122	130	150	157	165	173	180	187	193	199	205	212	221	230	239	248	257	266
	58	62	86	93	101	109	117	125	133	153	160	168	176	183	189	195	201	207	214	223	232	241	250	259	268
	60	64	89	96	104	112	120	128	136	156	163	171	179	186	192	198	204	210	217	226	235	244	253	262	271
	62	66	92	99	107	115	123	131	139	159	166	174	182	189	195	201	207	213	220	229	238	247	256	265	274
	64	68	95	102	110	118	126	134	142	162	169	177	185	192	198	204	210	216	223	232	241	250	259	268	277
	66	70	98	105	113	121	129	137	145	165	172	180	188	195	201	207	213	219	226	235	244	253	262	271	280
	68	72	101	108	116	124	132	140	148	168	175	183	190	197	203	209	215	221	228	237	246	255	264	273	282
	70	74	104	111	119	127	135	143	151	171	178	186	193	200	206	212	218	224	231	239	248	257	266	275	284
	72	76	107	114	122	130	138	146	154	174	181	189	196	203	209	215	221	227	234	242	251	260	269	278	287
	74	78	110	117	125	133	141	149	157	177	184	191	198	205	211	217	223	229	236	244	253	262	271	280	289
	76	80	113	120	128	136	144	152	160	180	187	194	201	208	214	220	226	232	239	247	256	265	274	283	292
	78	82	116	123	131	139	147	155	163	183	190	197	204	211	217	223	229	235	242	250	259	268	277	286	295
	80	84	119	126	134	142	150	158	166	186	193	200	207	214	220	226	232	238	245	253	262	271	280	289	298
	82	86	122	129	137	145	153	161	169	189	196	203	210	217	223	229	235	241	248	256	265	274	283	292	301
	84	88	125	132	140	148	156	164	172	192	199	206	213	220	226	232	238	244	251	259	268	277	286	295	304
	86	90	128	135	143	151	159	167	175	195	202	209	216	223	229	235	241	247	254	262	271	280	289	298	307
	88	92	131	138	146	154	162	170	178	198	205	212	219	226	232	238	244	250	257	265	274	283	292	301	310
	90	94	134	141	149	157	165	173	181	201	208	215	222	229	235	241	247	253	260	268	277	286	295	304	313
	92	96	137	144	152	160	168	176	184	204	211	218	225	232	238	244	250	256	263	271	280	289	298	307	316
	94	98	140	147	155	163	171	179	187	207	214	221	228	235	241	247	253	259	266	274	283	292	301	310	319
	96	100	143	150	158	166	174	182	190	210	217	224	231	238	244	250	256	262	269	277	286	295	304	313	322
	98	102	146	153	161	169	177	185	193	213	220	227	234	241	247	253	259	265	272	280	289	298	307	316	325
	100	104	149	156	164	172	180	188	196	216	223	230	237	244	250	256	262	268	275	283	292	301	310	319	328
	102	106	152	159	167	175	183	191	199	219	226	233	240	247	253	259	265	271	278	286	295	304	313	322	331
	104	108	155	162	170	178	186	194	202	222	229	236	243	250	256	262	268	274	281	289	298	307	316	325	334
	106	110	158	165	173	181	189	197	205	225	232	239	246	253	259	265	271	277	284	292	301	310	319	328	337
	108	112	161	168	176	184	192	200	208	228	235	242	249	256	262	268	274	280	287	295	304	313	322	331	340
	110	114	164	171	179	187	195	203	211	231	238	245	252	259	265	271	277	283	290	298	307	316	325	334	343
	112	116	167	174	182	190	198	206	214	234	241	248	255	262	268	274	280	286	293	301	310	319	328	337	346
	114	118	170	177	185	193	201	209	217	237	244	251	258	265	271	277	283	289	296	304	313	322	331	340	349
	116	120	173	180	188	196	204	212	220	240	247	254	261	268	274	280	286	292	299	307	316	325	334	343	352
	118	122	176	183	191	199	207	215	223	243	250	257	264	271	277	283	289	295	302	310	319	328	337	346	355
	120	124	179	186	194	202	210	218	226	246	253	260	267	274	280	286	292	298	305	313	322	331	340	349	358
	122	126	182	189	197	205	213	221	229	249	256	263	270	277	283	289	295	301	308	316	325	334	343	352	361
	124	128	185	192	200	208	216	224	232	2															

Anexo C: Constantes e Fatores para as Cartas de Controlo de Variáveis Tradicionais

Tabela C.1 – Constantes e Fatores para Cartas de Controlo de Variáveis (Pereira e Requeijo, 2012)

Dimensão Amostral <i>n</i>	Carta da Média				Carta do Desvio Padrão				Carta da Amplitude					
	Factores Limites Controlo		Factores Linha Central		Factores para Limites de Controlo									
	A	A ₂	A ₃	d ₃	c ₄	B ₃	B ₄	B ₅	B ₆	d ₃	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄
2	2,121	1,881	2,659	1,128	0,7979	0	3,267	0	2,606	0,853	0	3,686	0	3,267
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	1,693
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	0,497	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

Para $n > 25$

$$A = \frac{3}{\sqrt{n}} \quad A_2 = \frac{3}{c_4 \sqrt{n}} \quad c_4 = \frac{4(n-1)}{4n-3} \quad B_3 = 1 - \frac{3\sqrt{1-c_4^2}}{c_4} \quad B_4 = 1 + \frac{3\sqrt{1-c_4^2}}{c_4}$$

$$B_5 = c_4 - 3\sqrt{1-c_4^2} \quad B_6 = c_4 + 3\sqrt{1-c_4^2}$$

Anexo D: Dados Recolhidos

a) Análise Pós-Secagem

Tabela D.1 – Dados Recolhidos para a Análise Pós-Secagem

Nº Amostra	Teor de Humidade (%)
1	0,0256
2	0,0233
3	0,0381
4	0,0420
5	0,0298
6	0,0422
7	0,0369
8	0,0488
9	0,0306
10	0,0401
11	0,0287
12	0,0352
13	0,1033
14	0,0711
15	0,0514
16	0,0586
17	0,0479
18	0,0421
19	0,0744
20	0,0477
21	0,0358
22	0,0507
23	0,0353
24	0,0510

b) Fase I do *SPC* e *MSPC* para a referência A94 501

	Cav. 1
	Cav. 2

Tabela D.2 – Dados recolhidos para a Massa da referência A94 501

Nº Amostra	Ref. Produto	Massa (g)					
		X1	X2	X3	X4	X5	X6
1	A94 501	260,258	263,709	260,467	260,200	263,715	263,708
2	A94 501	263,751	260,293	263,793	260,337	263,789	260,341
3	A94 501	263,727	263,739	260,251	263,822	260,333	260,356
4	A94 501	260,351	263,788	263,775	263,774	260,361	260,325
5	A94 501	260,331	263,791	260,345	263,805	260,384	263,398
6	A94 501	263,822	260,453	260,498	263,709	263,791	260,317
7	A94 501	260,481	263,741	263,712	260,368	263,804	260,410
8	A94 501	264,172	260,566	264,208	260,645	264,194	260,607
9	A94 501	260,541	264,237	260,571	264,24	260,548	264,291
10	A94 501	260,555	264,282	261,679	265,171	260,63	264,331
11	A94 501	260,55	264,166	260,484	264,138	260,504	264,192
12	A94 501	260,542	264,182	260,552	264,173	260,546	264,166
13	A94 501	260,56	264,215	260,52	264,174	260,527	264,159
14	A94 501	260,497	264,166	260,457	264,195	260,461	264,171
15	A94 501	260,489	264,193	260,524	264,152	260,536	264,198
16	A94 501	260,395	260,715	263,748	263,763	263,725	260,391
17	A94 501	263,584	260,303	263,671	260,378	263,651	260,388
18	A94 501	260,421	260,369	263,69	263,712	260,422	263,704
19	A94 501	263,665	260,371	263,67	260,388	263,684	260,416
20	A94 501	260,393	263,676	260,391	263,631	260,376	263,608
21	A94 501	263,669	260,428	263,701	260,39	263,718	260,421
22	A94 501	260,307	264,041	260,801	264,078	260,789	263,981
23	A94 501	263,797	260,581	263,984	260,561	263,839	260,542
24	A94 501	259,954	264,493	260,282	263,788	260,351	264,155
25	A94 501	260,359	262,239	260,31	261,743	259,966	261,62
26	A94 501	260,305	262,412	260,02	262,732	260,178	262,369
27	A94 501	260,935	263,026	260,532	262,885	260,433	262,593
28	A94 501	260,899	263,288	260,869	263,142	261,095	263,245
29	A94 501	261,033	263,355	260,805	263,256	260,872	263,306
30	A94 501	260,6	263,191	260,761	263,404	260,782	263,322

	Cav. 1
	Cav. 2

Tabela D.3 - Dados recolhidos para comprimento C1 da referência A94 501

Nº Amostra	Ref. Produto	C1 (mm)					
		X1	X2	X3	X4	X5	X6
1	A94 501	118,060	117,930	118,000	118,070	117,920	118,010
2	A94 501	118,050	118,070	118,050	118,040	117,920	118,050
3	A94 501	117,950	118,000	118,050	117,970	118,020	118,050
4	A94 501	118,040	118,030	118,030	117,950	118,030	118,050
5	A94 501	118,050	117,960	118,030	117,960	118,050	117,970
6	A94 501	118,050	117,980	118,070	117,990	118,030	118,040
7	A94 501	118,100	117,970	117,980	118,030	117,990	118,020
8	A94 501	118,01	118,08	118	118,05	118	118,05
9	A94 501	118,06	117,97	118,07	118,01	118,04	118
10	A94 501	118,04	117,95	118	117,97	118,04	117,97
11	A94 501	118,04	117,95	118,06	118	118,05	117,98
12	A94 501	118,05	118	118,07	118,01	118,04	117,95
13	A94 501	118,05	118,01	118,07	118	118,06	117,96
14	A94 501	118,06	118,01	118,05	118,02	118,05	118,03
15	A94 501	118,07	118,03	118,05	117,99	118,03	118,01
16	A94 501	118,07	118,05	118,1	118,04	118,02	118,06
17	A94 501	118,05	118,05	118,02	118,05	118,01	118,04
18	A94 501	118,03	118,1	118,03	118,04	118,06	118,01
19	A94 501	118	118,01	117,98	118,05	117,97	118,04
20	A94 501	118,05	118	118,05	118	118,07	117,97
21	A94 501	118,01	118,07	118,03	118,06	118	118,06
22	A94 501	118,02	117,95	118,02	117,98	118,02	117,97
23	A94 501	117,99	118,03	118	118,04	117,98	118,07
24	A94 501	118,04	117,93	118,07	117,97	118,05	117,96
25	A94 501	118,07	117,96	118,05	118	118,02	117,99
26	A94 501	118,06	117,92	118,06	117,97	118,05	118,01
27	A94 501	118,04	118	118,07	118,02	118,07	118,03
28	A94 501	118,05	117,98	118,03	117,96	118,03	118
29	A94 501	118	117,96	118,07	117,99	118,05	117,94
30	A94 501	118,09	118,01	118,06	118,02	118,09	117,98

	Cav. 1
	Cav. 2

Tabela D.4 - Dados recolhidos para comprimento C2 da referência A94 501

Nº Amostra	Ref. Produto	C2 (mm)					
		X1	X2	X3	X4	X5	X6
1	A94 501	117,980	117,830	117,810	117,970	117,780	117,770
2	A94 501	117,760	118,040	117,820	118,010	117,830	118,060
3	A94 501	117,800	117,800	117,970	117,840	118,010	118,040
4	A94 501	118,030	117,890	117,860	117,840	118,030	118,050
5	A94 501	118,050	117,830	118,100	117,790	118,020	117,870
6	A94 501	117,900	118,020	118,030	117,940	117,840	118,020
7	A94 501	117,970	117,850	117,840	117,820	117,860	117,960
8	A94 501	117,82	117,95	117,86	117,97	117,83	117,94
9	A94 501	118	117,86	118,01	117,85	117,98	117,88
10	A94 501	118,03	117,85	118	117,81	118,03	117,86
11	A94 501	118,03	117,85	118,06	117,86	118,03	117,86
12	A94 501	118,04	117,89	118,03	117,89	118,05	117,87
13	A94 501	118	117,87	118,05	117,87	118,05	117,84
14	A94 501	118,07	117,85	118,06	117,84	118,05	117,93
15	A94 501	117,96	117,83	117,99	117,85	118	117,82
16	A94 501	117,98	117,96	117,84	117,85	117,86	117,93
17	A94 501	117,9	118	117,91	118,01	117,92	118,03
18	A94 501	118,01	117,91	117,99	117,93	118	117,89
19	A94 501	117,94	118	117,89	117,98	117,93	118
20	A94 501	118,05	117,85	118,03	117,87	118,01	117,88
21	A94 501	117,89	118,06	117,86	118,05	117,9	118,04
22	A94 501	117,98	117,84	118,03	117,89	118,06	117,84
23	A94 501	117,96	118,03	117,9	118,01	117,9	118,02
24	A94 501	117,95	117,86	117,99	117,89	117,98	117,91
25	A94 501	117,94	117,88	118	117,92	117,95	117,86
26	A94 501	117,94	117,89	117,99	117,85	118	117,9
27	A94 501	117,99	117,88	117,97	117,9	118,01	117,88
28	A94 501	117,91	117,84	117,93	117,83	117,91	117,87
29	A94 501	117,96	117,88	117,98	117,86	117,93	117,87
30	A94 501	117,95	117,87	117,98	117,87	117,95	117,85

	Cav. 1
	Cav. 2

Tabela D.5 - Dados recolhidos para largura L1 da referência A94 501

Nº Amostra	Ref. Produto	L1 (mm)					
		X1	X2	X3	X4	X5	X6
1	A94 501	55,880	56,090	56,060	55,900	56,100	56,060
2	A94 501	56,090	55,950	56,080	55,930	56,060	55,880
3	A94 501	56,080	56,050	55,960	56,160	55,940	55,920
4	A94 501	55,910	56,040	56,080	56,090	55,930	55,930
5	A94 501	55,900	56,020	55,900	56,100	55,880	56,050
6	A94 501	56,050	55,830	55,970	56,050	56,070	55,790
7	A94 501	55,920	56,080	55,980	56,040	56,090	55,850
8	A94 501	56,05	55,91	56,04	55,93	56,07	55,87
9	A94 501	55,92	56,08	55,9	56,01	55,87	56,02
10	A94 501	55,88	56,03	55,9	56,05	55,87	56,04
11	A94 501	55,95	56,1	55,93	56,05	55,88	56,07
12	A94 501	55,94	56,12	55,91	56,04	55,88	56,01
13	A94 501	55,89	56,07	55,87	56,03	55,88	56,04
14	A94 501	55,91	56,09	55,9	56,1	55,86	56,06
15	A94 501	55,88	56,08	55,9	56,06	55,88	56,08
16	A94 501	55,96	55,88	56,28	56,19	56,13	55,9
17	A94 501	56,08	55,91	56,06	55,88	56,09	55,94
18	A94 501	55,91	56,1	55,93	56,16	55,88	56,04
19	A94 501	56,11	55,91	56,08	55,9	56,12	55,88
20	A94 501	55,9	56,09	55,86	56,11	55,9	56,07
21	A94 501	56,08	55,88	56,07	55,91	56,14	55,89
22	A94 501	55,88	56,04	55,89	56,08	55,93	56,09
23	A94 501	56,03	55,9	56,08	55,92	56,11	55,9
24	A94 501	55,93	56,07	55,94	56,05	55,96	56,08
25	A94 501	55,94	56,04	55,97	56	55,98	56,01
26	A94 501	55,85	56,02	55,9	56,07	55,91	56,01
27	A94 501	55,91	56,03	55,93	56,02	55,97	56,04
28	A94 501	55,9	56,07	55,91	56,03	55,96	56,05
29	A94 501	55,93	56,04	55,97	56,03	55,94	56,06
30	A94 501	55,86	56	55,91	55,99	55,91	56,04

	Cav. 1
	Cav. 2

Tabela D.6 - Dados recolhidos para largura L2 da referência A94 501

Nº Amostra	Ref. Produto	L2 (mm)					
		X1	X2	X3	X4	X5	X6
1	A94 501	56,130	56,000	55,960	56,130	55,980	55,950
2	A94 501	55,970	56,160	55,870	56,160	56,020	56,140
3	A94 501	56,030	55,960	56,130	55,980	56,160	56,180
4	A94 501	56,150	55,980	56,000	55,960	56,120	56,160
5	A94 501	56,190	55,980	56,180	55,980	56,170	55,990
6	A94 501	55,890	56,150	56,140	55,990	55,960	56,130
7	A94 501	56,170	56,010	55,910	56,030	55,910	56,150
8	A94 501	55,84	56,1	55,82	56,09	55,88	56,03
9	A94 501	56,09	55,89	56,06	55,86	56,11	55,92
10	A94 501	56,03	55,8	56,02	55,85	56,06	55,86
11	A94 501	56,08	55,9	56,1	55,93	56,11	55,89
12	A94 501	56,08	55,92	56,09	55,93	56,05	55,9
13	A94 501	56,09	55,91	56,1	55,91	56,06	55,88
14	A94 501	56,11	55,92	56,07	55,97	56,09	55,92
15	A94 501	56,03	55,95	56,1	56,01	56,06	55,98
16	A94 501	56,17	56,19	56,01	55,96	55,93	56,19
17	A94 501	55,9	56,2	55,91	56,21	55,93	56,16
18	A94 501	56,2	55,87	56,18	55,92	56,19	55,88
19	A94 501	55,92	56,19	55,9	56,17	55,94	56,18
20	A94 501	56,14	55,91	56,22	55,91	56,19	55,92
21	A94 501	55,9	56,17	55,9	56,17	55,89	56,16
22	A94 501	56,16	55,87	56,17	55,86	56,2	55,86
23	A94 501	55,89	56,17	55,86	56,2	55,87	56,17
24	A94 501	56,19	55,99	56,22	55,96	56,18	56
25	A94 501	56,15	55,92	56,17	55,94	56,2	55,9
26	A94 501	56,19	55,88	56,15	55,93	56,19	55,92
27	A94 501	56,22	55,95	56,23	55,92	56,24	55,91
28	A94 501	56,19	55,92	56,16	55,93	56,17	55,96
29	A94 501	56,17	55,89	56,18	55,92	56,15	55,89
30	A94 501	56,1	55,93	56,08	55,87	56,1	55,89

c) Fase I do SPC e MSPC para a referência D72 501

Tabela D.7 - Dados recolhidos para a Massa da referência D72 501

Nº Amostra	Ref. Produto	Massa (g)					
		X1	X2	X3	X4	X5	X6
1	D72 501	302,550	302,757	302,695	302,685	302,661	302,739
2	D72 501	302,695	302,626	302,817	302,679	302,702	302,658
3	D72 501	302,754	302,813	302,892	302,719	302,716	302,849
4	D72 501	302,732	302,870	302,751	302,828	302,869	302,847
5	D72 501	302,796	302,764	302,697	302,725	302,836	302,788
6	D72 501	302,866	302,849	302,74	302,813	302,864	302,805
7	D72 501	302,744	302,85	302,732	302,872	302,901	302,722
8	D72 501	302,788	302,977	302,875	302,889	302,796	302,82
9	D72 501	302,711	302,687	302,768	302,76	302,834	302,716
10	D72 501	302,881	302,72	302,796	302,76	302,758	302,658
11	D72 501	302,932	302,796	302,745	302,871	302,778	302,674
12	D72 501	302,759	302,844	302,868	302,763	302,741	302,655
13	D72 501	302,731	302,727	302,882	302,795	302,821	302,789
14	D72 501	302,942	302,882	302,759	302,863	302,783	302,983
15	D72 501	302,814	302,81	302,815	302,815	302,905	302,772
16	D72 501	302,782	302,852	302,803	302,824	302,755	302,79
17	D72 501	302,719	302,736	302,927	302,846	302,776	302,757
18	D72 501	302,753	302,726	302,878	302,935	302,801	302,766
19	D72 501	302,793	302,813	302,759	302,673	302,818	302,788
20	D72 501	302,787	302,935	302,808	302,886	302,775	302,758
21	D72 501	302,844	302,749	302,715	302,724	302,933	302,748
22	D72 501	302,865	302,753	302,709	302,867	302,781	302,657
23	D72 501	302,865	302,892	302,8	302,736	302,815	302,867
24	D72 501	302,805	302,713	302,804	302,87	302,885	302,994
25	D72 501	302,86	302,901	302,801	302,728	302,885	302,853
26	D72 501	302,809	303,014	302,999	302,854	302,901	302,706
27	D72 501	302,896	302,88	302,811	302,794	302,779	302,785
28	D72 501	302,798	302,817	302,784	302,701	302,737	302,867
29	D72 501	302,811	302,89	302,749	302,842	302,702	302,743
30	D72 501	302,903	302,827	302,895	302,852	302,763	302,89

Tabela D.8 - Dados recolhidos para o comprimento C1 da referência D72 501

Nº Amostra	Ref. Produto	C1 (mm)					
		X1	X2	X3	X4	X5	X6
1	D72 501	139,18	139,08	139,07	139,13	139,25	139,19
2	D72 501	139,19	139,11	139,05	139,09	139,13	139,16
3	D72 501	139,18	139,17	139,15	139,16	139,22	139,14
4	D72 501	139,22	139,05	139,14	139,15	139,15	139,20
5	D72 501	139,08	139,16	139,10	139,14	139,17	139,12
6	D72 501	139,12	139,20	139,13	139,19	139,15	139,20
7	D72 501	139,20	139,12	139,12	139,15	139,20	139,20
8	D72 501	139,11	139,10	139,21	139,16	139,09	139,19
9	D72 501	139,13	139,18	139,14	139,17	139,11	139,18
10	D72 501	139,20	139,14	139,09	139,10	139,30	139,10
11	D72 501	139,07	139,20	139,15	139,24	139,16	139,16
12	D72 501	139,11	139,15	139,15	139,16	139,19	139,05
13	D72 501	139,10	139,14	139,13	139,21	139,23	139,13
14	D72 501	139,11	139,16	139,10	139,26	139,12	139,16
15	D72 501	139,21	139,15	139,21	139,19	139,14	139,17
16	D72 501	139,19	139,20	139,15	139,14	139,18	139,13
17	D72 501	139,11	139,14	139,22	139,18	139,19	139,05
18	D72 501	139,16	139,19	139,12	139,08	139,13	139,14
19	D72 501	139,10	139,16	139,13	139,16	139,14	139,20
20	D72 501	139,07	139,19	139,17	139,04	139,12	139,12
21	D72 501	139,16	139,10	139,18	139,17	139,19	139,18
22	D72 501	139,16	139,17	139,03	139,23	139,19	139,17
23	D72 501	139,15	139,07	139,16	139,09	139,13	139,21
24	D72 501	139,23	139,25	139,14	139,08	139,10	139,12
25	D72 501	139,27	139,14	139,13	139,19	139,20	139,10
26	D72 501	139,13	139,17	139,19	139,14	139,14	139,20
27	D72 501	139,24	139,12	139,12	139,22	139,17	139,19
28	D72 501	139,14	139,11	139,19	139,20	139,07	139,09
29	D72 501	139,28	139,14	139,18	139,13	139,03	139,13
30	D72 502	139,14	139,17	139,20	139,16	139,09	139,22

