



Patrícia Isabel Outeiro Cordeiro

Licenciatura em Ciências de Engenharia e Gestão Industrial

Aplicação da Metodologia Seis Sigma na Melhoria de um Processo de Aplicação de Composto vedante numa Indústria de Pro- dução de Embalagens Alimentares

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

Orientadora: Professora Doutora Ana Sofia Leonardo Vilela de Matos,
Faculdade de Ciências e Tecnologia,
Universidade Nova de Lisboa

Coorientador: Professor Doutor Pedro Alexandre de Albuquerque Marques,
Faculdade de Engenharia,
Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias

Júri:

Presidente: Professora Doutora Ana Paula Ferreira Barroso

Arguente: Professor Doutor Izunildo Fernandes Cabral

Vogais: Professora Doutora Ana Sofia Leonardo Vilela de Matos
Engenheiro Raúl Rebelo Gouveia



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Outubro, 2021

Aplicação da Metodologia Seis Sigma na Melhoria de um Processo de Aplicação de Composto vedante numa Indústria de Produção de Embalagens Alimentares

Copyright © Patrícia Isabel Outeiro Cordeiro, 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

Concluída esta etapa, deixo aqui os meus profundos agradecimentos àqueles que contribuíram para a realização deste projeto e que marcaram de alguma forma o meu crescimento ao longo deste percurso académico.

Agradeço à Professora Ana Sofia Matos, pela orientação da dissertação, pela disponibilidade, paciência e ensinamentos transmitidos. Ao Professor Pedro Marques agradeço, os conselhos que me ajudaram a construir este trabalho.

Ao Engenheiro Raul Gouveia, pela oportunidade e acompanhamento na empresa onde o projeto foi desenvolvido.

Aos meus amigos, que foram sem dúvida uma fonte de ajuda, alegria, e boa disposição e que tornaram mais fácil este percurso que agora termina. Um agradecimento especial à Professora e amiga Ana Carla Ferreira pela ajuda nos aspetos linguísticos, e pelo acompanhamento ao longo de tantos anos.

Aos meus pais, irmão e avós, por todo o apoio que desde sempre demonstraram. Agradeço todos os sacrifícios, colinhos e palavras de incentivo que me impulsionaram chegar aqui, por sempre terem acreditado em mim, ainda antes de eu acreditar.

Por fim, deixo um agradecimento ao meu namorado, que esteve ao meu lado nos momentos bons e nos menos bons, fazendo-me sempre olhar para o lado positivo das coisas com a paciência e carinho que o caracterizam, obrigada.

RESUMO

Na indústria, ao longo dos anos, a garantia da qualidade dos produtos tem vindo a ganhar cada vez mais importância. Apesar da importância dos avanços nas tecnologias de produção, é facto que as empresas que comercializam bens com padrões de qualidade superior vencem repetidamente os seus rivais, sendo hoje em dia um dos objetivos das organizações de sucesso a busca contínua de oportunidades de melhoria de forma a diferenciarem o seu negócio.

O principal objetivo deste estudo foi a melhoria da capacidade do processo de aplicação de composto vedante por um *robot* autónomo (*spider*), em tampos de latas de atum, numa linha da empresa Crown Holdings, SA.

Assim, recorreu-se à aplicação do Seis Sigma, concretizada pela metodologia DMAIC (*Define, Measure, Analyze, Improve, Control*) na qual estão integradas algumas ferramentas, técnicas e métodos com o objetivo de melhorar a qualidade.

Após uma primeira análise ao processo, foi realizada uma análise estatística de forma a definir a *baseline performance* e definir as ações de melhoria para alcançar os objetivos traçados.

As melhorias aplicadas foram:

- Revisão do procedimento de pesagem dos esboços;
- Revisão das cartas de controlo usadas na empresa;
- Introdução à empresa da análise da autocorrelação dos dados;
- Aumento da capacidade do processo de aplicação de composto vedante para valor acima de 1.33;
- Redução do desperdício na linha;

Após a implementação das melhorias verificou-se a um aumento da performance do processo através das métricas nível sigma e DPMO (defeitos por milhão de oportunidades). As melhorias

foram quantificadas em termos monetários tendo-se estimado uma economia de 18 000€ por cada milhão de tampos produzidos.

Palavras-chave: Seis Sigma, DMAIC, Dados Autocorrelacionados, Desenho de Experiências, Controlo Estatístico do Processo

ABSTRACT

Over the years, the quality assurance of products in industry has become increasingly important. And despite the importance of advances in production technologies, the fact that companies who market their goods with superior quality standards repeatedly beat their rivals' sales is evident, nowadays one of the goals of successful organizations is the continuous search for opportunities to improve in order to differentiate their business from others.

The main objective of this study was to improve the capacity of the sealing compound application process by an autonomous robot (spider), in tuna can tops, in a production line of the company Crown Holdings, SA.

Thus, Six Sigma was applied, using the DMAIC (Define, Measure, Analyze, Improve, Control) methodology, in which some tools, techniques, and methods are integrated with the objective of improving quality.

After a preliminary analysis of the process, a deep statistical analysis was carried out to define the baseline performance and determine the improvement actions to achieve the objectives set.

The improvements applied were:

- Revision of the weighing procedure of the can tops;
- Revision of the control charts used in the company;
- Introduction of the analysis of autocorrelated data to the company;
- Increase of the capacity of sealing compound application process to a value above 1.33;
- Reduction of waste in the line;

After the implementation of the forementioned improvements, the enhancement of the process performance was verified through the metrics sigma level and DPMO (defects per million opportunities). The improvements were quantified in monetary terms with an estimated savings of 18,000€ per million can tops produced.

Keywords: Six Sigma, DMAIC, Autocorrelated data, Design of Experiments, Statistical Process Control

ÍNDICE

| | |
|--|-------------|
| AGRADECIMENTOS..... | III |
| RESUMO..... | V |
| ABSTRACT | VII |
| ÍNDICE..... | IX |
| LISTA DE TABELAS..... | XIII |
| LISTA DE FIGURAS..... | XV |
| LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS | XIX |
| CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1. ENQUADRAMENTO E JUSTIFICAÇÃO DO TEMA | 1 |
| 1.2. OBJETIVOS..... | 2 |
| 1.3. METODOLOGIA PROPOSTA..... | 2 |
| 1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO | 3 |
| CAPÍTULO 2 - ESTRATÉGIAS E FERRAMENTAS DE MELHORIA CONTÍNUA | 5 |
| 2.1. MELHORIA CONTÍNUA..... | 5 |
| 2.2. <i>TOTAL QUALITY MANAGEMENT</i> | 6 |
| 2.3. SEIS SIGMA..... | 8 |
| 2.3.1. ESTRUTURA ORGANIZACIONAL SEIS SIGMA..... | 11 |
| 2.3.2. <i>Estrutura de melhoria 6 sigma - DMAIC</i> | 12 |
| 2.3.2.1. <i>Fase Define</i> | 13 |
| 2.3.2.2. <i>Fase Measure</i> | 19 |
| 2.3.2.3. <i>Fase Analyze</i> | 32 |
| 2.3.2.4. <i>Fase Improve</i> | 37 |
| 2.3.2.5. <i>Fase Control</i> | 38 |

| | |
|--|------------|
| CAPÍTULO 3 - CARACTERIZAÇÃO DA ORGANIZAÇÃO E SELEÇÃO DO PROJETO DE MELHORIA | 40 |
| 3.1. CROWN HOLDINGS, INC..... | 40 |
| 3.2. CROWN HOLDINGS, INC - ALCOCHETE | 41 |
| 3.3. SELEÇÃO DO PROJETO DE MELHORIA E ALGUNS COMENTÁRIOS | 43 |
| CAPÍTULO 4 - ESTUDO DE CASO | 47 |
| 4.1. <i>Fase Define</i> | 47 |
| 4.1.1. <i>Iniciar o Project Charter</i> | 48 |
| 4.1.2. <i>Mapa de processos de alto nível</i> | 49 |
| 4.1.3. <i>Análise de Stakeholders e da resistência à mudança</i> | 50 |
| 4.2. <i>Fase Measure</i> | 53 |
| 4.2.1. <i>Compreender o processo “As Is”</i> | 54 |
| 4.2.2. <i>Validação do sistema de medição</i> | 55 |
| 4.2.3. <i>Melhoria do Sistema de Medição</i> | 58 |
| 4.2.4. <i>Análise estatística dos dados representativos do processo</i> | 58 |
| 4.2.5. <i>Análise gráfica dos dados</i> | 61 |
| 4.2.6. <i>Análise da autocorrelação dos dados</i> | 67 |
| 4.2.7. <i>Estabelecimento da baseline performance</i> | 71 |
| 4.2.8. <i>Atualização do Project Charter</i> | 73 |
| 4.3. <i>Fase Analyze</i> | 75 |
| 4.3.1. <i>Identificação das potenciais fontes de variação</i> | 76 |
| 4.3.2. <i>Determinação das causas mais prováveis para o problema e confirmação das relações causa-efeito</i> | 77 |
| 4.3.3. <i>Identificação dos fatores significativos para a resposta</i> | 78 |
| 4.3.4. <i>Confirmação dos objetivos</i> | 88 |
| 4.4. <i>Fase Improve</i> | 89 |
| 4.4.1. <i>Síntese das ações de melhoria</i> | 89 |
| 4.4.2. <i>Ensaio de melhoria</i> | 90 |
| 4.4.3. <i>Verificação do sucesso do ensaio de melhoria</i> | 90 |
| 4.4.4. <i>Quantificação das melhorias</i> | 94 |
| 4.5. <i>FASE CONTROL</i> | 96 |
| 4.5.1. <i>Plano de controlo</i> | 96 |
| 4.5.2. <i>Trabalhos futuros</i> | 97 |
| CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES GERAIS..... | 100 |
| 5.1 CONCLUSÕES DO ESTUDO..... | 100 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 103 |
| ANEXOS | 111 |
| ANEXO A: BPMN DA LINHA PM1..... | 113 |

| | |
|--|-----|
| ANEXO B: CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DA BALANÇA METLER TOLEDO PB 153 – S..... | 117 |
| ANEXO C: FOLHA DE REGISTO DO ESTUDO R&R..... | 121 |
| ANEXO D: FOLHA DE REGISTO, CARTAS DE CONTROLO E QUADRO RESUMO DA ANÁLISE DE VARIACÃO DO ESTUDO R&R APÓS CORREÇÕES..... | 123 |
| ANEXO E: ANÁLISE DE VARIÂNCIA, TWO-WAY-ANOVA PARA AMOSTRAS ALEATÓRIAS..... | 125 |
| ANEXO F: RUN CHARTS, SPIDERS 1, 2 E 4 | 126 |
| ANEXO G: DADOS, CONFIRMAÇÃO ANALÍTICA DA AUTOCORRELAÇÃO..... | 129 |
| ANEXO H: MATRIZES DE CORRELAÇÃO..... | 135 |
| ANEXO I: RELAÇÃO NÍVEL SIGMA, DPMO..... | 136 |
| ANEXO J: DOE 2 FATORES A 3 NÍVEIS, COMBINAÇÕES E ORDEM PELA QUAL FORAM EXPERIMENTADAS, VALORES DAS RESPOSTAS, MASSA DE COMPOSTO VEDANTE E $-10\log(S^2)$ | 137 |
| ANEXO K: DOE 2 FATORES A 3 NÍVEIS, GRÁFICOS DE NORMALIDADE DE RESÍDUOS, HOMOCEASTICIDADE E RESÍDUOS EM FUNÇÃO DA ORDEM DE REALIZAÇÃO DAS EXPERIÊNCIAS..... | 145 |
| ANEXO L: DOE 2 FATORES A 3 NÍVEIS, GRÁFICOS DE NORMALIDADE DE RESÍDUOS, HOMOCEASTICIDADE E RESÍDUOS EM FUNÇÃO DA ORDEM DE REALIZAÇÃO DAS EXPERIÊNCIAS, - $10\log(S^2)$ | 147 |
| ANEXO M: DOE 3 FATORES A 3 NÍVEIS, COMBINAÇÕES E ORDEM PELA QUAL FORAM EXPERIMENTADAS, VALORES DA RESPOSTA MASSA DE COMPOSTO VEDANTE..... | 149 |
| ANEXO N: DOE 3 FATORES A 3 NÍVEIS, GRÁFICOS DE NORMALIDADE DE RESÍDUOS, HOMOCEASTICIDADE E RESÍDUOS EM FUNÇÃO DA ORDEM DE REALIZAÇÃO DAS EXPERIÊNCIAS..... | 157 |
| ANEXO O: DADOS PESAGENS ENSAIO DE MELHORIA E ANÁLISE PELAS CÂMARAS DE VISÃO... | 159 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| TABELA 2.1 - EVENTOS MARCANTES NA PROPAGAÇÃO DO SEIS SIGMA, 1980-1990..... | 9 |
| TABELA 2.2 - IMPLEMENTAÇÃO DO SEIS SIGMA, UM PONTO DE VISTA FINANCEIRO | 11 |
| TABELA 2.3 - ANOVA, UM FATOR A VÁRIOS NÍVEIS | 24 |
| TABELA 2.4 - EQUAÇÕES ÍNDICE DE CAPACIDADE POTENCIAL E ÍNDICE DE CAPACIDADE..... | 28 |
| TABELA 4.1 – QUADRO RESUMO - ANÁLISE DA VARIAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO | 58 |
| TABELA 4.2 - <i>ONE-WAY-ANOVA</i> , REFERÊNCIAS | 59 |
| TABELA 4.3 - <i>TWO-WAY-ANOVA</i> , REFERÊNCIAS E <i>SPIDERS</i> | 60 |
| TABELA 4.4 - MÉDIAS E DESVIOS PADRÃO, DADOS <i>SPIDERS</i> | 60 |
| TABELA 4.5 - P-VALUES OBTIDOS ATRAVÉS DE <i>TWO-WAY-ANOVA</i> PARA AMOSTRAS ALEATÓRIAS | 61 |
| TABELA 4.6 - ANÁLISE <i>RUN CHARTS</i> , <i>SPIDERS</i> 1, 2 E 4 | 63 |
| TABELA 4.7 - PARÂMETROS n , m E ρ PARA AS QUATRO <i>SPIDERS</i> | 68 |
| TABELA 4.8 - VALORES CRÍTICOS E RESULTADOS DO TESTE DE HIPÓTESES PARA AS QUATRO <i>SPIDERS</i> | 68 |
| TABELA 4.9 - CAPACIDADE, NÍVEL SIGMA E DPMO | 72 |
| TABELA 4.10 - PONTUAÇÕES DA CORRELAÇÕES DOS CRITÉRIOS FACE ÀS CAUSAS | 77 |
| TABELA 4.11 - MATRIZ CAUSA-EFEITO | 78 |
| TABELA 4.12 - ANOVA, DOE 2 FATORES A 3 NÍVEIS..... | 80 |
| TABELA 4.13 - ANOVA CONDENSADA, DOE 2 FATORES A 3 NÍVEIS..... | 81 |
| TABELA 4.14 - ANOVA, DOE 2 FATORES A 3 NÍVEIS - $10\log(S^2)$ | 82 |
| TABELA 4.15 - ANOVA CONDENSADA, DOE 2 FATORES A 3 NÍVEIS - $10\log(S^2)$ | 82 |
| TABELA 4.16 - ANOVA, DOE 3 FATORES A 3 NÍVEIS..... | 85 |
| TABELA 4.17 - ANOVA CONDENSADA, DOE 3 FATORES A 3 NÍVEIS..... | 86 |
| TABELA 4.18 – COMPARAÇÃO DAS MÉTRICAS, ANTES-DEPOIS..... | 94 |
| | |
| TABELA C. 1 - FOLHA DE REGISTO DO ESTUDO R&R..... | 121 |
| | |
| TABELA D. 1 - FOLHA DE REGISTO DO ESTUDO R&R APÓS CORREÇÕES | 123 |
| TABELA D. 2 - QUADRO RESUMO - ANÁLISE DA VARIAÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO APÓS CORREÇÕES..... | 124 |
| | |
| TABELA E. 1 - <i>TWO-WAY-ANOVA</i> PARA AMOSTRA ALEATÓRIA 1 | 125 |
| TABELA E. 2 - <i>TWO-WAY-ANOVA</i> PARA AMOSTRA ALEATÓRIA 2 | 125 |

| | |
|--|-----|
| TABELA E. 3 - <i>Two-Way-Anova</i> PARA AMOSTRA ALEATÓRIA 3 | 125 |
| TABELA E. 4 - <i>Two-Way-Anova</i> PARA AMOSTRA ALEATÓRIA 4 | 125 |
| | |
| TABELA G. 1 - DADOS, CONFIRMAÇÃO ANALÍTICA DA AUTOCORRELAÇÃO, <i>SPIDER 1</i> | 129 |
| TABELA G. 2 - DADOS, CONFIRMAÇÃO ANALÍTICA DA AUTOCORRELAÇÃO, <i>SPIDER 2</i> | 130 |
| TABELA G. 3 - DADOS, CONFIRMAÇÃO ANALÍTICA DA AUTOCORRELAÇÃO, <i>SPIDER 3</i> | 131 |
| TABELA G. 4 - DADOS, CONFIRMAÇÃO ANALÍTICA DA AUTOCORRELAÇÃO, <i>SPIDER 4</i> | 132 |
| | |
| TABELA I. 1 - RELAÇÃO NÍVEL SIGMA, DPMO | 136 |
| | |
| TABELA J. 1 - DOE 2 FATORES A 3 NÍVEIS, COMBINAÇÕES E ORDEM PELA QUAL FORAM EXPERIMENTADAS, VALORES DAS RESPOSTAS, MASSA DE COMPOSTO VEDANTE E $-10\log(S^2)$ | 139 |
| | |
| TABELA M. 1 - DOE 3 FATORES A 3 NÍVEIS, COMBINAÇÕES E ORDEM PELA QUAL FORAM EXPERIMENTADAS, VALORES DA RESPOSTA MASSA DE COMPOSTO VEDANTE | 151 |
| | |
| TABELA O. 1 - DADOS PESAGENS ENSAIO DE MELHORIA E ANÁLISE PELAS CÂMARAS DE VISÃO | 159 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| FIG. 2.1 - VALORES, TÉCNICAS E FERRAMENTAS DA TQM | 7 |
| FIG. 2.2 - FASES DO PROJETO DMAIC, INTEGRAÇÃO COM CICLO PDCA..... | 13 |
| FIG. 2.3 - EXEMPLO DIAGRAMA SIPOC | 16 |
| FIG. 2.4 - EXEMPLO <i>FORCE FIELD DIAGRAM</i> | 17 |
| FIG. 2.5 - EXEMPLO DA MATRIZ DE ANÁLISE DE <i>STAKEHOLDERS</i> E ESTRATÉGIAS A ADOTAR | 18 |
| FIG. 2.6 - ELEMENTOS BÁSICOS, BPMN..... | 21 |
| FIG. 2.7 - REGRAS PARA DETECÇÃO DE CAUSAS ESPECIAIS | 27 |
| FIG. 2.8 - CORRESPONDÊNCIA SIGMA LEVEL - DPMO..... | 29 |
| FIG. 2.9 - EXEMPLO DIAGRAMA DE ISHIKAWA..... | 33 |
| FIG. 2.10 - COMBINAÇÕES TRATAMENTOS, FATORIAL COMPLETO 3^2 | 36 |
| FIG. 2.11 - COMBINAÇÕES TRATAMENTOS, FATORIAL COMPLETO 3^3 | 37 |
| FIG. 3.1 - CROWN HOLDINGS, ALCOCHETE | 42 |
| FIG. 3.2 - EMBALAGEM DE 2 PEÇAS, PRODUZIDA NA CROWN HOLDINGS - ALCOCHETE | 42 |
| FIG. 3.3 - FOTOGRAFIA DE ESBOÇO..... | 44 |
| FIG. 3.4 - FOTOGRAFIA DE <i>SPIDER</i> | 44 |
| FIG. 4.1 - FASE DEFINE, PASSOS E FERRAMENTAS | 47 |
| FIG. 4.2 - PROJECT CHARTER..... | 48 |
| FIG. 4.3 - DIAGRAMA SIPOC DA LINHA PM1 | 49 |
| FIG. 4.4 - ANÁLISE DE <i>STAKEHOLDERS</i> | 50 |
| FIG. 4.5 - <i>FORCE FIELD ANALYSIS</i> | 51 |
| FIG. 4.6 - FASE <i>MEASURE</i> , PASSOS E FERRAMENTAS..... | 54 |
| FIG. 4.7 - ESQUEMA DA BALANÇA METLLER TOLEDO PB 153-S..... | 56 |
| FIG. 4.8 - CARTA DE CONTROLO DA MÉDIA, ESTUDO R&R..... | 57 |
| FIG. 4.9 - CARTA DE CONTROLO DA AMPLITUDE, ESTUDO R&R | 57 |
| FIG. 4.10 - GRÁFICO DE INTERVALOS DO PESO MÉDIO DE COMPOSTO VEDANTE VS REFERÊNCIA | 59 |
| FIG. 4.11 - <i>RUN CHART</i> , <i>SPIDER 3</i> | 62 |
| FIG. 4.12 - <i>NORMAL PROBABILITY PLOT SPIDER 1</i> | 64 |
| FIG. 4.13 - <i>NORMAL PROBABILITY PLOT SPIDER 4</i> | 64 |
| FIG. 4.14 - <i>NORMAL PROBABILITY PLOT SPIDER 2</i> | 65 |
| FIG. 4.15 - <i>NORMAL PROBABILITY PLOT SPIDER 3</i> | 65 |

| | |
|---|-----|
| FIG. 4.16 – <i>BOX-COX SPIDER 2</i> | 65 |
| FIG. 4.17 – <i>BOX-COX SPIDER 3</i> | 65 |
| FIG. 4.18 - HISTOGRAMA <i>SPIDER 1</i> | 66 |
| FIG. 4.19 - HISTOGRAMA <i>SPIDER 2</i> | 66 |
| FIG. 4.20 - HISTOGRAMA <i>SPIDER 3</i> | 66 |
| FIG. 4.21 - HISTOGRAMA <i>SPIDER 4</i> | 66 |
| FIG. 4.22 - CARTA DE CONTROLO DO PESO DE COMPOSTO VEDANTE - <i>SPIDER 2</i> - SUSPEITA DE AUTOCORRELAÇÃO DE DADOS | 67 |
| FIG. 4.23 - CARTA <i>X</i> , <i>SPIDER 1</i> | 70 |
| FIG. 4.24 - CARTA <i>S</i> , <i>SPIDER 1</i> | 70 |
| FIG. 4.25 – CARTA <i>X</i> , <i>SPIDER 2</i> | 70 |
| FIG. 4.26 - CARTA <i>S</i> , <i>SPIDER 2</i> | 70 |
| FIG. 4.27 - CARTA <i>X</i> , <i>SPIDER 3</i> | 70 |
| FIG. 4.28 - CARTA <i>S</i> , <i>SPIDER 3</i> | 70 |
| FIG. 4.29 - CARTA <i>X</i> , <i>SPIDER 4</i> | 70 |
| FIG. 4.30 - CARTA <i>S</i> , <i>SPIDER 4</i> | 70 |
| FIG. 4.31 – CARTA DE CONTROLO DA MÉDIA COM NOVOS DADOS | 73 |
| FIG. 4.32 - PROJECT CHARTER ATUALIZADO | 74 |
| FIG. 4.33 - FASE <i>ANALYZE</i> , PASSOS E FERRAMENTAS | 75 |
| FIG. 4.34 - DIAGRAMA DE ISHIKAWA DO PROBLEMA EM ESTUDO..... | 76 |
| FIG. 4.35 - ESBOÇOS IDENTIFICADOS | 80 |
| FIG. 4.36 - PESAGEM DE ESBOÇO..... | 80 |
| FIG. 4.37 - ANÁLISE CÂMARAS DE VISÃO..... | 80 |
| FIG. 4.38 - GRÁFICO DE SUPERFÍCIE PARA A OBTENÇÃO DE NÍVEIS ÓTIMOS | 81 |
| FIG. 4.39 - GRÁFICO DE SUPERFÍCIE PARA A OBTENÇÃO DE NÍVEIS ÓTIMOS, $-10\log(S^2)$ | 83 |
| FIG. 4.40 - GRÁFICO DE SUPERFÍCIE, DOE 3 FATORES A 3 NÍVEIS | 87 |
| FIG. 4.41 - FASE <i>IMPROVE</i> , PASSOS E FERRAMENTAS..... | 89 |
| FIG. 4.42 - RESULTADO ENSAIO DE MELHORIA, CÂMARAS DE VISÃO | 91 |
| FIG. 4.43 - CARTAS DE CONTROLO DA MÉDIA E AMPLITUDE, ENSAIO DE MELHORIA | 92 |
| FIG. 4.44 - CARTAS DE CONTROLO DA MÉDIA E AMPLITUDE, ENSAIO DE MELHORIA, APÓS ELIMINADAS CAUSAS ESPECIAIS DE VARIAÇÃO | 92 |
| FIG. 4.45 - TESTE DE NORMALIDADE, ENSAIO DE MELHORIA..... | 93 |
| FIG. 4.46 - HISTOGRAMA RESULTADOS ENSAIO DE MELHORIA, CAPACIDADE REAL E POTENCIAL..... | 94 |
| FIG. 4.47 - FASE CONTROL, PASSOS E FERRAMENTAS | 96 |
| | |
| FIG. A. 1 - BPMN DA LINHA PM1..... | 115 |
| | |
| FIG. B. 1 - PÁGINA 1 DO CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DA BALANÇA METLER TOLEDO PB 153 - S..... | 117 |
| FIG. B. 2 - PÁGINA 2 DO CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DA BALANÇA METLER TOLEDO PB 153 - S..... | 118 |
| FIG. B. 3 - PÁGINA 3 DO CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DA BALANÇA METLER TOLEDO PB 153 - S..... | 119 |
| | |
| FIG. D. 1 - CARTA DE CONTROLO DA AMPLITUDE DO ESTUDO R&R APÓS CORREÇÕES..... | 124 |

| | |
|--|-----|
| FIG. D. 2 - CARTA DE CONTROLO DA MÉDIA DO ESTUDO R&R APÓS CORREÇÕES..... | 124 |
| FIG. F. 1 - <i>RUN CHART, SPIDER 1</i> | 126 |
| FIG. F. 2 - <i>RUN CHART, SPIDER 2</i> | 126 |
| FIG. F. 3 - <i>RUN CHART, SPIDER 4</i> | 127 |
| FIG. F. 1 - <i>RUN CHART, SPIDER 1</i> | 126 |
| FIG. F. 2 - <i>RUN CHART, SPIDER 2</i> | 126 |
| FIG. F. 3 - <i>RUN CHART, SPIDER 4</i> | 127 |
| FIG. H. 1 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO, <i>SPIDER 1</i> | 135 |
| FIG. H. 2 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO, <i>SPIDER 2</i> | 135 |
| FIG. H. 3 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO, <i>SPIDER 3</i> | 135 |
| FIG. H. 4 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO, <i>SPIDER 4</i> | 135 |
| FIG. K. 1 - GRÁFICO DE NORMALIDADE, DOE 2 FATORES A 3 NÍVEIS..... | 145 |
| FIG. K. 2 - GRÁFICO HOMOCEASTICIDADE, DOE 2 FATORES A 3 NÍVEIS..... | 145 |
| FIG. K. 3 - GRÁFICO DOS RESÍDUOS EM FUNÇÃO DA ORDEM DAS EXPERIÊNCIAS, DOE 2 FATORES A 3 NÍVEIS..... | 146 |
| FIG. L. 1 - GRÁFICO DE NORMALIDADE, DOE 2 FATORES A 3 NÍVEIS, $-10\log(S^2)$ | 147 |
| FIG. L. 2 - GRÁFICO HOMOCEASTICIDADE, DOE 2 FATORES A 3 NÍVEIS $-10\log(S^2)$ | 147 |
| FIG. L. 3 - GRÁFICO DOS RESÍDUOS EM FUNÇÃO DA ORDEM DAS EXPERIÊNCIAS, DOE 2 FATORES A 3 NÍVEIS, - $10\log(S^2)$ | 148 |
| FIG. N. 1 - GRÁFICO DE NORMALIDADE, DOE 3 FATORES A 3 NÍVEIS | 157 |
| FIG. N. 2 - GRÁFICO DE HOMOCEASTICIDADE, DOE 3 FATORES A 3 NÍVEIS | 157 |
| FIG. N. 3 - GRÁFICO DOS RESÍDUOS EM FUNÇÃO DA ORDEM DAS EXPERIÊNCIAS, DOE 3 FATORES A 3 NÍVEIS | 158 |

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÓNIMOS

BPMN – *Business Process Modelling Notation* – Notação de Modelação de Processos de Negócios

CTQ – *Critical to Quality* – Característica Crítica da Qualidade

DMAIC – *Define, Measure, Analyze, Improve, Control* – Definir, Medir, Analisar, Melhorar, Controlar

DOE – *Design of Experiments* – Desenho de Experiências

R&R – *Repeatability and Reproducibility* – Repetibilidade e Reprodutibilidade

SIPOC – *Suppliers, Inputs, Process, Outputs, Customers* – Fornecedores, Entradas, Processo, Saídas, Clientes

SMART – *Specific, Measurable, Achievable, Relevant, Time Constrained* – Específico, Mensurável, Alcançável, Relevante, Delimitado por tempo

SPC – *Statistical Process Control* – Controlo Estatístico do Processo

TQM – *Total Quality Management* – Gestão Total da Qualidade

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresenta-se o enquadramento e justificação do tema do estudo desenvolvido, os seus objetivos, estrutura e metodologia seguidas na dissertação.

1.1. Enquadramento e justificação do tema

Nos últimos anos, um número crescente de empresas tem vindo a utilizar diferentes programas de qualidade a fim de aumentar a satisfação dos clientes externos e internos bem como para reduzir os custos da falta de qualidade. A melhoria dos processos tem sido muitas vezes conseguida através de uma abordagem integrada, utilizando estratégias como o *Total Quality Management* (TQM), Lean, Seis Sigma e Lean Seis Sigma. Entre todas as estratégias, o Seis Sigma é talvez a mais amplamente escolhida para conduzir as melhorias (Hung & Sung, 2011).

O Seis Sigma é uma metodologia sistemática que visa a excelência operacional através de um processo contínuo de melhorias. Esta filosofia tem sido implementada com sucesso por todo o mundo há mais de 20 anos, produzindo melhorias significativas na rentabilidade de organizações grandes ou pequenas (Antony et al., 2012).

O ciclo DMAIC juntamente com ferramentas de análise estatística (como o desenho de experiências) e não estatísticas (como esquemas e diagramas de processo), é uma estrutura fundamental para alcançar as melhorias definidas como objetivo do projeto Seis Sigma. Este ciclo de melhoria tem sido amplamente utilizado tanto nas indústrias de serviços como nas de produção para melhorar a rapidez e precisão na implementação do Seis Sigma (Hakimi et al., 2018).

Posto isto, no presente caso de estudo, recorreu-se à metodologia Seis Sigma concretizada pelo ciclo DMAIC (*Define, Measure, Analyze, Improve, Control*) para conduzir um projeto com o objetivo de atingir a melhoria do C_{pk} da aplicação de composto vedante, na linha PM1 na fábrica da empresa Crown Holdings, SA, localizada em Alcochete.

O facto da metodologia Seis Sigma já ser implementada há vários anos na empresa onde se realizou o estudo, e a existência abundante de dados relativamente ao processo a estudar foi determinante para a escolha da mesma, sendo unanime que seria o caminho a seguir para melhorar o processo em questão.

1.2. Objetivos

No decurso da presente dissertação, seguindo os princípios da metodologia Seis Sigma serão implementadas ferramentas da qualidade recorrendo a um ciclo DMAIC, de forma a cumprir os seguintes objetivos:

- Melhorar a capacidade do processo de aplicação de composto vedante em tampos de latas de atum, produzidos na empresa Crown Holdings, SA na linha PM1;
- Reduzir a quantidade de desperdício da linha PM1 da empresa Crown Holdings, SA.

Para a concretização da melhoria, pretende-se atingir um valor de capacidade do processo (C_{pk}) superior a 1.33. A variável em estudo será a quantidade de composto vedante, em miligramas, aplicada.

Em suma, após a identificação e implementação das ações de melhoria, pretende-se obter um conjunto de resultados que mostre um processo de aplicação de composto vedante capaz, com a métrica da capacidade do processo superior a 1.33 e que produza menos defeitos do que anteriormente.

1.3. Metodologia proposta

Depois de definido o tema global da dissertação, iniciou-se um estudo profundo na área do Seis Sigma concretizando-se na revisão bibliográfica desta dissertação. Para a redação da revisão bibliográfica, foram utilizadas diferentes plataformas e motores de busca, como o Science Direct, Emerald Insight e Spinger, para se obter informação relevante sobre a área em estudo, tendo em consideração a sua aplicabilidade na ótica das empresas.

Surgiu então a oportunidade de integrar a metodologia Seis Sigma numa lista de projetos de melhoria pendentes na empresa Crown Holdings, SA, e depois de uma larga reflexão optou-se pelo projeto que visava à melhoria do C_{pk} da aplicação de composto vedante da linha PM1. Assim tendo como foco o projeto de melhoria selecionado, aprofundou-se o conhecimento sobre ferramentas e técnicas da qualidade para que pudessem ser aplicadas de forma a atingir os objetivos definidos.

Posto isto, deu-se início à implementação da metodologia Seis Sigma, visando os objetivos de cada fase do ciclo DMAIC. Foram fornecidos os dados necessários para uma análise primária e

posteriormente foram recolhidos os valores que se revelaram necessários ao longo da execução do projeto de melhoria.

Finalmente, concluído o ciclo DMAIC, foram retiradas conclusões gerais acerca do estudo e apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

1.4. Estrutura da dissertação

A presente dissertação está dividida em cinco capítulos, seguidos dos anexos referentes aos trabalhos conduzidos.

No primeiro capítulo é feito o enquadramento e justificação do tema escolhido, definidos os objetivos para o estudo, a metodologia proposta e a estrutura da dissertação.

No segundo capítulo, são abordadas estratégias, métodos e ferramentas de melhoria contínua considerados de elevada relevância para o estudo.

No terceiro capítulo é realizada a caracterização da organização onde o estudo foi desenvolvido e explicada a escolha do projeto de melhoria.

No quarto capítulo é abordado o caso de estudo seguindo a estrutura de melhoria DMAIC (*Define, Analyze, Improve, Control*).

E por último, no quinto capítulo são tecidas as conclusões gerais do estudo.

CAPÍTULO 2 – ESTRATÉGIAS E FERRAMENTAS DE MELHORIA CONTÍNUA

Neste capítulo, expõe-se a revisão bibliográfica realizada acerca das temáticas, estratégias/metodologias de melhoria contínua, em particular o Seis Sigma, o ciclo DMAIC e algumas ferramentas que se podem utilizar na sua concretização.

2.1. Melhoria Contínua

A expressão “melhoria contínua” tem-se tornado cada vez mais popular entre as empresas, este conceito está associado à variedade de abordagens utilizadas para o desenvolvimento das empresas, organizações e dos seus processos (Caffyn, 1999).

A melhoria contínua foi utilizada pela primeira vez no Japão na década de 50, onde surgiu sob o nome *Kaizen* que deriva da junção de dois caracteres japoneses, *Kai* (改) que significa mudança, e *Zen* (善), para melhor. Com a implementação desta filosofia verificou-se uma melhoria na qualidade dos produtos e assim esta rapidamente se estendeu para o ocidente (Macpherson et al., 2015; Radawski, 1999).

A identificação dos processos críticos para o funcionamento da empresa é fundamental, uma vez que os processos não podem ser todos alvo de ações de melhoria simultaneamente, devem ser considerados os recursos disponíveis utilizando mecanismos e técnicas de priorização e seleção de projetos, funcionando como guias para levar a cabo a visão estratégica da empresa. Os resultados das atividades de melhoria devem ser quantificados e documentados, (Lizarelli et al., 2019).

Esta estratégia tem a vantagem de ser simples, fácil de compreender e de necessitar de um baixo investimento para serem sentidos resultados e, nos dias que correm, é considerada uma das formas mais eficazes de aumentar a competitividade de uma empresa. Ao longo dos anos, o número de estratégias de melhoria contínua tem vindo a crescer com base nas necessidades específicas de cada empresa, exemplos são o *Total Quality Management (TQM)*, *Lean Manufacturing*, e Seis

Sigma. No entanto, estes modelos não têm capacidade de resolver todos os problemas das organizações, sendo muito comum a adoção de programas híbridos como *Lean Seis Sigma* (LSS), (Drohomeretski et al., 2014; Bhuiyan & Baghel, 2005).

As definições de TQM, Lean, Seis Sigma e LSS diferem apenas no modo como são atingidos os objetivos, no entanto, a sua finalidade e a necessidade de melhorar são as mesmas, (Lizarelli et al., 2019).

Nos próximos subcapítulos, as estratégias de melhoria mais relevantes para este estudo serão aprofundadas, apresentando-se de um modo geral, a sua origem, o que as distingue, as barreiras à sua implementação e os fatores de sucesso que as levam a ser utilizadas por muitas empresas de renome.

2.2. Total Quality Management

O sistema *Total Quality Management* (TQM), foi introduzido em meados da década de 80 por W. Edwards Deming, Joseph Juran e Kaoru Ishikawa, na sequência do trabalho que Feigenbaum desenvolveu, o sistema *Total Quality Control*, que mais tarde evoluiu para o TQM. Este conceito é geralmente entendido como um sistema integrado de gestão estratégica que visa melhorar a qualidade dos produtos e serviços, (Joiner, 2007).

Para um melhor entendimento desta estratégia de melhoria, é importante perceber o conceito de qualidade, de uma forma geral. Este conceito é relacionado com uma ou mais características desejáveis num produto ou serviço, mas existem várias definições.

Segundo Crosby (1980), qualidade é a conformidade com os requisitos (zero defeitos) e é mensurável, já segundo Feigenbaum (1991) a qualidade é determinada pelo cliente, pela sua experiência com o produto ou serviço quando comparada com os seus requisitos. Juran & Godfrey (1998) têm outro entendimento, qualidade são as características dos produtos que satisfazem as necessidades dos clientes e lhes proporcionam satisfação com o propósito final de aumentar as receitas da empresa ou organização.

Os investigadores identificaram uma série de ferramentas e técnicas para a melhoria da qualidade, entendendo-se uma ferramenta por um instrumento com uma função clara e normalmente aplicada individualmente, enquanto que uma técnica tem uma aplicação mais alargada e é entendida como um conjunto de ferramentas, (Tari & Sabater, 2004).

Kaoru Ishikawa, propôs sete ferramentas para analisar problemas de TQM graficamente, estes sete métodos ficaram conhecidos como as sete ferramentas tradicionais da qualidade, são elas, segundo Kiran (2017a): o Diagrama de Ishikawa, o Princípio de Pareto, o Diagrama de Dispersão, as Cartas de Controlo, o Fluxograma, o Histograma e as Folhas de Registo e Verificação. Mais

CAPÍTULO 2 – ESTRATÉGIAS DE MELHORIA CONTÍNUA

tarde surgiram as sete ferramentas modernas da qualidade, de acordo com Kiran (2017b): o Diagrama Matricial, o Diagrama de Afinidades, o Diagrama de Prioridades, o Gráfico de Decisão do Processo, o Diagrama de Relações, o Diagrama de Atividades e o Diagrama em Árvore.

Posto isto, segundo Hellsten & Klefsjö (2000) e Curry & Kadasah (2002) a *Total Quality Management* é vista como um sistema de gestão em contínua evolução que consiste num conjunto de valores, ferramentas e técnicas com o objetivo de aumentar a satisfação quer dos clientes externos como dos internos com uma quantidade de recursos reduzida, desenvolvendo-se ações de cariz preventivo ao invés de corretivo. Na figura 2.1 apresenta-se um quadro resumo com alguns dos valores, técnicas e ferramentas.

| Valores | Técnicas | Ferramentas |
|---|--|---|
| <ul style="list-style-type: none">• Compromisso da gestão de topo• Foco nos processos• Foco no cliente• Melhoria Contínua• Decisões baseadas em factos• Envolvimento de toda a empresa nos processos de melhoria | <ul style="list-style-type: none">• Ciclos de qualidade• Desenvolvimento dos trabalhadores• <i>Benchmarking</i>• Gestão de processos• Parcerias com fornecedores• Desenho de Experiências (DOE)• Avaliação autocrítica | <ul style="list-style-type: none">• Diagrama de relações• Desenho fatorial• Cartas de controlo• Diagrama de <i>Ishikawa</i>• Diagramas de processos• Diagramas em árvore |

Fig. 2.1 - Valores, técnicas e ferramentas da TQM

Adaptado de: Hellsten & Klefsjö (2000)

Em suma, *Total Quality Management*, é uma estratégia largamente utilizada para implementar e gerir atividades de melhoria no dia a dia de uma organização, numa cultura empresarial caracterizada por um aumento na satisfação do cliente através de eventos de melhoria contínua onde todos os operadores da empresa são envolvidos, (Montgomery, 2009; Dahlgaard & Mi Dahlgaard-Park, 2006).

A TQM é uma estratégia com resultados comprovados, presente em diversas multinacionais como IMB, British Airways, Hewlett-Packard, Motorola, etc, (Yusof & Aspinwall, 2000).

Segundo Jaeger & Adair (2016), constata-se benefícios mas também barreiras à implementação desta estratégia de gestão. Os benefícios vão de encontro aos valores apresentados anteriormente,

fundindo-se com a mística e tornando-se a filosofia da empresa. Com a implementação do TQM é expectável a melhoria do envolvimento dos operadores, da comunicação, um aumento na produtividade, na qualidade e na satisfação dos clientes, sendo reduzidos os custos de não qualidade e aumentada a vantagem competitiva face aos concorrentes. É importante a empresa estar ciente das barreiras que terá de ultrapassar para atingir os benefícios, entre elas destaca-se uma cultura organizacional inadequada, falta de capacidade de liderança na gestão de topo, formação inadequada ou insuficiente, incapacidade de reconhecer a importância do envolvimento dos operadores, falta de cooperação, tempo que é necessário dedicar ao TQM e o compromisso financeiro para a formação e educação. Posto isto, o mais desafiante será sempre moldar e gerir a mudança de mentalidades e pessoas, e não a implementação técnica das ferramentas, com uma gestão adequada, o TQM destaca-se como uma estratégia de sucesso.

2.3. Seis Sigma

O Seis Sigma é, de uma forma geral, uma maneira mais inteligente de gerir um negócio ou departamento. Esta estratégia coloca o cliente em primeiro lugar e baseia-se em dados e factos para conduzir a soluções. Embora a condução de projetos Seis Sigma implique medir e analisar os processos empresariais de uma organização, é errado assumir que esta estratégia é apenas uma iniciativa de qualidade, pois também se impõe como uma forma de gestão empresarial, (Pande & Holpp, 2001).

A abordagem Seis Sigma, deriva do trabalho de W. Edward Deming com empresas japonesas entre os anos de 1950 e 1970, estes trabalhos tornaram os níveis de qualidade muito superiores aos das empresas americanas, tendo despertado o interesse de diversas organizações ocidentais, fomentando a busca por padrões de qualidade semelhantes, (McCarty et al., 2005).

Quando uma empresa japonesa adquiriu uma das fábricas da Motorola na década de 1970 foi ainda mais evidente a diferença entre o oriente e o ocidente. Com a passagem da Motorola para a gestão japonesa, a fábrica experienciou uma redução significativa da quantidade de defeitos e de custos. Utilizando a mesma tecnologia, mão de obra e sem alterações nos *designs* dos produtos, tornou-se claro que o problema só poderia ser da gestão, isto levou o CEO da Motorola, Bob Galvin, a debruçar-se sobre o assunto e a finalmente constatar a existência de um problema de gestão e de qualidade, tendo proferido as palavras "*Our quality stinks*", (Pyzdek & Keller, 2010).

Em desespero para igualar o Japão, a década de 1980 foi marcada por tentativas das empresas americanas em fazer uso de quase todas as ferramentas da qualidade com o intuito de elevarem os seus padrões, no entanto, sem sucesso. Nesta altura, um engenheiro da Motorola, Bill Smith, começou a focar-se no conceito de variação do processo de Deming. Esta variação, num conjunto de dados pode ser definida como o padrão do desvio em torno da média, representada pela letra

CAPÍTULO 2 – ESTRATÉGIAS DE MELHORIA CONTÍNUA

sigma, σ , a letra do alfabeto grego utilizada comumente na estatística para representar a variabilidade de um processo. Os estudos de Bill Smith rapidamente captaram a atenção de Bob Galvin e, com o seu apoio, a “iniciativa sigma” tornou-se a forma de trabalhar na Motorola. Assim, a Motorola focou-se na análise da variação em tudo o que fazia, perseguindo a melhoria contínua tendo adotado o “*Sigma Goal*” – “Objetivo Sigma”. Este objetivo traduz-se no equivalente a produzir apenas 3.4 defeitos por cada milhão de oportunidades, a quase perfeição, (Eckes, 2001; Pyzdek & Keller, 2010).

Ao longo do tempo, a abordagem Seis Sigma tem-se expandido e sido adotada por diversas empresas de grande, média e pequena dimensão que atingem elevados níveis de rentabilidade, sustentabilidade e crescimento a longo prazo, (Pyzdek & Keller, 2010). Na tabela 2.1, apresentam-se alguns acontecimentos relevantes na propagação da metodologia Seis Sigma nas décadas de 1980 e 1990.

Tabela 2.1 - Eventos marcantes na propagação do Seis Sigma, 1980-1990

| Ano | Acontecimento | Fonte |
|------|---|------------------------------------|
| 1986 | A metodologia Seis Sigma é trazida a público pela Motorola | (Banuelas Coronado & Antony, 2002) |
| 1988 | Motorola é a primeira empresa a ganhar o <i>Malcom Bladridge United States National Quality Award</i> | (McCarty et al., 2005) |
| 1994 | Allied Signal adotou o Seis Sigma | (Park, 2003) |
| 1995 | General Electric lançou a iniciativa Seis Sigma | (Caulcutt, 2001) |
| 1997 | LG e Samsung adotaram o Seis Sigma | (Park, 2003) |
| 1998 | Honewell implementou a iniciativa Seis Sigma | (Pulakanam, 2012) |
| 2000 | Ford adotou o Seis Sigma | (Pulakanam, 2012) |

Os princípios e premissas da gestão de projetos têm também evoluído ao longo do tempo, tradicionalmente a gestão de projetos foi concebida como um plano organizado para atingir objetivos pré-determinados num espaço de tempo definido. Os pensamentos mais recentes em relação a este tema, tratam os projetos como conjuntos de práticas destinadas a fornecer produtos e serviços de qualidade superior através da integração com outras práticas organizacionais e da utilização eficaz dos recursos disponíveis. Os projetos Seis Sigma apresentam-se essencialmente como projetos de melhoria cujo objetivo é aperfeiçoar os processos e rotinas organizacionais concentrando-se em objetivos específicos e pré-determinados, (Parast, 2011).

CAPÍTULO 2 – ESTRATÉGIAS DE MELHORIA CONTÍNUA

Para otimizar o *output* de qualquer processo, é necessário identificar as variáveis de *input* chave que, evidentemente, influenciam o *output*. Os fatores críticos de sucesso do Seis Sigma representam um papel idêntico ao das variáveis de *input* chave em qualquer processo, (Antony & Banuelas, 2002).

A identificação dos fatores críticos de sucesso ajuda as empresas a compreenderem os ingredientes essenciais para o sucesso do Seis Sigma, (Szeto & Tsang, 2005). Segundo Anbari (2004) e Antony & Banuelas (2002), os fatores críticos de sucesso para conduzir um programa Seis Sigma numa empresa são:

- Envolvimento e compromisso por parte da gestão de topo
- Encorajar e aceitar a mudança cultural
- Competência na gestão dos projetos
- Aposta em treino e formação a todos os envolvidos no programa Seis Sigma
- Intersetar os projetos Seis Sigma com a estratégia da empresa e com os requisitos e expectativas dos clientes
- Envolver os fornecedores-chave e os recursos humanos no sistema Seis Sigma.
- Bom entendimento da metodologia Seis Sigma e das suas ferramentas
- Selecionar cuidadosamente os projetos, realizar um planeamento adequado e utilizar uma metodologia comum e apropriada

Uma das razões que levaram à popularidade do Seis Sigma no mundo dos negócios, deve-se ao facto de muitas empresas terem obtido um retorno substancial do investimento na sua implementação. Alguns estudos indicam que se podem esperar poupanças na ordem de dois milhões de dólares americanos como resultado da formação de 20 indivíduos em peritos Seis Sigma, (Szeto & Tsang, 2005).

Segundo Pulakanam (2012) e Kwak & Anbari (2006), a implementação do Seis Sigma levou à redução de custos, sintetizados na tabela 2.2, que corrobora a sucesso desta estratégia de melhoria de um ponto de vista financeiro.

As ferramentas estatísticas do Seis Sigma devem ser um complemento às perspetivas e aos desafios da organização de forma a ser atingido o sucesso da iniciativa. O Seis Sigma tem sido aplicado em diversos setores empresariais para aumentar o desempenho global das empresas, no entanto, a integração dos projetos Seis Sigma estruturados e orientados por dados (*data-driven*) têm ainda potencial para melhoria. Além disto, as mudanças culturais requerem tempo e compromisso até estarem fortemente enraizadas e se tornarem parte da forma de operar de uma organização.

CAPÍTULO 2 – ESTRATÉGIAS DE MELHORIA CONTÍNUA

Os princípios e práticas Seis Sigma têm mais probabilidades de sucesso se se insistir no aperfeiçoamento contínuo da cultura organizacional, (Kwak & Anbari, 2006).

Tabela 2.2 - Implementação do Seis Sigma, um ponto de vista financeiro

| Empresa | Período de Análise | Poupanças em milhões de dólares americanos (\$M) | Poupanças em % das receitas |
|------------------|--------------------|--|-----------------------------|
| Motorola | 1986 – 2004 | 17.000 | 4,2 |
| Allied Signal | 1994 – 1997 | 1.200 | 2,3 |
| General Electric | 1995 – 2002 | 8.000 | 1 |
| Honeywell | 1998 – 2000 | 1.800 | 2,5 |
| Ford | 2000 – 2003 | 1.700 | 0,3 |

Em suma, o Seis Sigma, faz uso das ferramentas da qualidade, como o controlo estatístico do processo, análise dos modos de falha e seus efeitos, estudo da repetibilidade e da reprodutibilidade, entre outros. Através da sua aplicação sistemática, da formação de toda a organização e de um nível elevado de apoio por parte da gestão são atingidos resultados muito satisfatórios, (Stamatis, 2004).

2.3.1. Estrutura organizacional Seis Sigma

Além dos pontos anteriormente mencionados, e para uma implementação bem sucedida do Seis Sigma, a existência de uma estrutura organizacional bem definida é determinante para gerir e apoiar as atividades de melhoria. Assim, a gestão dos projetos Seis Sigma é feita através da utilização do sistema denominado “*Belt*”, uma sólida estrutura organizacional, (Pyzdek & Keller, 2010; Anbari, 2004).

Esta estrutura é formada por profissionais Seis Sigma treinados e dedicados à melhoria contínua dos processos e por outros colaboradores chave na condução dos trabalhos da empresa, desde os cargos administrativos aos operadores. Tipicamente a organização Seis Sigma inclui, (McCarty et al., 2005; Achterkamp & Vos, 2008):

- *Sponsors*: membros da equipa de gestão de topo, normalmente num alto cargo executivo. O *Sponsor* significa patrocinador, este lidera a iniciativa Seis Sigma no seu dia a dia, gerindo-a como um conjunto articulado de projetos e comunicando ao restante quadro administrativo o seu potencial, mantendo assim os apoiantes ao programa e adquirindo novos.
- *Champions*: são executivos que assumem a responsabilidade por um ou mais projetos Seis Sigma. São frequentemente os diretores de departamentos que gerem os processos

afetados pelo projeto Seis Sigma. O *Champion* aprova os planos do projeto, e autoriza a utilização de recursos para o levar a cabo, o seu trabalho próximo com a equipa Seis Sigma é determinante para que esta compreenda os objetivos estratégicos globais da iniciativa.

- *Process Owners*: responsáveis por tudo o que se encontra entre o início e o fim de um processo. Pode também ser um *Champion* pois detém muitos recursos que a equipa de projeto necessita para conduzir o seu trabalho. O *Process Owner* deve apoiar a equipa pois, em última análise é este que tem a responsabilidade de implementar e manter as alterações feitas para melhorar o processo, deve por isso ser um gestor e promotor da mudança.
- *Green Belts*: é um praticante de Seis Sigma geralmente não a tempo inteiro, treinado na metodologia de resolução de problemas Seis Sigma, DMAIC e em ferramentas básicas de estatística.
- *Black Belts*: trabalham a tempo inteiro em projetos seis sigma, devem ser minuciosamente treinados em métodos estatísticos e de melhoria e ser proficientes em trabalhar com equipas de forma a implementar um projeto de sucesso.
- *Master Black Belt*: são *Black Belts* muito experientes que trabalham a tempo inteiro na campanha Seis Sigma que têm a responsabilidade de dirigir. Treinam os *Black Belts* e os *Green Belts* em métodos estatísticos, e no caso dos *Black Belts*, são seus mentores e auxiliam na utilização correta desses métodos.
- Equipa do Projeto: concretizam a metodologia DMAIC no processo em estudo, têm a função de recolher e analisar os dados, determinar as causas raiz da variação, gerar soluções, implementar as melhorias e monitorizá-las. Têm um líder nomeado pelo *Champion*, e a sua constituição pode incluir desde *Green Belts* a indivíduos com experiência ou responsabilidade no processo em análise.

Esta infraestrutura e número de intervenientes supramencionados depende da dimensão e complexidade da empresa e da fase de maturidade da utilização do Seis Sigma.

2.3.2. Estrutura de melhoria 6 sigma - DMAIC

Nos dias que correm, as empresas estão a esforçar-se por melhorar o seu desempenho global de forma a enfrentar a pressão crescente da concorrência. Enquanto realizam esta tarefa, tentam aplicar estratégias apropriadas e eficazes na sua jornada, (Srinivasan et al., 2016).

DMAIC é uma parte integrante do Seis Sigma; o modelo DMAIC refere-se a cinco fases interligadas, *Define, Measure, Analyze, Improve* e *Control* que ajudam sistematicamente as organizações a resolver problemas e a melhorar os seus processos, (Jirasukprasert et al., 2014).

CAPÍTULO 2 – ESTRATÉGIAS DE MELHORIA CONTÍNUA

A estrutura de melhoria DMAIC difere dos demais programas de qualidade na sua abordagem *top down* e na sua metodologia rigorosa que exige uma análise detalhada onde as decisões são baseadas em dados para lidar com defeitos, desperdícios e problemas de qualidade em projetos, tanto na área da produção como nos serviços, (Sehgal & Kaushish, 2013).

Segundo Chiarini (2011), o modelo DMAIC é talvez a parte mais importante do ADN Seis Sigma, auxiliando na implementação de projetos sem falhas.

O DMAIC assemelha-se ao ciclo PDCA (*Plan, Do, Check, Act*) de Deming, de aprendizagem contínua e melhoria de processos, (Jirasukprasert et al., 2014). Apesar de não existir uma correspondência consensual ao ciclo PDCA de Deming, alguns autores como Ranjan Senapati (2004) e Vilasini et al. (2014) defendem a que se ilustra na figura 2.2, fazem corresponder as primeiras três fases *Define, Measure* e *Analyze* à etapa *Plan*, a fase *Improve* à etapa *Do* e por último inserem as etapas *Check* e *Act* na fase *Control*.

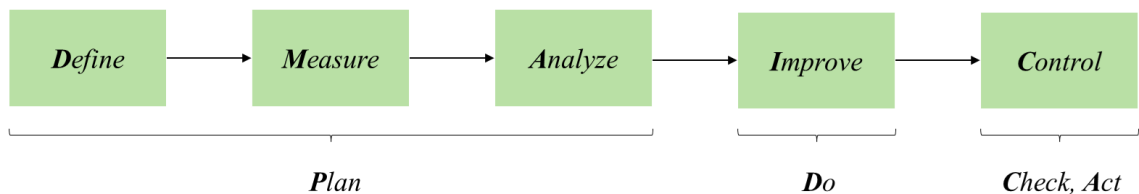


Fig. 2.2 - Fases do projeto DMAIC, integração com ciclo PDCA

Entre cada uma das fases, o projeto Seis Sigma passa por uma revisão denominada *tollgate*. As *tollgates* são reuniões, normalmente entre a equipa e o *sponsor*, fundamentais para manter as equipas no caminho certo bem como para verificar se os objetivos de cada fase foram cumpridos. É determinante que o líder compreenda esta abordagem estruturada e os objetivos de cada fase, podendo assim utilizar as *tollgates* para assegurar a boa condução do projeto, (McCarty et al., 2005).

De seguida, as fases do ciclo DMAIC bem como alguns métodos e ferramentas, serão descritos em detalhe. Note-se que as ferramentas a utilizar em cada fase são definidas pela equipa do projeto, havendo por isso uma grande variedade e liberdade na sua escolha, sendo descritas apenas as utilizadas neste estudo.

2.3.2.1. Fase *Define*

A primeira fase do ciclo DMAIC, *Define*, procura respostas em relação a qual é o problema, se este existe e quais os tipos de defeitos a tratar (Mishra & Kumar Sharma, 2014). De uma forma geral, o foco desta fase é identificar uma oportunidade de projeto e concluir se esta constitui uma verdadeira chance de melhoria, (Montgomery, 2009).

CAPÍTULO 2 – ESTRATÉGIAS DE MELHORIA CONTÍNUA

O projeto deve ser importante para o cliente bem como para a empresa, é importante que os *stakeholders* envolvidos no processo e os seus clientes a jusante estejam de acordo sobre a potencial utilidade do projeto, (Gijo et al., 2011).

Os principais objetivos desta fase são, (Pyzdek & Keller, 2010):

- Desenvolver o *Project Charter*
 - Definir o *âmbito*, objetivos e a calendarização
 - Definir o processo (*top-level*) e os *stakeholders*
 - Selecionar os membros da equipa
 - Obter a autorização do *sponsor*
- Estabelecer e instruir a equipa do projeto
- Identificar as características críticas da qualidade (CTQ)

No final desta fase é determinante compreender e estabelecer corretamente o problema, captar o contributo das diferentes valências dos membros da equipa, tentando fazer face às barreiras impostas começando a teorizar-se sobre as fontes de variação do processo, (Holtz & Campbell, 2003).

Serão agora apresentados os elementos e ferramentas que auxiliam à concretização da fase D.

Project Charter

Um dos primeiros elementos a ser elaborado nesta fase, é o *Project Charter*. O *Project Charter* é um documento que contém, de uma forma geral, a descrição do projeto e o seu âmbito e as datas de início e conclusão previstas. Neste documento devem estar presentes as métricas para medir o sucesso do projeto e como estas se alinham com os objetivos da empresa, deve conter os potenciais ganhos financeiros para a unidade de negócio e os benefícios que o projeto trará ao cliente final. Além disto, devem ser definidos marcos de conclusão de etapas, a equipa do projeto e as funções de cada um dos elementos, (Montgomery, 2009).

Complementando a informação anteriormente fornecida, o *Project Charter*, é constituído por, (McKeever, 2006):

- Nome do projeto: identifica o projeto.
- Propósito do projeto: breve descrição em forma de sumário executivo do projeto em que se descreve o motivo para o seu desenvolvimento, o objetivo e as expectativas.
- Âmbito do projeto: identifica os limites do projeto e os trabalhos que serão desenvolvidos clarificando o que pertence e o que não pertence ao âmbito do projeto.

CAPÍTULO 2 – ESTRATÉGIAS DE MELHORIA CONTÍNUA

- Objetivos do projeto: identificam o que se pretende alcançar com o projeto, em termos técnicos e comerciais. Todos os objetivos devem ser baseados na técnica de definição de objetivos SMART, um acrónimo que significa: *Specific* (Específico), *Measurable* (Mensurável), *Achievable* (Alcançável), *Relevant* (Relevante) e *Time Constrained* (Delimitado por tempo).
- Papéis e responsabilidades dos envolvidos: posições e responsabilidades específicas no projeto às quais são confiadas autoridades e papéis únicos.
 - *Sponsor*: é o líder organizacional que investe capital político, recursos e tempo com o propósito de apoiar o projeto. O sponsor tem autoridade máxima sobre o projeto e sobre ele recai a responsabilidade pelo mesmo. É também sua função resolver conflitos entre os *stakeholders* e os departamentos organizacionais.
 - Gestor do projeto: tem a responsabilidade global pelo sucesso do projeto e reporta ao *sponsor*. O Gestor do projeto gere o projeto no dia a dia, coordena todas as atividades e aprova todos os documentos relacionados com o projeto. É o gestor do projeto que elabora o *Project Charter*.
 - Cliente: quem beneficia e recebe os resultados do projeto, pode ser uma pessoa, organização ou mesmo um departamento interno na empresa onde o projeto é desenvolvido.
 - Equipa do projeto: membros da equipa técnica e funcional central que trabalham em conjunto para produzir os resultados do projeto.
- Abordagem ao projeto: identifica a estratégia geral para a conclusão do projeto e descreve os métodos e processos que serão utilizados. Deve conter um calendário de alto nível com *milestones* e postos de controlo (como as tollgates do DMAIC).
- Entregáveis: uma lista de documentos que devem ser apresentados para controlo do projeto, durante e após a sua conclusão.

Segundo McKeever (2006), a utilização do Project Charter traz diversos benefícios, como a clara definição dos papéis e responsabilidades dos envolvidos no projeto, compromisso da direção, melhoria dos processos de gestão do projeto, aumento da probabilidade de sucesso do projeto.

SIPOC

Após a clara definição do projeto a desenvolver, procede-se ao seu mapeamento de alto nível.

A descrição de um processo fornece uma visão do desenvolvimento de um produto ou serviço e da relação entre os diferentes departamentos. Os diagramas de processos definem-se por uma série de atividades que fazem uso de um ou mais *inputs*, transformando-os em *outputs* com valor para o cliente, (Pyzdek & Keller, 2010).

CAPÍTULO 2 – ESTRATÉGIAS DE MELHORIA CONTÍNUA

O Diagrama SIPOC é frequentemente usado na elaboração de um projeto DMAIC, especialmente na fase *Define*. É uma ferramenta de mapeamento muito útil cujo nome deriva das seguintes palavras: *Suppliers, Inputs, Process, Outputs* e *Customers*, (Park, 2003).

Na figura 2.3, observa-se uma representação deste diagrama, com os elementos que devem constar em cada uma das suas partes. Inicia-se a construção do diagrama pelos fornecedores, pessoas ou organizações que fornecem o *input* ao processo, podem ser internos ou externos. De seguida procede-se à identificação das entradas (*inputs*), recursos e dados que são necessários para o processo, podem ser materiais, pessoas, informação, conhecimento, equipamentos ou instalações. Depois lista-se o conjunto de atividades que constituem, de uma forma macro, o processo e organizam-se num fluxograma, estas atividades fazem uso de inputs para criar um *output* com valor para o cliente; as saídas (*outputs*), tangíveis ou intangíveis que procuram satisfazer as necessidades do cliente, e por fim, o cliente ou clientes (*customers*), a pessoa ou organização que recebe o *output* do processo, pode ser interno ou externo (Marques & Requeijo, 2009).

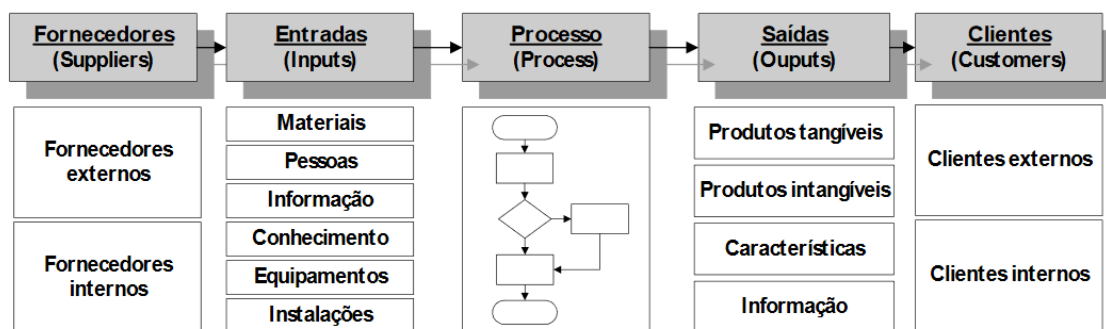


Fig. 2.3 - Exemplo diagrama SIPOC

Adaptado de: Marques & Requeijo (2009)

Este diagrama é muito útil quando utilizado pelas equipas de melhoria do processo com o objetivo de identificar todos os elementos relevantes de um projeto de melhoria antes de serem iniciados os trabalhos, (Yeung, 2009). O SIPOC ajuda a compreender as principais componentes do processo e a definir as suas fronteiras, sendo por isso muito útil aquando da definição do *scope* do projeto, (Carboneau et al., 2010).

Force Field Analysis

O conceito de *Force Field Analysis* - Análise do campo de forças, como uma técnica para conduzir à mudança quer estrutural, tecnológica ou das pessoas foi introduzido por Kurt Lewin no início da década de 1950. A *Force Field Analysis* baseia-se nas ciências físicas, fazendo uso à analogia de vetores que possuem forças relativas as quais podem ser quantificadas com precisão. A medição dessas forças por um cientista permite-lhe prever a direção e velocidade do movimento, por

CAPÍTULO 2 – ESTRATÉGIAS DE MELHORIA CONTÍNUA

outro lado, numa organização as forças que se fazem sentir não estão sujeitas a uma medição tão precisa. No entanto, através de *brainstorming*, a avaliação e quantificação destas permite proceder a uma previsão valiosa da direção provável e da velocidade do movimento da organização em relação à mudança, (Thomas, 1985).

Nesta técnica, do lado esquerdo são apresentadas as forças facilitadoras da mudança, fatores que contribuem para que determinado objetivo seja atingido com sucesso e, do lado direito as barreiras, forças que se opõem à mudança, que dificultam a conclusão do objetivo, (Kubiak & Benbow, 2009).

Para uma melhor compreensão, apresenta-se um exemplo na figura 2.4. Analisando o resultado, é evidente que existe uma diferença significativa nas pontuações (6,31), prevalecendo o peso das barreiras, neste caso de estudo em particular, o autor concluiu que estão a impedir a empresa em questão de melhorar a eficiência da sua rede de abastecimento, (Ismail Salaheldin, 2003).