Tabela D.9 - Dados recolhidos para o comprimento C2 da referência D72 501

Nº Amostra	Ref. Produto	C2 (mm)					
		X1	X2	X3	X4	X5	X6
1	D72 501	139,11	139,10	139,05	139,11	139,04	139,06
2	D72 501	139,11	139,05	139,15	139,07	139,03	139,11
3	D72 501	139,13	139,15	139,11	139,15	139,24	139,11
4	D72 501	139,09	139,08	139,14	139,10	139,06	139,20
5	D72 501	139,12	139,07	139,12	139,04	139,17	139,15
6	D72 501	139,14	139,05	139,14	139,11	139,15	139,02
7	D72 501	139,10	139,06	139,11	139,10	139,20	139,08
8	D72 501	139,07	139,12	139,08	139,14	139,02	139,09
9	D72 501	139,17	139,07	139,10	139,13	139,09	139,11
10	D72 501	139,12	139,13	139,15	139,17	139,05	139,16
11	D72 501	139,05	139,13	139,10	139,07	139,07	139,11
12	D72 501	139,12	139,19	139,14	139,16	139,06	139,19
13	D72 501	139,09	139,17	139,16	139,04	139,15	139,07
14	D72 501	139,03	139,03	139,07	139,13	139,12	139,07
15	D72 501	139,14	139,04	139,09	139,10	139,11	139,06
16	D72 501	139,09	139,04	139,09	139,21	139,18	139,07
17	D72 501	139,07	139,14	139,14	139,09	139,10	139,14
18	D72 501	139,13	139,03	139,16	139,09	139,06	139,10
19	D72 501	139,11	139,04	139,10	139,00	139,17	139,04
20	D72 501	139,15	139,09	139,11	139,00	138,98	139,12
21	D72 501	139,08	139,12	139,15	139,08	139,08	139,04
22	D72 501	139,10	139,12	139,10	139,20	139,06	138,95
23	D72 501	139,08	139,14	139,13	139,00	139,11	139,17
24	D72 501	139,17	139,20	139,02	139,07	139,17	139,07
25	D72 501	139,12	139,13	139,15	139,10	139,14	139,13
26	D72 501	139,08	139,09	139,12	139,11	139,02	139,08
27	D72 501	139,04	139,08	139,15	139,20	139,07	139,16
28	D72 501	139,03	139,06	139,13	139,05	139,10	139,15
29	D72 501	139,20	139,12	139,10	139,06	139,04	139,16
30	D72 501	139,12	139,09	139,13	139,09	139,12	139,04

Tabela D.10 - Dados recolhidos para a largura L1 da referência D72 501

Nº Amostra	Ref. Produto	L1 (mm)					
		X1	X2	X3	X4	X5	X6
1	D72 501	67,38	67,49	67,39	67,48	67,51	67,42
2	D72 501	67,49	67,41	67,38	67,38	67,45	67,49
3	D72 501	67,52	67,64	67,56	67,63	67,50	67,55
4	D72 501	67,62	67,62	67,60	67,65	67,60	67,59
5	D72 501	67,52	67,68	67,62	67,62	67,66	67,59
6	D72 501	67,57	67,59	67,58	67,64	67,60	67,54
7	D72 501	67,54	67,54	67,61	67,69	67,58	67,65
8	D72 501	67,60	67,65	67,58	67,59	67,62	67,55
9	D72 501	67,62	67,56	67,60	67,59	67,67	67,62
10	D72 501	67,62	67,60	67,57	67,62	67,59	67,68
11	D72 501	67,58	67,55	67,54	67,51	67,63	67,63
12	D72 501	67,57	67,62	67,61	67,72	67,53	67,65
13	D72 501	67,61	67,55	67,62	67,68	67,63	67,59
14	D72 501	67,56	67,64	67,58	67,59	67,60	67,56
15	D72 501	67,66	67,55	67,50	67,64	67,62	67,59
16	D72 501	67,60	67,63	67,65	67,64	67,66	67,61
17	D72 501	67,64	67,53	67,60	67,62	67,58	67,62
18	D72 501	67,66	67,58	67,56	67,59	67,59	67,62
19	D72 501	67,57	67,56	67,57	67,58	67,49	67,60
20	D72 501	67,59	67,64	67,65	67,70	67,56	67,62
21	D72 501	67,63	67,57	67,61	67,64	67,55	67,58
22	D72 501	67,60	67,56	67,65	67,56	67,59	67,58
23	D72 501	67,59	67,56	67,58	67,64	67,58	67,65
24	D72 501	67,64	67,61	67,57	67,60	67,61	67,53
25	D72 501	67,64	67,65	67,59	67,61	67,57	67,63
26	D72 501	67,56	67,53	67,61	67,55	67,63	67,60
27	D72 501	67,55	67,55	67,65	67,61	67,63	67,61
28	D72 501	67,51	67,59	67,67	67,56	67,61	67,56
29	D72 501	67,57	67,65	67,57	67,53	67,61	67,62
30	D72 501	67,60	67,58	67,58	67,62	67,61	67,60

Tabela D.11 - Dados recolhidos para a largura L2 da referência D72 501

Nº Amostra	Ref. Produto	L2 (mm)					
		X1	X2	X3	X4	X5	X6
1	D72 501	67,48	67,53	67,49	67,47	67,47	67,52
2	D72 501	67,44	67,43	67,50	67,49	67,46	67,44
3	D72 501	67,61	67,60	67,56	67,65	67,68	67,66
4	D72 501	67,61	67,59	67,63	67,65	67,67	67,62
5	D72 501	67,59	67,67	67,73	67,62	67,68	67,58
6	D72 501	67,58	67,60	67,61	67,67	67,60	67,65
7	D72 501	67,54	67,68	67,68	67,58	67,69	67,68
8	D72 501	67,66	67,63	67,53	67,59	67,63	67,66
9	D72 501	67,63	67,65	67,68	67,66	67,55	67,60
10	D72 501	67,61	67,62	67,61	67,58	67,53	67,55
11	D72 501	67,68	67,68	67,66	67,62	67,64	67,59
12	D72 501	67,60	67,62	67,64	67,66	67,60	67,65
13	D72 501	67,57	67,61	67,68	67,68	67,61	67,55
14	D72 501	67,59	67,55	67,70	67,51	67,67	67,63
15	D72 501	67,63	67,58	67,62	67,58	67,63	67,61
16	D72 501	67,62	67,61	67,63	67,63	67,64	67,63
17	D72 501	67,52	67,68	67,60	67,59	67,61	67,57
18	D72 501	67,67	67,56	67,63	67,59	67,65	67,61
19	D72 501	67,63	67,63	67,57	67,62	67,67	67,61
20	D72 501	67,65	67,65	67,54	67,59	67,60	67,59
21	D72 501	67,64	67,58	67,64	67,59	67,57	67,54
22	D72 501	67,66	67,68	67,63	67,60	67,67	67,57
23	D72 501	67,63	67,59	67,63	67,60	67,62	67,50
24	D72 501	67,57	67,57	67,57	67,63	67,61	67,56
25	D72 501	67,62	67,56	67,70	67,63	67,56	67,61
26	D72 501	67,57	67,61	67,60	67,71	67,68	67,65
27	D72 501	67,63	67,59	67,55	67,57	67,53	67,67
28	D72 501	67,62	67,64	67,68	67,69	67,68	67,66
29	D72 501	67,71	67,62	67,64	67,60	67,56	67,62
30	D72 501	67,68	67,54	67,62	67,67	67,60	67,64

d) Fase I do SPC e MSPC para a referência D72 502

Tabela D.12 - Dados recolhidos para a Massa da referência D72 502

Nº Amostra	Ref. Produto	Massa (g)					
		X1	X2	X3	X4	X5	X6
1	D72 502	308,320	308,431	308,424	308,384	308,378	308,319
2	D72 502	308,229	308,321	308,302	308,217	308,253	308,239
3	D72 502	308,365	308,327	308,333	308,248	308,349	308,266
4	D72 502	308,260	308,184	308,257	308,366	308,338	308,489
5	D72 502	308,266	308,384	308,204	308,291	308,461	308,287
6	D72 502	308,330	308,241	308,327	308,326	308,325	308,271
7	D72 502	308,191	308,272	308,265	308,187	308,440	308,235
8	D72 502	308,347	308,329	308,335	308,344	308,374	308,444
9	D72 502	308,303	308,351	308,519	308,328	308,325	308,402
10	D72 502	308,335	308,372	308,382	308,436	308,483	308,233
11	D72 502	308,363	308,314	308,352	308,337	308,35	308,333
12	D72 502	308,308	308,34	308,36	308,255	308,355	308,328
13	D72 502	308,356	308,479	308,319	308,397	308,331	308,183
14	D72 502	308,25	308,399	308,235	308,467	308,227	308,181
15	D72 502	308,417	308,228	308,224	308,424	308,199	308,341
16	D72 502	308,28	308,482	308,176	308,225	308,464	308,301
17	D72 502	308,287	308,217	308,201	308,389	308,199	308,234
18	D72 502	310,594	308,306	308,814	308,376	309,097	308,136
19	D72 502	308,284	308,464	308,328	308,387	308,333	308,468
20	D72 502	308,278	308,244	308,361	308,412	308,253	308,419
21	D72 502	308,36	308,258	308,371	308,359	308,219	308,429
22	D72 502	308,355	308,338	308,365	308,432	308,234	308,38
23	D72 502	308,371	308,289	308,271	308,384	308,253	308,319
24	D72 502	308,262	308,388	308,223	308,204	308,307	308,216
25	D72 502	308,157	308,214	308,289	308,364	308,237	308,187
26	D72 502	308,294	308,478	308,254	308,476	308,374	308,426
27	D72 502	308,385	308,256	308,375	308,303	308,394	308,482
28	D72 502	308,241	308,322	308,207	308,336	308,256	308,179
29	D72 502	308,346	308,115	308,397	308,242	308,181	308,157
30	D72 502	308,263	308,129	308,506	308,281	308,21	308,212

Tabela D.13 - Dados recolhidos para o comprimento C1 da referência D72 502

Nº Amostra	Ref. Produto	C1 (mm)					
		X1	X2	X3	X4	X5	X6
1	D72 502	139,19	139,02	139,03	139,14	139,15	139,14
2	D72 502	139,14	139,14	139,05	139,13	139,12	139,14
3	D72 502	139,12	139,13	139,05	139,14	139,11	139,23
4	D72 502	139,11	139,04	139,21	139,07	139,15	139,02
5	D72 502	139,23	139,19	139,13	139,11	139,10	139,03
6	D72 502	139,17	139,22	139,10	139,13	139,10	139,10
7	D72 502	139,20	139,19	139,13	139,01	139,13	139,15
8	D72 502	139,12	139,20	139,11	139,11	139,09	139,09
9	D72 502	139,06	139,22	139,22	139,05	139,19	139,08
10	D72 502	139,18	139,12	139,15	139,14	139,16	139,15
11	D72 502	139,08	139,13	139,02	139,09	139,14	139,01
12	D72 502	139,15	139,17	139,04	139,12	139,10	139,22
13	D72 502	139,15	139,19	139,13	139,08	139,08	139,05
14	D72 502	139,13	139,12	138,98	139,12	139,12	139,14
15	D72 502	139,08	139,10	139,13	139,04	139,06	139,14
16	D72 502	139,06	139,19	139,13	139,23	139,17	139,15
17	D72 502	139,13	139,15	139,20	139,17	139,18	139,08
18	D72 502	139,24	139,22	139,23	139,21	139,19	139,19
19	D72 502	139,16	139,19	139,18	139,20	139,13	139,05
20	D72 502	139,07	139,12	139,16	139,16	139,17	139,11
21	D72 502	139,08	139,24	139,13	139,28	139,15	139,07
22	D72 502	139,09	139,09	139,12	139,15	139,04	139,15
23	D72 502	139,13	139,04	139,01	139,05	139,09	139,02
24	D72 502	139,05	139,01	139,07	139,05	139,02	139,10
25	D72 502	139,05	139,17	139,10	139,11	139,11	139,22
26	D72 502	139,24	139,11	139,06	139,16	139,09	139,13
27	D72 502	139,12	139,20	139,08	139,16	139,05	139,09
28	D72 502	139,11	139,15	139,20	139,16	139,27	139,18
29	D72 502	139,09	139,09	139,12	139,18	139,12	139,14
30	D72 502	139,15	139,12	139,18	139,23	139,08	139,15

Tabela D.14 - Dados recolhidos para o comprimento C2 da referência D72 502

Nº Amostra	Ref. Produto	C2 (mm)					
		X1	X2	X3	X4	X5	X6
1	D72 502	139,19	139,32	139,16	139,21	139,27	139,19
2	D72 502	139,22	139,21	139,21	139,20	139,23	139,24
3	D72 502	139,18	139,24	139,12	139,17	139,17	139,31
4	D72 502	139,14	139,19	139,18	139,31	139,23	139,21
5	D72 502	139,28	139,23	139,17	139,16	139,20	139,25
6	D72 502	139,17	139,14	139,19	139,25	139,24	139,24
7	D72 502	139,24	139,22	139,17	139,21	139,27	139,25
8	D72 502	139,21	139,24	139,23	139,21	139,24	139,17
9	D72 502	139,30	139,14	139,27	139,27	139,23	139,18
10	D72 502	139,16	139,24	139,25	139,28	139,26	139,17
11	D72 502	139,17	139,29	139,24	139,24	139,16	139,12
12	D72 502	139,21	139,24	139,19	139,40	139,23	139,19
13	D72 502	139,20	139,19	139,19	139,22	139,10	139,22
14	D72 502	139,27	139,15	139,19	139,26	139,16	139,18
15	D72 502	139,10	139,17	139,29	139,22	139,22	139,11
16	D72 502	139,24	139,19	139,12	139,18	139,22	139,15
17	D72 502	139,13	139,31	139,18	139,21	139,20	139,27
18	D72 502	139,22	139,17	139,18	139,18	139,16	139,15
19	D72 502	139,21	139,13	139,25	139,16	139,28	139,20
20	D72 502	139,24	139,22	139,21	139,11	139,22	139,27
21	D72 502	139,24	139,14	139,25	139,19	139,20	139,19
22	D72 502	139,20	139,15	139,19	139,22	139,16	139,24
23	D72 502	139,14	139,10	139,13	139,20	139,13	139,09
24	D72 502	139,08	139,16	139,08	139,16	139,11	139,07
25	D72 502	139,23	139,18	139,15	139,18	139,27	139,28
26	D72 502	139,21	139,16	139,23	139,13	139,19	139,20
27	D72 502	139,21	139,26	139,16	139,21	139,24	139,23
28	D72 502	139,28	139,21	139,22	139,17	139,23	139,27
29	D72 502	139,26	139,21	139,17	139,18	139,22	139,19
30	D72 502	139,29	139,25	139,20	139,22	139,18	139,14

Tabela D.15 - Dados recolhidos para a largura L1 da referência D72 502

Nº Amostra	Ref. Produto	L1 (mm)					
		X1	X2	X3	X4	X5	X6
1	D72 502	67,66	67,73	67,65	67,74	67,62	67,60
2	D72 502	67,69	67,73	67,62	67,62	67,67	67,59
3	D72 502	67,75	67,64	67,58	67,65	67,65	67,63
4	D72 502	67,70	67,68	67,63	67,65	67,62	67,62
5	D72 502	67,66	67,63	67,65	67,56	67,57	67,67
6	D72 502	67,70	67,71	67,71	67,60	67,57	67,62
7	D72 502	67,59	67,66	67,54	67,64	67,67	67,66
8	D72 502	67,67	67,63	67,66	67,58	67,62	67,72
9	D72 502	67,63	67,69	67,61	67,69	67,68	67,71
10	D72 502	67,66	67,59	67,70	67,68	67,71	67,71
11	D72 502	67,76	67,66	67,57	67,62	67,55	67,53
12	D72 502	67,60	67,66	67,70	67,62	67,64	67,61
13	D72 502	67,66	67,58	67,65	67,62	67,55	67,60
14	D72 502	67,70	67,62	67,71	67,70	67,66	67,76
15	D72 502	67,65	67,66	67,68	67,58	67,59	67,65
16	D72 502	67,67	67,63	67,68	67,72	67,68	67,60
17	D72 502	67,64	67,65	67,62	67,66	67,60	67,54
18	D72 502	67,72	67,77	67,78	67,67	67,79	67,67
19	D72 502	67,70	67,63	67,62	67,76	67,79	67,65
20	D72 502	67,67	67,64	67,68	67,65	67,72	67,55
21	D72 502	67,69	67,69	67,72	67,62	67,74	67,64
22	D72 502	67,71	67,70	67,74	67,70	67,66	67,69
23	D72 502	67,55	67,49	67,53	67,56	67,61	67,57
24	D72 502	67,55	67,51	67,59	67,61	67,63	67,55
25	D72 502	67,72	67,66	67,62	67,62	67,57	67,65
26	D72 502	67,70	67,56	67,60	67,65	67,67	67,61
27	D72 502	67,66	67,69	67,63	67,58	67,66	67,70
28	D72 502	67,66	67,52	67,65	67,62	67,70	67,62
29	D72 502	67,66	67,67	67,68	67,57	67,61	67,70
30	D72 502	67,73	67,62	67,67	67,62	67,59	67,71

Tabela D.16 - Dados recolhidos para a largura L2 da referência D72 502

Nº Amostra	Ref. Produto	L2 (mm)					
		X1	X2	X3	X4	X5	X6
1	D72 502	67,59	67,56	67,64	67,57	67,60	67,59
2	D72 502	67,57	67,61	67,58	67,57	67,53	67,57
3	D72 502	67,56	67,54	67,61	67,58	67,62	67,51
4	D72 502	67,55	67,56	67,60	67,55	67,61	67,42
5	D72 502	67,51	67,61	67,55	67,59	67,64	67,48
6	D72 502	67,59	67,56	67,64	67,55	67,62	67,62
7	D72 502	67,63	67,53	67,60	67,59	67,53	67,60
8	D72 502	67,54	67,60	67,58	67,56	67,58	67,56
9	D72 502	67,67	67,51	67,58	67,54	67,57	67,57
10	D72 502	67,69	67,60	67,60	67,53	67,61	67,64
11	D72 502	67,51	67,55	67,59	67,58	67,52	67,63
12	D72 502	67,67	67,54	67,60	67,58	67,64	67,58
13	D72 502	67,61	67,58	67,55	67,54	67,56	67,66
14	D72 502	67,57	67,62	67,64	67,58	67,54	67,66
15	D72 502	67,58	67,58	67,61	67,60	67,62	67,55
16	D72 502	67,57	67,60	67,58	67,53	67,63	67,62
17	D72 502	67,66	67,60	67,61	67,62	67,59	67,60
18	D72 502	67,61	67,64	67,70	67,62	67,62	67,65
19	D72 502	67,50	67,54	67,57	67,49	67,48	67,60
20	D72 502	67,64	67,48	67,59	67,58	67,63	67,56
21	D72 502	67,52	67,60	67,59	67,53	67,68	67,69
22	D72 502	67,64	67,59	67,52	67,56	67,61	67,51
23	D72 502	67,51	67,58	67,60	67,64	67,52	67,53
24	D72 502	67,61	67,59	67,55	67,55	67,54	67,61
25	D72 502	67,60	67,61	67,57	67,62	67,51	67,51
26	D72 502	67,62	67,65	67,56	67,55	67,54	67,61
27	D72 502	67,59	67,62	67,58	67,56	67,57	67,58
28	D72 502	67,63	67,64	67,55	67,50	67,54	67,57
29	D72 502	67,59	67,49	67,55	67,64	67,56	67,56
30	D72 502	67,57	67,49	67,58	67,55	67,59	67,53