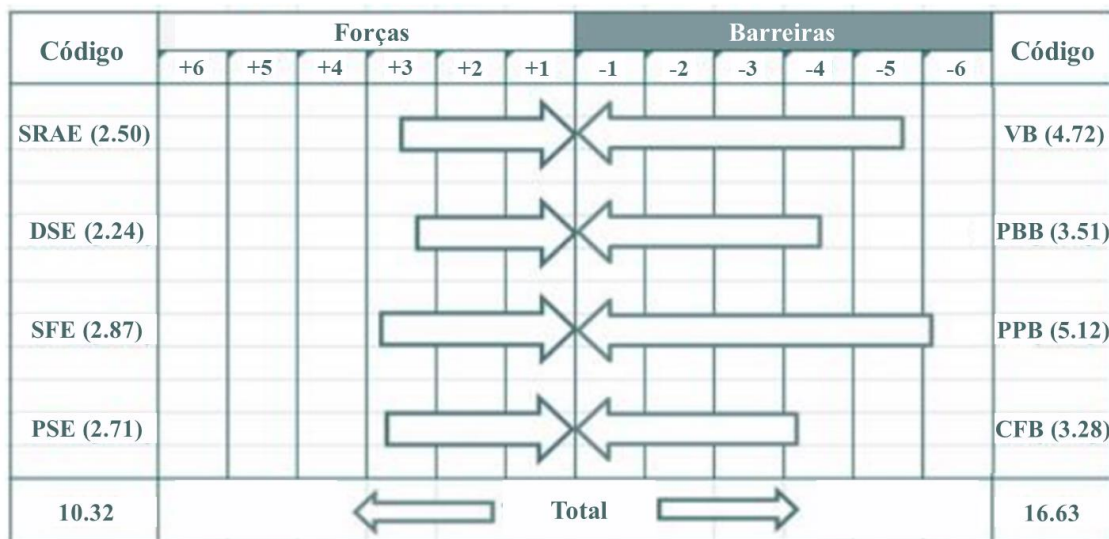


Fig. 2.4 - Exemplo Force Field Diagram

Adaptado de: Ismail Salaheldin (2003)

A *Force Field Analysis* é muito útil para identificar as forças que contribuem para a realização de um dado projeto, estas forças devem ser integradas na estratégia de implementação do mesmo de modo a assegurar que as mesmas são mantidas ou reforçadas. Quanto às barreiras, devem ser eliminadas ou mitigadas, constituem também oportunidades de melhoria que podem originar novos projetos, (Kubiak & Benbow, 2009).

Muitos líderes têm vindo a utilizar a *Force Field Analysis* como forma de ajudar a identificar e atuar sobre os pontos-chave de modo a alavancar o processo de mudança. Esta técnica tem vindo a ser implementada com sucesso principalmente no âmbito do planeamento da provisão dos

CAPÍTULO 2 – ESTRATÉGIAS DE MELHORIA CONTÍNUA

cuidados de saúde, na formação de líderes, na gestão de sistemas de informação e de projetos de uma forma geral, (Schwering, 2003).

Análise de *Stakeholders*

Entende-se como *stakeholder*, um indivíduo, grupo ou organização que possui interesse (*stake*) e a capacidade de influenciar as ações e objetivos de uma organização, projeto ou estratégia de gestão. A análise de *stakeholders*, tem como objetivo avaliar e compreender os *stakeholders* da perspetiva de uma organização, determinando a sua relevância num determinado projeto, (Brugha & Varvasovszky, 2000).

De acordo com Achterkamp & Vos (2008), o fracasso de um projeto, de uma forma geral, não é resultado da ineficácia nas práticas de gestão do mesmo, mas sim na falta na análise dos intervenientes (*stakeholders*) do projeto. A análise de *stakeholders* é, portanto, uma ferramenta essencial para a condução de um projeto de sucesso.

Como forma de conduzir esta análise, a equipa Seis Sigma pode ter diferentes abordagens, uma delas é proceder à categorização dos *stakeholders* recorrendo a uma matriz, como a que se observa na figura 2.5, de categorização com duas dimensões: o potencial dos *stakeholders* para inviabilizar o projeto e o potencial dos *stakeholders* para cooperar com o projeto. A utilização desta matriz permite à equipa do projeto diferenciar quais os *stakeholders* mais suscetíveis a colaborar ou a opor-se à equipa. A identificação da posição dos *stakeholders* e o quadrante onde se posicionam na matriz ajuda a equipa Seis Sigma a determinar qual a estratégia mais adequada para aumentar o sucesso do projeto, na figura 2.5 observa-se também a estratégia a adotar para os *stakeholders* em cada um dos quadrantes, (Pakdil, 2020).

| | | Potencial dos <i>stakeholders</i> para inviabilizar o projeto | |
|---|---------|---|---|
| | | Elevado | Baixo |
| Potencial dos <i>stakeholders</i> para cooperar com o projeto | Elevado | <i>Stakeholder</i> : Intermédio Estratégia: Colaborar | <i>Stakeholder</i> : Favorável Estratégia: Envolver |
| | Baixo | <i>Stakeholder</i> : Desfavorável Estratégia: Contestar | <i>Stakeholder</i> : Irrelevante Estratégia: Monitorizar |

Fig. 2.5 - Exemplo da matriz de análise de *stakeholders* e estratégias a adotar

Adaptado de: Pakdil (2020)

Tollgate da fase *Define*

Por fim, após a aplicação das ferramentas acima descritas, a equipa deve preparar-se para a primeira *tollgate review*, esta foca-se em responder às seguintes questões, (Montgomery, 2009):

- O foco do *problem statement* é os sintomas e não as possíveis causas ou soluções do problema?
- Os *stakeholders* mais importantes estão todos identificados?
- Existem evidências que comprovem que o projeto em questão acrescenta valor à empresa?
- O âmbito do projeto foi avaliado assegurando-se que não é nem demasiado estrito nem demasiado amplo?
- O diagrama SIPOC ou outra ferramenta de mapeamento de alto nível foi elaborado?
- Todas as barreiras e obstáculos à implementação do projeto foram identificados?

2.3.2.2. Fase *Measure*

Esta fase é a segunda fase da estrutura de melhoria DMAIC, na fase *Measure* procura-se concluir acerca de como o processo é medido e qual a sua *performance*, (Mishra & Kumar Sharma, 2014).

Segundo Pande & Holpp (2001), nesta fase, as equipas Seis Sigma, já possuem um profundo conhecimento sobre o processo e utilizam-no para estabelecer prioridades e tomar boas decisões sobre quais as características a medir para definir a sua *baseline performance*. Existem três categorias principais de medidas:

- *Output* ou *Outcome*: Os resultados finais do processo. As medidas de output focam-se nos resultados imediatos como número de entregas, defeitos ou reclamações, por outro lado, as medidas de *outcome* têm em consideração os impactos a longo prazo tais como os lucros e a satisfação.
- Processo: O que pode ser rastreado e medido. Normalmente estas medidas auxiliam a equipa na identificação das causas do problema.
- *Inputs*: O que entra no processo e é transformado em outputs. É evidente que inputs de fraca qualidade podem criar *outputs* de também fraca qualidade pelo que esta categoria de medidas contribui também para a identificação das possíveis causas do problema.

Os principais objetivos desta fase são, (Pyzdek & Keller, 2010; Montgomery, 2009):

- Definir claramente o processo
- Determinar as características a medir
- Gerir a recolha de dados

CAPÍTULO 2 – ESTRATÉGIAS DE MELHORIA CONTÍNUA

- Desenvolver e validar o sistema de medição
- Estabelecer a *baseline performance* para quantificar os resultados operacionais atuais como um meio de verificação das necessidades, definir o nível sigma

No final da fase *Measure*, a equipa deve, se necessário, atualizar o *Project Charter*, rever os objetivos e âmbito do projeto e reavaliar a composição da equipa, (Montgomery, 2009).

Agora, serão explicados alguns métodos, ferramentas e conceitos necessários para a execução desta fase do ciclo de melhoria.

Business Process Modeling Notation (BPMN)

Ao longo do tempo, foram desenvolvidas diversas linguagens de modelação gráfica de processos com o intuito de auxiliar as organizações na documentação dos seus trabalhos. Estas linguagens vão desde fluxogramas simples até formas mais avançadas e capazes de capturar informação necessária para a simulação e execução de processos. Nos dias que correm, o maior representante no campo das linguagens de mapeamento de processos é conhecido sob a sigla BPMN – ***Business Process Modeling Notation*** (Recker, 2010).

O mapeamento de processos associado a uma notação, tem uma importância fundamental em assegurar uma comunicação eficiente com os *stakeholders* de uma empresa. Existem várias notações, mas as evidências mostram que nos últimos anos a notação BPMN está a tornar-se o padrão para a modelação de processos de negócio na indústria, (Kalenkova et al., 2019).

O BPMN é largamente utilizado tanto no meio académico como no meio empresarial. É constituído por cinco categorias básicas de elementos: a) objetos de fluxo, b) dados, c) artefactos, d) objetos de conexão e por último e) *swimlanes*, (Zarour et al., 2019), como se ilustra na figura 2.6.

O diagrama de processos, BPMN, é uma representação gráfica das etapas que devem ser executadas num processo, em que sequência, quando e sob que condições. Devem também ser incluídas situações particulares ou excepcionais, e a forma como devem ser conduzidas. As cinco categorias supramencionadas são de seguida apresentadas em detalhe, (Stiehl, 2014):

- a) **Objetos de fluxo**: elementos gráficos que definem o comportamento do processo, existem três tipos: atividades (tarefa ou processo), decisão e eventos (início, intermédio e fim).
- b) **Dados**: informação processada num processo ou partilhada entre diferentes processos, aqui estão compreendidos os seguintes elementos: dados elementares, dados de input/output, armazenamento de dados ou mensagens.

CAPÍTULO 2 – ESTRATÉGIAS DE MELHORIA CONTÍNUA

- c) Artefactos: informação adicional sobre o processo, estes podem ser grupos ou anotações de texto.
- d) Objetos de conexão: permitem conectar os objetos de fluxo entre si, existem quatro tipos, fluxo de sequência, fluxo de informação e associação.
- e) Swimlanes: usadas para agrupar os elementos acima mencionados, existem dois tipos de grupagem, em *Pools* e em (*Swim-*) *Lanes*.

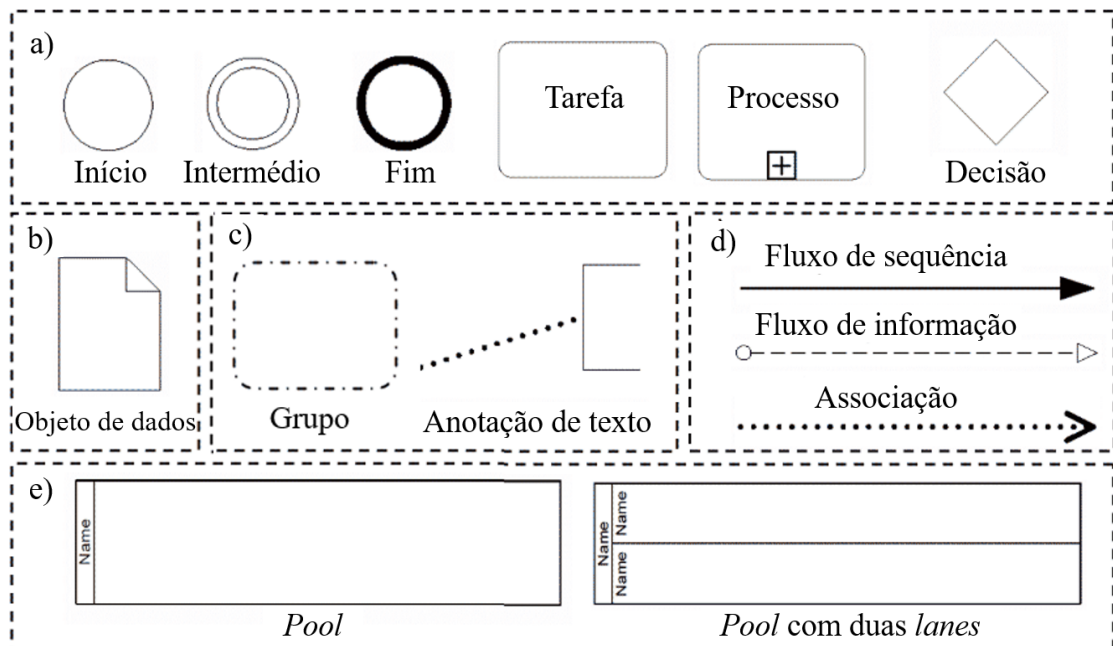


Fig. 2.6 - Elementos básicos, BPMN

Adaptado de: Ciaramella et al. (2009)

Análise de Sistemas de Medição

A análise do sistema de medição é essencial quando se procura a análise dos dados de um processo produtivo, (Runje et al., 2017). Após as atividades medição, as variáveis do processo ganham o seu significado, exprimindo o comportamento do processo. A qualidade dos dados de medição depende de múltiplas medições que são obtidas a partir de um sistema de medição que funciona em condições fixas. Assim, para a análise dos dados de um processo produtivo ser correta, é necessário que os dispositivos de medição bem como as pessoas que os operem não tenham erros, (Senol, 2004).

Estudo da Repetibilidade e Reprodutibilidade

A análise e quantificação da variabilidade de um sistema de medição desempenha um papel determinante na melhoria da qualidade no setor industrial. Um aparelho de medição só é adequado para determinado processo de medição se tiver valores de repetibilidade e reprodutibilidade

CAPÍTULO 2 – ESTRATÉGIAS DE MELHORIA CONTÍNUA

adequados. Posto isto, o estudo da Repetibilidade e Reprodutibilidade (R&R) é determinante para empresas que desejam atingir a excelência na qualidade dos seus produtos, (Pan, 2006).

Para uma melhor compreensão dos conceitos, segundo IPQ (2008):

Condição de repetibilidade:

“Condição de medição num conjunto de condições, que inclui o mesmo procedimento de medição, os mesmos operadores, o mesmo sistema de medição, as mesmas condições operativas e a mesma localização, e medições repetidas no mesmo objeto ou objetos similares, num curto intervalo de tempo”

Repetibilidade de medição:

“Fidelidade de medição para um conjunto de condições de repetibilidade.”

Condição de reprodutibilidade:

“Condição de medição num conjunto de condições, que inclui os diferentes locais, operadores e sistemas de medição e medições repetidas no mesmo objeto ou objetos similares.”

Reprodutibilidade de uma medição:

“Fidelidade de medição para um conjunto de condições de reprodutibilidade.”

A variação total de um processo reflete além da sua variabilidade, a variabilidade que provém do sistema de medição, esta última é medida em termos de R&R. A variação total é dada pela seguinte equação 1, (Pereira & Requeijo, 2012):

$$\sigma_{Total}^2 = \sigma_{Produto}^2 + \sigma_{Sistema\ de\ medição}^2 = \sigma_{Produto}^2 + \sigma_{R\&R}^2 \quad (1)$$

Segundo Pereira & Requeijo (2012), para retirar conclusões acerca da repetibilidade e da reprodutibilidade pode recorrer-se à construção de cartas de controlo da média e amplitudes. Ao contrário do que acontece normalmente quando se utiliza uma carta de controlo das médias, pretende-se detetar o máximo de pontos fora de controlo, o que indica que o instrumento de medição tem a resolução correta para o fim que é utilizado. Por outro lado, a carta das amplitudes, para que haja consistência nas medições deve apresentar todos os pontos sob controlo estatístico.

Para efetuar a avaliação ao sistema de medição pode também proceder-se à análise de variância de modo a verificar a contribuição das várias fontes de variação do sistema de medição em estudo. No entanto esse método não será exposto em detalhe por não ter sido utilizado.

Para a condução do estudo, as amostras devem ser recolhidas aleatoriamente, e numeradas, devem ser medidas pelos operadores selecionados de forma aleatória e o operador não deve saber qual a unidade que está a medir.

CAPÍTULO 2 – ESTRATÉGIAS DE MELHORIA CONTÍNUA

Finalmente, o importante é quantificar percentualmente o contributo relativo da repetibilidade e reprodutibilidade na variação total do estudo. Comparando este contributo com os valores de referência do critério de aceitação para instrumentos de medição, pode-se concluir se o instrumento é aceitável, duvidoso ou não aceitável.

Critério de aceitação para um instrumento de medição:

- R&R de 0% a 10% da variação total – Instrumento aceitável.
- R&R de 11% a 30% da variação total – Instrumento duvidoso.
- R&R superior a 30% da variação total – Instrumento não aceitável.

Caso o instrumento não seja aceitável deve proceder-se à melhoria do sistema de medição de forma a que os dados recolhidos tenham credibilidade para representar o processo em estudo.

Análise de variância – *One Way Anova* e *Two Way Anova*

A análise de variância (Anova), é uma técnica que permite comparar parâmetros entre diversas populações. Esta técnica possibilita calcular e repartir a variabilidade dos dados pelas diversas componentes que contribuem para essa variabilidade, sendo assim possível determinar quais as componentes estatisticamente significativas, (Pereira & Requeijo, 2012).

Segundo Kim (2017), para analisar a variância é costume, realizar-se um teste de hipóteses, recorrendo à estatística de teste de Fisher, F_C , à diferença de médias de dois grupos, mutuamente independentes e que satisfazem os pressupostos de normalidade e homocedasticidade. No entanto, se o objetivo for determinar se estas diferenças existem nas médias de três ou mais grupos de uma variável independente face a uma variável dependente, recorre-se à *One Way Anova*. O teste de hipóteses a aplicar, a título de exemplo, para três grupos seria, (Pereira & Requeijo, 2012):

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \text{ ou } \mu_1 \neq \mu_3 \text{ ou } \mu_2 \neq \mu_3$$

A tabela Anova, para uma análise de variância recorrendo à *One Way Anova*, apresenta-se na tabela 2.3, onde, (Pereira & Requeijo, 2012):

a – nível, $i=1, 2, \dots, a$

n – valor das réplicas, $j=1,2, \dots, n$

N – número total de observações, $a \times n$

$$Y_i. = \sum_{j=1}^n y_{ij} \tag{2}$$

$$\bar{Y}_i. = \frac{Y_i.}{n} \tag{3}$$

CAPÍTULO 2 – ESTRATÉGIAS DE MELHORIA CONTÍNUA

$$Y_{..} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n y_{ij} \quad (4)$$

$$\bar{Y}_{..} = \frac{Y_{..}}{N} \quad (5)$$

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{Y}_{..})^2 = SS_B + SS_W \quad (6)$$

$$SS_B = n \sum_{i=1}^a (\bar{Y}_{i.} - \bar{Y}_{..})^2 \quad (7)$$

$$SS_W = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{Y}_{i.})^2 \quad (8)$$

Tabela 2.3 - Anova, um fator a vários níveis

| Fonte | Graus de Liberdade | SS (Sum of Squares) | MS (Mean Square) | F ₀ |
|--------------|--------------------|------------------------|--|--|
| Entre níveis | a-1 | SS _B | SS _B / (a-1) = MS _B (9) | MS _B / MS _W (11) |
| Erro | N-a | SS _W | SS _W / (N-a) = MS _W (10) | |
| Total | N-1 | SS _T | | |

Comparando a estatística de teste com F₀, conclui-se sobre a rejeição da hipótese nula, isto é:

Se $F_0 > F_{\alpha; (a-1)(N-a)}$ rejeita-se a hipótese nula e conclui-se que existem diferenças significativas entre os níveis do fator. Esta análise pode também ser feita utilizando o p-value.

A *Two Way* Anova é bastante semelhante à *One Way* Anova, no entanto esta análise de variância foca-se nas médias de três ou mais grupos que são testados face a duas variáveis independentes, isto é, estuda o efeito de dois fatores sobre uma variável dependente e se esses dois fatores interagem entre si para afetar essa mesma variável, (Aflaki & Memarzadeh, 2011). O teste de hipóteses a aplicar, mais uma vez a título de exemplo, seria para os fatores A e B, respetivamente com a e b níveis, (Pereira & Requeijo, 2012):

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

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

Onde τ_i representa o efeito do nível i do fator A.

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

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

Onde β_j representa o efeito do nível j do fator B.

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

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

CAPÍTULO 2 – ESTRATÉGIAS DE MELHORIA CONTÍNUA

Onde γ_{ij} representa o efeito da interação entre A e B.

No caso da *Two Way* Anova, $N = a \times b \times n$, onde, (Pereira & Requeijo, 2012):

a – nível do fator A, $i=1, 2, \dots, a$

b – nível do fator B, $i=1, 2, \dots, b$

n – valor das réplicas, $j=1, 2, \dots, n$

As equações 2, 3, 4 e 5 mantêm-se inalteradas, adicionando-se apenas a dimensão k, que corresponde ao número de réplicas. O cálculo das variações é dado por:

$$SS_T = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \sum_{k=1}^n y_{ijk}^2 - \frac{(Y_{...})^2}{abn} \text{ com } (abn-1) \text{ graus de liberdade} \quad (12)$$

$$SS_A = \sum_{i=1}^a \frac{Y_{i..}^2}{bn} - \frac{(Y_{...})^2}{abn} \text{ com } (a-1) \text{ graus de liberdade} \quad (13)$$

$$SS_B = \sum_{j=1}^b \frac{Y_{.j.}^2}{an} - \frac{(Y_{...})^2}{abn} \text{ com } (b-1) \text{ graus de liberdade} \quad (14)$$

$$SS_{AB} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \frac{Y_{ij.}^2}{n} - \frac{(Y_{...})^2}{abn} - SS_A - SS_B \text{ com } (a-1)(b-1) \text{ graus de liberdade} \quad (15)$$

À semelhança da *One Way* Anova, a coluna das *Mean Squares*, é calculada dividindo o valor do SS pelos respetivos graus de liberdade. As conclusões são retiradas da mesma forma, através da condição $F_0 > F_{\alpha; (a-1)(N-a)}$ ou utilizando o p-value.

Run Chart

Um Run Chart é uma representação gráfica de um conjunto de dados ordenados, na maioria dos casos temporalmente. O eixo horizontal representa a escala de tempo e o eixo vertical a característica da qualidade em estudo. Num *Run Chart* a mediana é utilizada como linha central pois assim, metade dos dados estarão acima e abaixo desta. O objetivo de um Run Chart é realizar uma análise bastante simples aos dados em busca de *clusters*, misturas, tendências ou oscilações no processo (Perla et al., 2011; Anhøj, 2015).

Para detetar os padrões, o software define uma hipótese nula, que os dados possuem sequências aleatórias e converte o número observado de *runs* (sequências ascendentes e descendentes) numa estatística de teste que é aproximadamente normal, utilizando esta distribuição para obter valores de p-value.

Statistical Process Control (SPC)

O *Statistical Process Control*, em português, controlo estatístico do processo, surgiu com a necessidade das empresas em produzir produtos consistentemente de qualidade. Para tal, os

CAPÍTULO 2 – ESTRATÉGIAS DE MELHORIA CONTÍNUA

processos de fabrico têm de ser estáveis e todos os envolvidos no processo devem procurar continuamente a melhoria deste através da redução da variabilidade e da melhoria da performance, (Montgomery, 2009).

O SPC é uma ferramenta primária para atingir este objetivo, por via das cartas de controlo propostas por Walter A. Shewhart. As cartas de controlo são sistematicamente usadas pelas equipas de melhoria para monitorizar características da qualidade direta ou indiretamente relacionadas com o processo de produção, a partir de estimativas dos parâmetros do processo concluindo se este é ou não capaz de produzir de acordo com as especificações estipuladas, (Koutras et al., 2007).

Segundo Xie et al. (2002), as cartas de controlo estão divididas em dois grandes grupos, cartas de controlo de variáveis e de atributos. Nas cartas de controlo de variáveis, a característica da qualidade em estudo assume valores contínuos, enquanto que nas cartas de controlo de atributos os dados são discretos. As cartas de controlo de variáveis mais utilizadas são as cartas da média e amplitude, média e desvio padrão, média e variância, mediana e amplitude por último as cartas de observações individuais e amplitudes móveis. As cartas de controlo por atributos mais comuns e os seus objetivos são, cartas p, para analisar a proporção de unidades não conformes e as cartas np para o número de unidades conformes, além disto existem também as cartas c para estudar o número de defeitos e as cartas u, para estudar o número de defeitos por unidade.

As cartas de controlo tradicionais, de Shewhart monitorizam o processo, utilizando a hipótese da distribuição Gaussiana para definir limites de controlo superiores e inferiores. O intervalo entre estes limites, define a região onde o processo está a produzir de forma normal, se os dados da característica da qualidade em estudo saírem desta região, significa que o processo está a produzir de forma anormal e que ocorreu uma falha ou perturbação no mesmo, que deve ser estudada de forma a identificar a sua causa raiz, (Ge & Song, 2013).

Para a melhoria dos processos é determinante identificar as causas de variação detetadas pelas cartas de controlo, que se podem dividir em dois grupos, causas especiais de variação que se referem a variações atribuídas a eventos extraordinários, sendo por isso esporádicas e as causas comuns de variação que são variações que podem ser explicadas e previstas, seguindo padrões que podem advir por exemplo da deterioração dos equipamentos, (Chen et al., 2014). As regras para deteção das causas especiais de variação de seguida enunciadas, têm como objetivo reconhecer padrões que detetam comportamentos não aleatórios na disposição dos pontos nas cartas de controlo. Para a aplicação destas cartas, considera-se que o intervalo compreendido entre o LSC e o LIC está dividido em seis zonas como mostra a figura 2.7, (Pereira & Requeijo, 2012).

Segundo a norma ISO 7870-2:2013(en), as regras são as seguintes:

- Regra 1: Qualquer ponto fora dos limites de ação.
- Regra 2: Nove pontos consecutivos na zona central ou para além da zona central mas 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 dos três pontos consecutivos na zona A, do mesmo lado da linha central.
- Regra 6: Quatro de cinco pontos consecutivos na zona B ou A, 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.

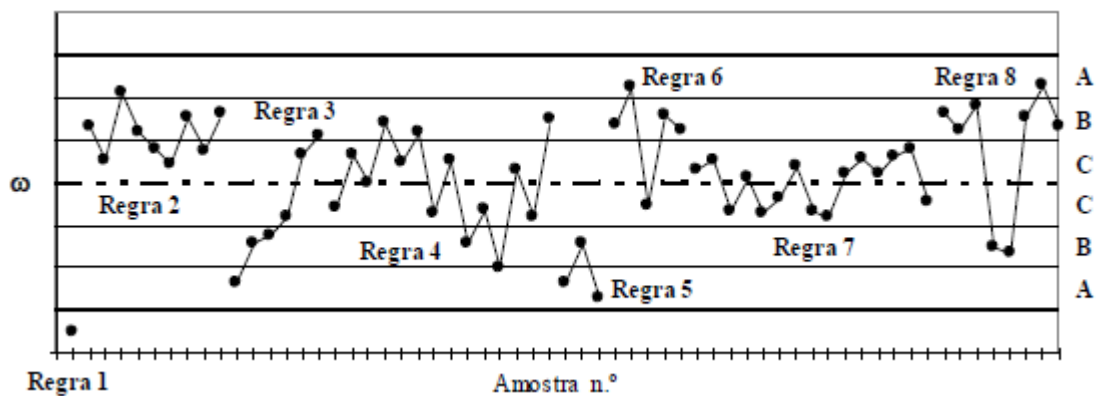


Fig. 2.7 - Regras para detecção de causas especiais

Adaptado de: Pereira & Requeijo (2012)

Segundo Calcutt (1996), alguns dos benefícios que advêm da implementação do SPC são, a redução do esforço desperdiçado em busca de melhorias, a melhoria de processos, a melhoria da consistência no *output* dos processos. Com a eliminação das causas especiais de variação a redução da variabilidade do processo leva em muitos casos a uma maior aceitação de produto por parte do cliente, sendo por isto um método de elevada importância na análise estatística de processos.

Aquando da análise de um processo, depois da utilização das cartas de controle e da verificação de se o processo está ou não sob controle estatístico é importante perceber se o processo está a produzir de acordo com os limites de especificação. Nesta sequência surge uma forma de avaliar o processo em que se reflita a variação causada pelas causas comuns de variação, o estudo da capacidade do processo, (Pereira & Requeijo, 2012).

CAPÍTULO 2 – ESTRATÉGIAS DE MELHORIA CONTÍNUA

Os índices de capacidade C_p , capacidade potencial e C_{pk} , índice de capacidade têm ganho cada vez mais popularidade nas indústrias, tendo sido estabelecido que o valor mínimo para se considerar um processo capaz e potencial é que os valores destas métricas sejam superiores a 1.33. É importante referir que apesar de um processo possuir índices de capacidade acima de 1.33 pode não estar a produzir peças conformes, resultado da sua média não estar centrada com o valor nominal, assim o processo estará centrado se $C_p = C_{pk}$, (Somerville & Montgomery, 1996).

De seguida serão apresentadas as equações para o cálculo destes índices para dados normais e não normais, tabela 2.4, quando os parâmetros do processo são estimados (Somerville & Montgomery, 1996); Pereira & Requeijo, 2012):

Tabela 2.4 - Equações índice de capacidade potencial e índice de capacidade

| Índices para dados normalmente distribuídos | Índices para dados não normais |
|---|---|
| $\widehat{C}_p = \frac{LSE - LIE}{6\hat{\sigma}}$ (16) | $\widehat{C}_p = \frac{LSE - LIE}{5.15\hat{\sigma}}$ (18) |
| $\widehat{C}_{pk} = \min\left(\frac{\hat{\mu} - LIE}{3\hat{\sigma}}, \frac{LSE - \hat{\mu}}{3\hat{\sigma}}\right)$ (17) | $\widehat{C}_{pk} = \min\left(\frac{\hat{\mu} - LIE}{2.575\hat{\sigma}}, \frac{LSE - \hat{\mu}}{2.575\hat{\sigma}}\right)$ (19) |

Com o crescimento do Seis Sigma, as organizações apresentam um valor ao qual chamam *sigma level*, nível sigma, com o objetivo de impressionarem e cativarem clientes começaram a rotular-se como “organizações seis sigma”. Um processo diz-se seis sigma se produzir 3.4 defeitos por cada milhão de oportunidades (DPMO), tendo sido criada uma correspondência para o número de defeitos vs. o nível sigma, onde quanto mais consistente a produção, menor o valor do desvio padrão, menos peças defeituosas serão produzidas e maior o nível sigma. Essa conversão é visível no gráfico da figura 2.8. O nível sigma pode ser obtido analiticamente multiplicando C_{pk} por 3, quando os dados verificam o pressuposto da normalidade (Goh & Xie, 2004), (Arcidiacono & Nuzzi, 2017).

Assim termina a fase I do controlo estatístico do processo, a fase II, inicia-se com um novo conjunto de dados recolhidos em condições estáveis e representativas do processo. Os novos dados são inseridos nas cartas de controlo elaboradas na fase I e verifica-se se os limites de controlo se ajustam ao processo em questão (Montgomery, 2009).

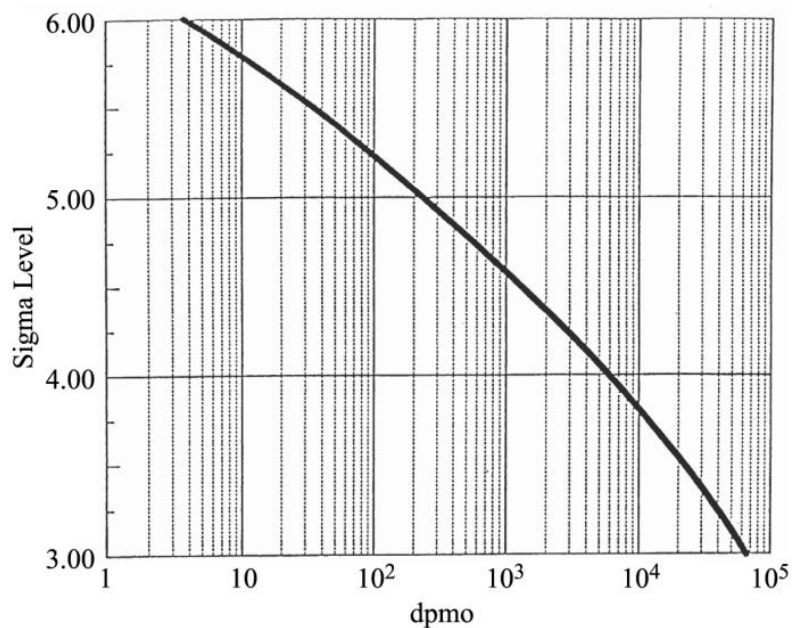


Fig. 2.8 - Correspondência Sigma Level - DPMO

Adaptado de: Goh & Xie (2004)

Dados Autocorrelacionados e Cartas de Controllo com Limites Modificados

Para a utilização das cartas de controllo tradicionais, assume-se que os dados do processo, quando este se encontra sob controllo estatístico, são normais e independentemente distribuídos, com média μ e variância σ^2 . No entanto, principalmente nos processos de produção, o pressuposto da independência dos dados é muitas vezes violado o que leva a um conjunto de resultados enganadores pela presença de falsos alarmes. Quando se confirma que os dados não são independentes, diz-se que estes estão positivamente autocorrelacionados, (Montgomery, 2009).

Então, se existir de facto autocorrelação dos dados, os parâmetros do processo bem como os limites das cartas de controllo seriam estimados incorretamente, se não forem usados os métodos adequados. Existem diversas metodologias para o tratamento deste tipo de dados, como por exemplo, a utilização das cartas de controllo de Shewhart com limites modificados, *CUSUM* ou *EWMA*, com os limites de controllo modificados, (Pereira & Requeijo, 2012).

De seguida irá ser explicada a metodologia considerada mais relevante para o caso de estudo, as cartas de controllo convencionais de Shewhart com limites modificados. Segundo Pereira & Requeijo (2012), esta apresenta a grande vantagem de ser bastante mais simples que as demais, não sendo necessário estabelecer um modelo matemático que se ajuste aos dados em estudo, os limites são determinados tendo em consideração os parâmetros do processo, ou em alternativa as suas estimativas e do coeficiente de correlação médio, ρ .

CAPÍTULO 2 – ESTRATÉGIAS DE MELHORIA CONTÍNUA

O coeficiente de correlação médio, ρ é definido pela equação 20, referente à característica da qualidade X, (Pereira & Requeijo, 2012):

$$\hat{\rho} = \frac{\sum_{i \neq j} r_{ij}}{n(n-1)} \quad (20)$$

Para a sua determinação considera-se que:

m – número de amostras (subgrupos)

n – dimensão das amostras

k – amostra ou subgrupo, onde $k=1, 2, \dots, m$

Cada subgrupo é uma realização do vetor aleatório $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, distribuído segundo uma Normal multivariada $N(\mu, V)$, onde μ é o vetor média e $V = \{V_{ij}\}$ a matriz das covariâncias sendo $i, j=1, 2, \dots, n$.

A matriz de correlação R, é definida por $R = \{r_{ij}\}$ onde r_{ij} representa o coeficiente de autocorrelação. Estes coeficientes são definidos por:

$$r_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{para } i = j \\ r_{ij}, \text{ com } |r_{ij}| \leq 1, & \text{para } i \neq j \end{cases}$$

O teste de hipóteses para verificar se os dados são ou não autocorrelacionados é o seguinte, onde I é a matriz identidade:

$$H_0: R=I$$

$$H_1: R \neq I$$

A estatística de teste é definida por:

$$X_C^2 = \left(\sum_{i \neq j} r_{ij}^2 \right) \left(m - 1 - \frac{2n+5}{6} \right) \quad (21)$$

A hipótese nula é rejeitada, confirmando-se a existência de autocorrelação, para uma significância α , se $X_C^2 > X_{\alpha;v}^2$, onde v corresponde aos graus de liberdade, calculados através de:

$$v = \frac{n(n-1)}{2} \quad (22)$$

Se os dados forem autocorrelacionados as cartas de controlo serão construídas com limites modificados e a capacidade do processo será calculada utilizando $\hat{\sigma}'$ ao invés de $\hat{\sigma}$.

$$\hat{\sigma}' = \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{1-\rho}} \quad (23)$$

CAPÍTULO 2 – ESTRATÉGIAS DE MELHORIA CONTÍNUA

Os limites para a carta de controlo das médias, para média e variância desconhecidas são os seguintes:

$$LSC_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} + 3 \frac{\bar{S}}{c_4} \sqrt{\frac{1+(n-1)\rho}{n(1-\rho)}} \quad (24)$$

$$LIC_{\bar{X}} = \bar{\bar{X}} - 3 \frac{\bar{S}}{c_4} \sqrt{\frac{1+(n-1)\rho}{n(1-\rho)}} \quad (25)$$

Para calcular os limites para a carta dos desvios padrão é necessário calcular primeiramente alguns valores:

$$\gamma_4 = 1 - \frac{\eta^2}{8\sigma^4(1-\rho)^2} \quad (26)$$

$$\eta^2 = \frac{1}{(n-1)^2} (2 \operatorname{tr}(V^2) - \frac{4}{n}(\Omega) + \frac{2}{n^2}v^2) \quad (27)$$

Onde, v corresponde à soma dos elementos da matriz V , matriz das covariâncias e Ω à soma dos elementos da matriz V^2 .

Os limites para a carta de controlo dos desvios padrão, para média e variância desconhecidas são os seguintes:

$$LSC_S = \bar{S} \left(1 + 3 \frac{\sqrt{1-\gamma_4^2}}{\gamma_4} \right) \quad (28)$$

$$LIC_S = \max \left(0; \bar{S} \left(1 - 3 \frac{\sqrt{1-\gamma_4^2}}{\gamma_4} \right) \right) \quad (29)$$

No entanto, provou-se através de simulação que o valor de γ_4 é muito semelhante ao valor de c_4 e por isso, os limites modificados para esta carta são muito parecidos aos tradicionais, quanto maior a dimensão da amostra, mais semelhantes serão. Este facto é fácil de explicar, os limites tradicionais para a carta do desvio padrão são:

$$LSC_S = \bar{S} \left(1 + 3 \frac{\sqrt{1-c_4^2}}{c_4} \right) \quad (30)$$

$$LIC_S = \bar{S} \left(1 - 3 \frac{\sqrt{1-c_4^2}}{c_4} \right) \quad (31)$$

Como se verifica, as fórmulas são muito semelhantes, na realidade das cartas de controlo tradicionais para as cartas de controlo com limites modificados apenas se troca o valor de c_4 para γ_4 .

Tollgate da fase Measure

Finalmente, realiza-se a *tollgate review* da fase M do ciclo DMAIC, os problemas que devem ser objeto de discussão por parte da equipa do projeto, são, (Montgomery, 2009):

- Existe uma representação gráfica detalhada do processo que englobe todas as etapas e atividades do processo?
- A capacidade do sistema de medição está documentada?
- Os pressupostos tomados durante a recolha de dados foram anotados?
- A equipa é capaz de responder a perguntas como, “De onde provêm os dados?” e “Como se decidiu que dados recolher?”?
- O processo está num bom caminho no que diz respeito a tempo e aos resultados previstos?

2.3.2.3. Fase Analyze

A terceira fase do ciclo de melhoria, a fase *Analyze*, prende-se com a utilização dos dados provenientes da fase anterior, *Measure*, para começar a determinar as relações causa-efeito, quais as fontes de variabilidade presentes no processo e se estas influenciam a característica da qualidade em estudo, quantificando por fim a oportunidade de melhoria encontrada, (Montgomery, 2009).

Enunciam-se os principais objetivos desta fase do ciclo de melhoria, (Pyzdek & Keller, 2010):

- Analisar o fluxo de valor para identificar formas de eliminar a lacuna entre o desempenho atual e o desempenho desejado.
- Analisar as fontes de variação que contribuem para a lacuna.
- Determinar os fatores impulsionadores, que influenciam significativamente o processo.

De seguida, serão explicados os elementos mais relevantes para este estudo no que diz respeito à concretização desta fase do ciclo de melhoria.

Diagrama de Ishikawa

Quando se está perante um problema grave, é importante explorar de uma forma holística tudo o que o pode causar, antes de se começar a pensar numa solução. Como forma de abordar esta questão e identificar todas as causas raiz que afetam um problema em particular, surge o Diagrama de Ishikawa, (Kiran, 2017a).

O Diagrama de Ishikawa, conhecido também por diagrama de causa-efeito ou diagrama espinha de peixe é uma das sete ferramentas básicas da qualidade, o nome Diagrama de Ishikawa deriva do seu autor, Kaoru Ishikawa que o desenvolveu na década de 60, (Ashok Sarkar et al., 2013).

Tipicamente, este diagrama utiliza dados provenientes de sessões de brainstorming para gerar as possíveis causas de um problema, tendo a função de as organizar para posteriormente ser identificada a causa ou causas mais prováveis e se possam tomar medidas para resolver o problema em estudo. As causas raiz são organizadas nas dimensões onde se inserem, as mais comuns são, máquina, método, material, pessoas e ambiente no entanto estas categorias podem ser modificadas com base no tipo de problema, (Rodgers & Oppenheim, 2019).

Na figura 2.9 apresenta-se um esquema exemplo de um diagrama de Ishikawa.

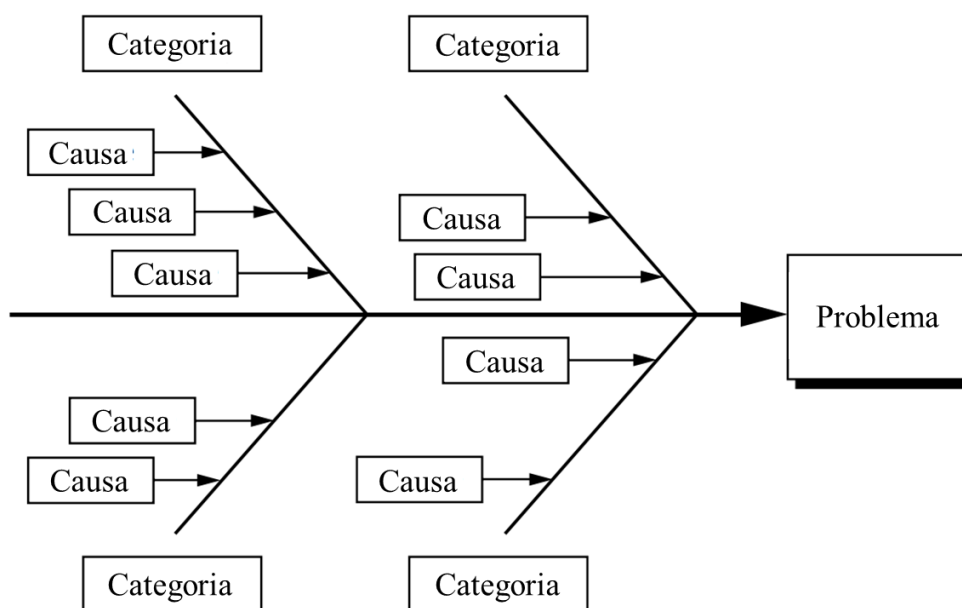


Fig. 2.9 - Exemplo Diagrama de Ishikawa

Adaptado de: Voehl et al. (2013)

Matriz causa-efeito

A matriz causa-efeito, também conhecida como matriz de priorização, é uma ferramenta utilizada para ajudar à decisão sobre a ordem de importância de uma lista de elementos, permitindo definir quantitativamente a importância da relação de causa-efeito entre os critérios definidos e as causas identificadas. É muitas vezes utilizada para priorizar causas previamente definidas num Diagrama de Ishikawa (Marriott et al., 2013).

Segundo Kiran (2017b), existem dois tipos de matrizes causa-efeito, a matriz de causa-efeito simples, onde cada critério tem o mesmo peso, e matrizes causa-efeito ponderadas, onde os fatores não têm a mesma importância sendo por isso atribuídos diferentes pesos. Esta última é a mais utilizada pois normalmente os critérios de avaliação não são de igual importância.

A matriz causa-efeito é normalmente usada nas seguintes situações, (Kiran, 2017b):

- Para priorizar questões ou problemas complexos e pouco claros onde existem múltiplos critérios para decidir a importância.
- Quando não existem dados disponíveis para ajudar a hierarquizar as causas.
- Quando utilizada com um grupo de pessoas, ajuda a obter acordo sobre quais as prioridades e questões-chave, em detrimento de uma simples votação.

Desenho de Experiências (DOE)

O desenho e experiências (DOE), é um método estatístico para estabelecer quais os fatores/variáveis importantes num processo e as condições sob as quais estas variáveis devem funcionar para otimizar esse processo. Foi introduzido em 1920 por Sir Ronald A. Fisher em Inglaterra, na área da investigação agrícola. Desde então muitos cientistas e matemáticos contribuíram para o desenvolvimento do DOE e a sua aplicação em diferentes áreas, (Izarbe et al., 2008).

A abordagem sistemática inerente ao DOE evita a parcialidade do investigador e muitas vezes conduz a conclusões não consideradas anteriormente. A principal vantagem do DOE é a capacidade de detetar como as interações entre fatores podem afetar o *output* da variável em estudo, além disto ao variar simultaneamente os parâmetros esta abordagem pode ser mais eficiente do que o alcançado pelas abordagens tradicionais que fazem variar um fator de cada vez, (Weissman & Anderson, 2015).

Para proceder ao desenho de experiências, devem ser seguidos os seguintes passos, (Montgomery, 2013):

1. Reconhecimento e definição do problema.
2. Definição da variável de resposta.
3. Escolha de fatores, níveis e intervalos.
4. Escolha do desenho experimental.
5. Análise estatística dos dados.
6. Conclusões e recomendações.

De um modo geral, existem diversas técnicas que se podem seguir para concretizar o DOE, (Cavazzuti, 2013):

- Desenho com blocos aleatórios – numa experiência, há sempre diversos fatores que podem afetar o resultado, alguns destes não podem ser controlados pelo que devem ser aleatorizados durante a execução experimental para que se possa separar a variação criada por essas fontes, da variação residual.
- Desenho fatorial completo – é a estratégia mais comum e intuitiva do desenho de experiências, onde existe um determinado número de fatores (k) e L níveis por fator, a dimensão

da amostra será então, $N = L^k$. Cada fator toma normalmente dois níveis, o nível alto (+) e o nível baixo (-). Por vezes há a necessidade de se adicionar um ponto central ao desenho de experiências, designado valor médio (0), o valor do ponto central é a média entre os níveis alto e baixo. A matriz de planeamento é uma matriz ortogonal, constituída pelo número da experiência, os níveis dos fatores e a variável resposta para cada combinação. Este tipo de desenho apresenta o problema de o número de experiências crescer exponencialmente com o número de parâmetros e de níveis.

- Desenho fatorial fracionado – a ideia deste desenho é executar apenas um subconjunto das experiências fatoriais completas, de uma forma que ainda fornece informação satisfatória no que toca aos efeitos principais e as suas interações. O tamanho da amostra do fatorial fracionado pode ser metade, um quarto, e assim por diante, do fatorial completo. Diz-se que um desenho é de resolução R, dependendo da estrutura dos efeitos confundidos:
 - Resolução III – os efeitos principais estão confundidos com interações de dois fatores e estas interações também estão confundidas umas com as outras, no entanto os efeitos principais não estão confundidos uns com os outros.
 - Resolução IV – os efeitos principais estão confundidos com interações de três fatores, as interações de dois fatores estão confundidas umas com as outras, no entanto, os efeitos principais não estão confundidos uns com os outros nem com interações de dois fatores.
 - Resolução V – os efeitos das interações de dois fatores estão confundidas com as de três fatores, no entanto quer as interações principais quer as interações de dois fatores não estão confundidos entre si.

Além das técnicas mencionadas existe também os métodos de Box-Behnken, Plackett-Burman, Taguchi entre outros para proceder ao desenho de experiências.

É importante neste documento realçar a importância do desenho fatorial completo 3^2 e 3^3 , (Montgomery, 2013).

- Desenho fatorial completo, 3^2

Este tipo de desenho, tem como objetivo estudar dois fatores quando cada um destes possui três níveis. Como existem $3^2 = 9$ combinações de tratamentos, existem oito graus de liberdade entre as combinações destes tratamentos. Os efeitos principais dos fatores têm dois graus de liberdade e a sua interação, quatro. Com n réplicas, haverá $n3^2 - 1$ graus de liberdade totais e $3^2(n - 1)$ graus de liberdade para o erro. As somas dos quadrados (SS) são calculadas utilizando os métodos tradicionais do fatorial fracionado.

Cada efeito principal pode ser representado por um componente linear e um componente quadrático, cada um com um único grau de liberdade, o modelo de regressão é definido por:

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_{12}x_1x_2 + \beta_{11}x_1^2 + \beta_{11}x_1^2 + \beta_{22}x_2^2 + \epsilon \quad (32)$$

Onde x_1 e x_2 representam os fatores, β , os coeficientes da regressão e y a resposta, ϵ é a parcela do erro.

Na figura 2.10, apresenta-se uma representação das combinações dos tratamentos no desenho fatorial completo 3^2 , para os fatores A e B.

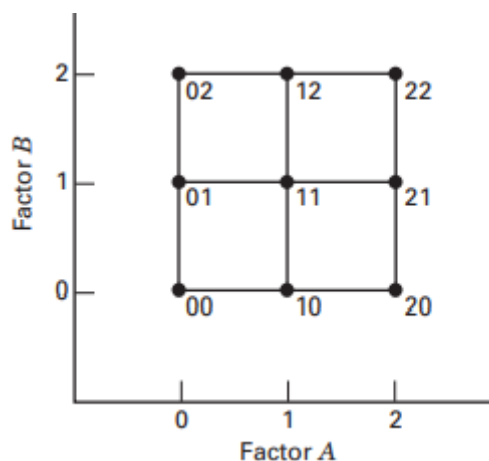


Fig. 2.10 - Combinações tratamentos, fatorial completo 3^2

Adaptado de: Montgomery (2013)

- Desenho fatorial completo, 3^3

Este desenho fatorial completo é muito semelhante ao apresentado anteriormente, no entanto tratam-se de três fatores cada um com três níveis. As $3^3 = 27$ combinações dos tratamentos possuem 26 graus de liberdade, cada efeito principal apresenta dois graus de liberdade, as interações de dois fatores, quatro, e as interações de três fatores oito graus de liberdade. À semelhança do anterior, com n réplicas, haverá $n3^3 - 1$ graus de liberdade totais e $3^3(n - 1)$ graus de liberdade para o erro. As somas dos quadrados (SS) são calculadas utilizando os métodos tradicionais do fatorial fracionado.

Quando os fatores são quantitativos, os efeitos podem ser divididos em dois grupos, lineares e quadráticos, as interações de dois fatores podem ser decompostas em linear \times linear, linear \times quadrático, quadrático \times linear e quadrático \times quadrático. E as interações de três fatores em, linear \times linear \times linear, linear \times linear \times quadrático e por aí em diante.

CAPÍTULO 2 – ESTRATÉGIAS DE MELHORIA CONTÍNUA

Na figura 2.11, apresenta-se uma representação das combinações dos tratamentos no desenho fatorial completo 3^3 , para os fatores A, B e C.

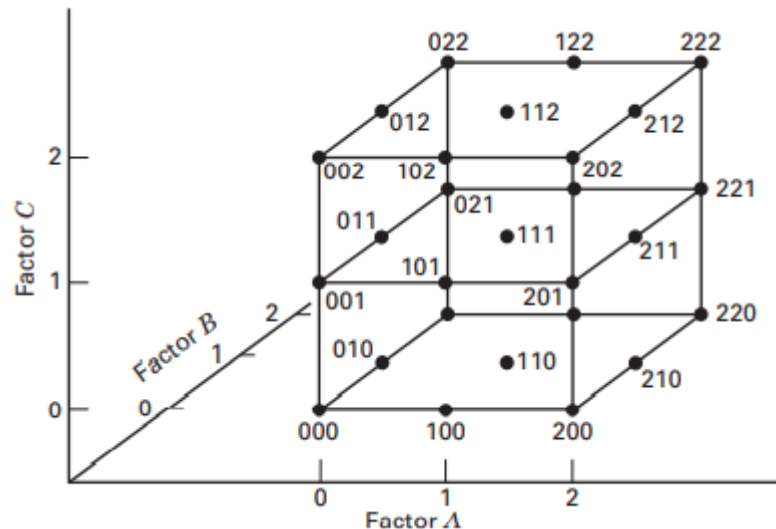


Fig. 2.11 - Combinações tratamentos, fatorial completo 3^3

Adaptado de: Montgomery (2013)

Tollgate da fase Analyze

Por fim, realiza-se a *tollgate* da fase *Analyze* do ciclo de melhoria, os problemas e questões a ser analisados são, (Montgomery, 2009):

- Que oportunidades de melhoria serão alvo de análise na fase *Improve* que se segue?
- Que dados e análises suportam que as oportunidades de melhoria selecionadas terão o resultado desejado nos *CTQs* que foram o foco inicial do projeto?
- Existem outras oportunidades que não serão analisadas profundamente? Se sim, porquê?
- O projeto está num bom caminho no que respeita ao tempo e aos resultados previstos?

2.3.2.4. Fase Improve

Na fase *Improve*, faz-se uso dos conhecimentos da equipa para desenvolver e implementar ações de melhoria para abordar a ou as causas primárias de variação, (Holtz & Campbell, 2003). Com recurso ao pensamento criativo, são definidas mudanças específicas que podem ser feitas no processo, entre outras melhorias identificadas para que se tenha o impacto pretendido no processo, (Shankar, 2009).

Os objetivos que devem ser atingidos na fase *improve* do ciclo de melhoria, segundo Pyzdek & Keller (2010), são:

- Priorizar as diferentes oportunidades de melhoria.
- Implementar a solução para a oportunidade de melhoria escolhida, definindo as configurações/parâmetros ótimos.

Tollgate da fase Improve

Os problemas e questões que devem ser objeto de análise na *tollgate* da fase *improve* são, (Montgomery, 2009):

- Existe documentação adequada sobre como foi obtida a solução do problema?
- Existe documentação sobre soluções alternativas que foram consideradas?
- Estão disponíveis os resultados completos do teste piloto, incluindo apresentação de dados, análises, experiências, etc?
- A viabilidade da implementação da solução foi analisada?

2.3.2.5. Fase Control

Na última fase do ciclo DMAIC, deve ser feita a conclusão de todos os trabalhos pendentes no projeto e entregar o processo melhorado ao seu proprietário juntamente com um plano de controle e todos os procedimentos necessários para assegurar que os ganhos não serão perdidos, (Shankar, 2009).

Nesta fase, os objetivos que devem ser atingidos são, (Pyzdek & Keller, 2010):

- Validar estatisticamente que o novo processo atinge os objetivos e benefícios definidos e procurados durante o projeto.
- Desenvolver e implementar um plano de controle para institucionalizar o novo processo.

Tollgate da fase Control

A *tollgate* da fase *Control*, inclui normalmente os seguintes problemas e questões, (Montgomery, 2009):

- Os dados do antes e depois que comprovam que os objetivos do projeto foram atingidos estão disponíveis?
- O plano de controle foi definido?
- Oportunidades que não foram levadas a cabo no projeto serão aproveitadas para desenvolver projetos futuros?

CAPÍTULO 3 - CARACTERIZAÇÃO DA ORGANIZAÇÃO E SELEÇÃO DO PROJETO DE MELHORIA

Neste capítulo apresenta-se a empresa onde foi realizado o estudo, a Crown Holdings, Inc.

3.1. Crown Holdings, Inc

As origens da Crown Holdings remontam ao ano de 1892 quando William Painter inventou a cápsula, mais comumente conhecida como carica, uma nova forma de embalar refrigerantes e cerveja em garrafas de vidro que revolucionou a indústria do engarrafamento. A empresa foi fundada sob o nome New Process Cork Company Inc, tendo já sido denominada de Crown Cork & Seal e mais recentemente adquiriu o nome pelo qual é hoje conhecida, Crown Holdings, Inc. A Crown Holdings é hoje a quarta maior empresa fabricante de latas dos Estados Unidos da América, desde 1984 que expandiu o seu negócio de cápsulas para a produção de embalagens metálicas.

Quando Painter morreu, em 1906 a empresa expandiu a sua base de fabrico para incluir a Europa, América do Sul e para os países da Ásia-Pacífico. Esta entrada precoce no mercado estrangeiro deu à Crown uma vantagem sobre os seus concorrentes nos campos de recipientes e vedantes, uma vantagem que se mantém até aos dias de hoje.

Em 1960 a Crown começou a conceber equipamentos (máquinas) especificamente para satisfazer as necessidades dos produtores de refrigerantes tendo ganho uma cota considerável no mercado dos EUA e em 1968 desenvolveu a primeira tampa totalmente plástica para refrigerantes carbonatados.

Em 1977, a empresa afirmava-se já como um dos principais produtores mundiais de latas e cápsulas fora dos Estados Unidos da América operando em 60 unidades industriais, o valor líquido de vendas chegava nesta altura a mil milhões de dólares americanos.

CAPÍTULO 4 – CASO DE ESTUDO

Nos dias que correm, o Presidente e CEO da Crown Holdings, Inc é Timothy J. Donahue, e existem 236 instalações dispersas por 47 países. Os centros chave de investigação e desenvolvimento situam-se em Alsil nos Illinois, e Wantage no Reino Unido. Conta com 33 000 colaboradores e as vendas líquidas reportadas em 2020 foram de 11.6 mil milhões de dólares americanos.

A Crown está presente nos mercados de bebidas, alimentação, indústria geral, saúde e beleza, metais e promocionais.

Para assegurar a melhoria contínua, foi criada na empresa uma abordagem integrada e global que reconhece a interação de cada função e atividade. Ao integrar sistemas que aumentam a eficácia dos operadores, ideias, processos e fornecedores, a empresa esforça-se por manter os defeitos, as reclamações e o impacto no meio ambiente a um mínimo absoluto.

Esta iniciativa única de melhoria de desempenho a nível mundial, chama-se World-Class Performance (WCP). Definido como um plano rigoroso e estruturado, o programa WCP fornece a estrutura e o enquadramento para todas as atividades numa ótica de desenvolvimento sustentável. Este programa é baseado em vários princípios orientadores, denominados “As Sete Dimensões”:

- A qualidade em primeiro lugar: o foco na satisfação do cliente através da qualidade do produto e do processo.
- Servir os clientes: construir o crescimento através de parcerias estreitas e relações duradouras com os clientes.
- Ambiente, Saúde e Segurança: conservar os recursos naturais e assegurar a saúde e o bem-estar dos colaboradores da empresa.
- Força de equipa: formação dos operadores para trabalharem em equipas e para se esforçarem ativamente para contribuírem para a melhoria contínua.
- Gestão da Inovação: assegurar que as melhores práticas estão difundidas por toda a organização.
- Processos de fabrico: foco contínuo em métodos para eliminar a variabilidade e melhorar a eficiência.
- Gestão da cadeia de abastecimento: trabalhar em estreita relação com os fornecedores para otimizar o desempenho e minimizar o desperdício.

3.2. Crown Holdings, Inc - Alcochete

A Crown Holdings está presente em Portugal desde 1950, nesta altura as suas instalações situavam-se em Lisboa e em Ovar onde eram produzidas latas de duas e três peças, tampos tradicionais de latas e cápsulas. Em novembro de 1998 a Crown adquiriu a empresa ORMIS e transferiu todas

CAPÍTULO 4 – CASO DE ESTUDO

as suas atividades em território nacional para Alcochete passando a trabalhar com metais. As instalações apresentam-se na figura 3.1.



Fig. 3.1 - Crown Holdings, Alcochete

A Crown em Portugal conta com cerca de 220 trabalhadores para a produção de embalagens metálicas para a indústria de pescados: embalagens de duas peças (as típicas latas de atum, constituídas pelo tampo e pelo corpo) como a que se mostra na figura 3.2, com tampos de abertura fácil. Detém a liderança em Portugal na produção e comercialização de latas de duas peças e, para além de exportar parte da sua produção para Espanha, abastece fábricas do grupo lá instaladas com folha impressa para a produção de latas de três peças (como as latas de salsicha).



Fig. 3.2 - Embalagem de 2 peças, produzida na Crown Holdings - Alcochete

Para um melhor entendimento do processo de fabrico de embalagens de duas peças, e das atividades na Crown Holdings – Alcochete, é importante descrever os trabalhos de uma forma geral.

Na unidade fabril existem cinco processos distintos de fabricação. A montante destes processos, a operação de corte de folha de flandres e de alumínio inicia a fabricação da embalagem. A folha

CAPÍTULO 4 – CASO DE ESTUDO

recebida em bobines é cortada na dimensão requerida com recurso a ferramentas adequadas, este processo é automatizado, seguindo em paletes para a litografia.

Na litografia, as folhas de flandres ou de alumínio são envernizadas e impressas por processo de *offset* nas linhas de litografia. Este processo termina em fornos contínuos aquecidos ou a gás ou com ultravioletas, e de temperatura controlada de forma a secar os produtos aplicados.

As folhas litografadas seguem para a área de produção de duas peças, que se divide na produção do corpo e tampo da lata.

Para a fabricação do corpo da lata, a máquina é alimentada com folha proveniente da litografia e é realizada a embutição, depois o aparamento, passando pelo controlo de qualidade, nomeadamente por testes de luz infravermelha para detetar fissuras. Isto é feito através de câmaras com programas de deteção de defeitos e, se estiver conforme, segue para o paletizador de onde vai para o armazém de produtos acabados para posteriormente ser expedido para o cliente.

Já na produção do tampo da lata, balotes de folha litografada entram no alimentador, cada folha passa por uma prensa de múltiplos punções ou de duplo punção, dependendo da linha, é embutida e passa pelo orleador e depois pela borrachadeira, munida de *spiders* que aplicam o composto vedante também chamado de *sealing compound*. Nesta fase, a tampa chama-se esboço e já passou por diversos controlos de qualidade com o objetivo de rejeitar os esboços não conformes. O esboço é depois encaminhado em balotes para a aplicação do anel para abertura, e para o processo de corte das fissuras para a abertura fácil, depois passa por inspeção visual e por último é aplicado um verniz, após ir ao forno para secar. Os tampos conformes seguem para o paletizador para serem encaminhados para o armazém de produtos acabados de onde seguem para o cliente.

3.3. Seleção do Projeto de Melhoria e alguns comentários

Na Crown existe a preocupação com a melhoria dos processos, estando a decorrer o programa “*Spoilage Reduction*”, é neste programa que se inserem diversos projetos de melhoria contínua na área do Seis Sigma.

Apresentaram-se quatro opções de projetos, sendo eles:

1. MAS – *Attribute Agreement Analysis* na equipa de controladores de qualidade.
2. *Machine Capability Study*.
3. RR *Study* – Sistemas de Visão.
4. C_{pk} *improvement* – aplicação de composto vedante na linha PM1.

Considerando as quatro opções e a duração do estágio, que decorreu desde o início de março até finais de julho, decidiu-se optar pelo projeto de melhoria do C_{pk} da aplicação de composto vedante

CAPÍTULO 4 – CASO DE ESTUDO

na linha PM1, ficando definido qual o CTQ em que se optou por incidir o peso de composto vedante depositado pelas spiders da linha em estudo.

Para um melhor entendimento desta dissertação por parte do leitor, é importante clarificar alguns pontos para que não surjam dúvidas ao longo do trabalho.

Como dito anteriormente, no processo de produção de latas de duas peças, após a litografia dá-se a produção do esboço. A linha PM1 é uma linha de produção de esboços em folha de flandres.

Nesta linha são produzidos esboços com diferentes referências, segundo as especificações do cliente. Na figura 3.3 apresenta-se um esboço, o tampo da lata antes de serem cortadas as ranhuras para a abertura fácil e colocado o anel para abertura. A zona onde é colocada o composto vedante, a cinzento na figura, chama-se *cuvete* e a parte interior a dourado é denominada de *espelho*.



Fig. 3.3 – Fotografia de esboço

Para a aplicação do composto vedante nos esboços, é utilizada uma tecnologia denominada de *spider*, como a apresentada na figura 3.4.



Fig. 3.4 - Fotografia de *Spider*

CAPÍTULO 4 – CASO DE ESTUDO

A *spider* é constituída por três braços, controlados por um computador, que seguindo um movimento pré-definido por conjuntos de pontos, depositam composto vedante na cuvete do esboço.

Existem vários parâmetros para o controlo das *spiders*, são eles:

- Pressão – pressão sob a qual é aplicada a borracha, medida em bar.
- Cliques – o ajuste em cliques do bico de aplicação permite controlar a quantidade de composto vedante aplicada, medido em número de cliques.
- Ajuste – permite definir onde a *spider* começa e termina a aplicação de composto vedante sendo controlável pelo mecânico da linha, medido em milímetros.

Além disto, o local onde se encontram as *spiders* é fechado e climatizado a uma temperatura constante de 20°C.

CAPÍTULO 4 - ESTUDO DE CASO

Neste capítulo descreve-se de forma detalhada as etapas do modelo de melhoria Seis Sigma e as ferramentas aplicadas neste estudo.

4.1. Fase *Define*

A primeira fase do ciclo DMAIC é a fase *Define* – Definir, ilustrada na figura 4.1. Após a seleção do projeto a abordar, iniciou-se a elaboração do *Project Charter*. De seguida, para melhor compreender o processo e os seus *inputs* e *outputs* procedeu-se à utilização da ferramenta SIPOC. Por fim, seguiu-se para a identificação dos *stakeholders* e da sua análise e à construção da *Force Field Analysis*, estando assim, em condições de estabelecer a equipa do projeto, e de fazer uso da *Skills Matrix*, terminando esta fase pela conclusão da elaboração do *Project Charter*.

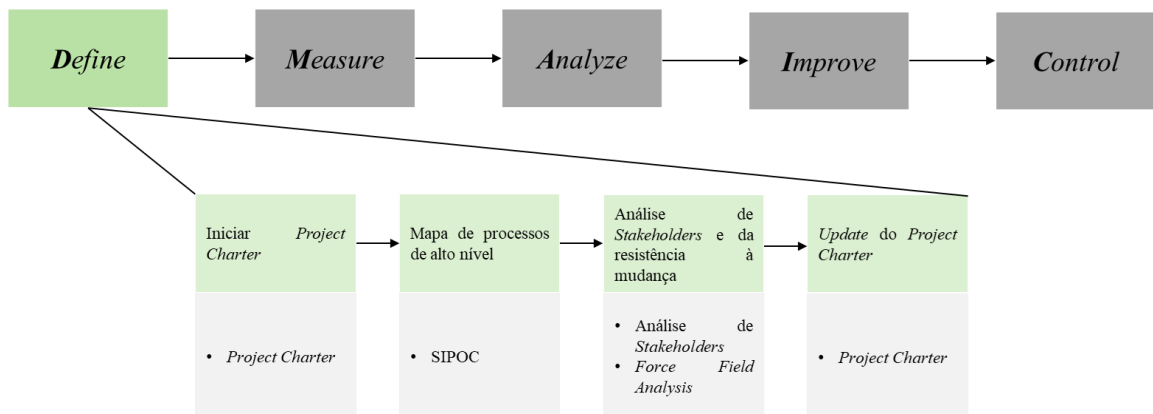


Fig. 4.1 - Fase Define, passos e ferramentas

Agora, será descrito em detalhe a utilização das ferramentas usadas na fase *Define* deste projeto.