Anexo E: Cartas de Controle Univariadas para a Fase I do SPC

a) Referência A94 501

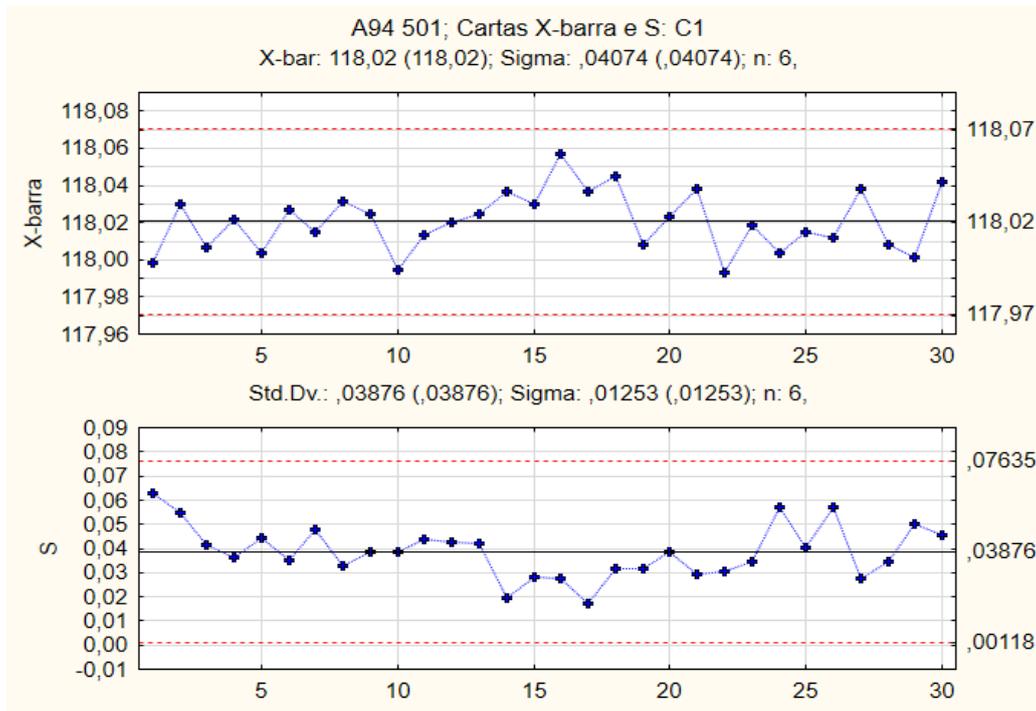


Figura E.1 – Cartas da Média e do Desvio Padrão para C1 - A94 501

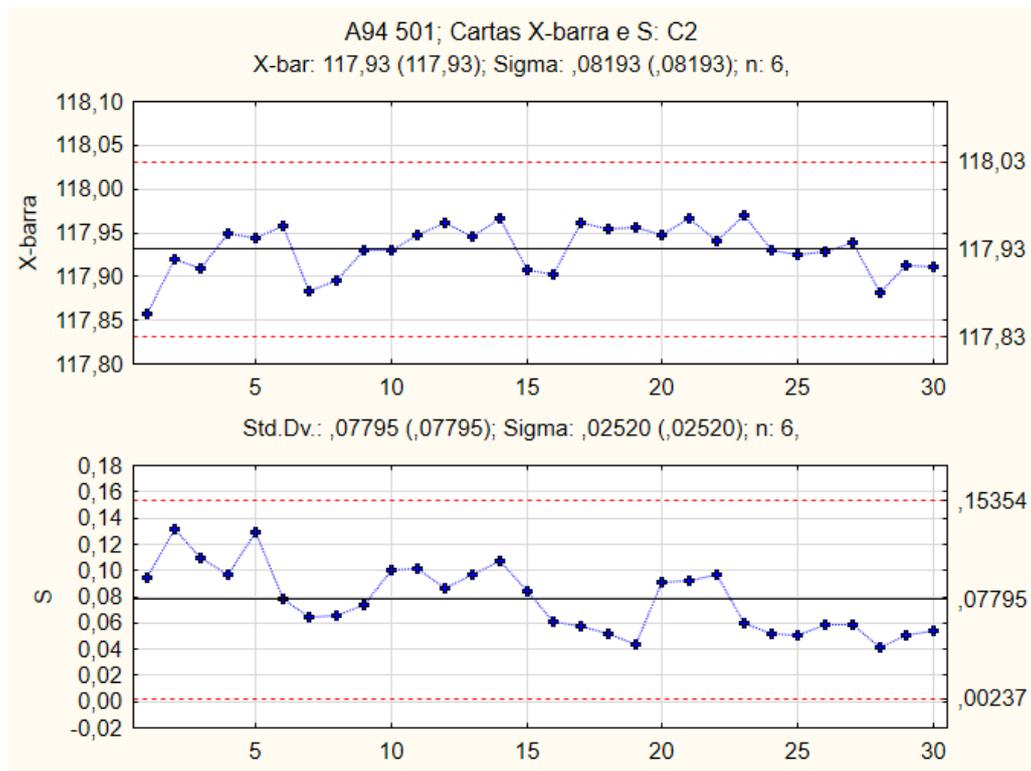


Figura E.2 - Cartas da Média e do Desvio Padrão para C2 - A94 501

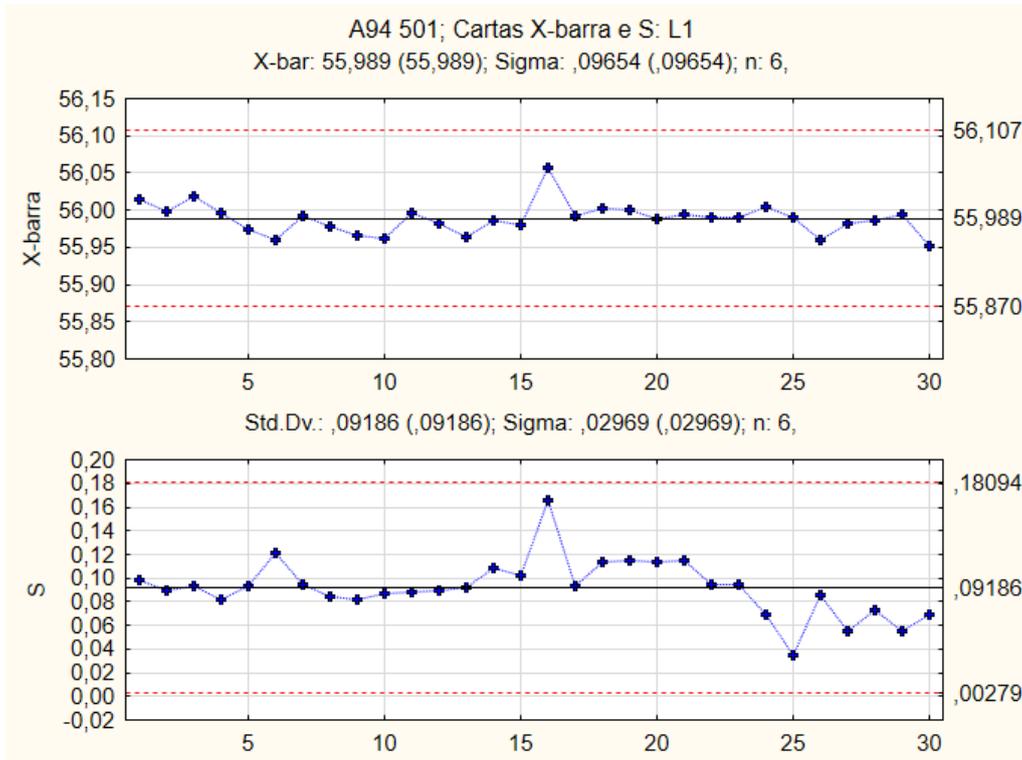


Figura E.3 - Cartas da Média e do Desvio Padrão para L1 - A94 501

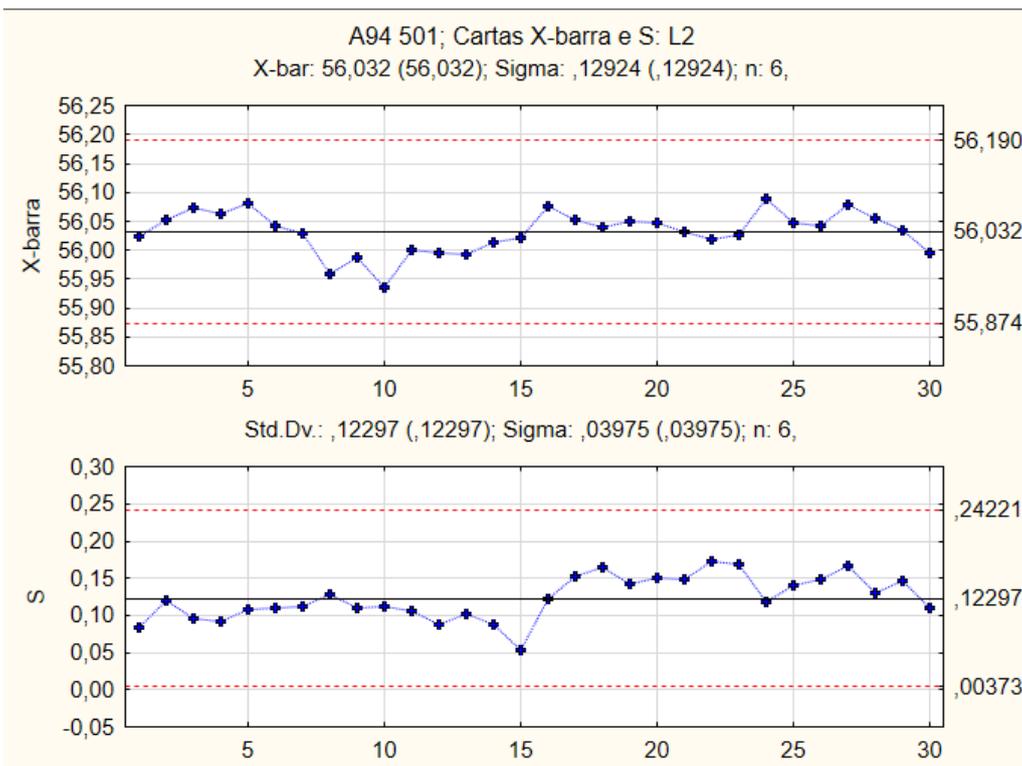


Figura E.4 - Cartas da Média e do Desvio Padrão para L2 - A94 501

b) Referência D72 501

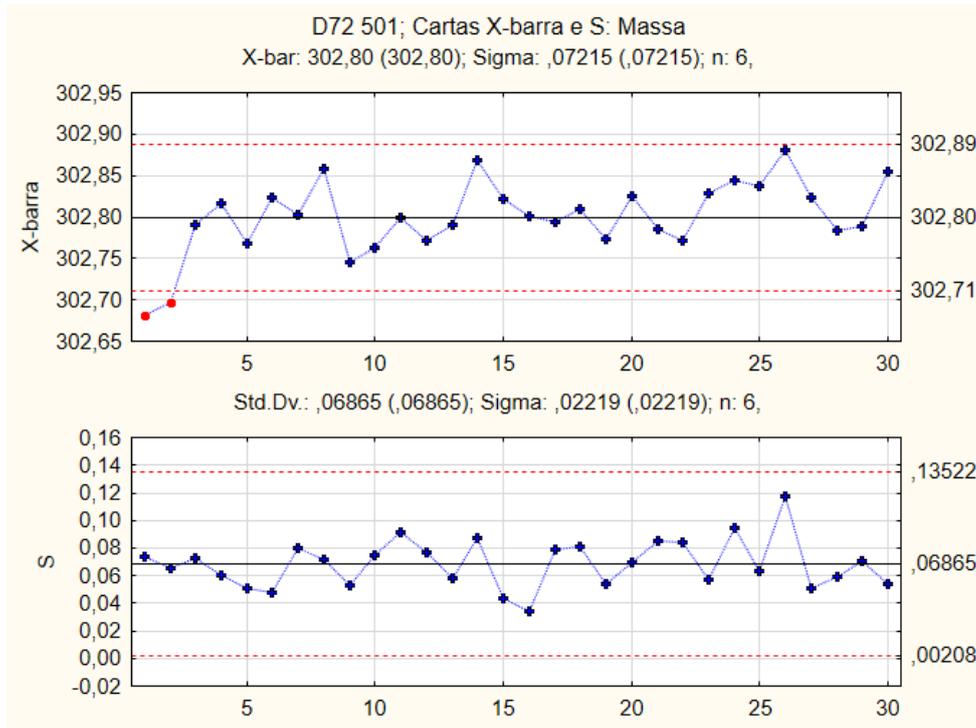


Figura E.5 - Cartas da Média e do Desvio Padrão para a Massa – D72 501

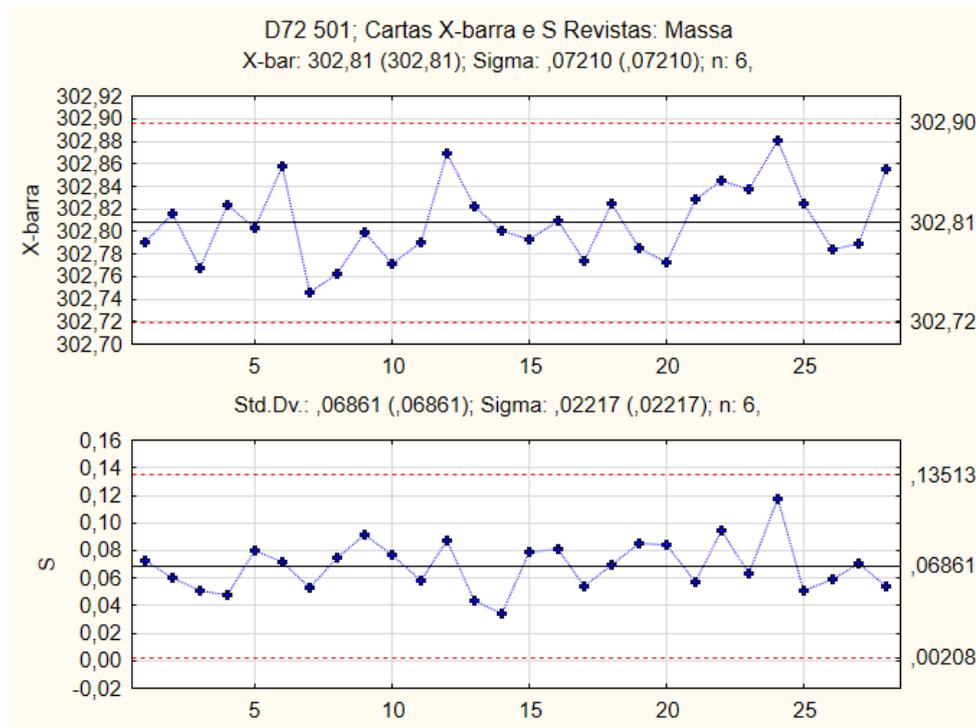


Figura E.6 - Cartas da Média e do Desvio Padrão Revistas para a Massa – D72 501

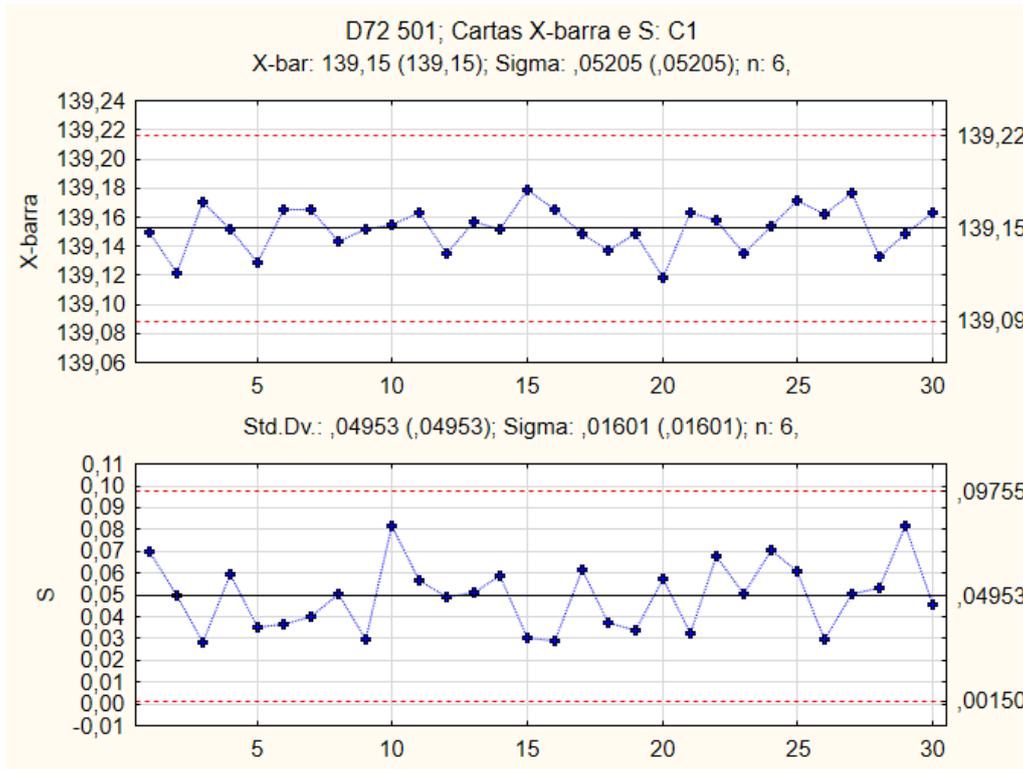


Figura E.7 - Cartas da Média e do Desvio Padrão para C1 – D72 501

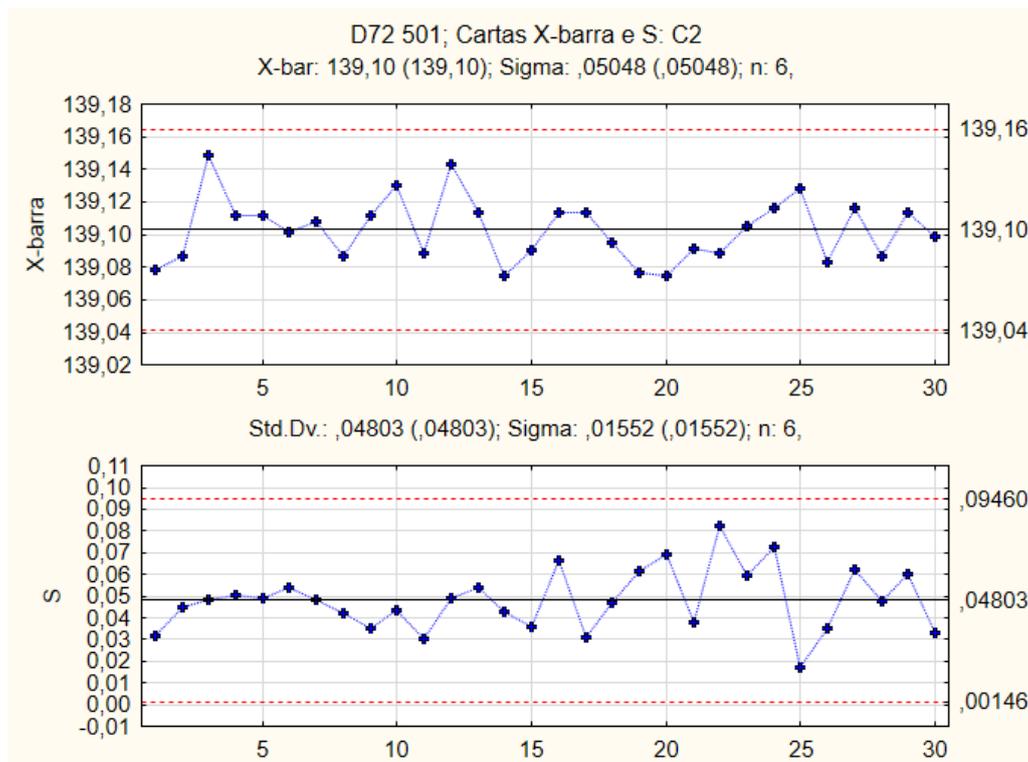


Figura E.8 - Cartas da Média e do Desvio Padrão para C2 – D72 501

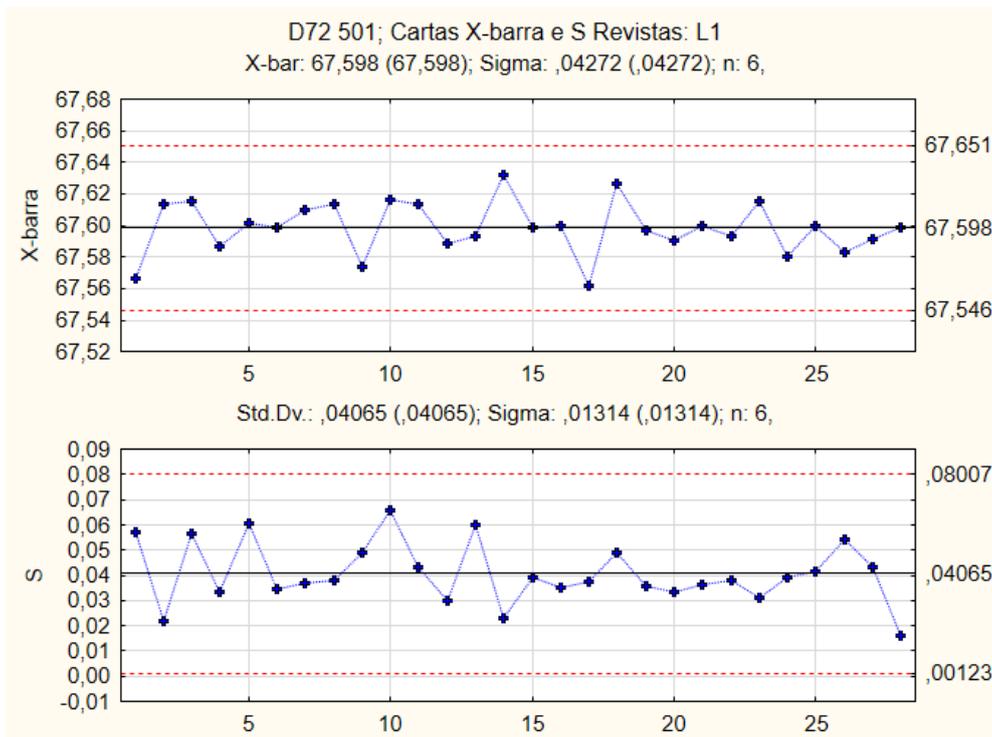


Figura E.9 - Cartas da Média e do Desvio Padrão Revistas para L1 – D72 501

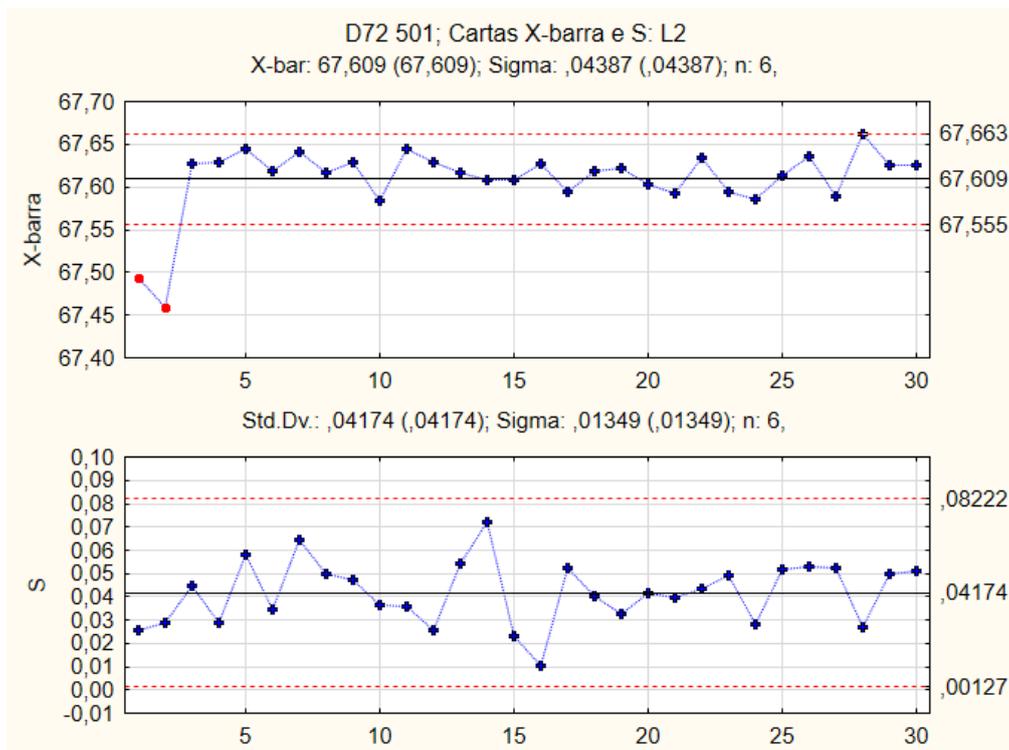


Figura E.10 - Cartas da Média e do Desvio Padrão para L2 – D72 501

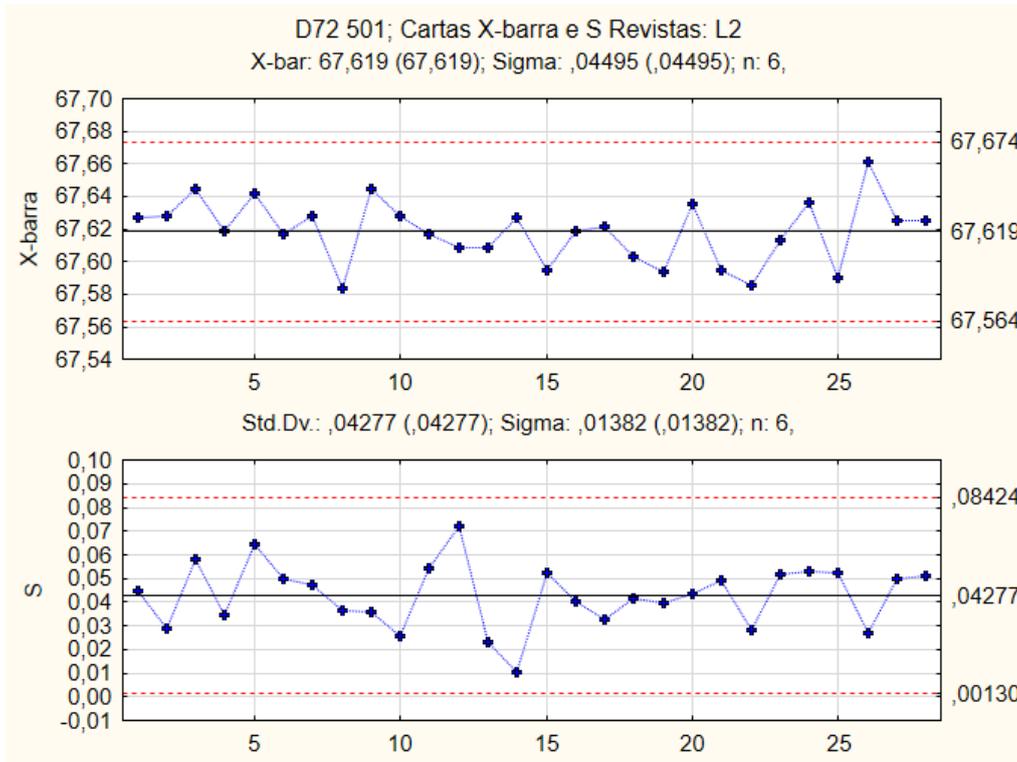


Figura E.11 - Cartas da Média e do Desvio Padrão Revistas para L2 – D72 501

c) Referência D72 502

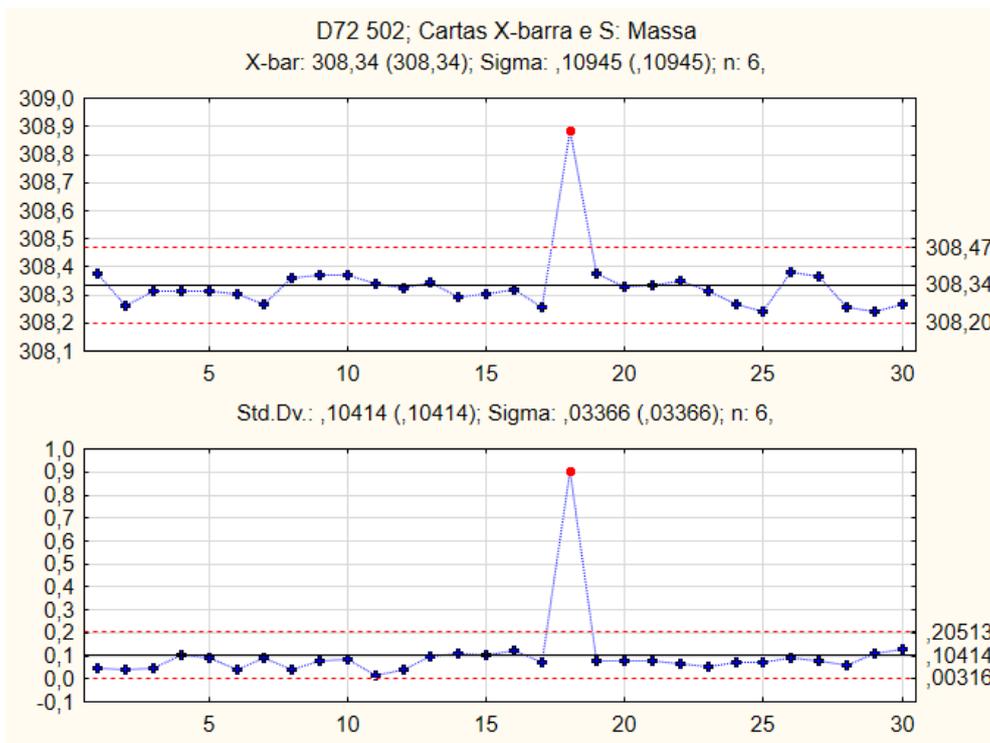


Figura E.12 - Cartas da Média e do Desvio Padrão para a Massa – D72 502

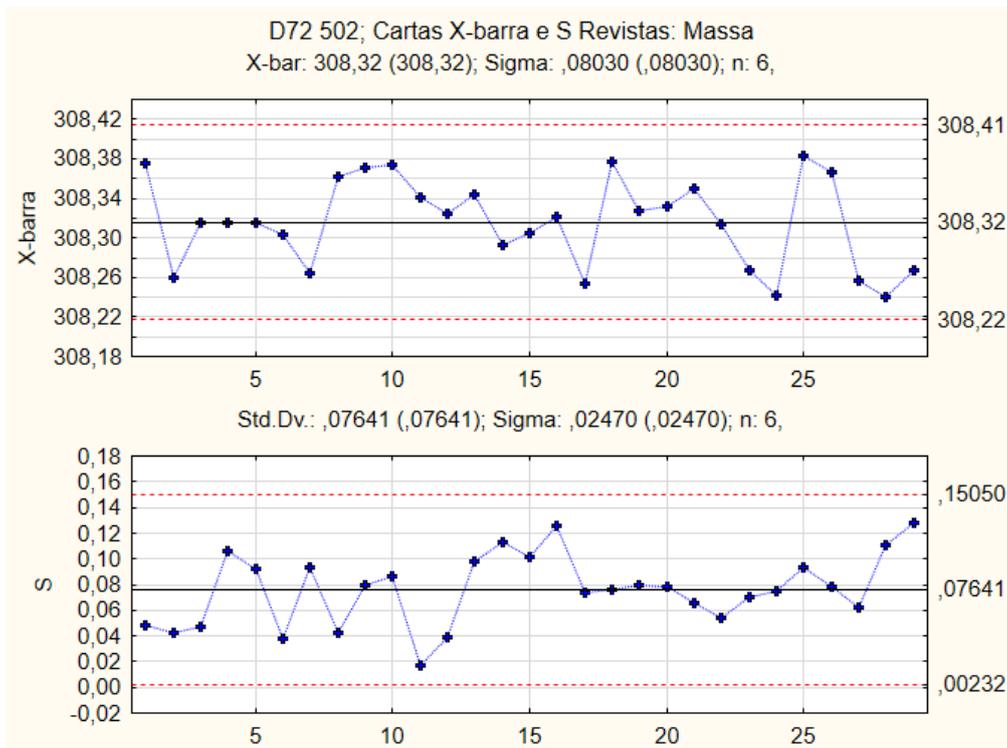


Figura E.13 - Cartas da Média e do Desvio Padrão Revistas para a Massa – D72 502

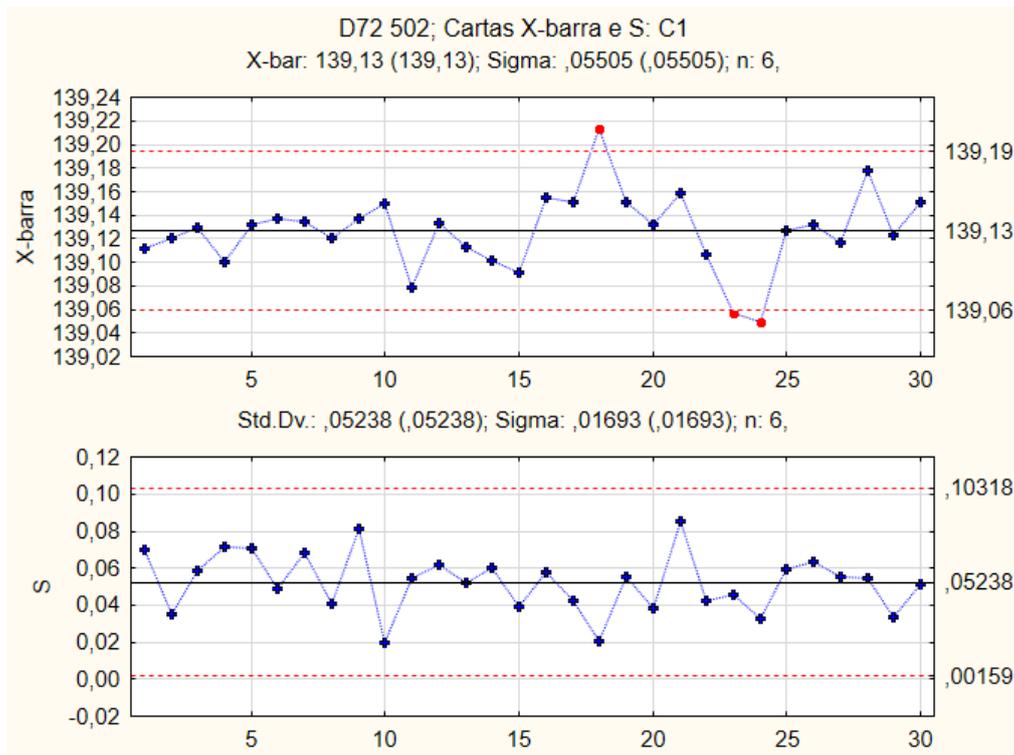


Figura E.14 - Cartas da Média e do Desvio Padrão para C1 – D72 502

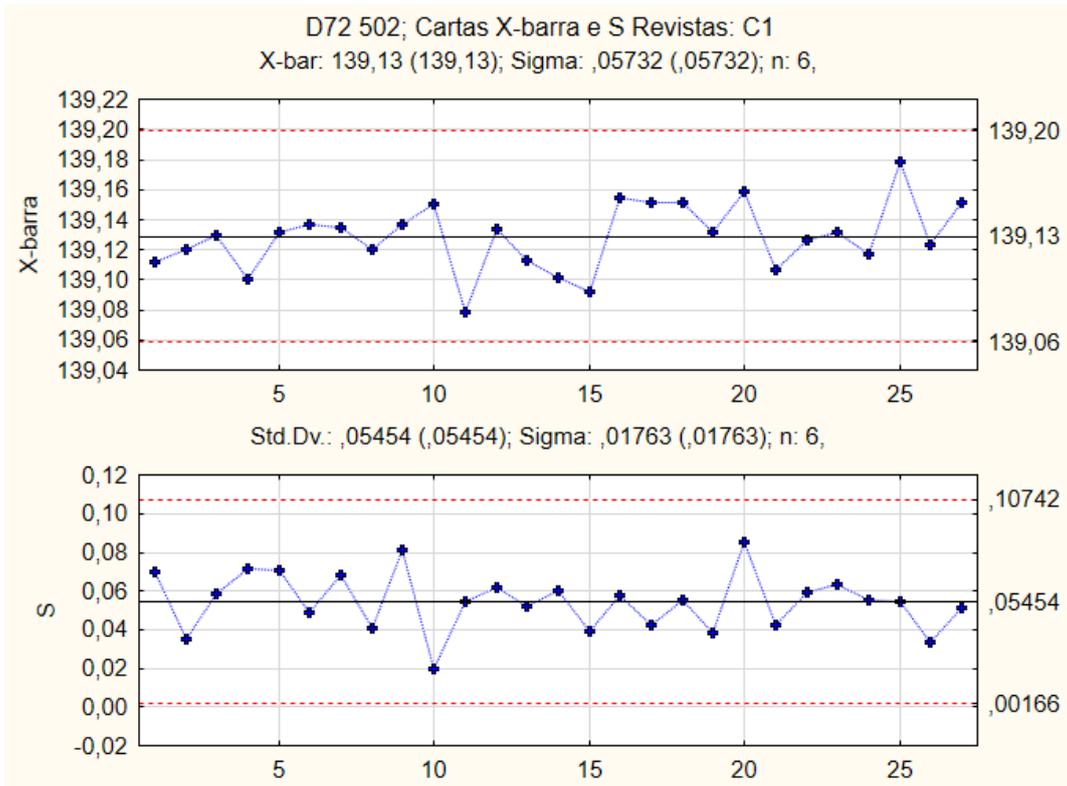


Figura E.15 - Cartas da Média e do Desvio Padrão Revistas para C1 – D72 502

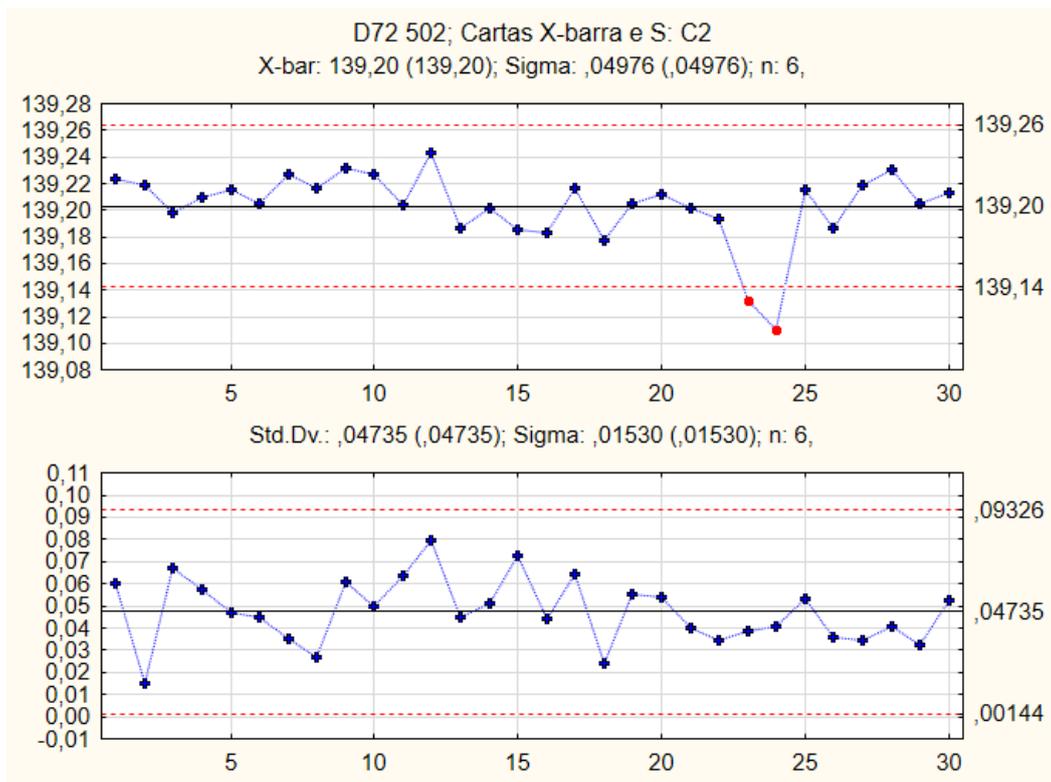


Figura E.16 - Cartas da Média e do Desvio Padrão para C2 – D72 502

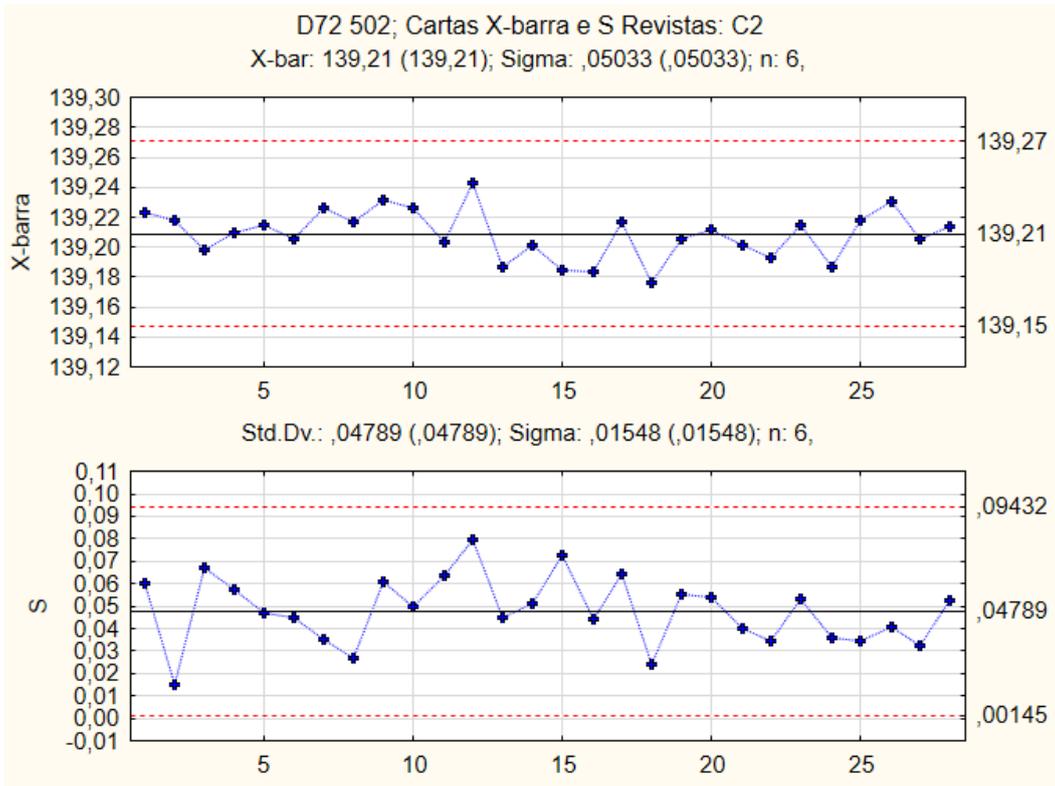


Figura E.17 - Cartas da Média e do Desvio Padrão Revistas para C2 – D72 502

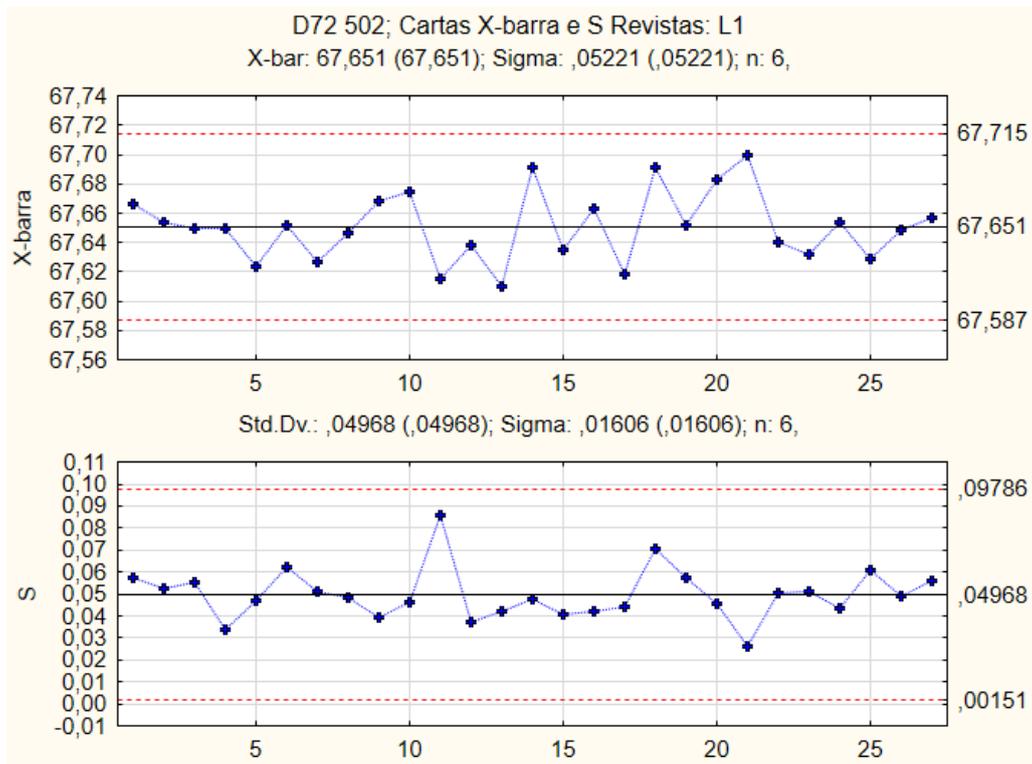


Figura E.18 - Cartas da Média e do Desvio Padrão Revistas para L1 – D72 502

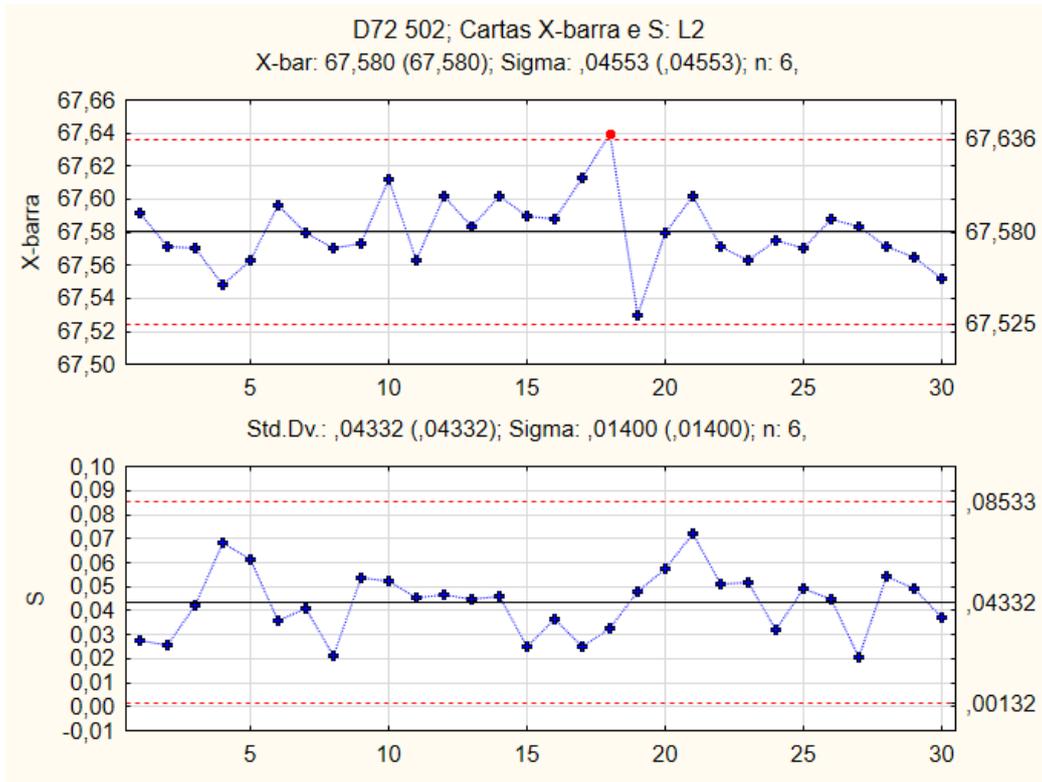


Figura E.19 - Cartas da Média e do Desvio Padrão para L2 – D72 502

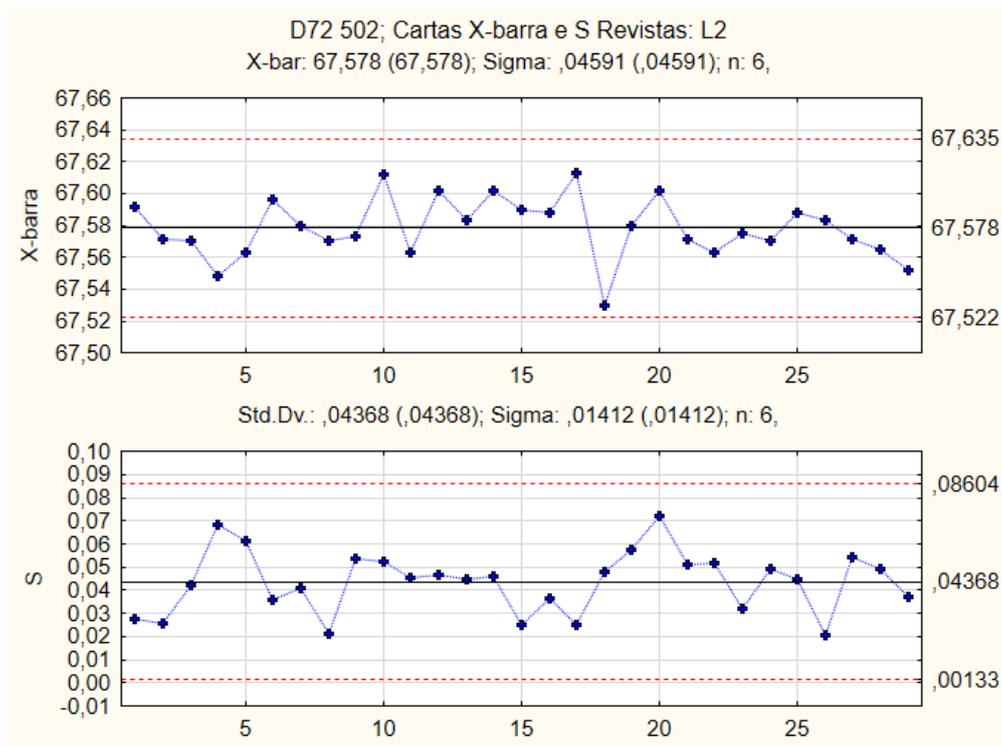


Figura E.20 - Cartas da Média e do Desvio Padrão Revistas para L2 – D72 502

Anexo F: Histogramas para o estudo da Normalidade

a) D72 501

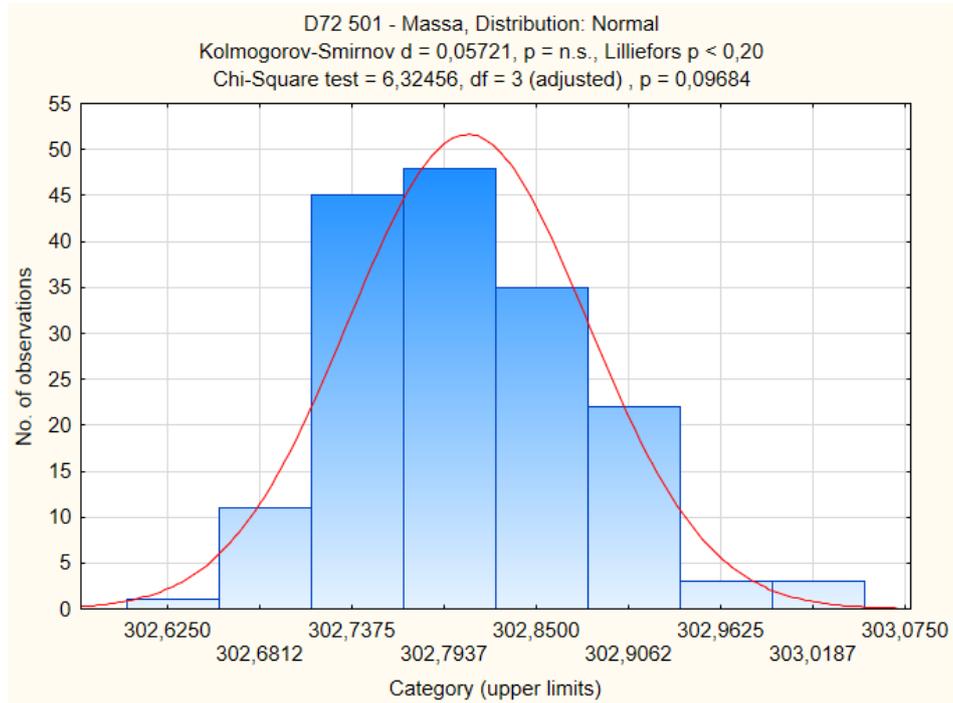


Figura F.1 – Estudo da Normalidade dos dados da Massa – D72 501

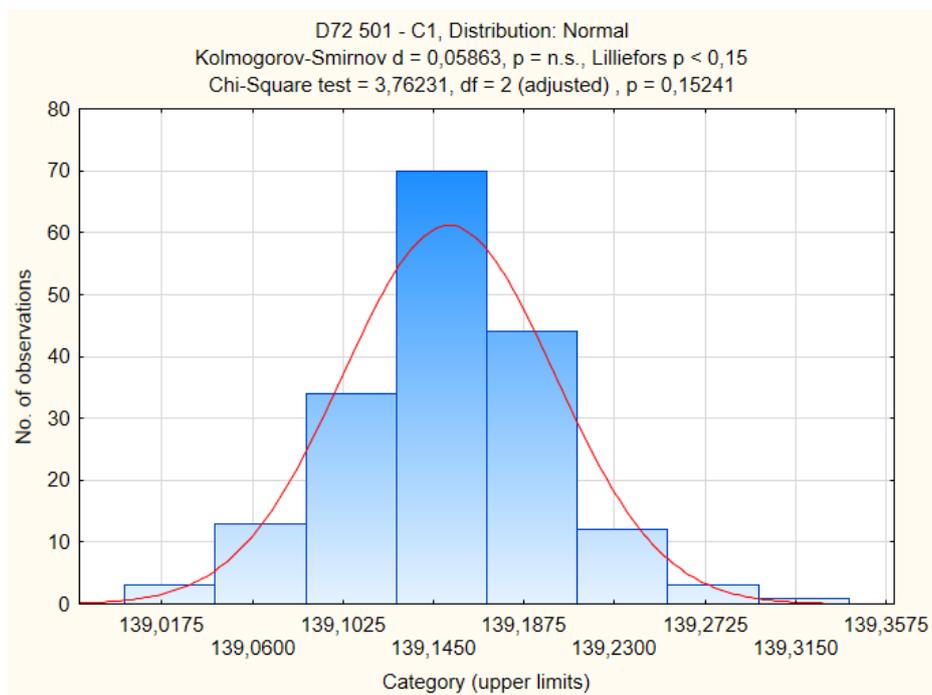


Figura F.2 - Estudo da Normalidade dos dados de C1 – D72 501

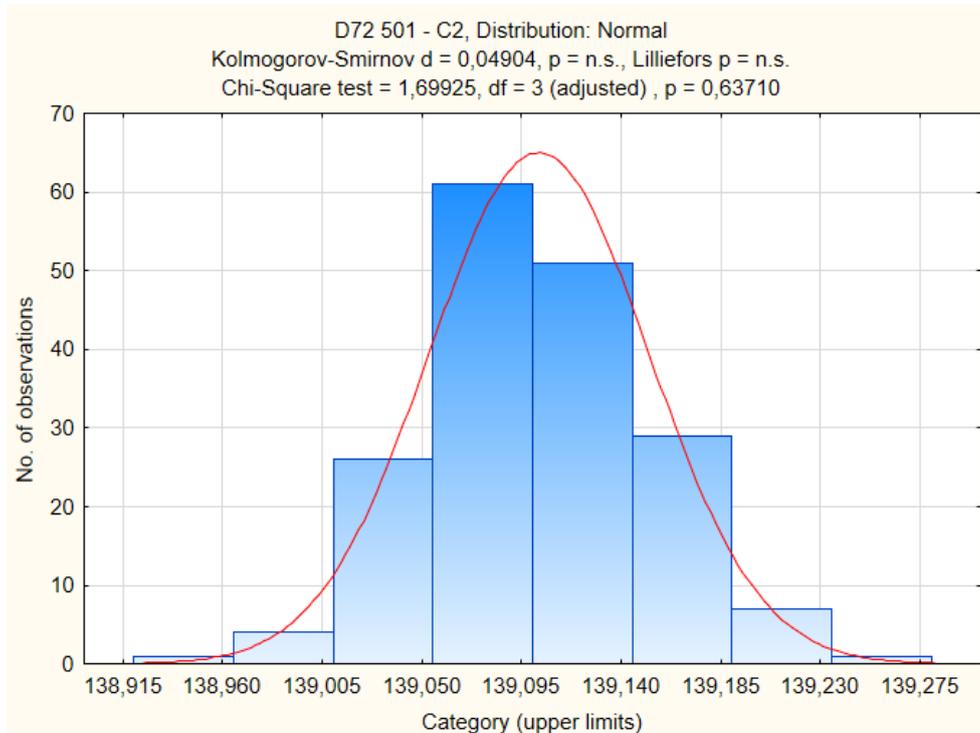


Figura F.3 - Estudo da Normalidade dos dados de C2 – D72 501

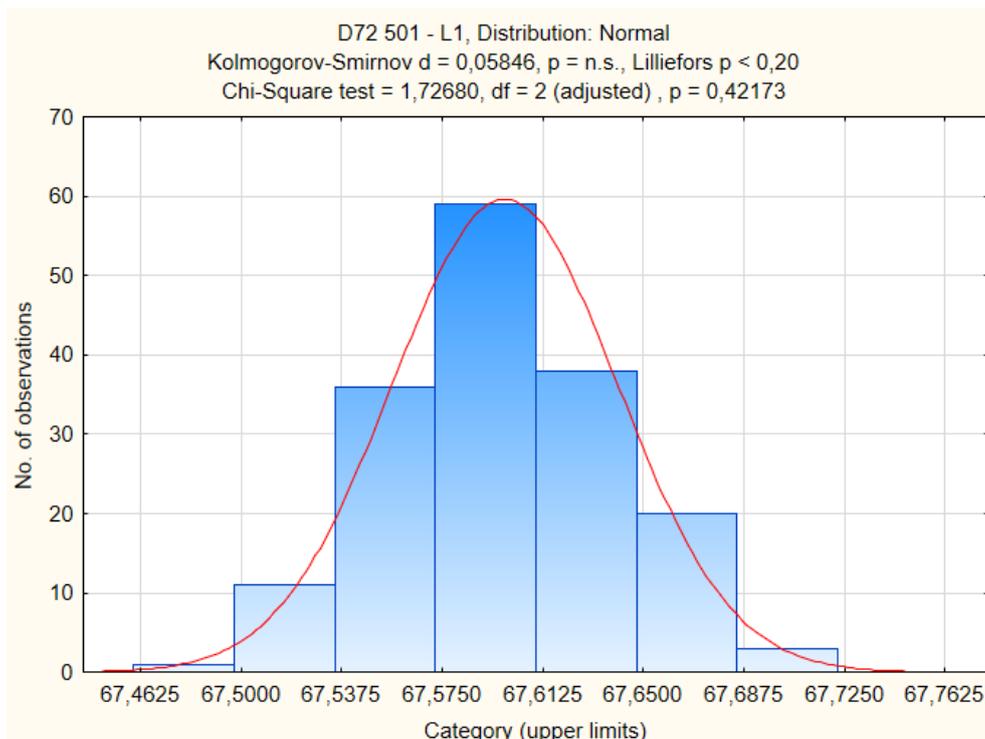


Figura F.4 - Estudo da Normalidade dos dados de L1 – D72 501

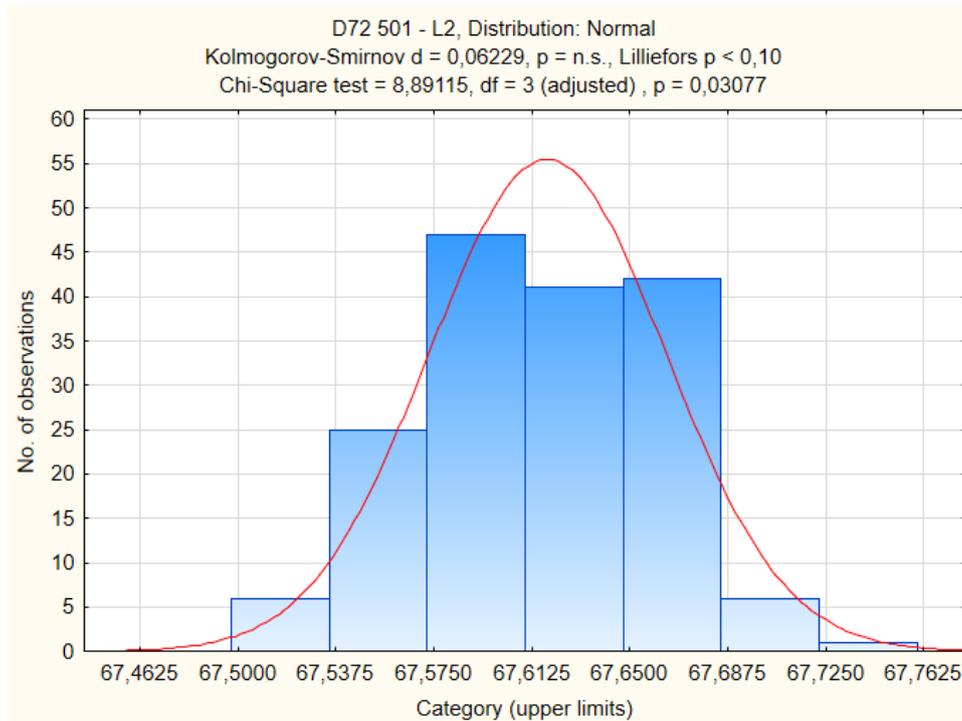


Figura F.5 - Estudo da Normalidade dos dados de L2 – D72 501

b) D72 502

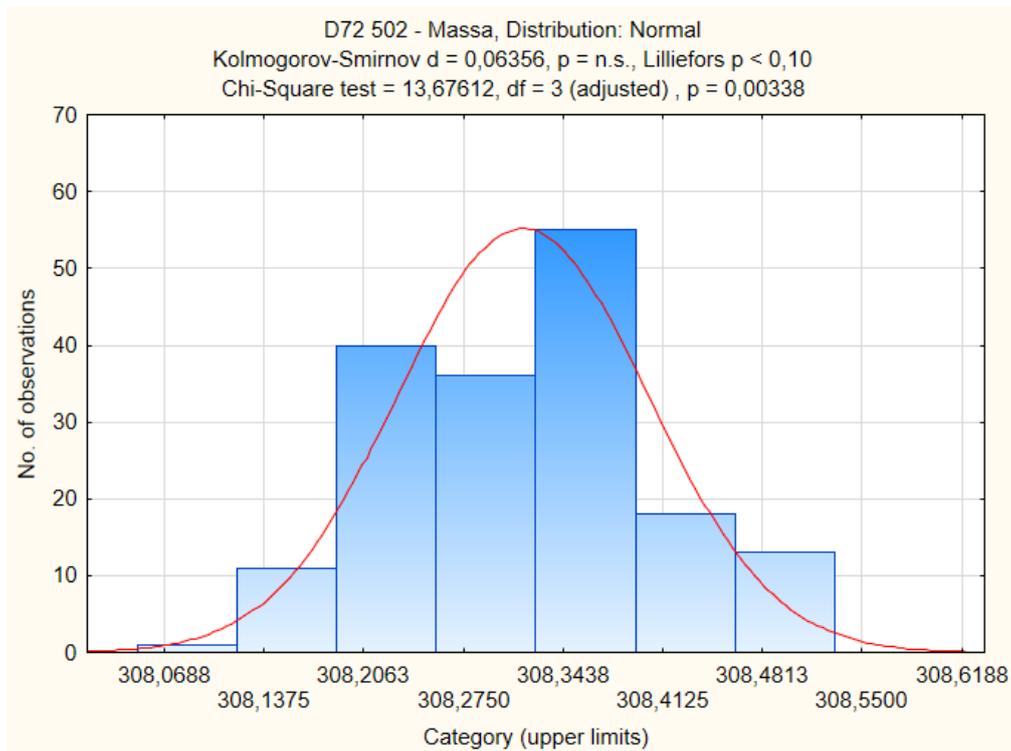


Figura F.6 - Estudo da Normalidade dos dados da Massa – D72 502

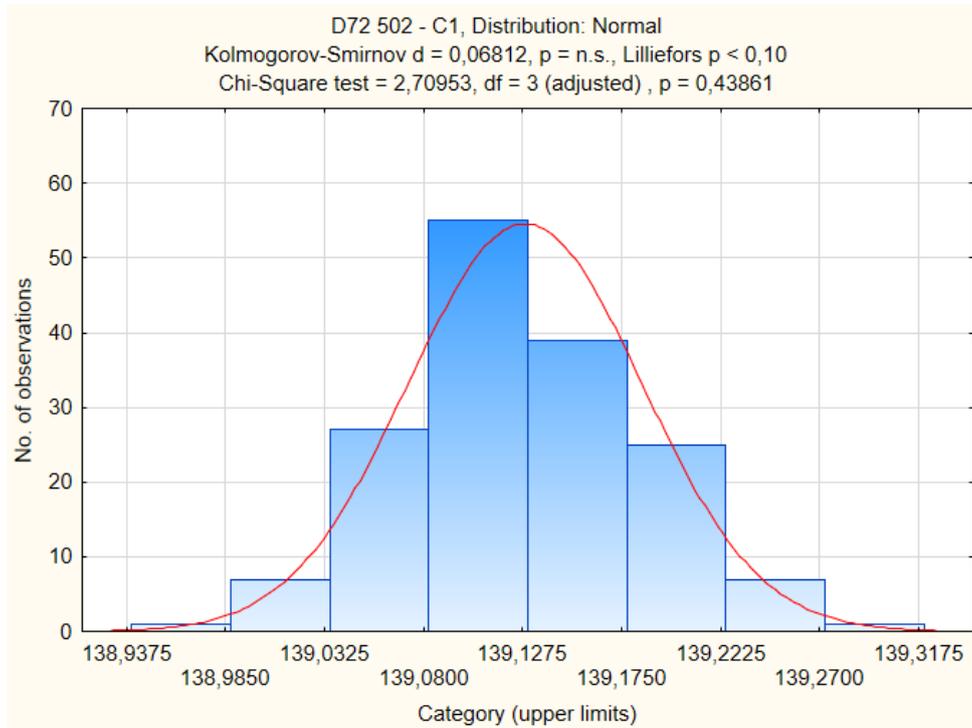


Figura F.7 - Estudo da Normalidade dos dados de C1 – D72 502

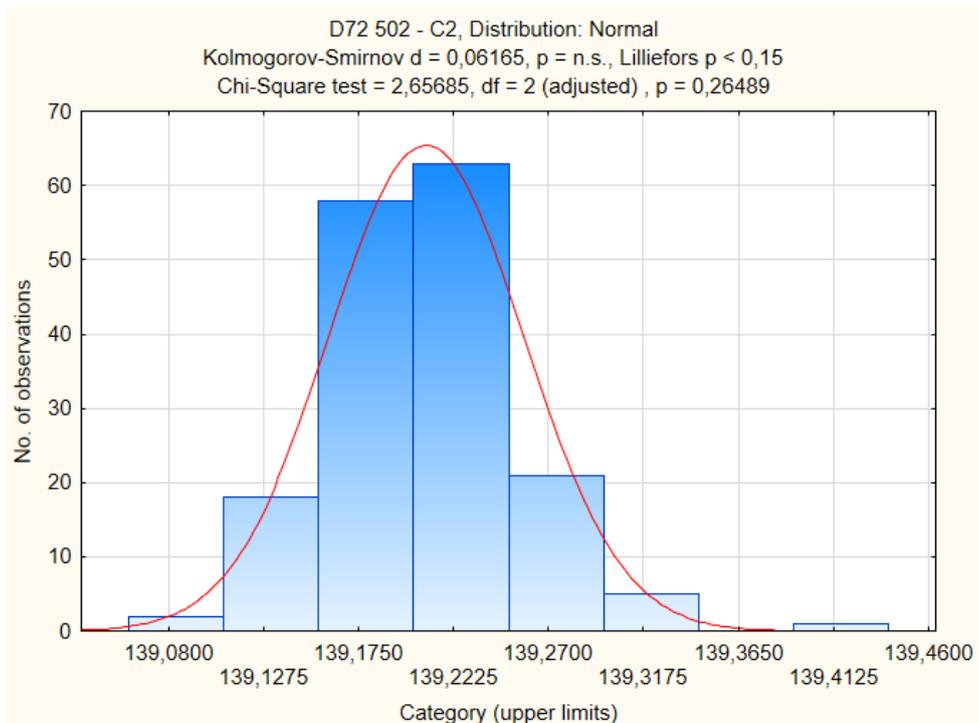


Figura F.8 - Estudo da Normalidade dos dados de C2 – D72 502

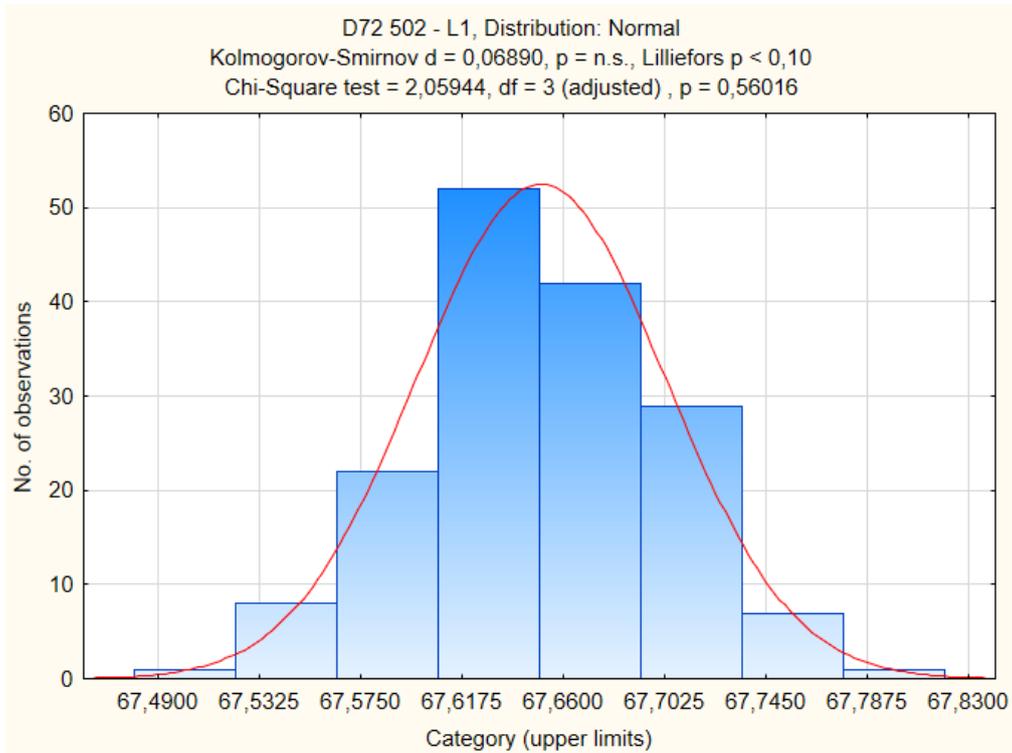


Figura F.9 - Estudo da Normalidade dos dados de L1 – D72 502

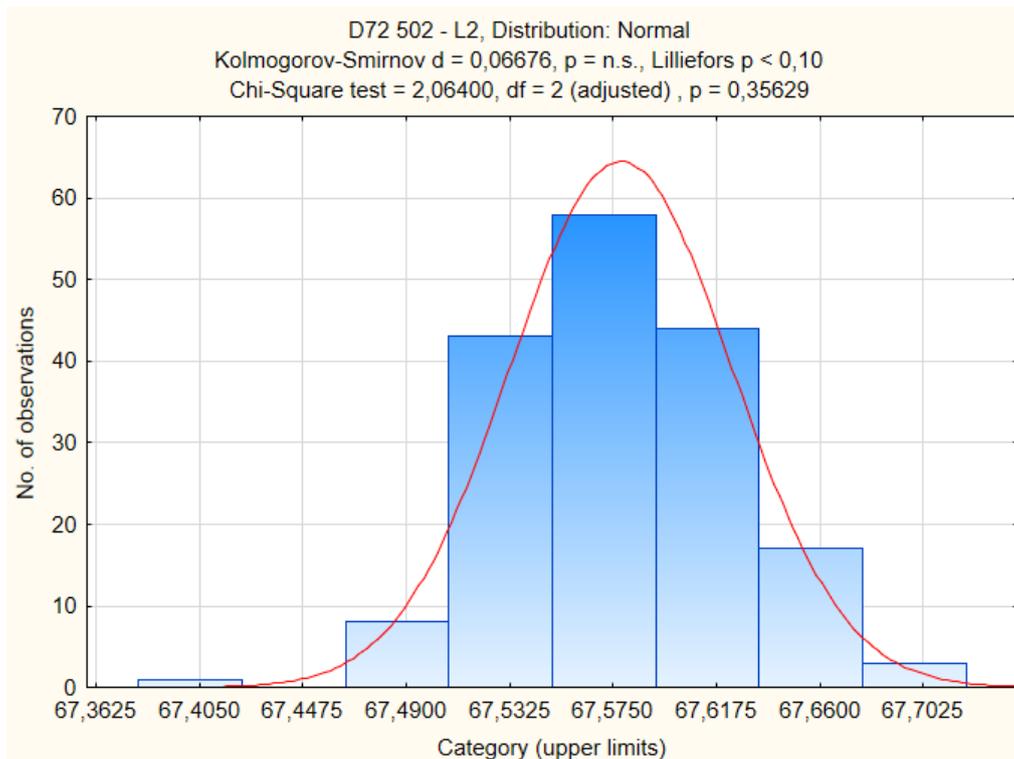