CAPÍTULO 4 – CASO DE ESTUDO

4.1.1. Iniciar o *Project Charter*

Para levar a cabo o projeto, de uma forma estruturada e de forma a garantir a sua gestão, criou-se um planeamento compacto, um *Project Charter*. O *Project Charter* é um documento dinâmico, que foi ajustado inúmeras vezes no decorrer do projeto de forma a ser mantido atualizado, por isso, o *Project Charter* que a seguir se apresenta na figura 4.2 não é o resultado após todas as alterações e atualizações.

| 1.0 IDENTIFICAÇÃO DO PROJETO | | |
|------------------------------|---|---|
| Nome | Melhoria da métrica Cpk na aplicação de composto vedante na linha PM1 | |
| Sponsor | Raul Gouveia | <i>Continuous Improvement Manager</i> |
| Líder do projeto | Patrícia Cordeiro | |
| Equipa | Miguel Ferreira | <i>2 Pieces EOE & Crowns Production Manager</i> |
| Equipa | Hugo Carvalho | <i>WCP Production Engineer</i> |
| Equipa | Pedro Rosado | <i>WCP Quality Engineer</i> |
| Equipa | Rui Carvalho | Mecânico da linha PM1 |

| 2.0 RAZÕES PARA O PROJETO |
|--|
| <ul style="list-style-type: none">▪ Valor de Cpk da aplicação de composto vedante na linha abaixo do mínimo de 1.33▪ Melhoria da qualidade dos esboços produzidos▪ Redução do número de esboços rejeitados |

| 3.0 OBJETIVO DO PROJETO |
|---|
| <ul style="list-style-type: none">▪ Aumento da capacidade do processo de aplicação de composto vedante na linha PM1 para valor acima de 1.33▪ Redução do desperdício |

| 4.0 ÂMBITO DO PROJETO |
|--|
| <ul style="list-style-type: none">▪ Processo de aplicação de composto vedante através de <i>spiders</i> na linha PM1. Projeto de melhoria integrado no programa <i>Spoilage Reduction</i> a decorrer na empresa. |

| 6.0 MILESTONES - DATAS | | |
|------------------------|--|------------|
| Item | Milestones | Datas |
| 1. | Mapeamento do processo | 19/03/2021 |
| 2. | Análise do sistema de medição | 09/05/2021 |
| 3. | Estabelecimento de controlo estatístico e definição da <i>baseline performance</i> | 20/05/2021 |
| 4. | Desenho de Experiências (DOE) | 18/07/2021 |
| 5. | Obtenção de valores ótimos para os fatores | 18/07/2021 |
| 6. | Teste da linha com fatores ótimos | 18/07/2021 |
| 7. | Determinação das melhorias alcançadas | 29/08/2021 |
| 8. | Estabelecimento do plano de controlo | 01/08/2021 |

| 7.0 BENEFÍCIOS EXPECTÁVEIS |
|---|
| <ul style="list-style-type: none">▪ Melhoria da capacidade do processo de aplicação de composto vedante▪ Diminuição do desperdício |

Fig. 4.2 - Project Charter

4.1.2. Mapa de processos de alto nível

SIPOC

De modo a ter uma melhor perceção do processo, ainda que através de uma visão macro, utilizou-se a ferramenta SIPOC.

Para se proceder à elaboração deste elemento, foram pedidas informações ao *Sponsor* do projeto e responsável do departamento de melhoria contínua acerca dos fornecedores. Quanto aos *inputs*, ao processo e aos *outputs*, de forma a compreender todas as variáveis de interesse para a construção do diagrama, foram recolhidas as informações através da observação direta, em diversos dias e alturas, da consulta de documentos da empresa e do parecer dos operadores de linha.

O SIPOC serviu para ajudar a equipa a entender o processo, assegurando que todos partilhavam da mesma perspetiva validando assim o *scope* do projeto, não restando dúvidas a toda a equipa, onde será o foco do mesmo. O SIPOC da linha de produção de esboços PM1 apresenta-se de seguida na figura 4.3.

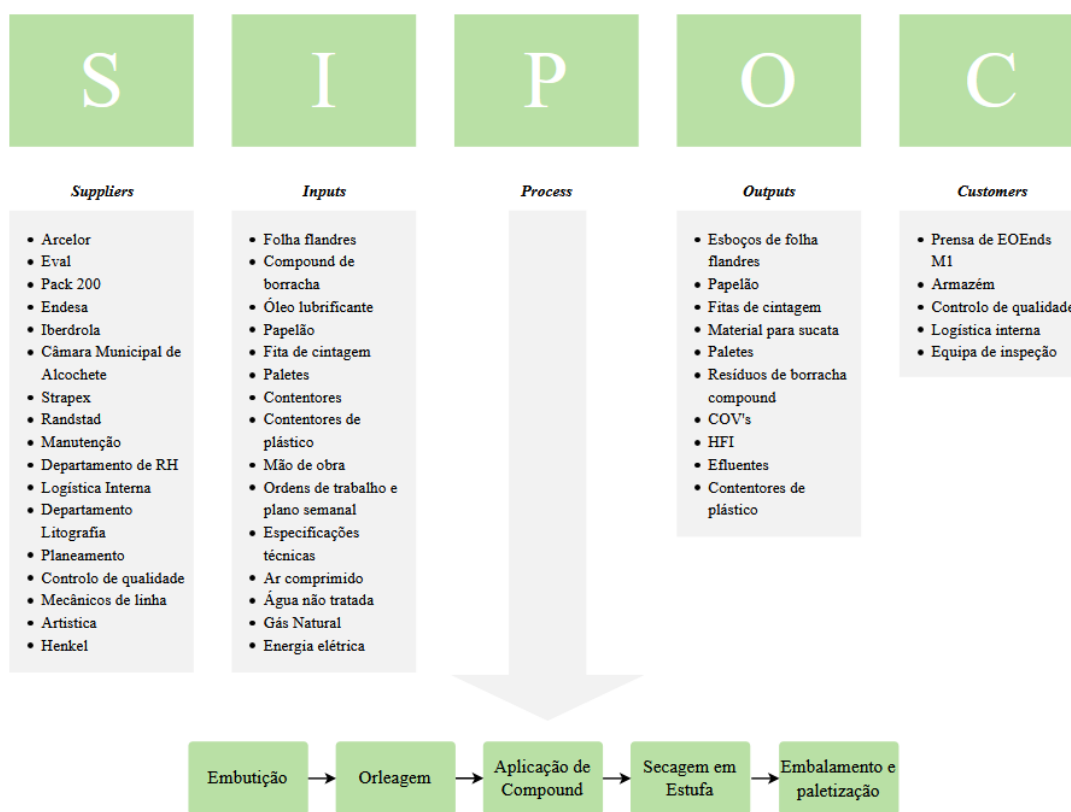


Fig. 4.3 - Diagrama SIPOC da linha PM1

4.1.3. Análise de *Stakeholders* e da resistência à mudança

Análise de *Stakeholders*

É importante ter em conta todas as variáveis que podem influenciar o decurso do projeto, uma destas variáveis são os *stakeholders*. Os *stakeholders* identificados pela equipa foram: Diretor da fábrica, Diretor da produção, Diretor da qualidade, Diretor Financeiro, Engenheiro da qualidade de EOE & 2PC's, Chefes de turno, Mecânicos de linha, Controladores de qualidade, Chefes de turno da qualidade, Eletricistas, Equipa de Manutenção, Clientes internos, Planeamento e Equipa de inspeção de visão artificial.

Apesar de nem todos os *stakeholders* estarem diretamente envolvidos no projeto, todos seriam afetados pelo mesmo e partilhavam o interesse na execução e nos resultados, o que significa que influenciavam a sua execução, tendo o poder de infligir forças facilitadoras ou barreiras à implementação e continuidade do projeto.

Posto isto, procedeu-se a uma análise dos mesmos de forma a garantir que estas forças permanecessem controláveis.

Da análise de *stakeholders* realizada, concluiu-se quais os elementos que necessitavam de atenção extra, isto é, um reforço na sua motivação e esforços no sentido de os manter a bordo do projeto. Esta é uma análise subjetiva feita com recurso ao *brainstorming* com a equipa do projeto, os resultados apresentam-se na figura 4.4.

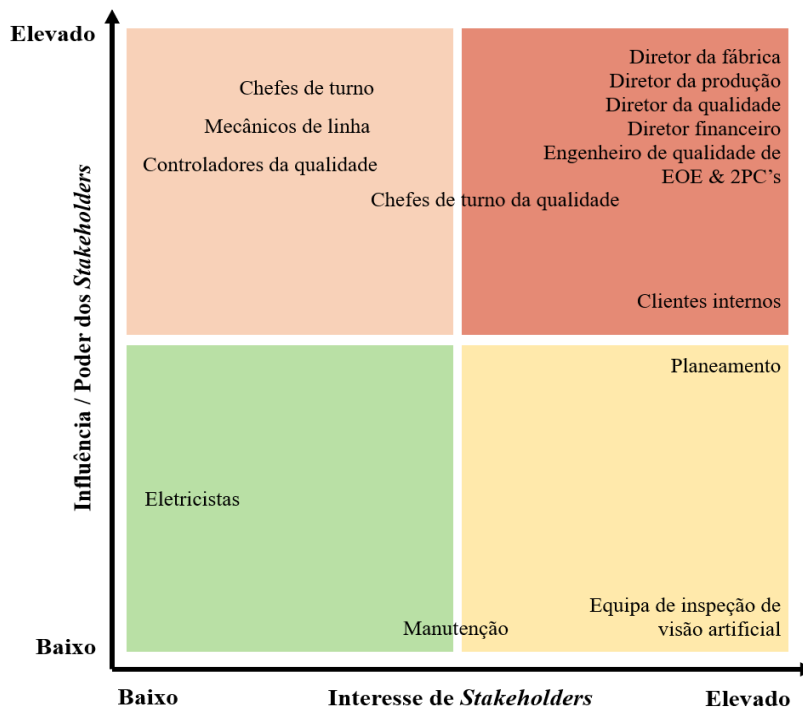


Fig. 4.4 - Análise de *Stakeholders*

CAPÍTULO 4 – CASO DE ESTUDO

Pela análise desta matriz, verifica-se que os *Stakeholders* Chefes de turno, Mecânicos de Linha, Controladores da Qualidade e Chefes de turno da qualidade foram aqueles que necessitaram de uma atenção mais rigorosa, de modo a transitarem do segundo para o primeiro quadrante. Esta necessidade justificou-se pelo facto destes terem uma influência elevada na conclusão do projeto, mas, no que toca ao interesse pelo mesmo, ser baixo. De forma a contrariar esta tendência, foi explicado a estes operadores a relevância da melhoria que se procura atingir e qual o impacto que a mesma terá no seu trabalho e nos resultados da empresa, motivando-os para a mudança e para os tornar facilitadores da mesma.

Force Field Analysis

De forma a concluir sobre a resistência à mudança no projeto do presente estudo de caso, foi elaborada uma *Force Field Analysis*. Através de *brainstorming*, com o responsável do departamento de melhoria contínua, concluiu-se quanto à existência de forças facilitadoras e quanto às barreiras à implementação deste projeto.

Por via de uma escala de um a dez, forças e barreiras foram quantificadas quanto ao seu impacto na gestão da mudança do projeto em questão, apresentando-se no diagrama da figura 4.5.

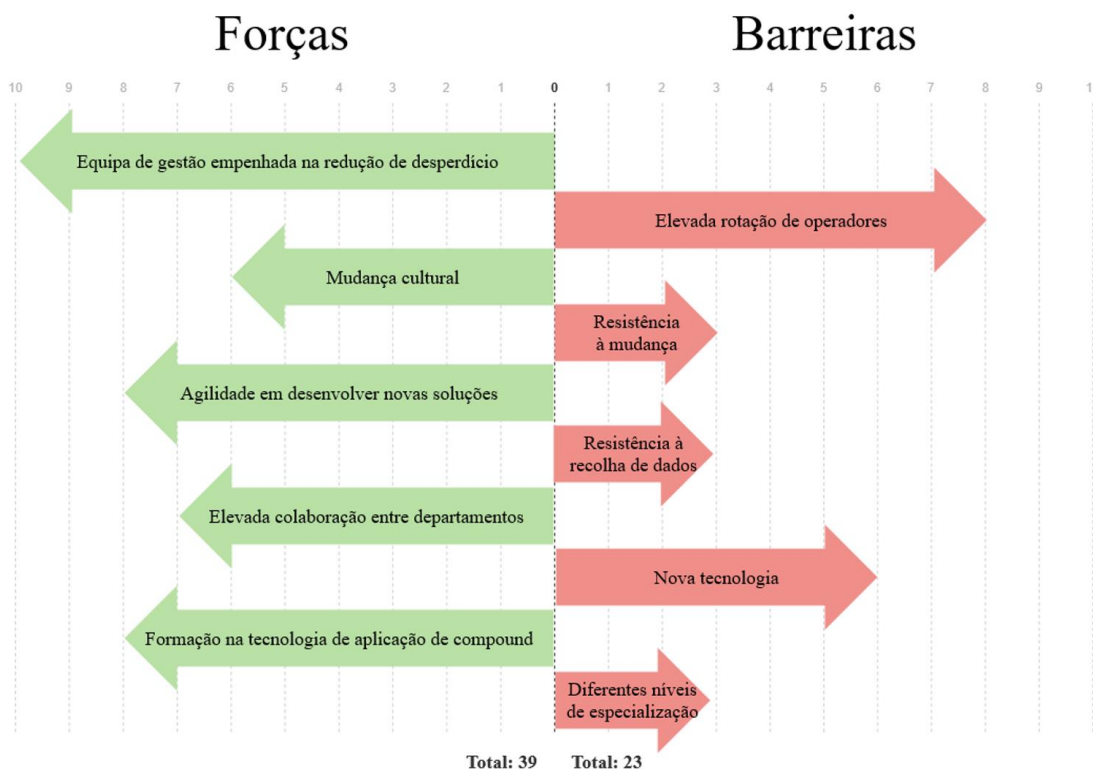


Fig. 4.5 - *Force Field Analysis*

CAPÍTULO 4 – CASO DE ESTUDO

Estando a decorrer na empresa o programa *Spoilage Reduction*, que tem como objetivo identificar e eliminar o desperdício, é evidente o empenho da equipa de gestão na redução do desperdício. Existe uma equipa bastante competente, e com profundos conhecimentos na área da melhoria contínua, e com a agilidade necessária para desenvolver novas soluções, sendo este um fator chave para uma mudança bem-sucedida. A elevada colaboração entre departamentos facilita a identificação de oportunidades de melhoria, bem como o sucesso na sua implementação.

A Crown Holdings, Inc. em Portugal, realiza desde 2017 projetos Seis Sigma, não sendo por isso uma novidade para a organização. A mudança cultural que se faz sentir tem já uma força bastante significativa quando comparada com a barreira da resistência à mudança, que ainda que presente, tem um peso bastante reduzido.

A elevada rotação de operadores, provocada pela saída e entrada de novos colaboradores na empresa é a maior barreira à mudança, o que gera também a existência de diferentes níveis de especialização, isto é, os operadores integrados nos quadros da empresa, há já muitos anos, possuem um maior e mais abrangente conhecimento sobre os trabalhos da empresa do que aqueles que passam pela Crown em trabalho temporário. Por outro lado, a resistência à recolha de dados é muito baixa, os operadores mostram-se recetivos e disponíveis para colaborar nesta tarefa.

Por fim, a utilização de tecnologia de ponta na aplicação de *sealing compound* leva a que esta seja uma barreira, devido a estar implementada há apenas dois anos. No entanto, a organização fornece formação nessa mesma tecnologia, mitigando a força da barreira.

Por fim, somadas as forças e as barreiras, obteve-se um saldo positivo de 16. Concluiu-se com certeza, que a gestão da mudança seria conduzida com sucesso e que o projeto possuía potencial para ser implementado e gerar benefícios num futuro próximo para a empresa.

Tollgate da fase Define

No final desta fase, foi importante rever com a equipa do projeto se todas os objetivos e questões próprias da *tollgate* desta fase estavam respondidas para se poder proceder para a fase seguinte.

Foi unânime que o foco do *problem statement* são os sintomas e não as causas, que os *stakeholders* foram todos identificados através da *stakeholder analysis*, que o processo acrescenta valor à empresa e tem a dimensão adequada, nem muito amplo nem demasiado estrito. Em relação às ferramentas implementadas, o seu objetivo foi atingido, tendo sido elaborado um diagrama de processos de alto nível permitindo um primeiro reconhecimento do processo e as forças e barreiras

CAPÍTULO 4 – CASO DE ESTUDO

identificadas de forma a evitar percalços futuros, na implementação do processo, além da *stakeholder analysis* anteriormente mencionada.

É importante referir que a característica da qualidade a tratar neste projeto foi claramente identificada sem a necessidade de utilizar ferramentas adicionais. Isto é, os objetivos definidos no *Project Charter* foram:

- Aumento da capacidade do processo de aplicação de composto vedante na linha PM1 para valor acima de 1.33.
- Redução do desperdício.

A característica da qualidade a ter em consideração é a inerente ao cálculo da capacidade do processo, sendo esta o peso de composto vedante em cada esboço produzido na linha PM1.

Concluiu-se assim que o projeto estava a cumprir os *timings* definidos no *Project Charter*, não tendo sido necessário nesta altura atualizar o mesmo, e que o projeto de melhoria tem importância para a empresa tendo assim potencial para avançar para a próxima fase.

4.2. Fase *Measure*

Apresenta-se de seguida a segunda fase da abordagem DMAIC, a fase *Measure* – Medir, ilustrada na figura 4.6. Nesta segunda fase, foi determinante compreender o processo “*As-Is*”. Iniciou-se esta fase pelo mapeamento do processo, de forma a obter-se uma visão mais aprofundada, ao nível das etapas de produção que decorrem na linha PM1, complementando a informação do SIPOC elaborado na fase *Define* da estrutura de melhoria. Depois, com o objetivo de estabelecer a *baseline performance*, validou-se o sistema de medição de modo a ter-se a certeza de que os valores recolhidos eram válidos para o estudo, tendo sido desenvolvidas ações de melhoria para o tornar mais aceitável.

Através da implementação do SPC, progrediu-se para a estabilização do processo e finalmente para a análise dos dados e estabelecimento da *baseline performance*. A fase *Measure* concluiu-se com a finalização do *Project Charter* e com a *tollgate* desta fase.

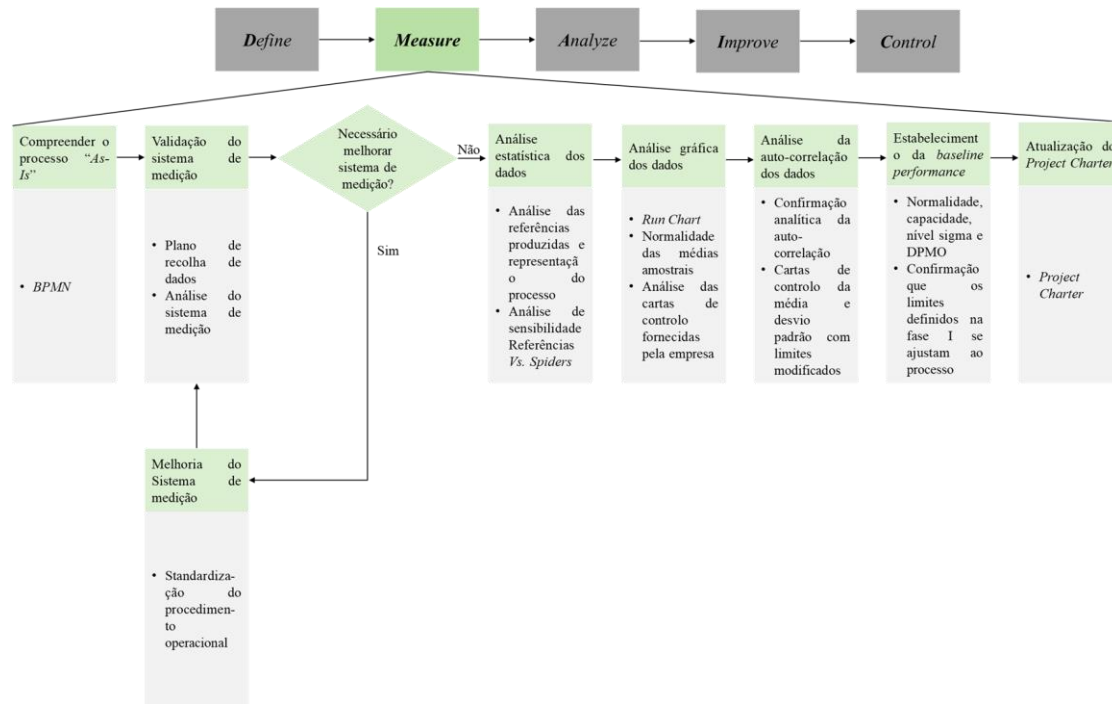


Fig. 4.6 - Fase *Measure*, passos e ferramentas

4.2.1. Compreender o processo “As Is”

BPMN

Na linha PM1, o processo inicia-se pela consulta do plano de produção, pelo mecânico/operador de linha. De seguida, solicita-se o abastecimento da linha com chapas de folha flandres previamente litografadas e identificadas com etiquetas de código de barras. O mecânico/operador de linha verifica as etiquetas e, caso os dados correspondam aos indicados na ordem de fabrico, e o conjunto de folhas estiver em boas condições, colocam-se no alimentador. Valida-se a entrada de cada *bidon* de composto vedante, solicita-se à qualidade a validação do sistema de corte, dos sistemas de visão e do composto vedante, e realizam-se testes até se chegar aos valores pretendidos do peso do composto vedante. Estes testes prendem-se com pesagens e ajustes sucessivos da máquina até ser atingido o peso pretendido em cada esboço.

De seguida, efetua-se a validação do arranque e a folha é transportada por um tapete rolante até à zona de embutição, aqui, a folha é colocada na posição ótima para a embutição pela ação de braços mecânicos munidos de pinças e a folha é embutida na forma do esboço.

Os esboços são transportados para o orleador que tem a função de arredondar as arestas exteriores e encaminhados para a borrachadeira.

CAPÍTULO 4 – CASO DE ESTUDO

Na borrachadeira, as *spiders*, depositam o composto vedante nos esboços que seguem para a estufa para a secagem. Na borrachadeira, o mecânico deve verificar visualmente e periodicamente a aplicação de composto vedante, para que se necessário a possa afinar prevenindo os defeitos de aplicação, o mecânico tem também a responsabilidade adicional de registrar as produções e paragens de linha.

Finda a secagem, os esboços são encaminhados por um tapete rolante, neste percurso encontra-se uma câmara de visão que controla os erros visuais de aplicação de composto vedante. Os esboços com qualidade são finalmente encaminhados para o embalamento onde são colocados pelo operador de linha num contentor metálico.

O BPMN do processo em questão, apresenta-se no Anexo A, tendo sido elaborado no *software* Bizagi Modeler.

4.2.2. Validação do sistema de medição

Plano de recolha de dados

Depois de descrito o processo, foram identificados os equipamentos de medição utilizados na recolha de dados deste processo e selecionados os operadores para a análise do sistema de medição. Concluiu-se que o equipamento de medição utilizado era uma balança e foram selecionados três operadores que trabalham diariamente com este equipamento, estando familiarizados com o mesmo e com o procedimento operacional.

Para a análise do sistema de medição recorreu-se ao estudo R&R. Solicitou-se ao mecânico da máquina que recolhesse 10 esboços ao longo de diferentes alturas do dia, estes foram posteriormente numerados para que pudessem ser facilmente identificados. A recolha de dados foi efetuada com recurso a uma balança digital de precisão.

Análise do Sistema de Medição

De forma a não se tirarem ilações erradas em relação ao processo, realizou-se um estudo com o objetivo de averiguar quais as medidas de localização e dispersão que descreviam o comportamento do sistema de medição e se seriam ou não adequadas.

O equipamento analisado foi uma balança digital de precisão da marca Mettler Toledo, modelo PB 153-S, figura 4.7. Para efetuar a medição dos esboços, na empresa, faz-se uso de um apoio de acrílico com o objetivo de distribuir o peso uniformemente pelo prato da balança. Esta balança é utilizada em todas as medições de composto vedante da linha PM1, sendo por isso a sua análise imprescindível para este estudo. A balança tem uma resolução de 0.001g.

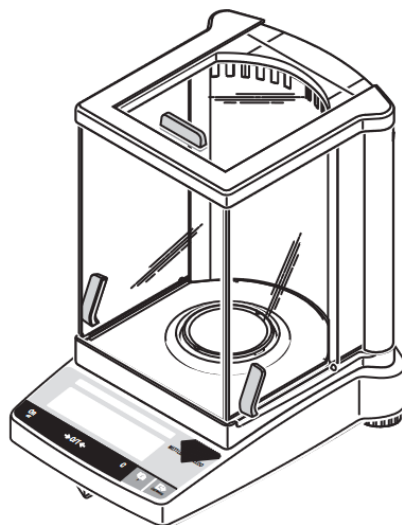


Fig. 4.7 - Esquema da balança Mettler Toledo PB 153-S

Adaptado de: (Toledo, 2003)

Medidas de localização

O instrumento de medição foi calibrado em abril de 2020, o certificado de calibração encontra-se em Anexo B. Pela análise do certificado, pôde concluir-se acerca da linearidade e exatidão. O instrumento possui uma forte linearidade e não são detetados erros aleatórios no fim de escala, onde normalmente existe uma maior dificuldade em obter leituras corretas. Considerou-se também que o instrumento é exato e, portanto, que não existem erros sistemáticos.

Medidas de dispersão

Tendo-se já retirado conclusões acerca das medidas de localização, passou-se ao estudo da repetibilidade e da reprodutibilidade do sistema de medição.

Para proceder a este estudo, os três operadores selecionados, Operador 1, Operador 2 e Operador 3, efetuaram duas vezes a pesagem de dez esboços, aleatoriamente ordenados em cada uma das séries de pesagem. Os operadores desconheciam que peça estavam a medir, e as duas séries de medições não foram sequenciais. Os registos foram feitos por mim, Patrícia, diretamente no *software* Minitab, a folha de registo encontra-se no Anexo C.

Foram construídas as cartas da média e da amplitude, figuras 4.8 e 4.9, respetivamente, com recurso ao *software* Minitab, onde está indicada a linha central e os limites superior (UCL) e inferior (LCL) de controlo para cada carta.

CAPÍTULO 4 – CASO DE ESTUDO

Como se pode observar, pela Carta de Controlo de Médias apresentada na figura 4.8, a grande maioria dos pontos, 24 num total de 30 (80%), saem fora dos limites de controlo, valor superior aos 70% recomendados. Inferimos que o desvio padrão é muito reduzido e que a balança tem a resolução correta para efetuar as medições efetuadas.

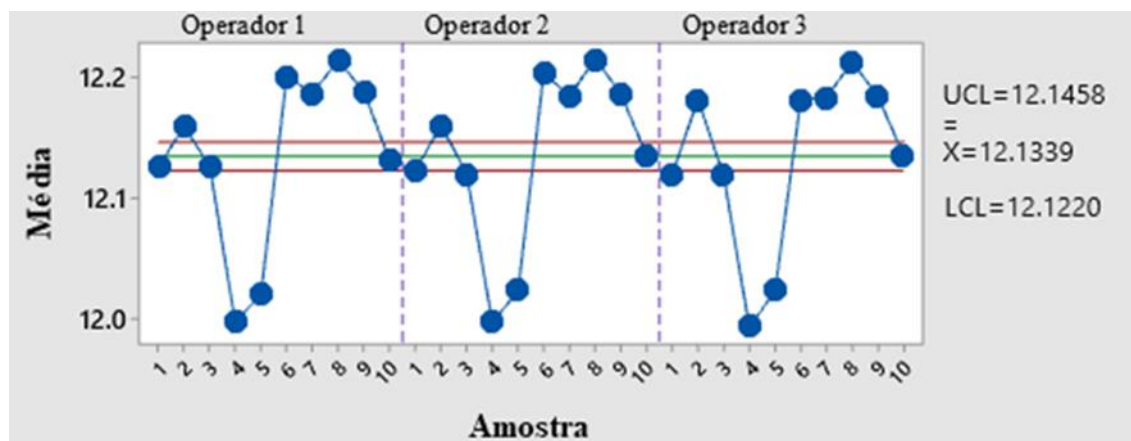


Fig. 4.8 - Carta de controlo da média, estudo R&R

Pela análise da Carta de Controlo da Amplitude, figura 4.9, e pela observação do processo de medição, concluiu-se que o Operador 3, colocou erradamente o tampo em duas das dez medições, que constituem causas especiais de variação, à exceção destas, todas as outras apresentam uma amplitude normal. Considerou-se assim o processo sob controlo estatístico e concluiu-se que o instrumento de medição era consistente.

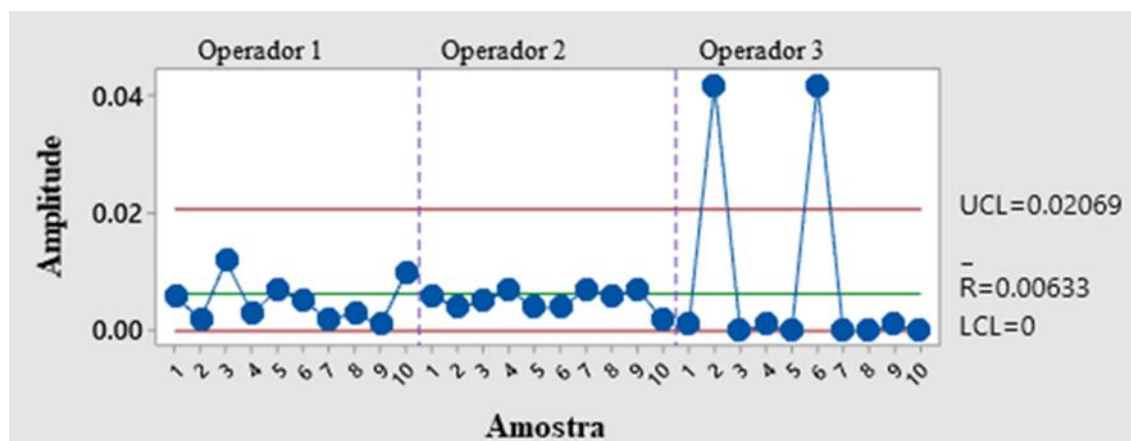


Fig. 4.9 - Carta de controlo da amplitude, estudo R&R

Na tabela 4.1, apresenta-se a tabela resumo do estudo R&R, retirada do *software* Minitab. Verificou-se que o contributo relativo da reprodutibilidade e da repetibilidade é de 8,15%. O sistema considerou-se aceitável pois este contributo é inferior ao valor limite de 10%.

Tabela 4.1 – Quadro Resumo - Análise da Variação do Sistema de Medição

| Fonte de Variação | Desvio Padrão | Variação (6σ) | Variação (%) |
|---------------------|---------------|------------------------|--------------|
| Repetibilidade | 0.0056 | 0.3368 | 8.15 |
| Reprodutibilidade | 0 | 0 | 0 |
| Total do estudo R&R | 0.0056 | 0.3368 | 8.15 |
| Parte a Parte | 0.0687 | 0.4121 | 99.67 |
| Total | 0.0689 | 0.4134 | 100 |

4.2.3. Melhoria do Sistema de Medição

Aquando das medições, verificou-se que uma das operadoras procedia à colocação do tampo horizontalmente ao contrário das outras duas, que colocavam o tampo na vertical. Além disto, a balança possui três portas, uma na parte superior e duas nas laterais, uma destas permanecia aberta durante o processo de pesagem. Não estava previsto no procedimento operacional a posição pretendida na pesagem dos tampos, nem que as portas estivessem fechadas. Devido a ser uma balança de precisão, o fator do fecho das portas é muito importante para as medições. Adicionalmente, foi nestas condições que a balança foi validada, não sendo correta a sua utilização de portas abertas. Posto isto, foi sugerido ao departamento da qualidade da Crown a atualização deste procedimento, melhoria esta que foi prontamente aceite pelo responsável e de imediato colocada em prática. O procedimento experimental diz agora claramente que o tampo deve ser colocado na horizontal e as portas fechadas para a pesagem.

Com estas correções, foi novamente efetuado o estudo R&R, e, desta vez obteve-se um contributo de apenas 2.09% da repetibilidade e reprodutibilidade na variância do sistema de medição. A folha de registo, as Cartas de Controlo da média e amplitude, bem como o quadro resumo da variação do sistema de medição correspondente a este estudo encontram-se no Anexo D.

Por fim, concluiu-se que o sistema de medição é aceitável e capaz.

4.2.4. Análise estatística dos dados representativos do processo

Análise das referências produzidas e representação do processo

Para iniciar a análise do processo de produção de esboços, foi importante tirar conclusões em relação ao que é produzido e como é produzido. Isto é, existe informação de que são produzidas nesta linha quatro referências de esboços, por quatro *spiders* distintas, sendo determinante verificar a possibilidade de se poder tratar os dados, como um todo ou se é necessário realizar algumas exclusões ou mesmo considerar apenas só uma parte.

CAPÍTULO 4 – CASO DE ESTUDO

Com o objetivo de verificar se as quatro referências que são produzidas na linha PM1 apresentavam diferenças significativas na quantidade de composto vedante depositada, realizou-se uma comparação entre os dados da aplicação de composto vedante, considerando as quatro *spiders* existentes com as diferentes referências através de uma *One-Way-Anova*, com 5% de significância. As referências em questão são:

- ES 1/4 CLUB FF 0,20
- ES 1/4 CLUB FF 0,19 (L.P.)
- ES 1/4 CLUB FF 0,18
- ES 1/4 CLUB FF 0,19

Na tabela 4.2 apresenta-se a *One-Way-Anova* obtida, com um p-value=0, inferior ao nível de significância (0.05). Conclui-se que as referências são significativamente diferentes.

Tabela 4.2 - One-Way-Anova, referências

| Fonte de Variação | Graus de Liberdade | SS Ajustado | MS Ajustado | P-Value |
|-------------------|--------------------|-------------|-------------|---------|
| Referência | 3 | 10093 | 3364.36 | 0.000 |
| Erro | 1005 | 32314 | 32.15 | |
| Total | 1008 | 42407 | | |

O gráfico da figura 4.10, indica que a referência ES 1/4 CLUB FF 0,19 (L.P.) era significativamente diferente das demais e, por isso não seria considerada nas análises que se seguiram neste estudo.

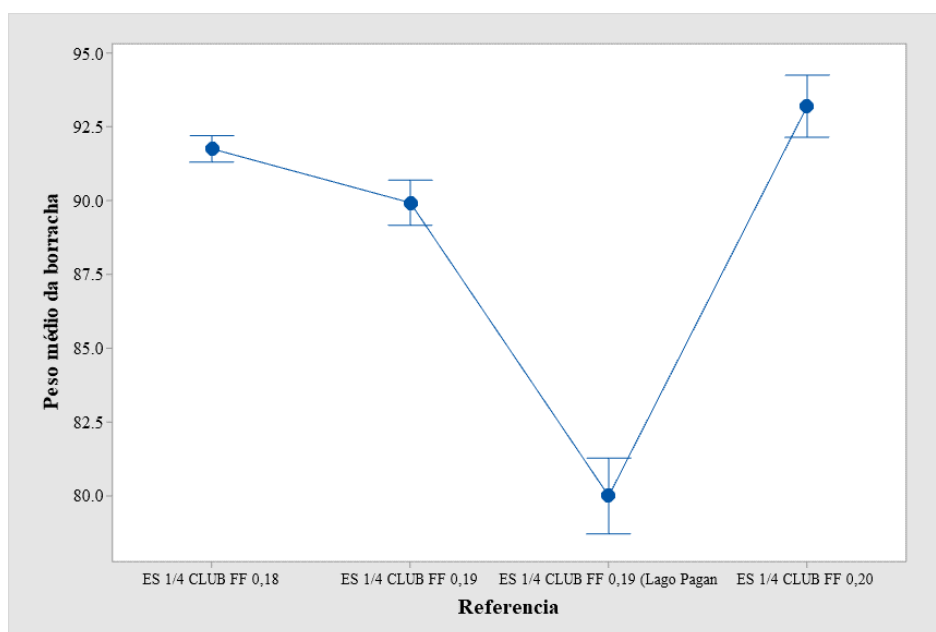


Fig. 4.10 - Gráfico de intervalos do Peso médio de composto vedante vs Referência

CAPÍTULO 4 – CASO DE ESTUDO

Análise de sensibilidade – Referências Vs. *Spiders*

Procedeu-se à análise de sensibilidade, ao estudo do efeito das fontes de variação - Referências e *Spiders* - no processo, recorrendo à *Two-Way-Anova* com uma confiança de 95%.

Com as 2802 medições disponíveis, obteve-se um $p\text{-value}=0$ nas *spiders* e nas referências, o que indicava que eram significativamente diferentes. A tabela Anova apresenta-se na tabela 4.3.

Tabela 4.3 - *Two-Way-Anova*, Referências e *Spiders*

| Fonte de Variação | Graus de Liberdade | SS Ajustado | MS Ajustado | P-Value |
|-------------------|--------------------|-------------|-------------|---------|
| <i>Spider</i> | 3 | 7412 | 2470.72 | 0.000 |
| Referência | 2 | 2650 | 1325.25 | 0.000 |
| Erro | 2796 | 103808 | 37.13 | |
| Total | 113877 | 113877 | | |

Questionando estes valores e pelo facto de o número de graus de liberdade ser muito elevado, procedeu-se ao cálculo das médias e desvios padrão das medições de cada uma das *spiders*. Apresentam-se na tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Médias e desvios padrão, dados *spiders*

| | Média | Desvio Padrão |
|-----------------|-------|---------------|
| <i>Spider 1</i> | 90.66 | 7.00 |
| <i>Spider 2</i> | 90.66 | 6.99 |
| <i>Spider 3</i> | 90.66 | 6.99 |
| <i>Spider 4</i> | 90.68 | 6.99 |

Como se verifica, os valores das médias e desvios padrão são muito semelhantes, o que alertou para um possível problema de *big data*. De forma a concluir se este problema existe de facto, seleccionaram-se aleatoriamente quatro amostras de 20 medições, e voltou-se a estudar os efeitos das referências e *spiders* face ao valor médio do peso do composto vedante com recurso à *Two-Way-Anova*. As tabelas Anova encontram-se em Anexo E. Na tabela 4.5 pode-se observar os valores de $p\text{-value}$ obtidos, todos superiores ao nível de significância de 5%.

Tabela 4.5 - p-values obtidos através de *Two-Way-Anova* para amostras aleatórias

| | <i>p-value</i> | |
|---------------------|----------------|------------|
| | <i>Spider</i> | Referência |
| Amostra aleatória 1 | 0.470 | 0.313 |
| Amostra aleatória 2 | 0.348 | 0.526 |
| Amostra aleatória 3 | 0.516 | 0.577 |
| Amostra aleatória 4 | 0.491 | 0.295 |

Estes valores indicam que não existem diferenças significativas, comprovando-se a existência de um problema de *big data*.

Assim concluiu-se que nas para a análise do processo se irá ter em conta todas as referências, exceto a ES 1/4 CLUB FF 0,19 (L.P.) e todas as *spiders* 1, 2, 3 e 4.

4.2.5. Análise gráfica dos dados

Run Chart

Para se obter uma primeira análise gráfica ao processo de cada uma das *spiders*, recorreu-se à utilização de um *Run Chart*, que deteta causas especiais de variação através de comportamentos não aleatórios, recorrendo ao *software* Minitab. A linha central, a tracejado, representa a mediana de todas as médias dos subgrupos, os pontos cinzentos representam os valores de cada medição e os pontos azuis a média de cada uma das amostras, representado na figura 4.11.

Para a deteção de causas especiais de variação, o *software* efetua dois testes, o teste do número de ensaios sobre a mediana e o teste do número de ensaios ascendentes ou descendentes.

O primeiro teste, o teste do número de ensaios sobre a mediana, identificou a presença de clusters e de misturas. Os clusters são aglomerados que podem evidenciar problemas de medição, variabilidade lote a lote ou de *set-up*, bem como de amostragem através da produção de um grupo de peças não conformes. Quanto às misturas (combinação probabilística de duas ou mais distribuições de probabilidade), são caracterizadas pelo cruzamento frequente da linha central e alertam para situações onde o processo opera a níveis diferentes, misturando populações distintas.

O segundo teste, o teste do número de ensaios ascendentes ou descendentes, procurou detetar a presença de oscilações e de tendências. As oscilações ocorrem quando o processo flutua para cima e para baixo, indicando que o processo não é estável. Uma tendência é uma variação prolongada (*drift*) nos dados, quer seja no sentido ascendente ou descendente. Podem indicar se o processo está ou tem a probabilidade de ficar brevemente fora de controlo, o que pode ser devido

CAPÍTULO 4 – CASO DE ESTUDO

a ferramentas com um elevado desgaste, uma máquina que não mantém um ajuste ou à rotação periódica dos operadores.

Em ambos os testes, a hipótese nula considerada é que os dados possuem uma sequência aleatória. O *software* converteu o número observado de ensaios numa estatística de teste que é aproximadamente normal e assim, usou a distribuição normal para obter p-values com uma confiança de 95%.

De seguida, na figura 4.11, apresenta-se o *Run Chart* da *spider 3*, aquele que evidenciou mais problemas, os demais estão disponíveis no Anexo F.

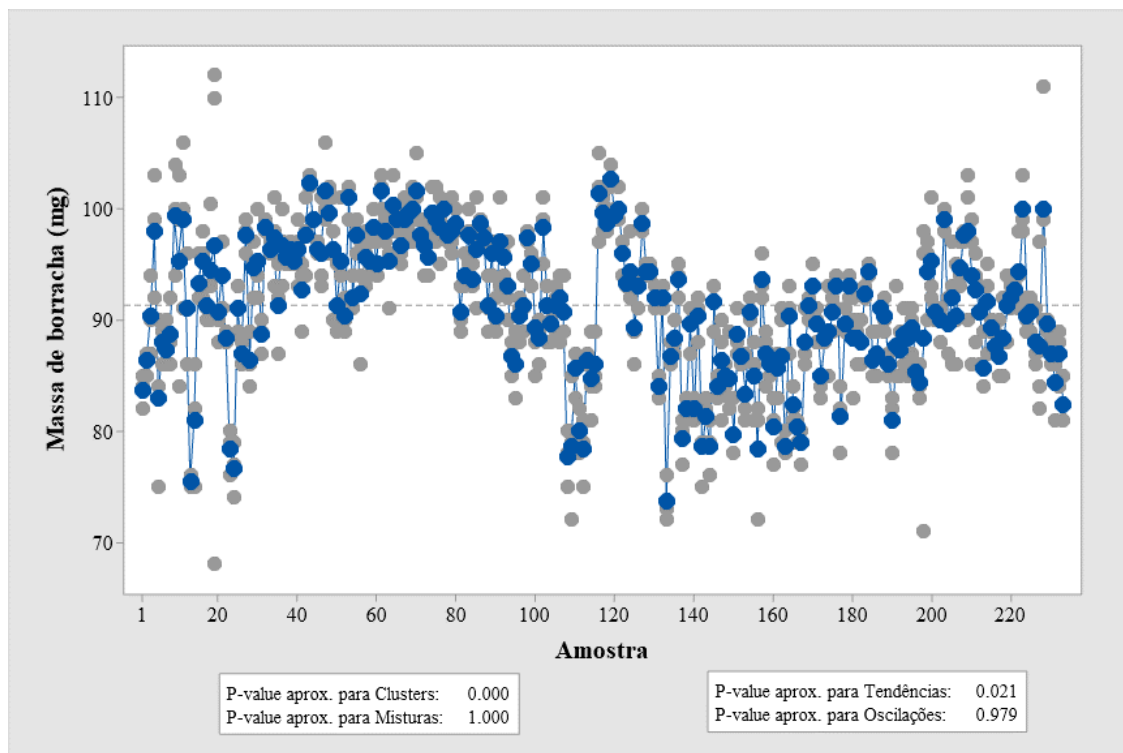


Fig. 4.11 - Run Chart, spider 3

Analisando o valor de p-value para a existência *clusters*, observou-se que é inferior a 5%, o que comprova a existência dos mesmos. Como acima mencionado, este facto sugeriu a existência de problemas de medição, que podemos prontamente apontar ao facto de aquando da recolha destas medições não serem fechadas todas as portas da balança e da posição em que o tempo era medido não ser consensual. A variabilidade lote a lote ou de *set-up* é um acontecimento que pode explicar a existência destes *clusters*, o que alertou para a influência das mudanças de mecânico na linha. Os mecânicos de linha são os operadores que ajustam os parâmetros da máquina, e por isso têm influência direta na produção. Finalmente, os *clusters* podem advir da produção de um grupo de peças não conformes, não detetado e que não foi retirado da amostra, manipulando a mesma.

CAPÍTULO 4 – CASO DE ESTUDO

Quanto ao valor de p-value para tendências, verificou-se que é inferior a 5%, indica que existem tendências, que existe probabilidade de o processo estar ou ficar, num futuro próximo, fora de controlo, devendo ser alvo de uma mais cuidada observação e acompanhamento por forma a evitar e corrigir este problema.

Os valores de p-value para *clusters*, misturas, tendências e oscilação apresentam-se na tabela 4.6, para as *spiders* 1, 2 e 4. A vermelho destacam-se aqueles que apresentaram valores inferiores ao nível de significância de 5%.

Tabela 4.6 - Análise Run Charts, spiders 1, 2 e 4

| | <i>Spider 1</i> | <i>Spider 2</i> | <i>Spider 4</i> |
|---------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| P-value aprox. para Clusters: | 0.016 | 0.001 | 0.000 |
| P-value aprox. para Misturas: | 0.984 | 0.999 | 1.000 |
| P-value aprox. para Tendências: | 0.175 | 0.175 | 0.811 |
| P-value aprox. para Oscilação: | 0.825 | 0.811 | 0.189 |

Posto isto, concluiu-se que no processo de aplicação de composto vedante, em todas as *spiders* existem *clusters* que podem levar a conclusões erradas ou imprecisas aquando da implementação do SPC.

Assim, representaram-se os dados de cada uma das *spiders*, num gráfico de pontos, tendo sido escolhida uma parte de cada amostra que aparentemente não apresentava *clusters*, e no caso da *spider 2* também tendências, de forma às conclusões finais não serem influenciadas pelos mesmos.

Os dados fornecidos foram recolhidos entre os dias 4 de janeiro de 2021 e 12 de março do mesmo ano, tendo sido disponibilizados pela empresa, um total de 233 amostras de dimensão três para cada uma das *spiders*. Para as *spiders* 1 e 2 foram retirados da amostra um total de 99 dados, tendo sido analisados 134 amostras de dimensão três. Para a *spider 3*, foram retirados 142 dados, tendo-se analisado 91 e por fim, para a *spider 4* foram retirados 113 dados, tendo contribuído para a análise um total de 120 amostras de dimensão 3.

Normalidade das médias amostrais

Analisados os dados de uma forma global, foi importante, antes de proceder à construção das cartas de controlo estudar a sua normalidade. Pelo teorema do limite central não se tem a garantia, para uma dimensão da amostra (n) inferior ou igual a 5, onde o caso estudado possui $n=3$, de que

CAPÍTULO 4 – CASO DE ESTUDO

os dados são normais. Verificou-se então, a normalidade das médias amostrais, recorrendo à representação gráfica dos dados utilizando o *Normal Probability Plot* no *software* Minitab.

Este gráfico tenta ajustar uma reta (Reta de Henry) aos dados, se os dados tomarem uma aparência aproximadamente retilínea conclui-se que a distribuição não se afasta da normal, adicionalmente, pelo valor de p-value fornecido podemos confirmar esta conclusão não só de um ponto de vista visual. Para o estudo foi adotado um nível de confiança de 95%.

Para este teste de hipóteses, a hipótese nula considerada foi que os dados seguissem uma distribuição normal e a resposta alternativa, que os dados não seguissem uma distribuição normal.

De seguida, apresentam-se os gráficos supramencionados para cada uma das *spiders*, figuras 4.12, 4.13, 4.14 e 4.15.

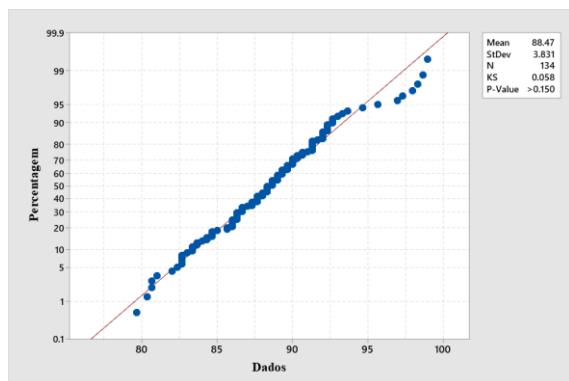


Fig. 4.12 - Normal probability plot Spider 1

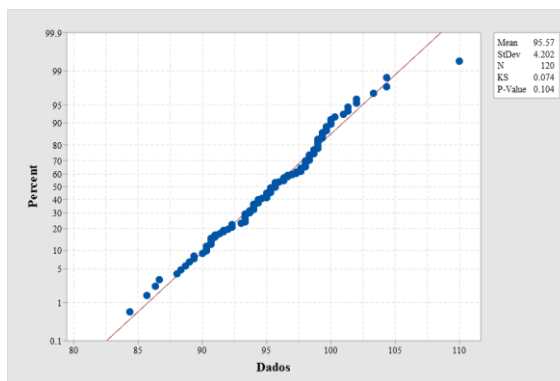


Fig. 4.13 - Normal probability plot Spider 4

Analisando o gráfico de normalidade quer da *spider* 1 quer da *spider* 4, figuras 4.12 e 4.13, verificou-se que os dados se ajustam à linha retilínea traçada pelo software e que, o valor de p-value era superior ao nível de significância de 5%.

Já para os gráficos de normalidade das *spiders* 2 e 3, figuras 4.14 e 4.15, a normalidade não se verifica, os dados não se ajustam à linha retilínea traçada e o valor de p-value é inferior a 0.05.

Para as *spiders* 2 e 3, recorreu-se à transformação Box-Cox devido aos dados não serem normais, esta transformação determina um parâmetro, lambda e calcula um intervalo de confiança para o mesmo. Se este intervalo de confiança incluir o valor 1 (um), conclui-se que a transformação não é necessária.

CAPÍTULO 4 – CASO DE ESTUDO

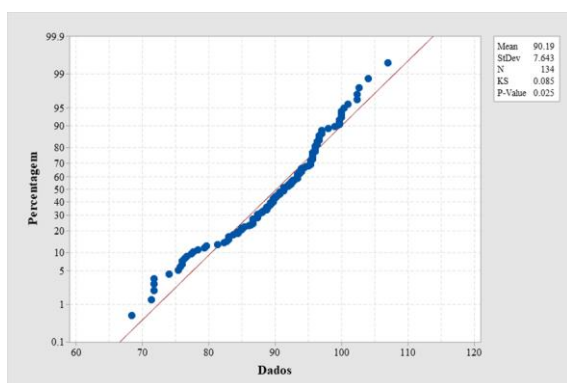


Fig. 4.14 - Normal probability plot Spider 2

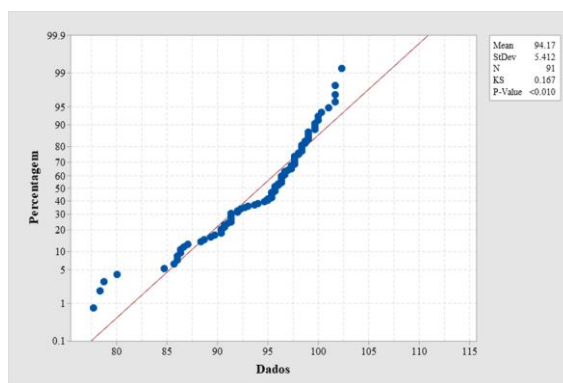


Fig. 4.15 - Normal probability plot Spider 3

No caso dos dados em estudo, como se observa nas figuras 4.16 e 4.17 com a utilização deste método, não se obteve valores para o limite de controlo superior, pois como se pode verificar no gráfico da variação residual em função de lambda não intersesta o limite para a confiança de 95%. No entanto pela localização do limite inferior, concluiu-se que o intervalo incluía o valor 1, e que a transformação não era necessária.

Como se observa nas figuras 4.16 e 4.17, os valores obtidos do parâmetro lambda para a *spider 2* $\lambda=2.94$ e para a *spider 3* $\lambda=3.88$.

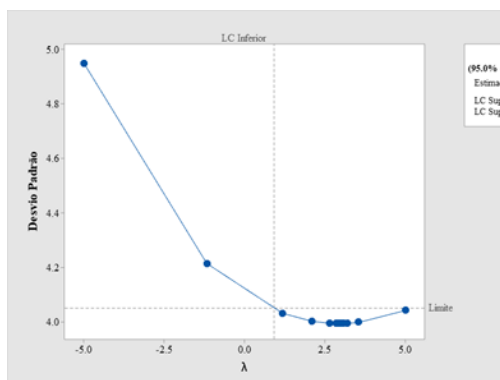


Fig. 4.16 – Box-Cox Spider 2

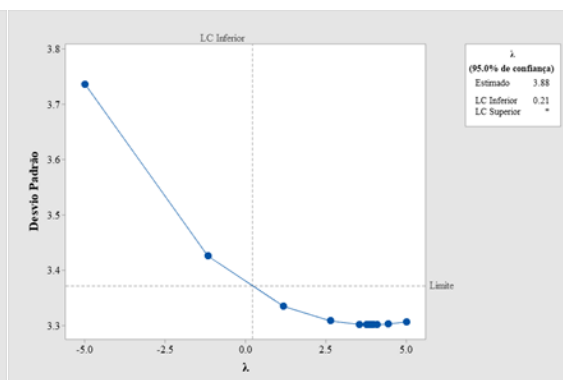


Fig. 4.17 – Box-Cox Spider 3

Recorreu-se ao *software* Statistica para confirmar se os dados eram de facto normais, utilizando o teste de Kolmogorov-Smirnov, como se pode observar para cada uma das spiders, nas figuras 4.18, 4.19, 4.20 e 4.21, respetivamente. Os valores obtidos por este teste foram 0.06 para a *spider 1*, 0.09 para a *spider 2*, 0.16 para a *spider 3* e 0.07 para a *spider 4*. concluindo-se que para a significância considerada, 5%, os dados verificavam o pressuposto da normalidade.

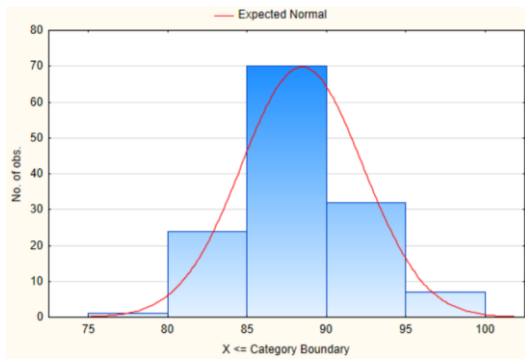


Fig. 4.18 - Histograma Spider 1

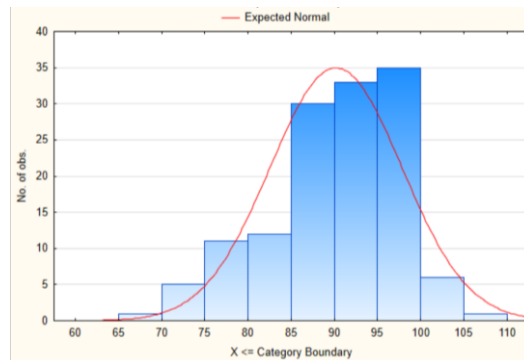


Fig. 4.19 - Histograma Spider 2

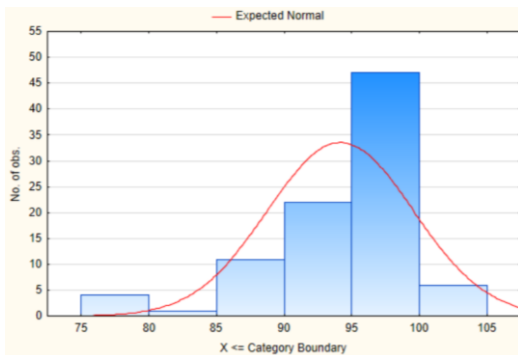


Fig. 4.20 - Histograma Spider 3

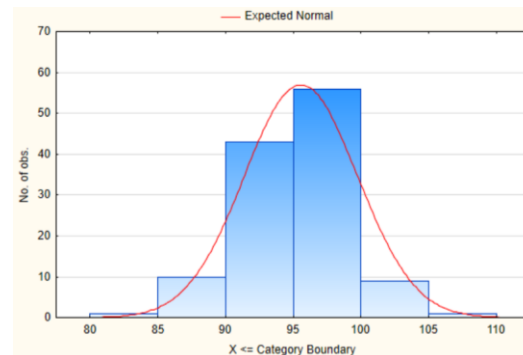


Fig. 4.21 - Histograma Spider 4

Análise das Cartas de Controlo fornecidas pela empresa

A empresa forneceu as cartas de controlo do processo, extraídas do *software* Lighthouse, do processo de aplicação de composto vedante pelas *spiders*. Como exemplo, apresenta-se na figura 4.22 a carta de controlo da *spider 2*. Numa primeira análise, verificou-se que os limites superiores e inferiores utilizados nessas cartas correspondiam aos limites da especificação, ao invés dos limites de controlo, calculados com base nos parâmetros do processo, tendo-se alertado a empresa para esta oportunidade de melhoria. Além disso, todas as cartas de controlo, apresentavam padrões que sugeriam a existência de dados autocorrelacionados, figura 4.22, uma medição acima da média tendia a ser seguida por outros valores acima da média (Situação A) e a mesma situação verificou-se com valores abaixo da média que tendiam a ser seguidos por valores abaixo da média (Situação B).

Para confirmar esta situação recorreu-se a um teste de hipóteses que confirmou a existência de autocorrelação positiva, isto é, que os dados não atendiam ao pressuposto da independência.

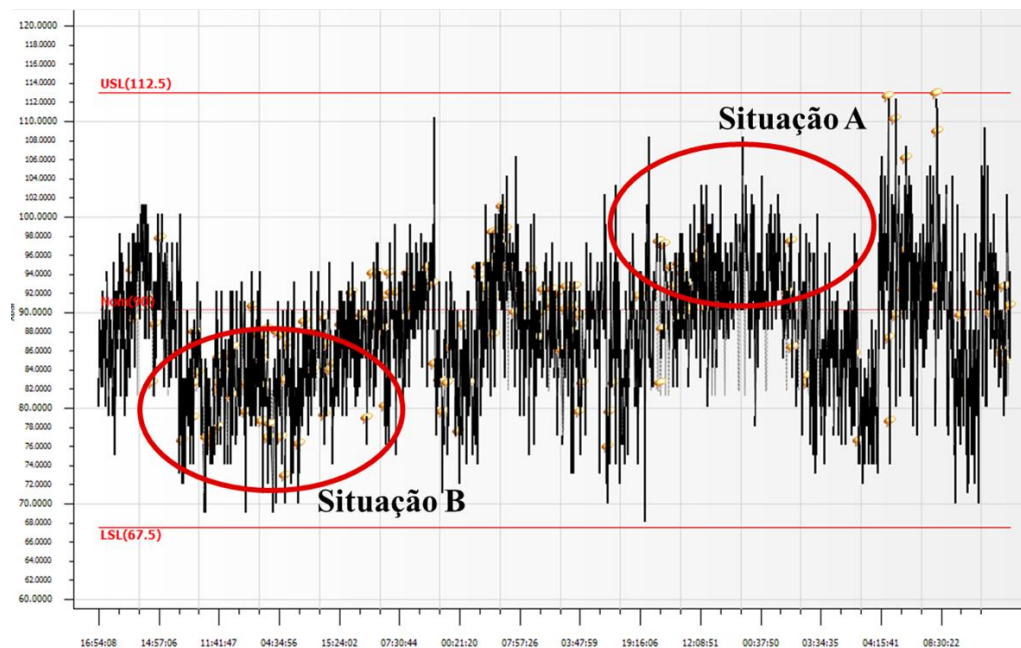


Fig. 4.22 - Carta de Controle do peso de composto vedante - spider 2 - suspeita de autocorrelação de dados

A presença deste tipo de dados é facilmente explicável numa linha como a PM1 e com um controle de qualidade dinâmico como o que existe na Crown. Quando o operador da qualidade deteta que alguma das *spiders* não está a aplicar o peso de composto vedante desejado, comunica de imediato esta situação ao mecânico da linha, e este, com base na sua experiência e conhecimento da máquina, ajusta os parâmetros de pressão, temperatura e cliques até o controle de qualidade confirmar que a quantidade de composto vedante aplicada nos esboços é adequada. Isto acontece diversas vezes no dia a dia da empresa, depois de um ajuste os valores subsequentes ao mesmo apresentarão uma dependência dos anteriores, é exatamente isto que são dados autocorrelacionados.

A verificação da presença deste tipo de dados é apresentada de seguida.

4.2.6. Análise da autocorrelação dos dados

Confirmação analítica da autocorrelação

Com os dados escolhidos, tendo-se por base os *Run Charts* anteriormente analisados, começou-se por calcular os valores das médias (\bar{X}) e desvios padrão (S) de cada amostra. Os dados em bruto bem como os valores de \bar{X} e S estão disponíveis no Anexo G para cada *spider*. Estes valores foram calculados com base na estimativa dos parâmetros do processo e do coeficiente de correlação médio estimado ($\hat{\rho}$).

Para o cálculo do coeficiente de correlação médio são necessários os seguintes valores: o número de amostras (m), de dimensão (n). Com estes dados é construída uma matriz de correlação (R)

CAPÍTULO 4 – CASO DE ESTUDO

para cada uma das *spiders*. Os valores de n , m e $\hat{\rho}$ apresentam-se na tabela 4.7 e as matrizes de correlação no Anexo H.

Tabela 4.7 - Parâmetros n , m e $\hat{\rho}$ para as quatro *spiders*

| | n | m | $\hat{\rho}$ |
|-----------------|-----|-----|--------------|
| <i>Spider 1</i> | 3 | 134 | 0.534882 |
| <i>Spider 2</i> | 3 | 134 | 0.523864 |
| <i>Spider 3</i> | 3 | 91 | 0.785761 |
| <i>Spider 4</i> | 3 | 120 | 0.622338 |

Assim, realizou-se o Teste de Hipóteses de forma a verificar a existência de autocorrelação positiva, onde I representa a matriz identidade:

$$H_0: R=I$$

$$H_1: R \neq I$$

Através da estatística de teste descrita na equação 21, e para uma significância (α) de 5%, rejeita-se a hipótese nula para $X_C^2 > X_{\alpha;v}^2$. Isto é, caso H_0 seja rejeitada, afirma-se que as amostras estão auto-correlacionadas. Os valores obtidos apresentam-se na tabela 4.8. O valor de $X_{\alpha;v}^2$, depende apenas do nível de significância e da dimensão das amostras, no caso em estudo os valores são iguais para as quatro *spiders*, e evidentemente o valor de $X_{\alpha;v}^2$ também será, tendo-se obtido o valor de 7.815.

Tabela 4.8 - Valores críticos e resultados do Teste de Hipóteses para as quatro *spiders*

| | X_C^2 | Resultado do Teste de Hipóteses |
|-----------------|----------|---------------------------------|
| <i>Spider 1</i> | 225.767 | Rejeita-se a hipótese nula |
| <i>Spider 2</i> | 247.056 | Rejeita-se a hipótese nula |
| <i>Spider 3</i> | 327.5291 | Rejeita-se a hipótese nula |
| <i>Spider 4</i> | 273.6919 | Rejeita-se a hipótese nula |

Como se rejeitou a hipótese nula em todos os casos, concluiu-se que os dados são de facto auto-correlacionados, não sendo correto proceder à sua análise utilizando métodos convencionais.

Depois de confirmar a presença de autocorrelação, utilizaram-se Cartas de Sewhart da média e do desvio padrão com limites modificados devido aos dados serem constituídos por médias

CAPÍTULO 4 – CASO DE ESTUDO

amostrais e utilizando os outros métodos de análise deste tipo de dados não é evidente o modo de trabalhar a dispersão.

Além disso, as cartas de controlo com limites modificados têm a vantagem de não ser necessário estabelecer um modelo matemático que se ajuste aos dados para os poder analisar, sendo por isso de bastante mais simples aplicação. Esta foi uma vantagem determinante para se decidir pela aplicação das cartas com limites modificados. A escolha de uma metodologia que por ser de baixa complexidade, a empresa possa continuar a implementar para efetuar o controlo estatístico do processo considerando a autocorrelação dos dados.

Para realizar a análise de cada uma das *spiders*, como concluído anteriormente com recurso aos *Run Charts*, não foram utilizados todos os dados disponíveis devido aos processos apresentarem grandes oscilações no intervalo de tempo em que os dados foram retirados. Posto isto, foram utilizados os dados anteriormente selecionados, para as *spider 1* e *2* foram utilizadas 134 amostras, para a *spider 3*, 91 amostras, e para a *spider 4*, 120 amostras de dimensão três.

Cartas de Controlo da média e do desvio padrão com limites modificados

Para a construção das cartas de controlo com limites modificados, calculou-se a média global do processo que corresponde ao limite central (LC) da carta de controlo da média e o desvio padrão médio que, por sua vez, é o limite central da carta do desvio padrão.

Depois, calcularam-se os limites modificados para a Carta das Médias. Quanto aos limites da Carta dos Desvios Padrão, devido à dispersão dos valores ser muito grande, não se consideraram os limites modificados, mas sim os limites tradicionais da carta S de Shewhart. Isto conduziu a um pequeno erro, como explicado anteriormente no capítulo 3, tanto menor quanto maior a dimensão da amostra, considerado neste caso, não significativo. Foi utilizada a constante B4 e B3 para $n=3$, $B4=2.568$ e $B3=0$.