Figura F.10 - Estudo da Normalidade dos dados de L2 – D72 502

Anexo G: Tabelas para detecção de Padrões não aleatórios

a) D72 501

		D72 501 - Massa ; Run Tests Carta X-barra Center line: 302,808030 Sigma: 0,029435		
Zones A/B/C: 3,000/2,000/1,000 * Sigma Tests for special causes (runs rules)	from sample	to sample		
9 samples on same side of center	OK	OK		
6 samples in row in/decreasing	OK	OK		
14 samples alternating up & down	OK	OK		
2 of 3 samples in Zone A or beyond	OK	OK		
4 of 5 samples in Zone B or beyond	OK	OK		
15 samples in Zone C	OK	OK		
8 samples beyond Zone C	OK	OK		

Figura G.1 – Padrões não aleatórios da carta da média da Massa – D72 501

		D72 501 - Massa ; Run Tests Carta S Center line: 0,068606 Sigma: 0,022174		
Zones A/B/C: 3,000/2,000/1,000 * Sigma Tests for special causes (runs rules)	from sample	to sample		
9 samples on same side of center	OK	OK		
6 samples in row in/decreasing	OK	OK		
14 samples alternating up & down	OK	OK		
2 of 3 samples in Zone A or beyond	OK	OK		
4 of 5 samples in Zone B or beyond	OK	OK		
15 samples in Zone C	OK	OK		
8 samples beyond Zone C	OK	OK		

Figura G.2 - Padrões não aleatórios da carta do desvio padrão da Massa – D72 501

		D72 501 - C1 ; Run Tests Carta X-barra Center line: 139,152278 Sigma: 0,021250		
Zones A/B/C: 3,000/2,000/1,000 * Sigma Tests for special causes (runs rules)	from sample	to sample		
9 samples on same side of center	OK	OK		
6 samples in row in/decreasing	OK	OK		
14 samples alternating up & down	OK	OK		
2 of 3 samples in Zone A or beyond	OK	OK		
4 of 5 samples in Zone B or beyond	OK	OK		
15 samples in Zone C	OK	OK		
8 samples beyond Zone C	OK	OK		

Figura G.3 - Padrões não aleatórios da carta da média de C1 – D72 501

	D72 501 - C1 ; Run Tests Carta S Center line: 0,049528 Sigma: 0,016008	
Zones A/B/C: 3,000/2,000/1,000 * Sigma Tests for special causes (runs rules)	from sample	to sample
9 samples on same side of center	OK	OK
6 samples in row in/decreasing	OK	OK
14 samples alternating up & down	OK	OK
2 of 3 samples in Zone A or beyond	OK	OK
4 of 5 samples in Zone B or beyond	OK	OK
15 samples in Zone C	OK	OK
8 samples beyond Zone C	OK	OK

Figura G.4 - Padrões não aleatórios da carta do desvio padrão de C1 – D72 501

	D72 501 - C2 ; Run Tests Carta X-barra Center line: 139,102889 Sigma: 0,020607	
Zones A/B/C: 3,000/2,000/1,000 * Sigma Tests for special causes (runs rules)	from sample	to sample
9 samples on same side of center	OK	OK
6 samples in row in/decreasing	OK	OK
14 samples alternating up & down	OK	OK
2 of 3 samples in Zone A or beyond	OK	OK
4 of 5 samples in Zone B or beyond	OK	OK
15 samples in Zone C	OK	OK
8 samples beyond Zone C	OK	OK

Figura G.5 - Padrões não aleatórios da carta da média de C2 – D72 501

	D72 501 - C2 ; Run Tests Carta S Center line: 0,048029 Sigma: 0,015524	
Zones A/B/C: 3,000/2,000/1,000 * Sigma Tests for special causes (runs rules)	from sample	to sample
9 samples on same side of center	OK	OK
6 samples in row in/decreasing	OK	OK
14 samples alternating up & down	OK	OK
2 of 3 samples in Zone A or beyond	OK	OK
4 of 5 samples in Zone B or beyond	OK	OK
15 samples in Zone C	OK	OK
8 samples beyond Zone C	OK	OK

Figura G.6 - Padrões não aleatórios da carta do desvio padrão de C2 – D72 501

	D72 501 - L1 ; Run Tests Carta X-barra Center line: 67,598452 Sigma: 0,017442	
Zones A/B/C: 3,000/2,000/1,000 * Sigma Tests for special causes (runs rules)	from sample	to sample
9 samples on same side of center	OK	OK
6 samples in row in/decreasing	OK	OK
14 samples alternating up & down	OK	OK
2 of 3 samples in Zone A or beyond	OK	OK
4 of 5 samples in Zone B or beyond	OK	OK
15 samples in Zone C	OK	OK
8 samples beyond Zone C	OK	OK

Figura G.7 - Padrões não aleatórios da carta da média de L1 – D72 501

		D72 501 - L1 ; Run Tests	
		Carta S	
		Center line: 0,040653 Sigma: 0,013140	
Zones A/B/C: 3,000/2,000/1,000 * Sigma		from	to
Tests for special causes (runs rules)		sample	sample
9 samples on same side of center		OK	OK
6 samples in row in/decreasing		OK	OK
14 samples alternating up & down		OK	OK
2 of 3 samples in Zone A or beyond		OK	OK
4 of 5 samples in Zone B or beyond		OK	OK
15 samples in Zone C		OK	OK
8 samples beyond Zone C		OK	OK

Figura G.8 - Padrões não aleatórios da carta do desvio padrão de L1 – D72 501

		D72 501 - L2 ; Run Tests	
		Carta X-barra	
		Center line: 67,618571 Sigma: 0,018350	
Zones A/B/C: 3,000/2,000/1,000 * Sigma		from	to
Tests for special causes (runs rules)		sample	sample
9 samples on same side of center		OK	OK
6 samples in row in/decreasing		OK	OK
14 samples alternating up & down		OK	OK
2 of 3 samples in Zone A or beyond		OK	OK
4 of 5 samples in Zone B or beyond		OK	OK
15 samples in Zone C		OK	OK
8 samples beyond Zone C		OK	OK

Figura G.9 - Padrões não aleatórios da carta da média de L2 – D72 501

		D72 501 - L2 ; Run Tests	
		Carta S	
		Center line: 0,042769 Sigma: 0,013823	
Zones A/B/C: 3,000/2,000/1,000 * Sigma		from	to
Tests for special causes (runs rules)		sample	sample
9 samples on same side of center		OK	OK
6 samples in row in/decreasing		OK	OK
14 samples alternating up & down		OK	OK
2 of 3 samples in Zone A or beyond		OK	OK
4 of 5 samples in Zone B or beyond		OK	OK
15 samples in Zone C		OK	OK
8 samples beyond Zone C		OK	OK

Figura G.10 - Padrões não aleatórios da carta do desvio padrão de L2 – D72 501

b) D72 502

		D72 502 - Massa ; Runs Tests Carta X-barra Center line: 308,316057 Sigma: 0,032784		
Zones A/B/C: 3,000/2,000/1,000 * Sigma Tests for special causes (runs rules)	from sample	to sample		
9 samples on same side of center	OK	OK		
6 samples in row in/decreasing	OK	OK		
14 samples alternating up & down	OK	OK		
2 of 3 samples in Zone A or beyond	OK	OK		
4 of 5 samples in Zone B or beyond	OK	OK		
15 samples in Zone C	OK	OK		
8 samples beyond Zone C	OK	OK		

Figura G.11 - Padrões não aleatórios da carta da média da Massa – D72 502

		D72 502 - Massa ; Runs Tests Carta S Center line: 0,076412 Sigma: 0,024697		
Zones A/B/C: 3,000/2,000/1,000 * Sigma Tests for special causes (runs rules)	from sample	to sample		
9 samples on same side of center	OK	OK		
6 samples in row in/decreasing	OK	OK		
14 samples alternating up & down	OK	OK		
2 of 3 samples in Zone A or beyond	OK	OK		
4 of 5 samples in Zone B or beyond	OK	OK		
15 samples in Zone C	OK	OK		
8 samples beyond Zone C	OK	OK		

Figura G.12 - Padrões não aleatórios da carta do desvio padrão da Massa – D72 502

		D72 502 - C1 ; Runs Tests Carta X-barra Center line: 139,128642 Sigma: 0,023399		
Zones A/B/C: 3,000/2,000/1,000 * Sigma Tests for special causes (runs rules)	from sample	to sample		
9 samples on same side of center	OK	OK		
6 samples in row in/decreasing	OK	OK		
14 samples alternating up & down	OK	OK		
2 of 3 samples in Zone A or beyond	OK	OK		
4 of 5 samples in Zone B or beyond	OK	OK		
15 samples in Zone C	OK	OK		
8 samples beyond Zone C	OK	OK		

Figura G.13 - Padrões não aleatórios da carta da média de C1 – D72 502

		D72 502 - C1 ; Runs Tests Carta S Center line: 0,054539 Sigma: 0,017628		