A norma ISO 8258:1991, apresenta oito regras que permitem detetar padrões sistemáticos, as causas especiais de variação. Aplicando a primeira regra, foram eliminados os pontos fora de controlo, iterativamente, até não existirem pontos fora dos limites tanto nas cartas da média como nas cartas do desvio padrão. Foram rejeitados 38% dos pontos na *spider 1*, na *spider 2*, 43%, na *spider 3*, 59% e na *spider 4*, 53%.

Depois, as cartas foram divididas em seis zonas designadas por A, B, C, C, B, A de largura equivalente a 1σ , em que a zona C é simétrica em relação ao limite central. As cartas foram cuidadosamente analisadas em busca dos padrões das últimas sete regras. Nas figuras 4.23, 4.24, 4.25, 4.26, 4.27, 4.28, 4.29, 4.30, apresentam-se as cartas de controlo da média e do desvio padrão de

CAPÍTULO 4 – CASO DE ESTUDO

cada uma das *spiders* onde estão identificados os limites de controle, a linha central, as seis zonas para aplicação das regras e as regras violadas.

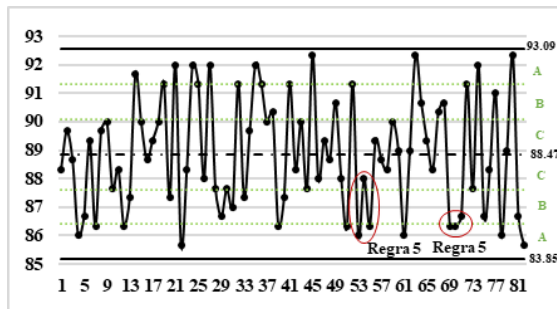


Fig. 4.23 - Carta \bar{X} , spider 1

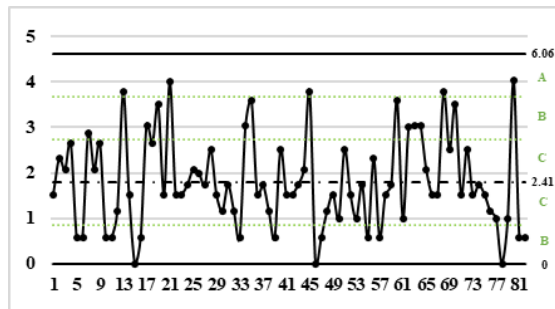


Fig. 4.24 - Carta S, spider 1

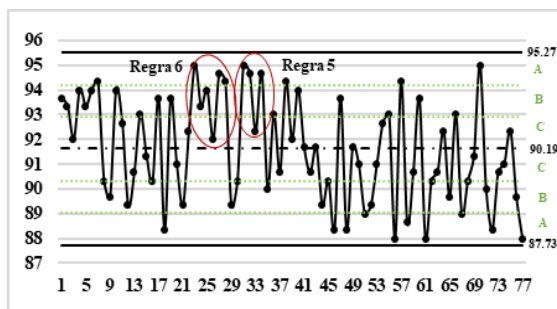


Fig. 4.25 - Carta \bar{X} , spider 2

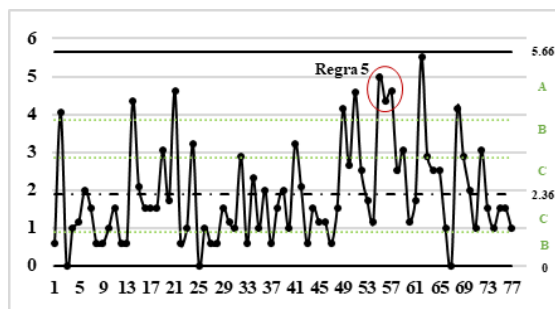


Fig. 4.26 - Carta S, spider 2

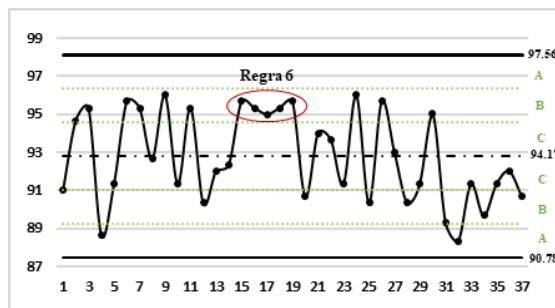


Fig. 4.27 - Carta \bar{X} , spider 3

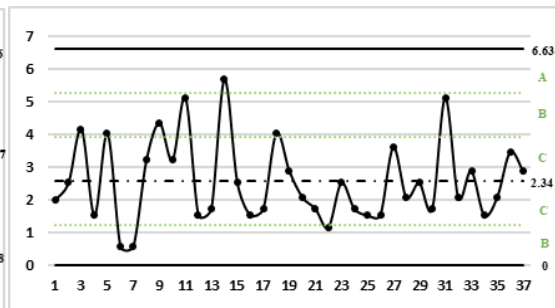


Fig. 4.28 - Carta S, spider 3

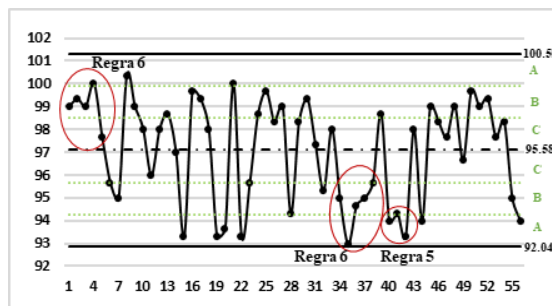


Fig. 4.29 - Carta \bar{X} , spider 4

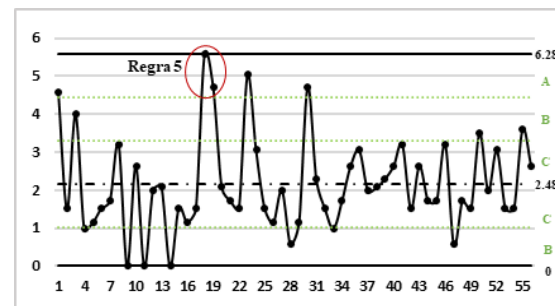


Fig. 4.30 - Carta S, spider 4

Com a análise das cartas de controle, concluiu-se que as regras violadas foram a regra 5: “Dois de três pontos consecutivos na zona A, ou além desta zona, do mesmo lado da linha central.”. E

CAPÍTULO 4 – CASO DE ESTUDO

a regra 6: “Quatro de cinco pontos consecutivos na zona B ou A, ou além destas zonas, do mesmo lado da linha central.”.

É importante tecer algumas considerações sobre os padrões identificados por estas regras, em relação à regra 5, que alerta para uma série de dados com um grande desvio em relação à média, podemos alegar que esta situação pode ter acontecido devido a grandes mudanças na *spider* ou nos seus parâmetros, a um *setup* feito erradamente, a uma falha momentânea do equipamento ou mesmo a uma falha da energia, sendo este último o cenário menos provável.

Em relação à presença da regra 6, esta ao contrário da regra 5, chama a atenção para um pequeno desvio em relação à média, tendo como causas possíveis a mudança de referência no processo produtivo. Este é um quadro pouco provável pois nas análises desenvolvidas anteriormente concluiu-se que não existem diferenças significativas entre as referências em estudo. Outra causa que explica este padrão é uma alteração nos parâmetros da máquina, mudança de turno, mudança no programa de manutenção ou uma manutenção/*setup* realizado deficientemente.

Pode ainda afirmar-se que os padrões tanto da regra 5 como da regra 6, podem ter origem num erro de medição por parte dos operadores da qualidade ou na má utilização do sistema de medição.

Constatou-se assim, considerando apenas a primeira regra de eliminação de causas especiais, que o processo estava sob controlo estatístico, podendo-se avançar para o estabelecimento da *baseline performance*.

4.2.7. Estabelecimento da *baseline performance*

Normalidade, capacidade, nível sigma e defeitos por milhão de oportunidades

Passou-se à definição da *baseline performance*, chegando-se ao objetivo principal da fase *Measure* do ciclo de melhoria e concluindo a fase I do SPC. Para isso, foi necessário analisar a normalidade dos dados em bruto, de forma a se poder usar as métricas de capacidade e de desempenho do processo adequadas.

Com o teste de normalidade, recorrendo-se uma vez mais ao *software* Minitab e com recurso ao *Normal Probability Plot*, concluiu-se para as quatro *spiders*, com uma confiança de 95% que os dados não são normais, assim, foram calculados os índices de capacidade potencial, C_p e de capacidade do processo, C_{pk} com as equações 18 e 19, para cada uma das *spiders*, o último traduzido no nível sigma correspondente e no número de defeitos por milhão de oportunidades (DPMO).

Os valores dos limites superiores e inferiores da especificação foram fornecidos pela empresa, são eles LIE=67.5mg e LSE=112.5mg.

CAPÍTULO 4 – CASO DE ESTUDO

Para o cálculo do nível sigma, apesar dos dados não seguirem uma distribuição normal, decidiu-se multiplicar o valor do C_{pk} por 3, obtendo-se o que se mostra na tabela 4.9, e recorrendo à tabela do Anexo I, obtiveram-se os valores aproximados de DPMO.

Tabela 4.9 - Capacidade, Nível Sigma e DPMO

| | \widehat{C}_p | $(\widehat{C}_{pk})_I$ | $(\widehat{C}_{pk})_S$ | \widehat{C}_{pk} | Nível sigma | DPMO |
|-----------------|-----------------|------------------------|------------------------|--------------------|-------------|---------|
| <i>Spider 1</i> | 1.04 | 0.99 | 1.10 | 0.99 | 2.97 | 70 840 |
| <i>Spider 2</i> | 0.92 | 0.98 | 0.85 | 0.85 | 2.55 | 146 859 |
| <i>Spider 3</i> | 0.68 | 0.76 | 0.59 | 0.60 | 1.8 | 382 089 |
| <i>Spider 4</i> | 0.79 | 1.04 | 0.54 | 0.54 | 1.62 | 452 256 |

Com esta análise, tornou-se claro que os processos de aplicação de composto vedante das quatro *spiders* não são capazes para os limites de especificação definidos, os valores de \widehat{C}_{pk} são inferiores a 1.33.

Comparando os valores de $(\widehat{C}_{pk})_I$ e $(\widehat{C}_{pk})_S$, pôde-se afirmar que os processos se encontravam descentrados, manifestando-se especial preocupação com a *spider 4*, a *spider* cujos valores têm maior amplitude. Quanto ao índice de dispersão do processo, \widehat{C}_p , verificou-se que para todas as *spiders* é inferior a 1.33, o que significa que os processos têm uma dispersão demasiado grande.

Estas conclusões refletem-se no Nível Sigma e no DPMO. O DPMO, defeitos por milhão de oportunidades que no contexto apresentado representa o número de medições do peso do composto vedante que excedem o valor da especificação, em cada milhão de oportunidades. O objetivo é este valor ser o mais pequeno possível para que o valor do nível sigma seja o mais próximo de seis sigma possível, que representa 3.4 defeitos por milhão de oportunidades.

Concluindo, a *spider 4* é aquela que suscita maior preocupação, por ter um nível sigma de 1.62, o mais baixo em relação às outras *spiders* e consequentemente o maior número de defeitos, 452 256 por cada milhão de esboços produzidos.

Os esforços concentraram-se na definição de ações corretivas para a diminuição da variabilidade do processo da *spider 4*, e posteriormente em centrar o processo com o valor nominal da especificação, 90mg. Por questões de tempo e custos foi decidido em conjunto com a empresa que só se iria incidir os esforços na *spider 4*, a que apresenta um nível sigma mais baixo.

Confirmação que os limites definidos na fase I do SPC se ajustam ao processo

Na fase II do SPC, procedeu-se à verificação de que os limites definidos se ajustavam ou não ao processo. Para isso, foram fornecidos dados da pesagem de esboços produzidos na linha PM1

CAPÍTULO 4 – CASO DE ESTUDO

pela empresa entre os dias 4 de janeiro de 2021 e 16 de julho do mesmo ano. Estes dados foram colocados nos limites anteriormente calculados.

Verificou-se que os limites não se ajustavam ao processo, como se observa na figura 4.31 na carta de controlo das médias, que o processo da *spider 4*, não se insere nos limites modificados.

O SPC é uma forma de avaliar um processo produtivo, no entanto, se não forem tomadas ações corretivas, não faz sentido aplicar cartas de controlo ao processo de aplicação de composto vedante nos esboços na linha PM1.

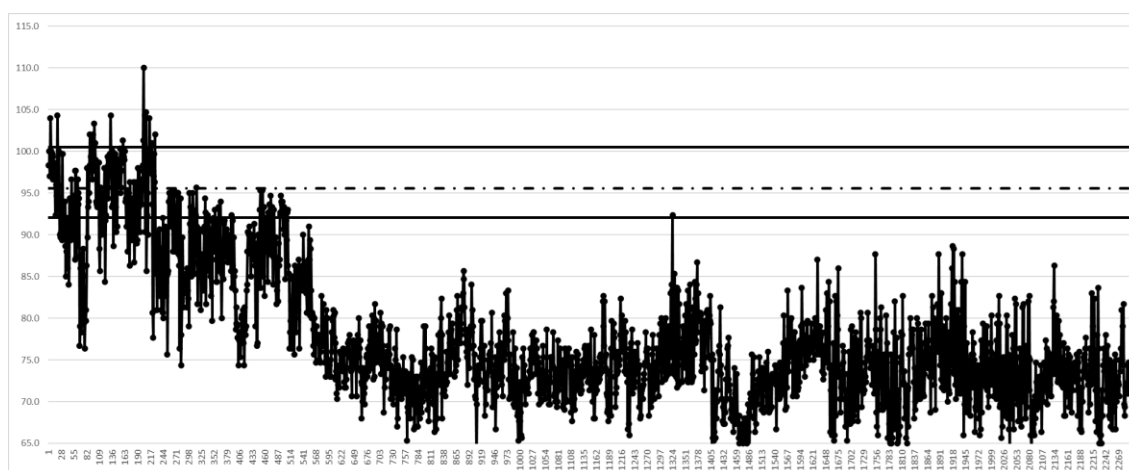


Fig. 4.31 – Carta de Controlo da média com novos dados

Poderia ter-se calculado o ARL (*Average Run Length*) para provar isso mesmo, no entanto, como concluído anteriormente, os dados violam o pressuposto da independência, o comprimento da sequência de pontos (*Run Length*) não segue uma distribuição geométrica e por isso este método não é válido para avaliar o desempenho das cartas de controlo, neste caso.

4.2.8. Atualização do *Project Charter*

Com os desenvolvimentos da fase *Mesure*, sentiu-se necessidade de atualizar o *Project Charter*. Além dos benefícios definidos na fase *Define* do ciclo de melhoria adicionaram-se os benefícios relacionados com o novo procedimento de pesagem de esboços, a atenção aos dados autocorrelacionados o seu devido tratamento e a utilização dos limites de controlo corretos nas cartas de controlo.

Os restantes pontos do *Project Charter* foram alterados para contemplarem apenas a melhoria da aplicação de composto vedante pela *spider 4*, ao invés de englobar todas as *spiders* da linha PM1.

Apresenta-se na figura 4.32 o *Project Charter* atualizado.

CAPÍTULO 4 – CASO DE ESTUDO

| 1.0 IDENTIFICAÇÃO DO PROJETO | | |
|------------------------------|---|---|
| Nome | Melhoria da métrica Cpk na aplicação de composto vedante pela <i>spider</i> 4 linha PM1 | |
| Sponsor | Raul Gouveia | <i>Continuous Improvement Manager</i> |
| Líder do projeto | Patrícia Cordeiro | |
| Equipa | Miguel Ferreira | <i>2 Pieces EOE & Crowns Production Manager</i> |
| Equipa | Hugo Carvalho | <i>WCP Production Engineer</i> |
| Equipa | Pedro Rosado | <i>WCP Quality Engineer</i> |
| Equipa | Rui Carvalho | Mecânico da linha PM1 |

| 2.0 RAZÕES PARA O PROJETO |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ▪ Valor de Cpk da aplicação de composto vedante na linha abaixo do mínimo de 1.33 ▪ Melhoria da qualidade dos esboços produzidos ▪ Redução do número de esboços rejeitados |

| 3.0 OBJETIVO DO PROJETO |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ▪ Aumento da capacidade do processo de aplicação de composto vedante pela <i>spider</i> 4 na linha PM1 para valor acima de 1.33 ▪ Redução do desperdício |

| 4.0 ÂMBITO DO PROJETO |
|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ▪ Processo de aplicação de composto vedante através de <i>spiders</i> na linha PM1. Projeto de melhoria integrado no programa <i>Spoilage Reduction</i> a decorrer na empresa. |

| 6.0 MILESTONES - DATAS | | |
|------------------------|--|------------|
| Item | Milestones | Datas |
| 1. | Mapeamento do processo | 19/03/2021 |
| 2. | Análise do sistema de medição | 09/05/2021 |
| 3. | Estabelecimento de controlo estatístico e definição da <i>baseline performance</i> | 20/05/2021 |
| 4. | Desenho de Experiências (DOE) | 18/07/2021 |
| 5. | Obtenção de valores ótimos para os fatores | 18/07/2021 |
| 6. | Teste da linha com fatores ótimos | 18/07/2021 |
| 7. | Determinação das melhorias alcançadas | 29/08/2021 |
| 8. | Estabelecimento do plano de controlo | 01/08/2021 |

| 7.0 BENEFÍCIOS EXPECTÁVEIS |
|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ▪ Melhoria da capacidade do processo de aplicação de composto vedante pela <i>spider</i> 4 ▪ Diminuição do desperdício ▪ Melhoria e adoção por parte dos operadores da qualidade do procedimento de pesagem de esboços ▪ Atenção da equipa de melhoria para a presença de dados auto-correlacionados, procedendo ao correto tratamento dos mesmos ▪ Utilização dos limites de controlo corretos nas cartas de controlo na empresa |

Fig. 4.32 - Project Charter Atualizado

Tollgate da fase Measure

Para dar como concluída a fase *Measure* do ciclo de melhoria, reuniu-se com a equipa do projeto e o seu *sponsor* de forma a responder às questões próprias da *tollgate* desta fase.

Foi unânime que a representação gráfica detalhada do processo por via do BPMN, englobava todas as etapas e atividades do processo em estudo.

As análises conduzidas na fase *Measure*, comprovaram que o C_{pk} tanto da *spider* 4, bem como o das restantes, não eram satisfatórios, e que conduzem à produção de uma grande quantidade de

CAPÍTULO 4 – CASO DE ESTUDO

defeitos. Assim, considerou-se de todo o interesse conduzir ações de melhoria que levassem ao seu aumento e conseqüente redução do número de esboços defeituosos produzidos na linha. A análise da capacidade do sistema de medição está documentada e é claro de onde provém os dados e como foram recolhidos.

Ficou claro que, por questões de tempo e custos, às *spiders* 1, 2 e 3 não seriam aplicadas ações de melhoria, apenas a *spider* 4 iria ser alvo das análises que se seguem, por ser esta que apresenta um menor Cpk, de 0.54.

Em relação ao tempo e resultados previstos, foi unânime que o projeto estava num bom caminho e que estavam reunidas todas as condições para se seguir para a fase seguinte.

4.3. Fase *Analyze*

Depois de definida a *baseline performance*, o projeto seguiu para a terceira fase, a fase *Analyze* – Análise, sintetizada no esquema da figura 4.33. Nesta fase foi importante proceder à identificação das potenciais fontes de variação do processo, determinando quais as controláveis para a realização do Desenho de Experiências (DOE) que confirma e prova que os fatores identificados têm influência na quantidade de composto vedante aplicada, validando assim as causas raiz identificadas.

A característica da qualidade sobre a qual se irá atuar, foi determinada no início do projeto, o objetivo do mesmo é a melhoria da métrica C_{pk} no processo de aplicação de composto vedante na linha PM1, portanto não foram utilizadas ferramentas para determinar qual ou quais os *CTQs* a atuar.

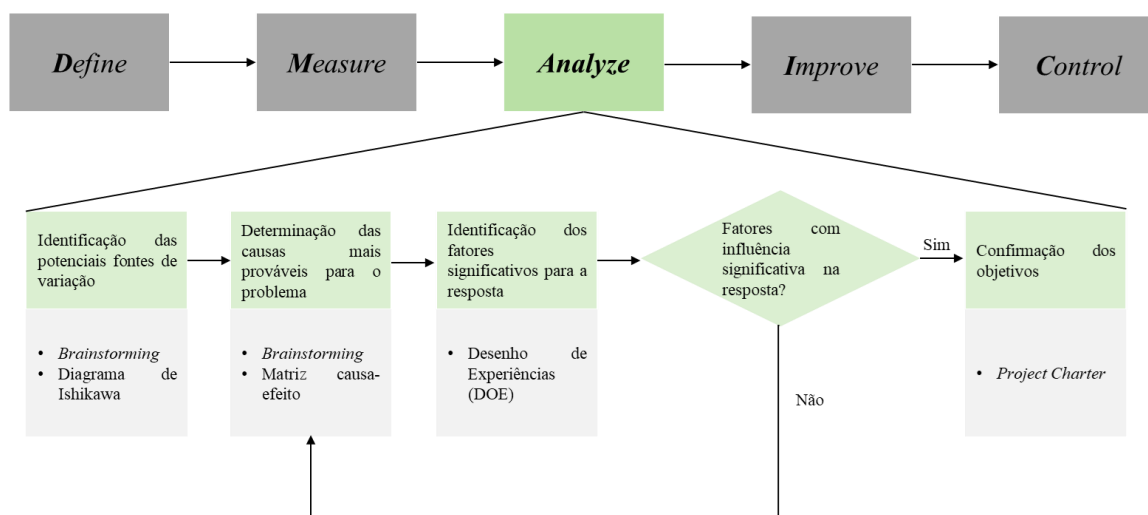


Fig. 4.33 - Fase *Analyze*, passos e ferramentas

4.3.1. Identificação das potenciais fontes de variação

Diagrama de Ishikawa

Por via de um diagrama de Ishikawa, apresentado na figura 4.34 foram identificadas as causas raiz do problema em estudo, “Aplicação pouco eficaz de composto vedante nos esboços da linha PM1”. Este diagrama foi elaborado em brainstorming com o responsável do departamento de melhoria contínua, com um Engenheiro de produção, com os operadores da PM1 e com o mecânico da linha.

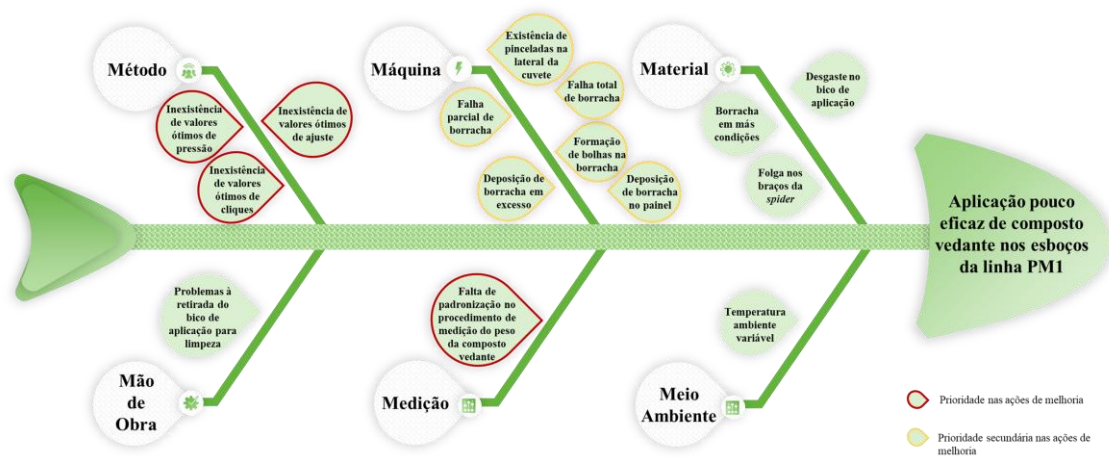


Fig. 4.34 - Diagrama de Ishikawa do problema em estudo

Dentro da categoria método foram identificadas a inexistência de valores ótimos de pressão, temperatura e cliques, causa provável para a grande variabilidade no processo de aplicação de composto vedante. Na categoria máquina foram identificados todos os defeitos que concorrem para a causa da má aplicação de composto vedante, sendo estes a existência de pinceladas na lateral da cuvete, falha total e parcial do composto vedante, formação de bolhas no composto vedante, deposição de composto vedante no painel e por fim deposição de composto vedante em excesso. Na dimensão material, identificaram-se causas o desgaste no bico de aplicação, a falta de condições do composto vedante e existência de folgas nos braços das spiders. Quanto à mão de obra, foram relatados problemas sistemáticos à retirada do bico de aplicação para limpeza o que foi considerado uma das causas do problema em questão. Aquando da realização do estudo R&R e como mencionado anteriormente na fase M deste projeto, existe falta de padronização no procedimento de medição do peso do composto vedante, podendo resultar em valores errados nos dados recolhidos, causa que foi inserida na dimensão medição. Na dimensão ambiente, foram identificadas grandes amplitudes térmicas, dentro das instalações, mais preocupante no verão existem relatos de temperaturas acima dos 40°C.

4.3.2. Determinação das causas mais prováveis para o problema e confirmação das relações causa-efeito

Matriz causa-efeito

Depois, com o objetivo de decidir sobre em que causas atuar, recorreu-se a uma matriz causa-efeito. Foram ponderados os critérios Gravidade, Grau de Barreiras à Solução e o Grau de Controlo sobre as Causas. Em conjunto com a equipa do projeto e determinou-se o grau de contributo dos critérios para o problema em questão. Definiu-se que o critério Grau de Controlo sobre as Causas era o mais importante funcionando como critério de exclusão, por forma aos esforços de melhoria se concentrarem nas causas em que é possível, por diversos constrangimentos, de tempo, monetários ou outros, atuar. A este critério foi dado o peso máximo, 9 e às correlações causa/critério, isto é, a classificação da causa raiz na ótica de cada critério, as pontuações de 9 para as causas controláveis pela equipa de projeto e 0 para as não controláveis.

Em relação aos critérios Gravidade e Grau de Barreiras à implementação foram pontuados com 8 e 7, respetivamente. Às correlações, a relação possível de cada critério com cada causa, foram dadas as pontuações de 9, 6, 3, 1 e 0, como se observa na tabela 4.10, de forma a serem obtidas maiores diferenças no resultado final do que usando os critérios, 5, 4, 3, 2, 1 após multiplicadas pelo peso de cada critério.

Tabela 4.10 - Pontuações da correlações dos critérios face às causas

| Pontuação | Gravidade | Grau de Barreiras à Solução |
|-----------|--------------------|-----------------------------|
| 9 | Extremamente grave | Sem dificuldade |
| 6 | Muito grave | Pouco difícil |
| 3 | Grave | Difícil |
| 1 | Pouco grave | Muito difícil |
| 0 | Sem gravidade | Extremamente elevado |

O resultado da matriz causa-efeito apresenta-se na tabela 4.11, e no diagrama de Ishikawa, figura 4.34, estão identificadas a vermelho as causas mais determinantes e com prioridade mais elevada nas ações de melhoria e com cor amarela as com prioridade secundária. As causas primárias e secundárias foram as que apresentaram uma pontuação mais elevada na matriz causa-efeito.

Tabela 4.11 - Matriz causa-efeito

| | | Gravidade | Grau de barreiras | Grau de Controle sobre as causas | Critérios |
|---------------|--|--------------------------------|-------------------|----------------------------------|-----------|
| | | 8 | 7 | 9 | Peso |
| Dimensões | Causas-Raiz | Relação entre Causa e Critério | | | Total |
| Método | Inexistência de valores ótimos de pressão | 9 | 9 | 9 | 216 |
| | Inexistência de valores ótimos de cliques | 9 | 9 | 9 | 216 |
| | Inexistência de valores ótimos de ajuste | 9 | 9 | 9 | 216 |
| Máquina | Falha parcial de composto vedante | 9 | 6 | 9 | 195 |
| | Deposição de composto vedante em excesso | 9 | 6 | 9 | 195 |
| | Existência de pinceladas na lateral da cuvete | 9 | 6 | 9 | 195 |
| | Falha total do composto vedante | 9 | 6 | 9 | 195 |
| | Formação de bolhas no composto vedante | 9 | 6 | 9 | 195 |
| | Deposição de composto vedante no painel | 9 | 6 | 9 | 195 |
| Material | Composto vedante em más condições | 6 | 0 | 0 | 48 |
| | Folga nos braços da <i>spider</i> | 9 | 0 | 0 | 72 |
| | Desgaste no bico de aplicação | 9 | 1 | 0 | 79 |
| Mão de Obra | Problemas à retirada do bico de aplicação para limpeza | 6 | 3 | 9 | 150 |
| Medição | Falta de padronização no procedimento de medição do peso do composto vedante | 9 | 9 | 9 | 216 |
| Meio Ambiente | Temperatura ambiente variável | 6 | 0 | 0 | 48 |

Assim, identificadas as potenciais fontes de variação e determinadas as causas mais prováveis do problema, depois da reunião da equipa de projeto onde se confirmaram em brainstorming as relações causa-efeito concluiu-se que as causas mais determinantes e com prioridade mais elevada levavam à existência das causas secundárias, isto é, atuando sobre as causas realçadas a vermelho no diagrama de Ishikawa levaria à mitigação das causas realçadas a amarelo e consequente resolução do problema “Aplicação pouco eficaz de composto vedante nos esboços da linha PM1”.

4.3.3. Identificação dos fatores significativos para a resposta

Desenho de Experiências (DOE)

- **1º Desenho de Experiências – 2 fatores a 3 níveis**

Posto isto, decidiu-se proceder ao desenvolvimento de um Desenho de Experiências (DOE), considerando os fatores pressão e cliques (abertura ou fecho do bico de aplicação da pistola), cada um com três níveis, de forma a verificar se contribuem significativamente para a variável resposta, a quantidade medida em miligramas de composto vedante aplicada em cada esboço pela *spider*

4. Estes fatores foram identificados em brainstorming com o mecânico da linha, o responsável

CAPÍTULO 4 – CASO DE ESTUDO

pelo departamento de melhoria contínua e o Engenheiro de manutenção. O desenho de experiências foi executado recorrendo-se a um desenho fatorial completo, 3^2 e pela realização de duas réplicas cada uma com 10 amostras. As amostras recolhidas totalizaram 180 esboços, 90 em cada réplica. É importante referir que durante a realização do DOE a linha esteve parada, tendo o estudo tido uma duração aproximada de 5 horas.

Como dito anteriormente, devido aos custos que o DOE acarreta, provenientes da produção de um número elevado de peças para serem sucataadas e principalmente do tempo de paragem da linha, foi realizado o estudo apenas na *spider 4*, aquela que, pelas análises anteriormente conduzidas, apresenta um pior desempenho.

Para a definição dos níveis alto, intermédio e baixo para cada um dos fatores consultou-se um engenheiro de produção e o mecânico da linha. Os valores definidos inicialmente foram retirados das instruções de funcionamento das *spiders*, que afirmava que os valores de pressão para um bom funcionamento devem variar entre 1.2 bar e 0.85 bar e de cliques entre 18 e 22.

Antes do início da realização das experiências os níveis foram testados, concluindo-se que não eram os adequados. Na realidade, não é possível aumentar a pressão acima de 1.02 bar e com os níveis de cliques definidos o traço de composto vedante não possuía uma espessura satisfatória.

Posto isto, em conjunto com o mecânico da linha fizeram-se variar os fatores até se chegar a níveis de pressão possíveis de utilizar e se atingir uma espessura satisfatória de composto vedante. Os parâmetros foram ajustados para os valores de pressão entre 0.8 e 1.02 bar, sendo o nível intermédio definido nos 0.96 bar. Já para os cliques foram definidos como níveis para o estudo 35, 30 e 25 cliques como os níveis altos, intermédio e baixo.

No Anexo J, encontram-se a ordem pela qual as combinações foram experimentadas os valores de resposta, e da transformação $-10 \log S^2$ obtidos e a informação de se foi aceite ou não pelas câmaras de visão.

Como descrito no BPMN realizado na fase *Measure* do ciclo de melhoria, a análise dos esboços é feita por câmaras de visão, sendo rejeitados os que não estão conforme as especificações. Isto é, para se considerar um esboço de qualidade, a quantidade de composto vedante aplicada não é o único fator importante e, por tanto, para tornar o estudo mais completo, não se poderia deixar de verificar quais os esboços aceites e rejeitados pelas câmaras de visão e os níveis a que foram produzidos.

Para a realização do DOE foram então identificados e pesados na balança validada na fase *Measure*, figura 4.35 e 4.36 respetivamente, os 180 esboços sem composto vedante, e pela ordem

CAPÍTULO 4 – CASO DE ESTUDO

aleatória produzidos 10 a 10, posteriormente analisados pelas câmaras e visão, figura 4.37. Por fim pesados novamente de forma a obter a quantidade de composto vedante aplicada.



Fig. 4.35 - Esboços identifica- **Fig. 4.36 - Pesagem de esboço** **Fig. 4.37 - Análise câmaras de visão**
dos

Os dados recolhidos foram tratados no software Statistica, o resultado do DOE encontra-se na tabela 4.12.