Zones A/B/C: 3,000/2,000/1,000 * Sigma Tests for special causes (runs rules)	from sample	to sample		
9 samples on same side of center	OK	OK		
6 samples in row in/decreasing	OK	OK		
14 samples alternating up & down	OK	OK		
2 of 3 samples in Zone A or beyond	OK	OK		
4 of 5 samples in Zone B or beyond	OK	OK		
15 samples in Zone C	OK	OK		
8 samples beyond Zone C	OK	OK		

Figura G.14 - Padrões não aleatórios da carta do desvio padrão de C1 – D72 502

		D72 502 - C2 ; Runs Tests		
		Carta X-barra		
		Center line: 139,208869 Sigma: 0,020546		
Zones A/B/C: 3,000/2,000/1,000 * Sigma	Tests for special causes (runs rules)	from sample	to sample	
	9 samples on same side of center	OK	OK	
	6 samples in row in/decreasing	OK	OK	
	14 samples alternating up & down	OK	OK	
	2 of 3 samples in Zone A or beyond	OK	OK	
	4 of 5 samples in Zone B or beyond	OK	OK	
	15 samples in Zone C	OK	OK	
	8 samples beyond Zone C	OK	OK	

Figura G.15 - Padrões não aleatórios da carta da média de C2 – D72 502

		D72 502 - C2 ; Runs Tests		
		Carta S		
		Center line: 0,047887 Sigma: 0,015478		
Zones A/B/C: 3,000/2,000/1,000 * Sigma	Tests for special causes (runs rules)	from sample	to sample	
	9 samples on same side of center	OK	OK	
	6 samples in row in/decreasing	OK	OK	
	14 samples alternating up & down	OK	OK	
	2 of 3 samples in Zone A or beyond	OK	OK	
	4 of 5 samples in Zone B or beyond	OK	OK	
	15 samples in Zone C	OK	OK	
	8 samples beyond Zone C	OK	OK	

Figura G.16 - Padrões não aleatórios da carta do desvio padrão de C2 – D72 502

		D72 502 - L1 ; Runs Tests		
		Carta X-barra		
		Center line: 67,650679 Sigma: 0,021316		
Zones A/B/C: 3,000/2,000/1,000 * Sigma	Tests for special causes (runs rules)	from sample	to sample	
	9 samples on same side of center	OK	OK	
	6 samples in row in/decreasing	OK	OK	
	14 samples alternating up & down	OK	OK	
	2 of 3 samples in Zone A or beyond	OK	OK	
	4 of 5 samples in Zone B or beyond	OK	OK	
	15 samples in Zone C	OK	OK	
	8 samples beyond Zone C	OK	OK	

Figura G.17 - Padrões não aleatórios da carta da média de L1 – D72 502

		D72 502 - L1 ; Runs Tests	
		Carta S	
		Center line: 0,049683 Sigma: 0,016058	
Zones A/B/C: 3,000/2,000/1,000 * Sigma	from	to	
Tests for special causes (runs rules)	sample	sample	
9 samples on same side of center	OK	OK	
6 samples in row in/decreasing	OK	OK	
14 samples alternating up & down	OK	OK	
2 of 3 samples in Zone A or beyond	OK	OK	
4 of 5 samples in Zone B or beyond	OK	OK	
15 samples in Zone C	OK	OK	
8 samples beyond Zone C	OK	OK	

Figura G.18 - Padrões não aleatórios da carta do desvio padrão de L1 – D72 502

		D72 502 - L2 ; Runs Tests	
		Carta X-barra	
		Center line: 67,578276 Sigma: 0,018743	
Zones A/B/C: 3,000/2,000/1,000 * Sigma	from	to	
Tests for special causes (runs rules)	sample	sample	
9 samples on same side of center	OK	OK	
6 samples in row in/decreasing	OK	OK	
14 samples alternating up & down	OK	OK	
2 of 3 samples in Zone A or beyond	OK	OK	
4 of 5 samples in Zone B or beyond	OK	OK	
15 samples in Zone C	OK	OK	
8 samples beyond Zone C	OK	OK	

Figura G.19 - Padrões não aleatórios da carta da média de L2 – D72 502

		D72 502 - L2 ; Runs Tests	
		Carta S	
		Center line: 0,043685 Sigma: 0,014119	
Zones A/B/C: 3,000/2,000/1,000 * Sigma	from	to	
Tests for special causes (runs rules)	sample	sample	
9 samples on same side of center	OK	OK	
6 samples in row in/decreasing	OK	OK	
14 samples alternating up & down	OK	OK	
2 of 3 samples in Zone A or beyond	OK	OK	
4 of 5 samples in Zone B or beyond	OK	OK	
15 samples in Zone C	OK	OK	
8 samples beyond Zone C	OK	OK	

Figura G.20 - Padrões não aleatórios da carta do desvio padrão de L2 – D72 502

Anexo H: Cartas de Controlo para a Fase II do SPC

a) Cartas Z

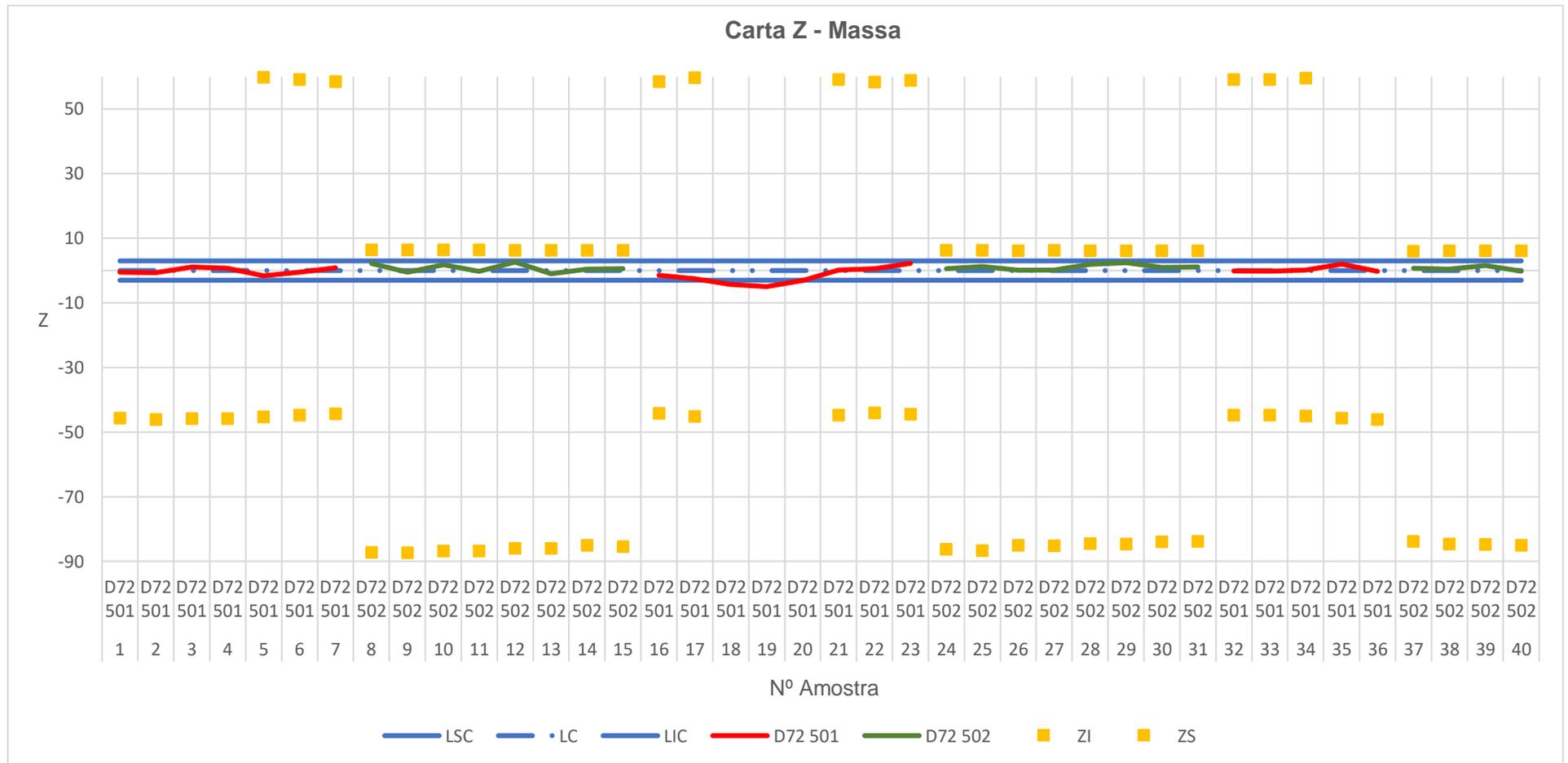


Figura H.1 – Carta Z para a Massa

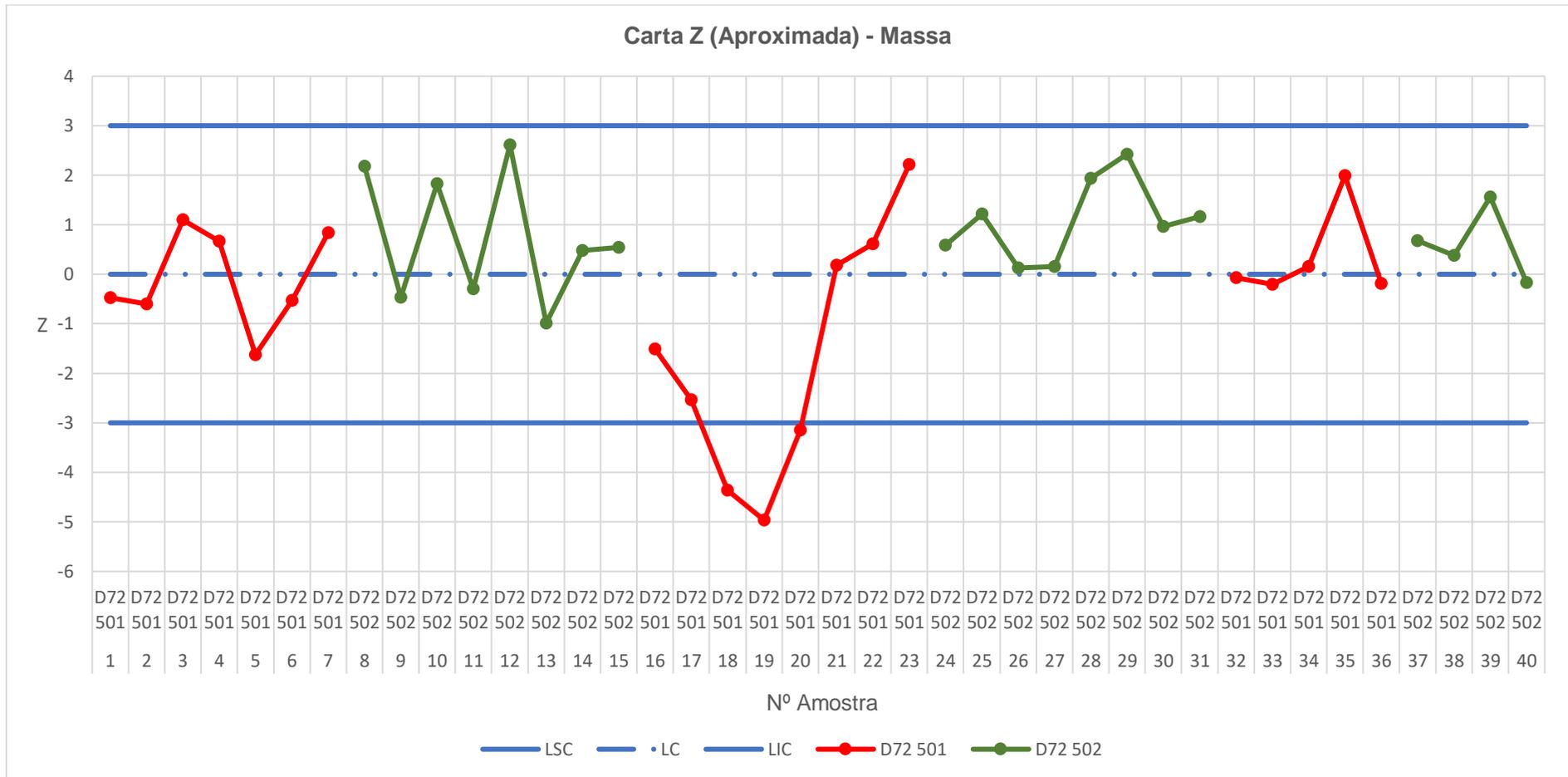


Figura H.2 – Carta Z Aproximada para a Massa

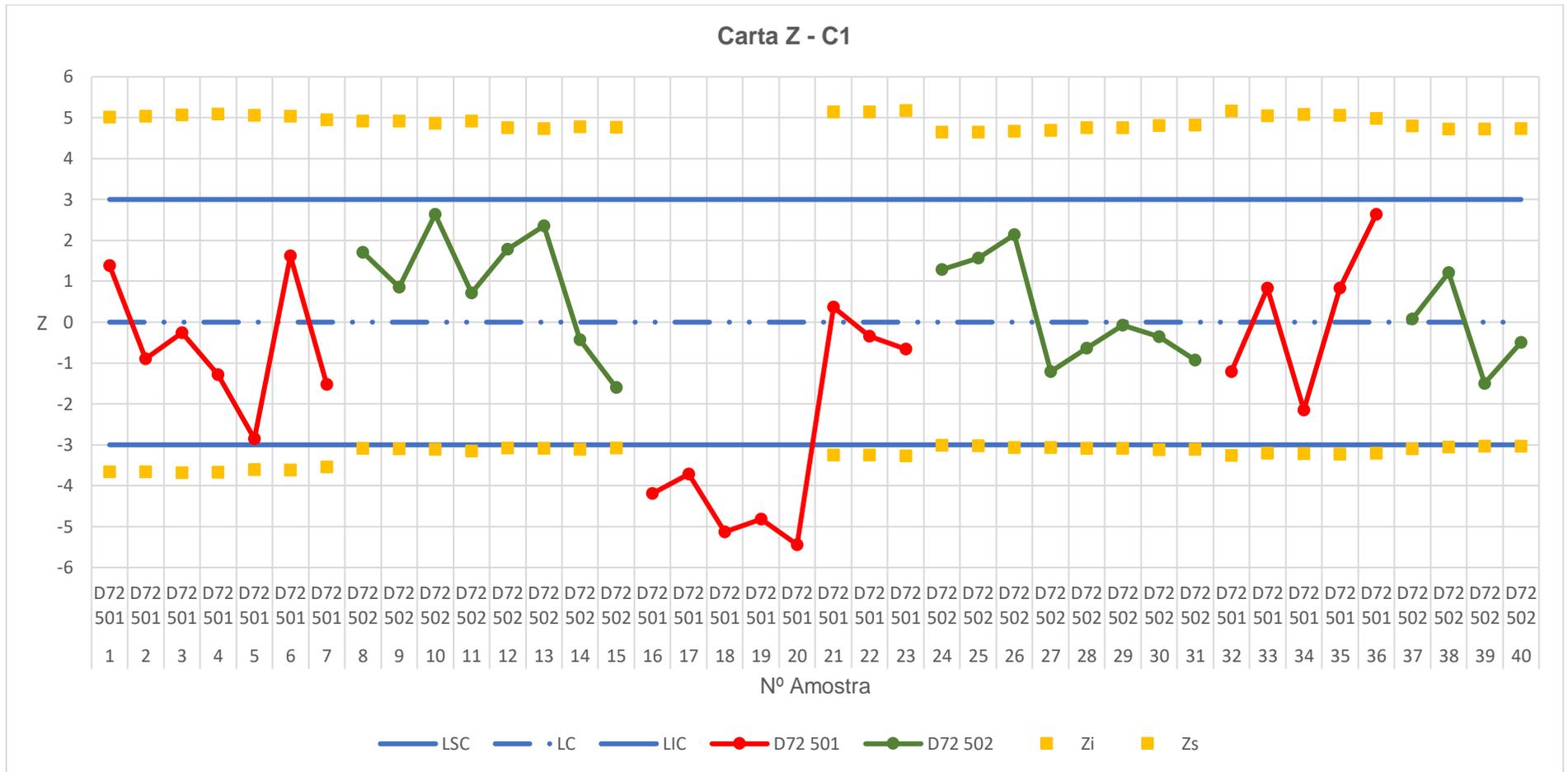


Figura H.3 – Carta Z para C1

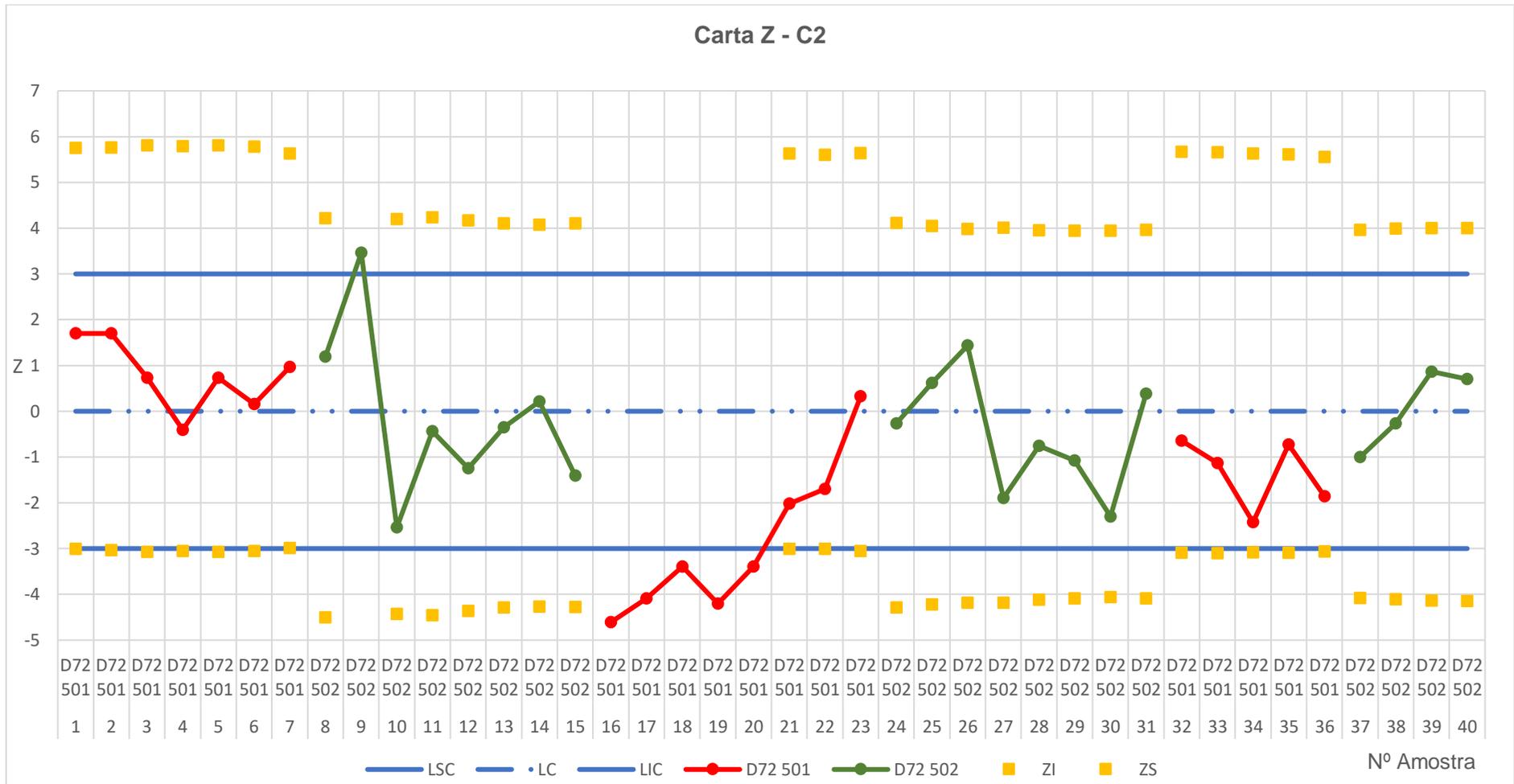


Figura H.4 - Carta Z para C2

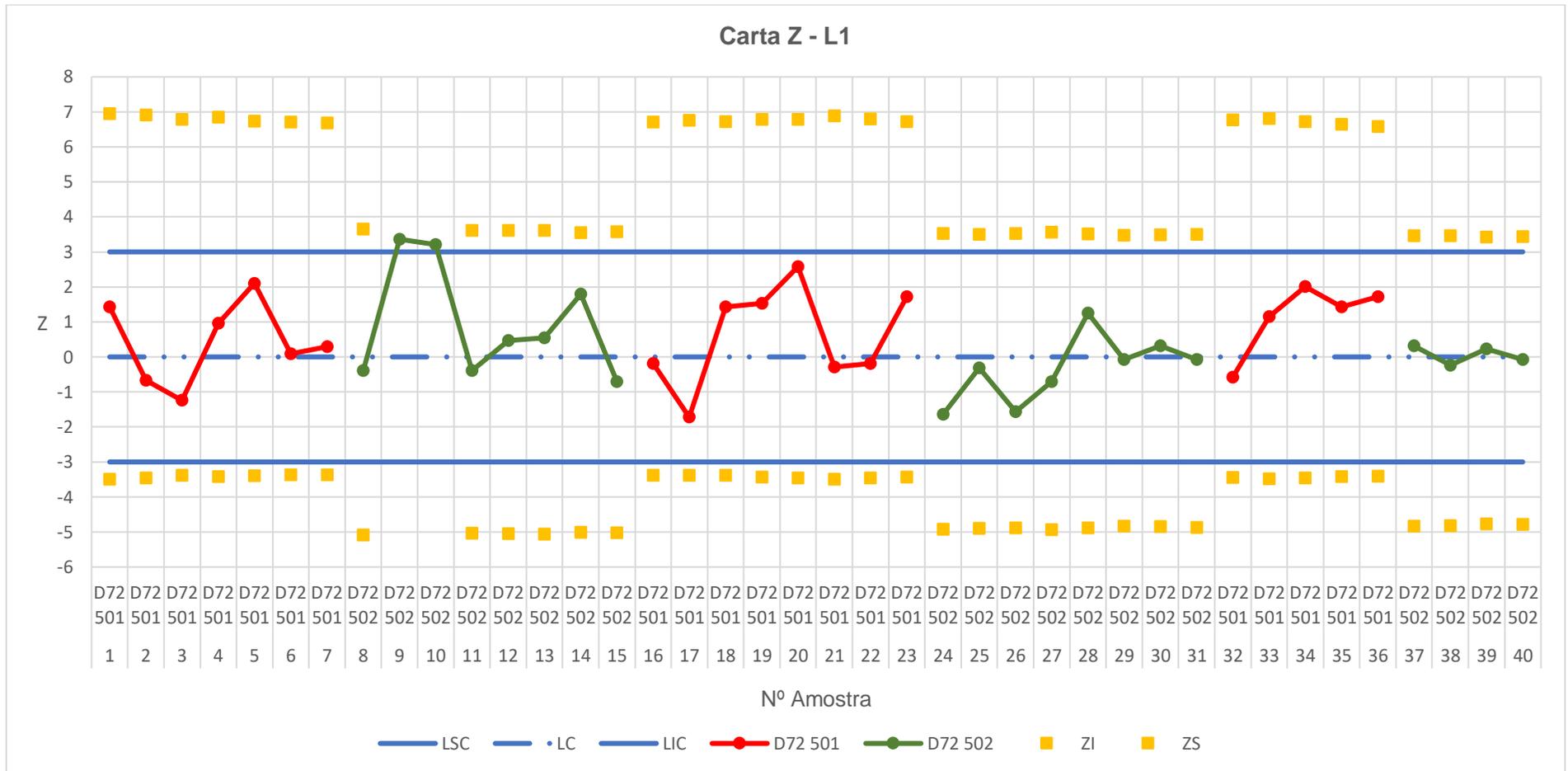


Figura H.5 - Carta Z para L1

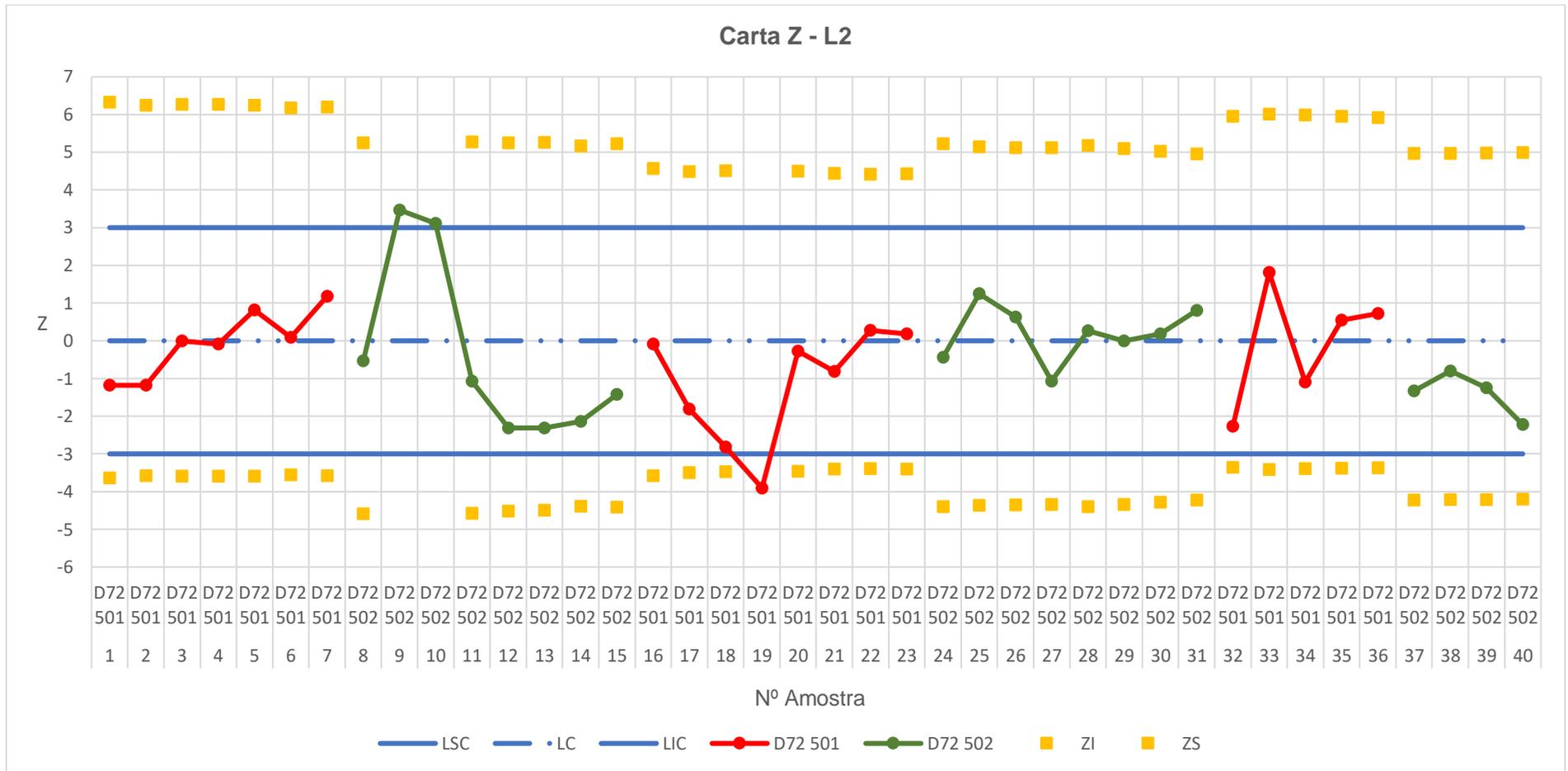


Figura H.6 - Carta Z para L2

b) Cartas W

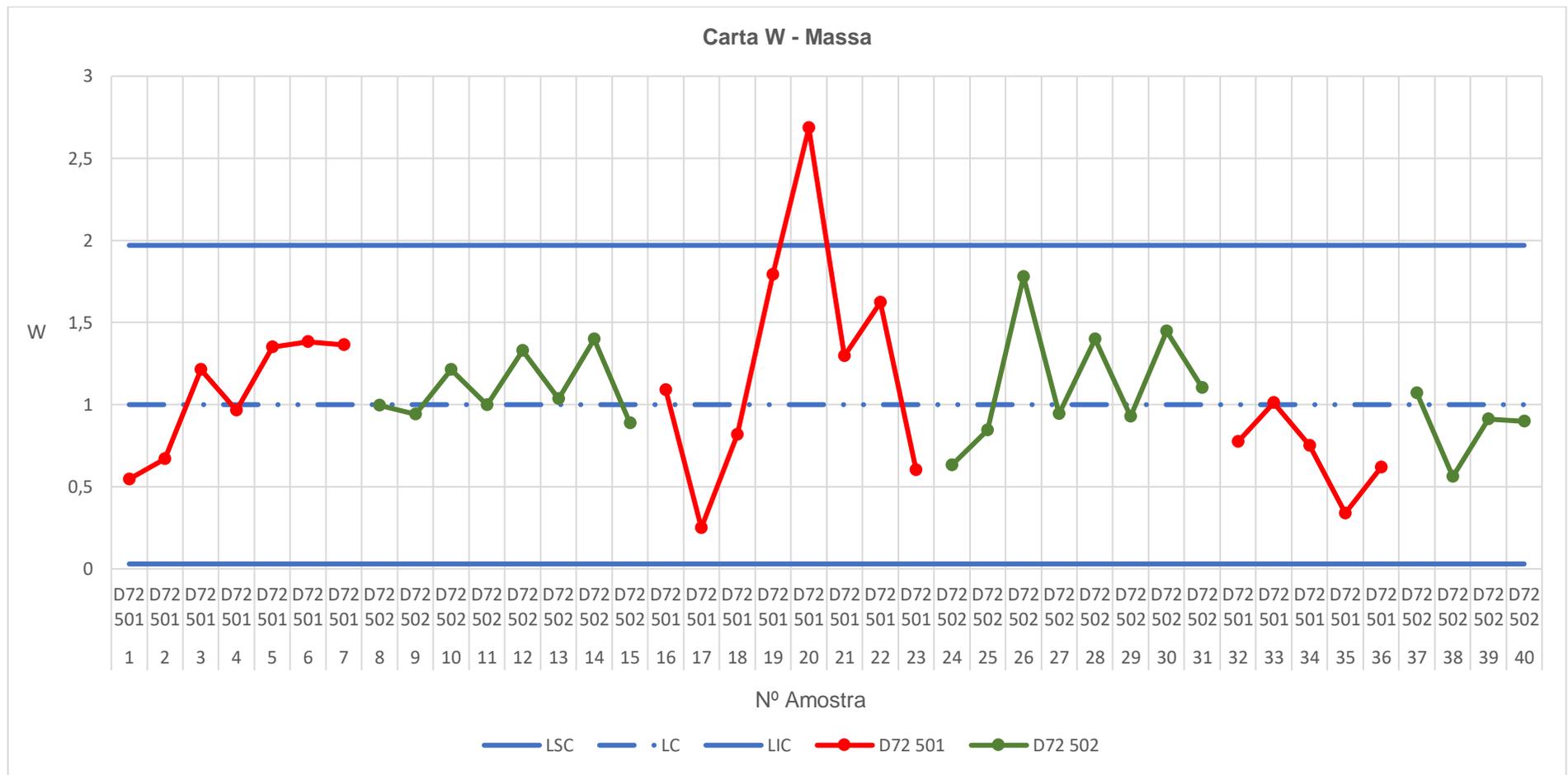


Figura H.7 - Carta W para a Massa

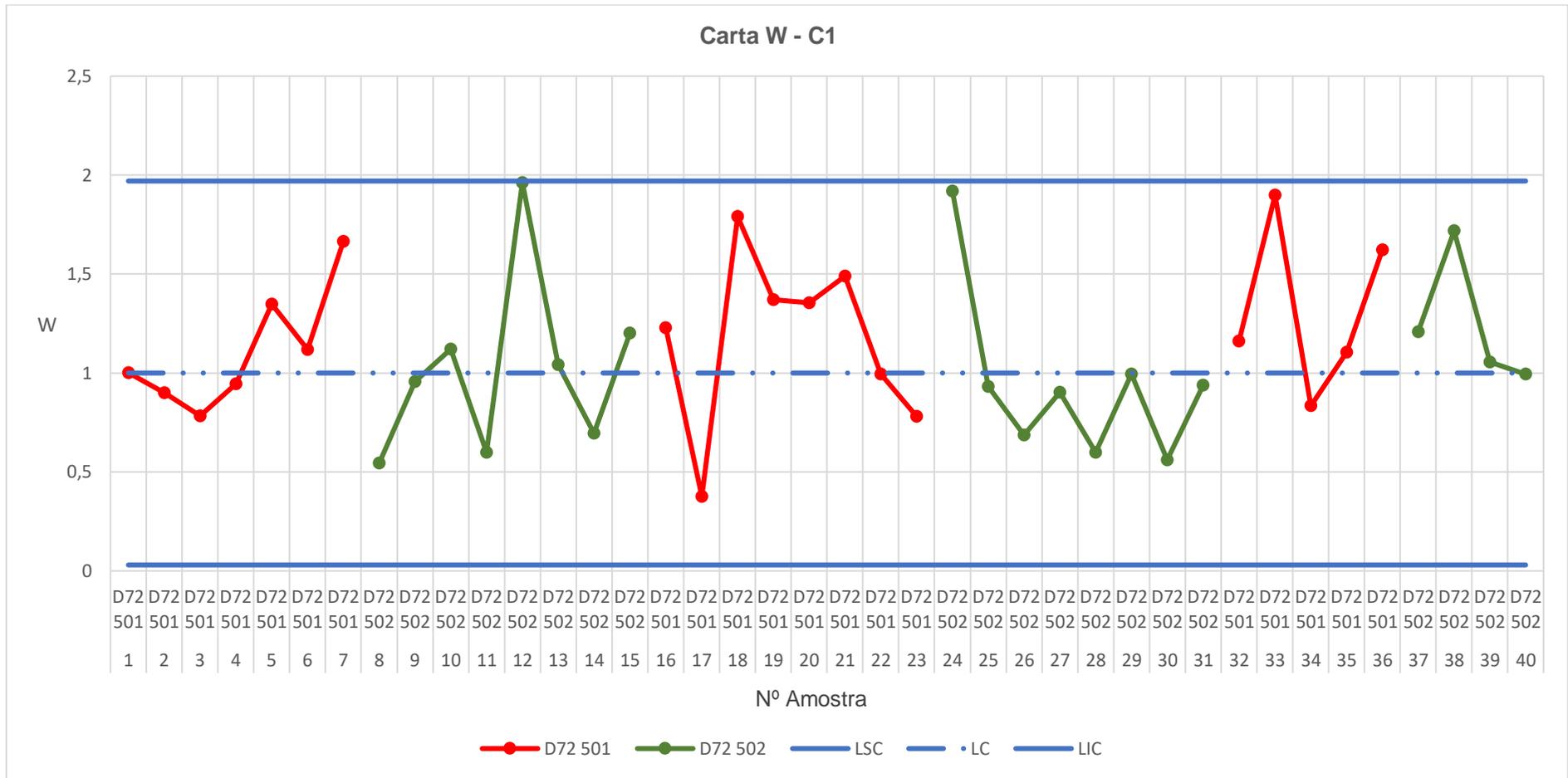


Figura H.8 - Carta W para C1

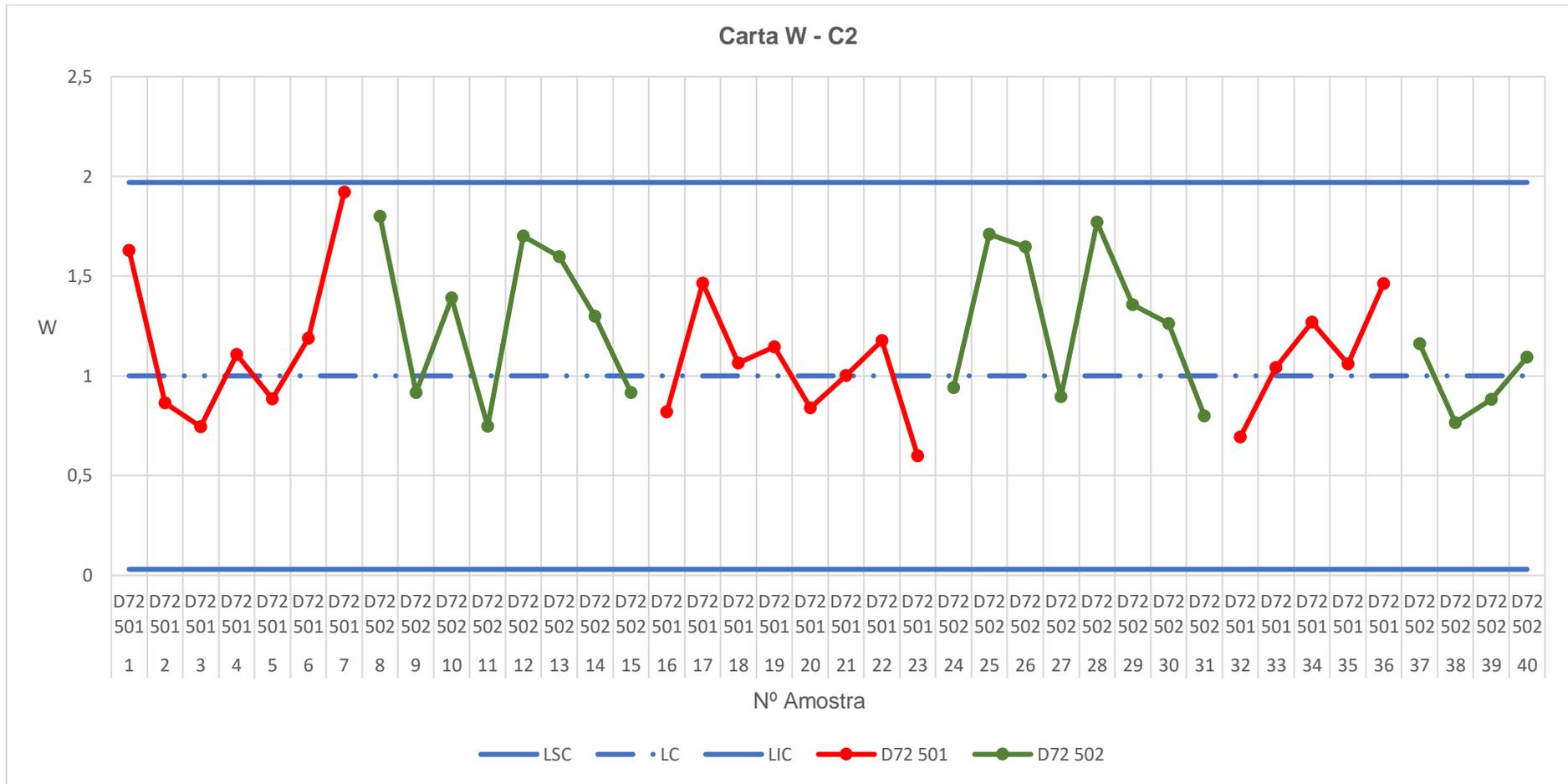


Figura H.9 - Carta W para C2

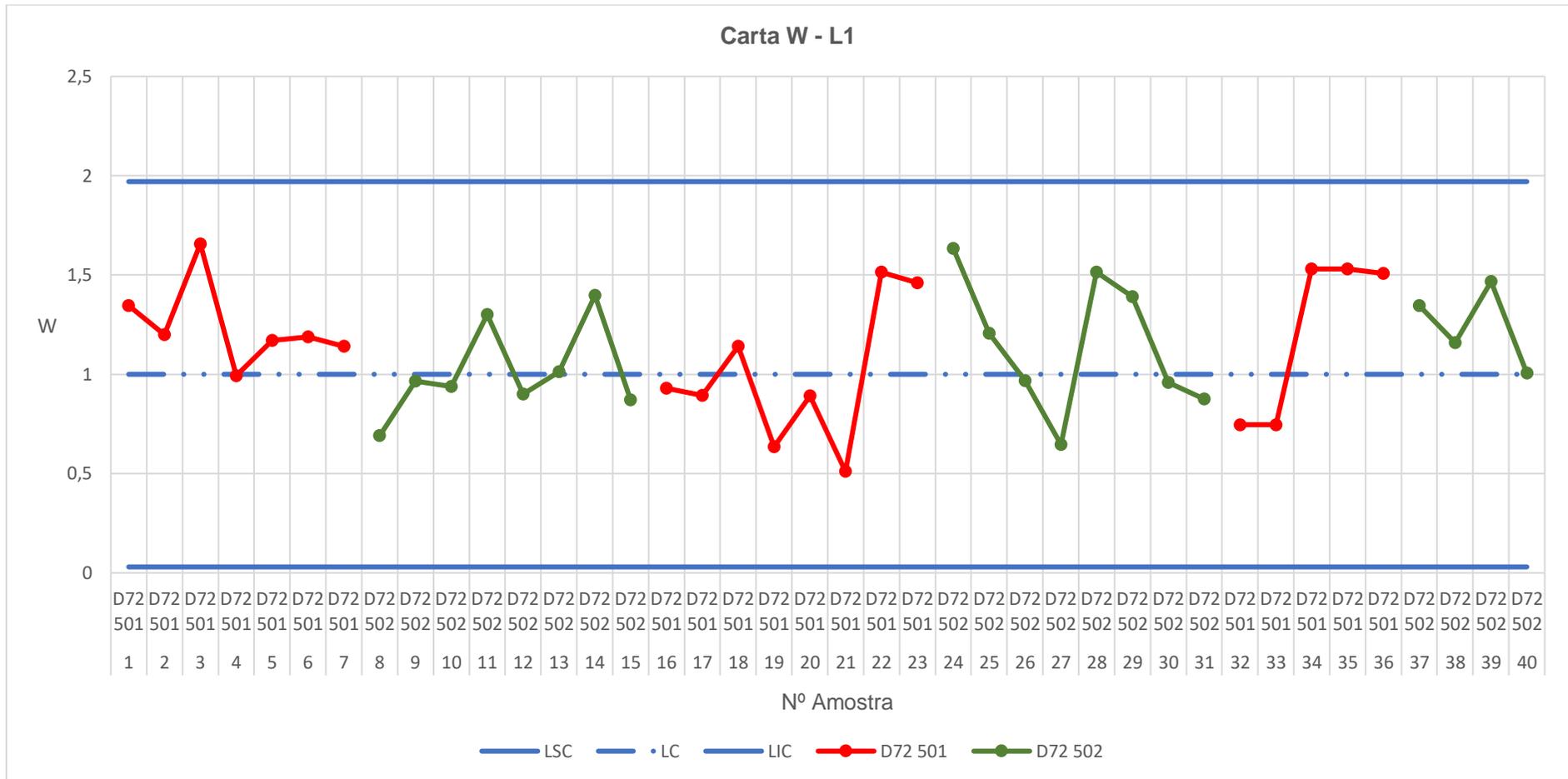


Figura H.10 - Carta W para L1

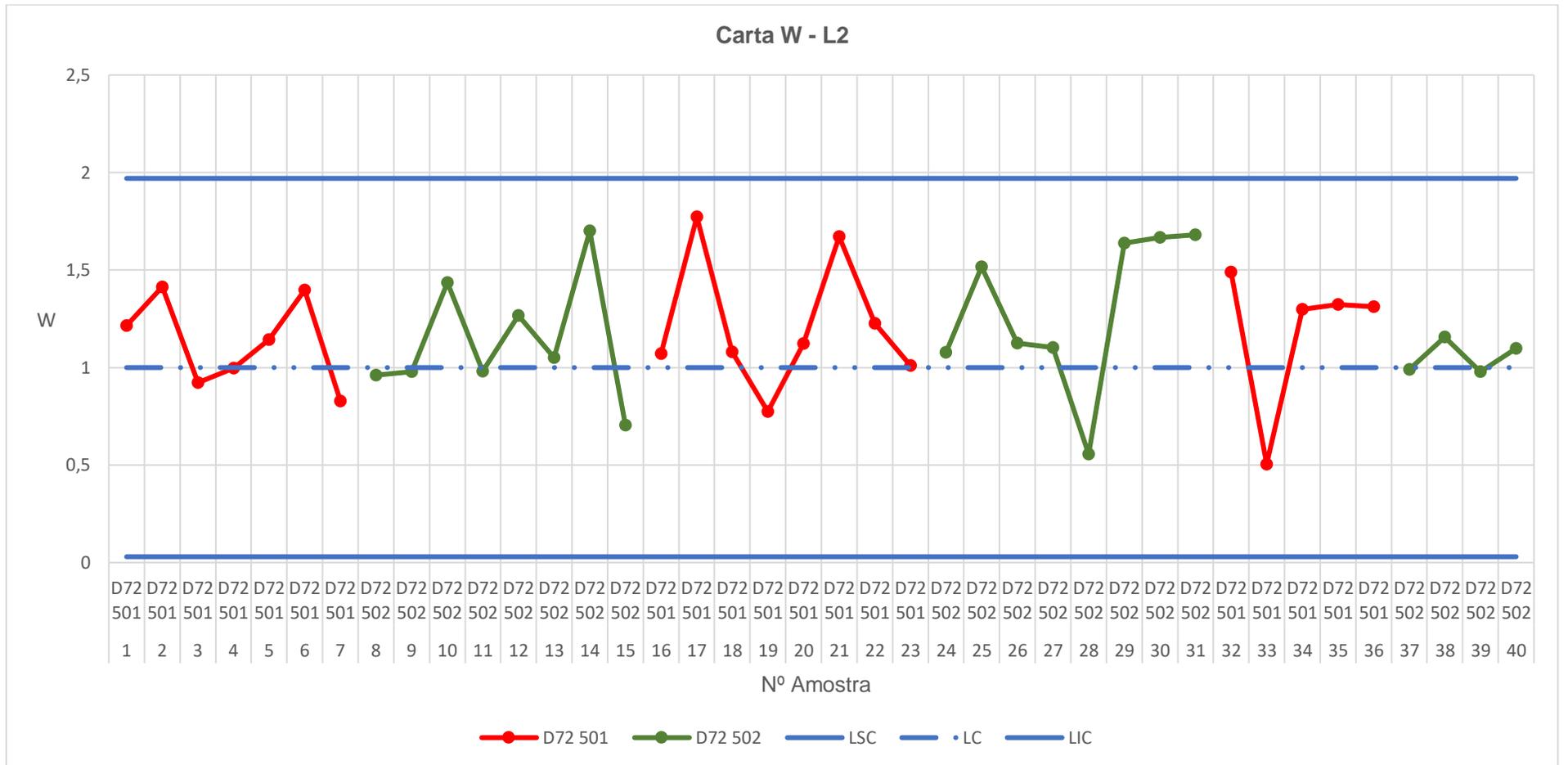


Figura H.11 - Carta W para L2

Anexo I: Carta de Controlo para a Fase II do *MSPC*

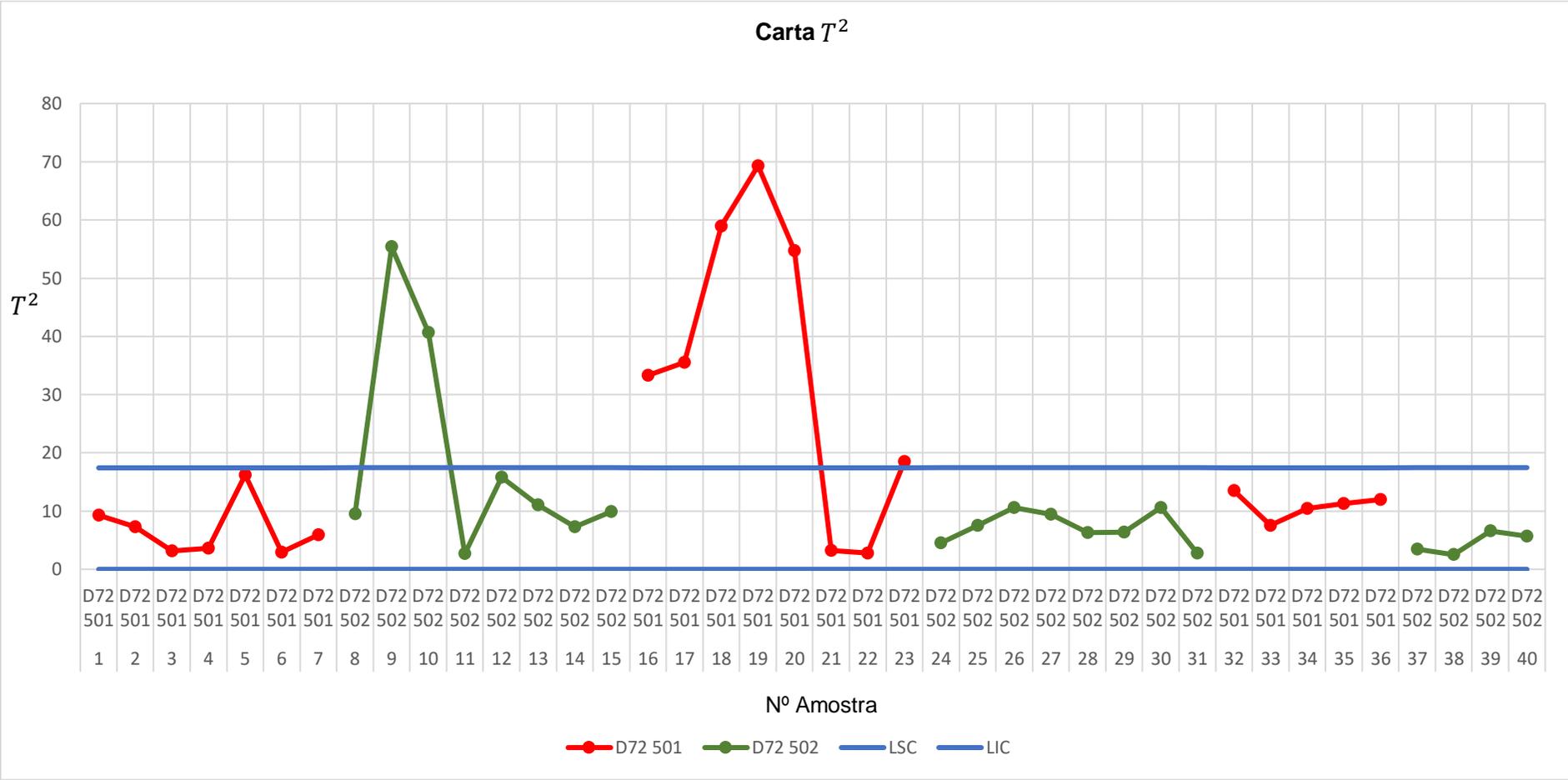


Figura I.1 – Carta para a Fase II do *MSPC*