Tabela 4.12 - Anova, DOE 2 fatores a 3 níveis

| Fonte de Variação | Graus de Liberdade | SS | MS | P-Value |
|--|--------------------|-----------------|-----------------|--------------|
| Pressão Linear | 1 | 1527.763 | 1527.763 | 0.001 |
| Pressão Quadrática | 1 | 23.931 | 23.931 | 0.586 |
| Cliques Linear | 1 | 2316.722 | 2316.722 | 0.004 |
| Cliques Quadrático | 1 | 1.050 | 1.050 | 0.909 |
| Pressão Linear * Cliques Linear | 1 | 0.245 | 0.245 | 0.956 |
| Pressão Linear * Cliques Quadrático | 1 | 29.482 | 29.482 | 0.547 |
| Pressão Quadrática* Cliques Linear | 1 | 17.913 | 17.913 | 0.637 |
| Pressão Quadrática* Cliques Quadrático | 1 | 84.185 | 84.185 | 0.318 |
| Erro | 9 | 676.725 | 75.192 | |
| Total | 17 | 4753.965 | | |

CAPÍTULO 4 – CASO DE ESTUDO

Pela análise de variância apresentada concluiu-se que para uma confiança de 95%, o fator pressão linear e cliques linear, assinalados com cor vermelha, têm influência significativa na quantidade de composto vedante aplicada.

Seguiu-se para a condensação da Anova, a introdução de todos os fatores e interações não significativos no erro para se conseguir obter uma Anova em que toda a variação explicada é significativa e a não explicada encontra-se como erro, o resultado encontra-se na tabela 4.13.

Tabela 4.13 - Anova condensada, DOE 2 fatores a 3 níveis

| Fonte de Variação | Graus de Liberdade | SS | MS | P-Value |
|-------------------|--------------------|----------|--------|---------|
| Pressão Linear | 1 | 1530.872 | 28.086 | 0.00009 |
| Cliques Linear | 1 | 2405.501 | 44.133 | 0.00008 |
| Erro | 15 | | | |
| Total | 17 | | | |

No mesmo software recorreu-se ao gráfico de superfície, para verificar quais os níveis com que se alcançava o valor de composto vedante desejado, 90mg, sendo estes, como se verifica na figura 4.38:

- Pressão: 1.02 bar
- Cliques: 35

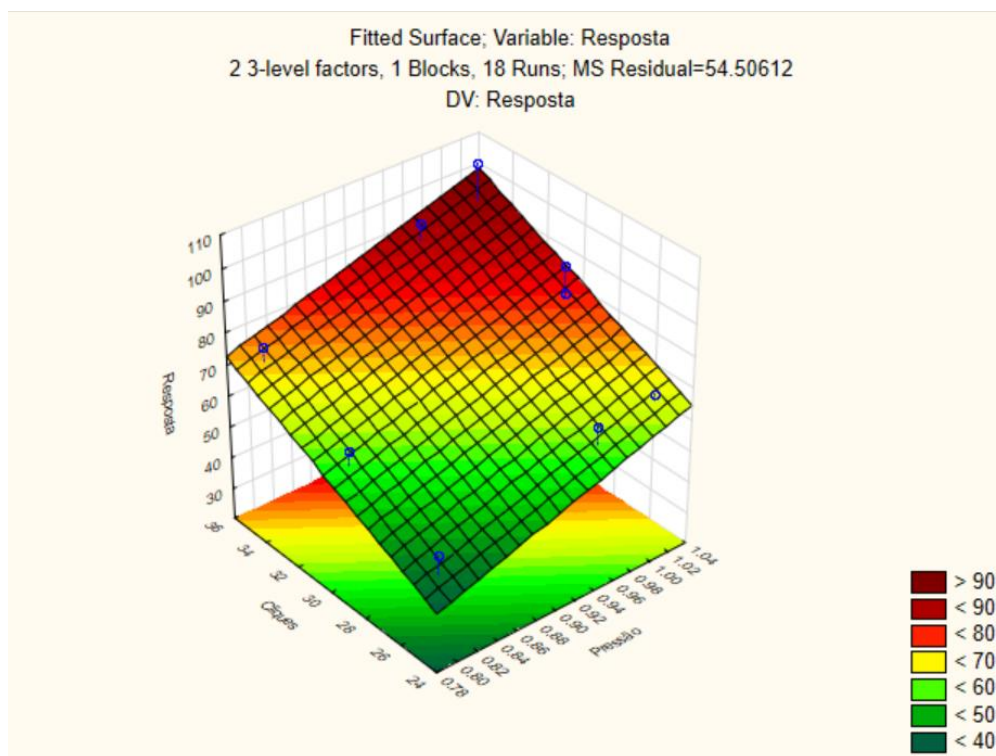


Fig. 4.38 - Gráfico de superfície para a obtenção de níveis ótimos

CAPÍTULO 4 – CASO DE ESTUDO

Para concluir em relação à normalidade, homocedasticidade e independência, recorreu-se ao mesmo *software*. Foi feito o gráfico de normalidade onde se comprovou que os dados se ajustavam à reta de Henry, validando-se este pressuposto. O gráfico dos resíduos em função do valor previsto não se orientava sob nenhuma forma suspeita, comprovando-se que a variância era de facto constante. Por último no gráfico dos resíduos em função da ordem de realização da experiências, os dados apresentando-se aleatoriamente distribuídos e além disso a matriz de planeamento foi introduzida de forma aleatória permitindo garantir a validade deste pressuposto. Estes gráficos apresentam-se no Anexo K.

De forma a obter qual a combinação de níveis que minimizava a variância do processo, foram analisados os valores da transformação $-10 \log S^2$, foi construída no software Statistica a tabela de análise de variância, como se observa na tabela 4.14.

Tabela 4.14 - Anova, DOE 2 fatores a 3 níveis $-10\log(S^2)$

| Fonte de Variação | Graus de Liberdade | SS | MS | P-Value |
|---------------------------------|--------------------|----------------|----------------|--------------|
| Pressão Linear | 1 | 1014.00 | 1014.00 | 0.009 |
| Pressão Quadrática | 1 | 35.827 | 35.827 | 0.332 |
| Cliques Linear | 1 | 832.958 | 832.958 | 0.011 |
| Cliques Quadrático | 1 | 90.676 | 90.676 | 0.163 |
| Pressão Linear * Cliques Linear | 1 | 83.790 | 83.790 | 0.176 |
| Erro | 3 | 26.896 | 26.896 | |
| Total | 8 | 2039.996 | | |

As linhas realçadas a vermelho, são aquelas cujos fatores são significativos, neste caso a Pressão Linear e Cliques Linear influenciam significativamente a resposta em estudo. Seguiu-se para a condensação da Anova, à semelhança do que foi feito para a variável resposta, o resultado encontra-se na tabela 4.15.

Tabela 4.15 - Anova condensada, DOE 2 fatores a 3 níveis $-10\log(S^2)$

| Fonte de Variação | Graus de Liberdade | SS | MS | P-Value |
|-----------------------|--------------------|----------------|----------------|--------------|
| Pressão Linear | 1 | 982.875 | 982.875 | 0.004 |
| Cliques Linear | 1 | 766.140 | 766.140 | 0.007 |
| Erro | 6 | 290.980 | 48.497 | |
| Total | 8 | 2039.996 | | |

CAPÍTULO 4 – CASO DE ESTUDO

Estavam neste momento reunidas as condições para a determinação dos níveis que minimizavam a variação, para a transformação $-10 \log S^2$, pela análise do gráfico de superfície da figura 4.39.

Verificou-se assim que os níveis que minimizavam a variabilidade, eram:

- Pressão: 1.02 bar
- Cliques: 35

Assim, verificou-se que os níveis ótimos para minimizar a variabilidade, coincidiam com os que se obtiveram para atingir o peso pretendido de 90mg.

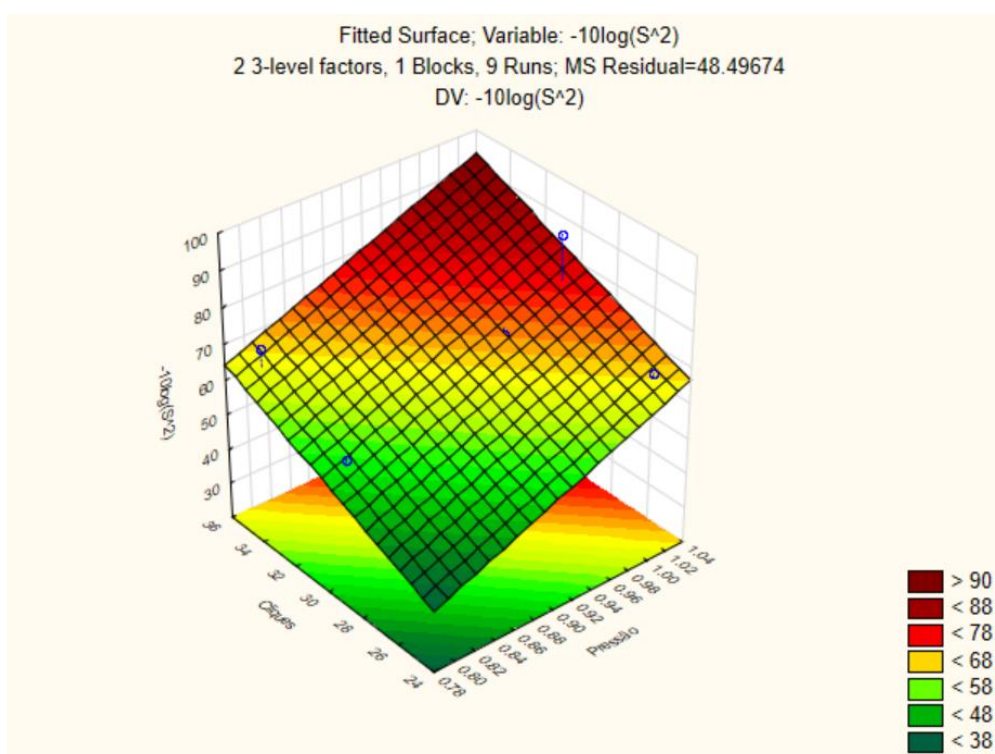


Fig. 4.39 - Gráfico de superfície para a obtenção de níveis ótimos, $-10\log(S^2)$

Em Anexo L apresenta-se, para a transformação $-10 \log S^2$, o gráfico de normalidade dos resíduos, os quais se ajustam à reta de Henry, seguindo portanto uma distribuição aproximadamente normal, o gráfico que prova a homocedasticidade, variância constante, onde os dados não se orientam de forma suspeita, validando-se também este pressuposto e por último o gráfico dos Resíduos em função da ordem de realização das experiências, este não apresenta qualquer tendência nem forma de funil. É importante ainda salientar que a matriz de planeamento foi introduzida de forma aleatória, permitindo garantir a validade do pressuposto da independência.

Como dito anteriormente, teve-se em conta a análise das câmaras de visão. Dos 180 esboços produzidos, apenas 34 foram aceites, todos eles por apresentarem uma falha parcial na aplicação

CAPÍTULO 4 – CASO DE ESTUDO

de composto vedante como mostrado na figura 4.37, a área evidenciada a vermelho não contém composto vedante.

- **2º Desenho de Experiências – 3 fatores a 3 níveis**

Assim, para colmatar a rejeição pelas câmaras de visão, reuniu-se a equipa do projeto e decidiu-se introduzir um novo fator a este estudo, ao qual se denominou Ajuste.

O Ajuste, em milímetros corresponde ao local onde a *spider* termina a aplicação de composto vedante, isto é, a *spider* termina a aplicação de composto vedante a distância indicada após o local onde a iniciou, eliminando a falha parcial de composto vedante experienciada sem o ajuste.

Em brainstorming com a equipa de melhoria e à semelhança do efetuado no desenho de experiências anteriormente conduzido, foram testados vários níveis de ajuste tendo-se decidido pela utilização de 2.0mm, 1.6mm e 1.2 mm como níveis alto intermédio e baixo na execução deste DOE.

Desta vez, o desenho de experiências consistiu num desenho fatorial completo de três fatores a três níveis, 3^3 , não tendo sido realizada qualquer réplica devido a questões de tempo e de custos.

Foram então identificados 270 esboços e pesados na balança validada na fase *Measure*, antes e depois da aplicação do composto vedante de forma a obter-se o seu peso. O composto vedante foi aplicado pela ordem aleatória nos que foram produzidos 10 a 10 e por fim analisados nas câmaras de visão. Durante a sua realização a linha esteve parada, e o estudo durou cerca de 7h. Os dados da resposta recolhidos encontram-se no Anexo M, bem como a ordem das combinações experimentadas.

Os dados foram analisados no *software* Statistica e a tabela Anova obtida apresenta-se na tabela 4.16.

A cor vermelha, o *software* apresentou os fatores e interações significativas, para 95% de confiança, aquelas que o p-value é inferior a 5%, sendo significativo a Pressão e Cliques, linear e quadrático, e as interações Pressão linear com Cliques Linear e por último Pressão linear com Cliques quadrático.

CAPÍTULO 4 – CASO DE ESTUDO

Tabela 4.16 - Anova, DOE 3 fatores a 3 níveis

| Fonte de Variação | Graus de Liberdade | SS | MS | P-Value |
|--|--------------------|----------|----------|---------|
| Pressão Linear | 1 | 1286.627 | 1286.627 | 0.000 |
| Pressão Quadrática | 1 | 10.939 | 10.939 | 0.040 |
| Cliques Linear | 1 | 5610.052 | 5610.052 | 0.000 |
| Cliques Quadrático | 1 | 70.419 | 70.419 | 0.001 |
| Ajuste Linear | 1 | 0.643 | 0.643 | 0.569 |
| Ajuste Quadrático | 1 | 1.821 | 1.821 | 0.347 |
| Pressão Linear * Cliques Linear | 1 | 58.080 | 58.080 | 0.001 |
| Pressão Linear * Cliques Quadrático | 1 | 40.534 | 40.534 | 0.002 |
| Pressão Quadrática* Cliques Linear | 1 | 1.064 | 1.064 | 0.467 |
| Pressão Quadrática* Cliques Quadrático | 1 | 4.028 | 4.028 | 0.176 |
| Pressão Linear * Ajuste Linear | 1 | 0.041 | 0.041 | 0.885 |
| Pressão Linear * Ajuste Quadrático | 1 | 1.400 | 1.400 | 0.407 |
| Pressão Quadrática* Ajuste Linear | 1 | 5.375 | 5.375 | 0.124 |
| Pressão Quadrática* Ajuste Quadrático | 1 | 3.794 | 3.794 | 0.187 |
| Cliques Linear * Ajuste Linear | 1 | 1.470 | 1.470 | 0.396 |
| Cliques Linear * Ajuste Quadrático | 1 | 0.751 | 0.751 | 0.539 |
| Cliques Quadrático* Ajuste Linear | 1 | 2.250 | 2.250 | 0.299 |
| Cliques Quadrático* Ajuste Quadrático | 1 | 1.333 | 1.333 | 0.418 |
| Erro | 8 | 14.598 | 1.825 | |
| Total | 26 | 7573.287 | | |

Seguiu-se para a condensação da ANOVA, isto é, na introdução de todos os fatores e interações não significativos no erro para se conseguir obter uma ANOVA em que toda a variação explicada é significativa e a não explicada encontra-se como erro, o resultado encontra-se na tabela 4.17.

Como se pode observar, todos os fatores e interações significativos se mantiveram, tendo-se considerado que são estes que têm influência significativa na quantidade de composto vedante aplicada.

CAPÍTULO 4 – CASO DE ESTUDO

Tabela 4.17 - Anova condensada, DOE 3 fatores a 3 níveis

| Fonte de Variação | Graus de Liberdade | SS | MS | P-Value |
|-------------------------------------|--------------------|----------|----------|---------|
| Pressão Linear | 1 | 1288.627 | 1288.627 | 0.000 |
| Pressão Quadrática | 1 | 10.939 | 10.939 | 0.028 |
| Cliques Linear | 1 | 5629.286 | 5629.286 | 0.000 |
| Cliques Quadrático | 1 | 72.142 | 72.142 | 0.000 |
| Pressão Linear * Cliques Linear | 1 | 57.887 | 57.887 | 0.000 |
| Pressão Linear * Cliques Quadrático | 1 | 36.670 | 36.670 | 0.001 |
| Erro | 20 | 38.979 | 1.949 | |
| Total | 26 | 7573.287 | | |

Antes de se proceder para a análise da normalidade, homocedasticidade e ao gráfico dos Resíduos em função da ordem de realização das experiências foi importante tecer algumas observações.

Apesar do último fator introduzido não ter tido influência significativa na resposta, considerou-se a sua introdução de elevada importância. Dos 270 esboços produzidos, nenhum foi rejeitado, confirmando-se que é importante considerar o ajuste aquando da aplicação de composto vedante.

Pela análise do gráfico da normalidade, constatou-se que os dados se ajustavam à reta de Henry, tendo podido afirmar-se que seguiam uma distribuição aproximadamente normal, quanto ao gráfico usado para concluir sobre a homocedasticidade e ao gráfico dos resíduos em função da ordem de realização das experiências observou-se que ambos formam uma nuvem de pontos sem formar funil, verificando-se o pressuposto da independência dos dados. No entanto, o gráfico da homocedasticidade, deixou algumas dúvidas, os valores abaixo de 50 apresentavam uma menor variação dos que acima de 60. Estes gráficos apresentam-se no Anexo N.

Para clarificar este ponto, realizou-se uma transformação de Box Cox para analisar a variância em conjunto com a normalidade. No gráfico de Box Cox, a unidade estava fora do intervalo de confiança, confirmando-se que é necessária uma transformação de dados. No entanto, depois desta transformação, era expectável que a unidade já se encontrasse dentro do intervalo de confiança, no entanto isso não se verificou, tendo-se concluído que a transformação não permitiu corrigir os dados.

Posto isto, recorrendo uma vez mais ao *software* Statistica, obtiveram-se os valores ótimos para os fatores significativos, pressão e cliques, utilizando como objetivo o valor nominal da especificação, 90mg de composto vedante, recorrendo-se ao gráfico de superfície da figura 4.40.

Os valores obtidos foram:

CAPÍTULO 4 – CASO DE ESTUDO

- Pressão: 1.02 bar
- Cliques: 35

Apesar do fator ajuste não se ter revelado significativo, pela análise das câmaras de visão ficou claro que tem elevada importância. Optou-se pelo valor mais económico, 1.2 mm o que proporciona uma menor quantidade de composto vedante aplicada.

Este gráfico mostra que trabalhando com os valores máximos experimentados de pressão e cliques, se obteve um valor próximo de 90mg.

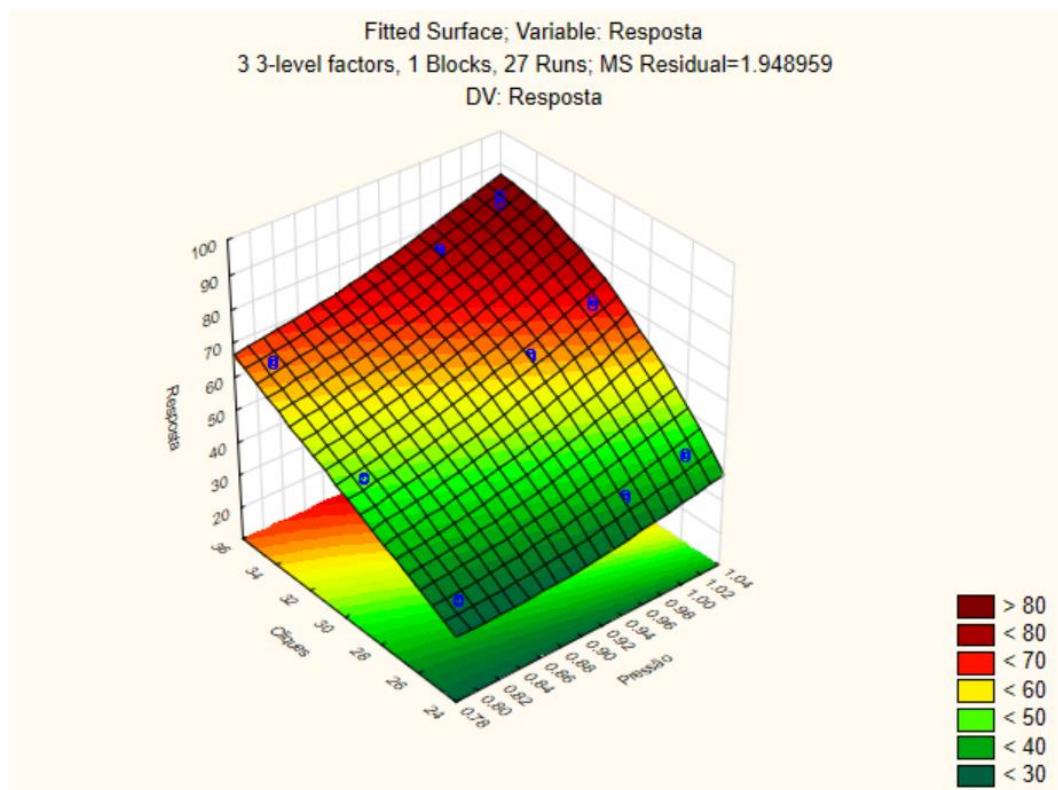


Fig. 4.40 - Gráfico de superfície, DOE 3 fatores a 3 níveis

É interessante referir que no primeiro DOE apresentado, antes de se considerar o terceiro fator, ajuste, se obtiveram as mesmas conclusões, corroborando os resultados obtidos com este segundo estudo.

Além disto, é evidente que para se obter uma resposta próxima da ótima, foram seleccionados os níveis máximos experimentados, e que, como anteriormente referido as condições onde o fator cliques deveria trabalhar seria entre os 18 e os 22, no entanto trabalhou-se nos 35.

Isto alerta para um grande desgaste na pistola desta *spider*, devendo ser pensada uma manutenção ou mesmo substituição da mesma.

4.3.4. Confirmação dos objetivos

Posto isto e concluído o desenho de experiências, foi importante reforçar o objetivo deste projeto.

Revedo o Project Charter anteriormente elaborado, os objetivos do trabalho mantiveram-se inalterados:

- Aumento do C_{pk} da aplicação de composto vedante na linha PM1 para valor acima de 1.3.
- Redução do desperdício.

Assim, de forma a estes objetivos serem atingidos, foram tomados como níveis ótimos os que permitem atingir o peso de 90mg em cada esboço, e que simultaneamente reduzem a variabilidade, de modo a aumentar o C_{pk} :

- Pressão: 1.02 bar
- Cliques: 35
- Ajuste: 1.2mm

Tollgate da fase Analyze

Para dar como finalizada a fase *Analyze*, a equipa de melhoria procedeu à realização da *tollgate review*, respondendo a algumas questões.

Ficou claro que os objetivos do projeto eram a melhoria do C_{pk} do processo de aplicação de composto vedante pela *spider 4* e consequente diminuição da quantidade de defeitos.

Os objetivos do projeto de melhoria, seriam atingidos por via de ações de melhoria com o objetivo de eliminar ou mitigar as causas raiz identificadas no diagrama de Ishikawa e posteriormente priorizadas com recurso à matriz causa-efeito. Sendo estas a inexistência de valores ótimos de pressão, cliques e ajuste e a falta de padronização no procedimento de medição do peso do composto vedante.

Os valores ótimos encontrados com recurso ao desenho de experiências iriam ser experimentados num ensaio de melhoria de forma a comprovar se estes realmente melhoravam o processo em questão, tanto em termos da quantidade de composto vedante aplicado como do número de rejeições efetuadas pelas câmaras de visão. A equipa mostrou grande entusiasmo e segurança nos dados e análises desenvolvidos para chegar aos níveis ótimos dos três fatores e estava confiante que teriam o resultado desejado nos *CTQs* do projeto.

CAPÍTULO 4 – CASO DE ESTUDO

Paralelamente, durante o projeto, outras oportunidades de melhoria foram encontradas, no entanto não correspondiam a causas raiz do problema em questão, não obstante, seriam também tratadas na fase *Improve* que se segue.

Em termos de tempo e resultados previstos, a equipa considerou que o projeto estava num bom caminho e que poderia seguir para a fase seguinte.

4.4. Fase *Improve*

Nesta fase, o objetivo principal foi elaborar e implementar as ações de melhoria, traçando um plano que culminasse na melhoria efetiva do processo. Com os resultados do DOE realizado na fase anterior, e por meio de um plano de recolha de dados, fez-se e verificou-se o sucesso do ensaio de melhoria, passando do projeto piloto para a escala real através de um plano de implementação, esta sequência foi sintetizada no esquema da figura 4.41.

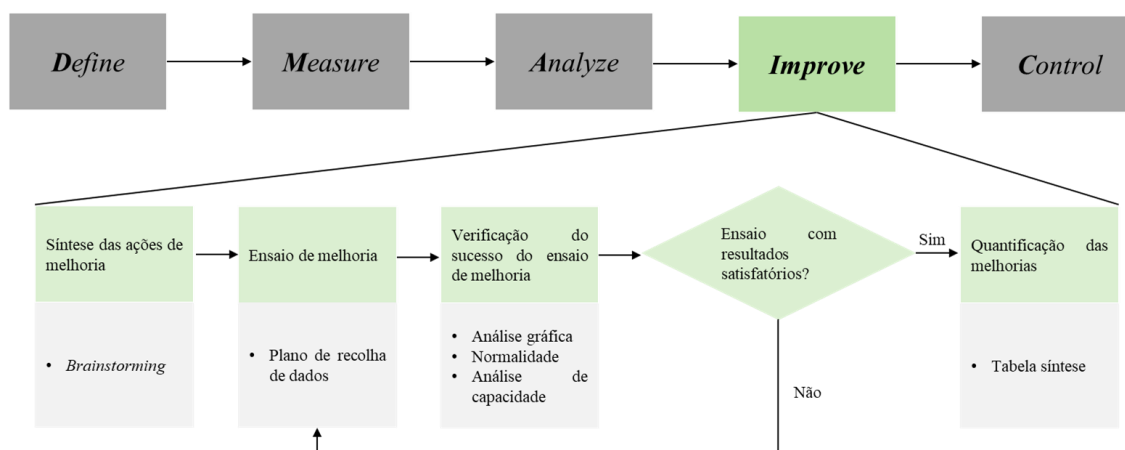


Fig. 4.41 - Fase *Improve*, passos e ferramentas

4.4.1. Síntese das ações de melhoria

Ao longo do projeto, foram detetadas algumas oportunidades de melhoria, foi importante nesta fase reuni-las para que fossem implementadas com sucesso:

1. Revisão do procedimento de pesagem dos esboços, indicando que devem ser fechadas todas as portas da balança.
2. Revisão das cartas de controlo usadas na empresa, nomeadamente a alteração dos limites para os de controlo ao invés dos de especificação utilizados incorretamente, até então.
3. Introdução da análise da autocorrelação dos dados para a melhor análise do processo na linha PM1.
4. Aumento da capacidade do processo de aplicação de composto vedante na linha PM1 para valor acima de 1.33, através da mitigação das causas raiz já mencionadas.
5. Redução do desperdício na linha, através da mitigação das causas raiz já mencionadas.

6. Substituição da pistola da *spider* 4 ou em alternativa uma manutenção profunda.

Em *brainstorming* com a equipa de melhoria, as oportunidades acima identificadas foram discutidas, tendo a primeira sido implementada de imediato na empresa. Quanto à segunda e terceira medidas, a empresa fará um esforço para alterar a forma como elabora as cartas de controlo, gradualmente nos seus processos. As quarta e quinta medidas, chegaram na sequência das causas raiz identificadas. A empresa mostrou disponibilidade para se efetuar um ensaio de melhoria com os níveis ótimos obtidos no DOE de forma a verificar-se se com os níveis identificados, o processo seria capaz e se diminuía o desperdício.

A última medida, nomeadamente a manutenção profunda não só da pistola da *spider* 4 mas de toda a linha, foi implementada após o ensaio de melhoria, tendo a linha retomado o seu funcionamento no início do mês de setembro de 2021.

4.4.2. Ensaio de melhoria

Plano de recolha de dados

Para este ensaio de melhoria, programou-se que ao longo de uma hora, das 14:56 às 16:16, sensivelmente, seriam produzidos na *spider* 4 esboços com os níveis identificados como ótimos no desenho de experiências, mais uma vez pressão de 1.02 bar, 35 cliques e um ajuste de 12mm. Ao longo desta hora foram introduzidos 50 esboços, 10 grupos de 5, em períodos equidistantes no tempo pelo mecânico da linha, os quais foram pesados e identificados antes da aplicação de composto vedante, e depois, de forma obter-se o valor do peso da mesma.

O número de esboços produzidos foi limitado pelo tempo que a empresa estipulou que a linha poderia estar parada, sensivelmente até às 16 horas, hora de término do turno do mecânico que acompanhou todo o estudo. Este facto limitou o estudo na medida em que não houve tanta confiança nos limites de controlo que iriam ser calculados e se seriam bons estimadores dos verdadeiros limites de controlo. Para esta amostra de dimensão 5 deveriam ter sido recolhidas, no mínimo 100 amostras ao invés de 50.

4.4.3. Verificação do sucesso do ensaio de melhoria

Os dados foram analisados pelas câmaras de visão tendo sido produzidos um total de 5 910 e obtiveram-se 77 rejeitados, pelas câmaras de visão como comprova a figura 4.42, fotografia tirada ao monitor da linha, em termos percentuais, apenas 1.3% dos esboços foram rejeitados. Os dados recolhidos no ensaio de melhoria apresentam-se no Anexo O.

| Linha de tracking A | |
|-------------------------------|--------------------|
| Totais | 5910 |
| Rejeitados | 77 |
| % | 1.30 |
| Velocidade média | 336 pçs/min |
| Pico de velocidade | 976 pçs/min |
| Velocidade instantâ... | 226 pçs/min |

Fig. 4.42 - Resultado ensaio de melhoria, câmaras de visão

Teria sido bastante interessante comparar a percentagem de peças rejeitadas com os dados recolhidos pelo software de controlo da Crown antes da introdução dos níveis ótimos, no entanto para as quatro *spiders* existem duas câmaras de visão, uma que avalia os esboços produzidos na Via 1, pelas *spiders* 1 e 2, e outra que avalia aqueles que provém da via 2, *spiders* 3 e 4. Como dito anteriormente o ensaio de melhoria foi efetuado apenas na *spider* 4, aquela onde se realizou o DOE, não se podendo tecer comparações diretas entre o antes e depois ao nível do desperdício.

De qualquer forma considerou-se interessante apresentar qual a percentagem de esboços rejeitados nomeadamente na via 2. Desde janeiro de 2021 até ao final de julho, foram rejeitados 0.49% dos esboços produzidos na via 2. Apesar do valor ter aumentado, considerou-se que as limitações no número de peças produzidas com os níveis ótimos foi um fator com um peso bastante elevado nestes resultados.

O facto da linha ter estado a produzir apenas durante uma hora e dos dados terem sido recolhidos num espaço curto de tempo e principalmente no início da produção, antes das *spiders* terem tempo para estabilizar pode muito provavelmente ter enviesado estas conclusões. Além disto não é certo qual a percentagem de rejeitados dos 0.49% que advém da *spider* 3 e que advém da *spider* 4, não deixando muita certeza em relação a estas ilações apesar de pela comparação dos índices de capacidade e desempenho destas *spiders* ser claro que a *spider* 4 apresenta mais problemas.

Análise gráfica

Passa-se agora para a análise gráfica dos dados do ensaio de melhoria. Os dados das pesagens encontram-se em Anexo N, estes foram analisados no software Minitab, onde pela dimensão da amostra ser reduzida se construiu as cartas de controlo da média e amplitude, figura 4.43. Os subgrupos 1, 5 e 10 foram retirados da amostra por estarem fora dos limites de controlo, representando causas especiais de variação na carta de controlo da média, sinalizados a vermelho.

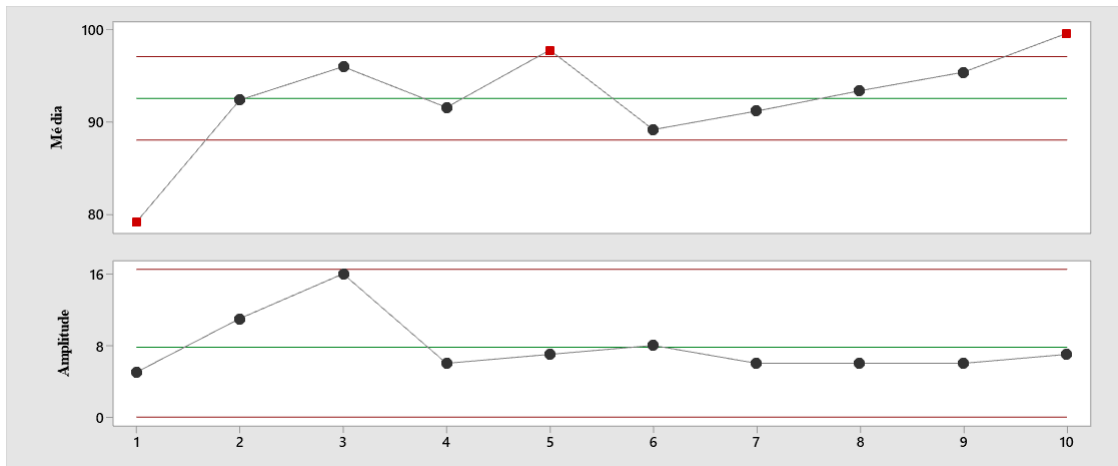


Fig. 4.43 - Cartas de Controlo da média e amplitude, ensaio de melhoria

Depois de eliminadas as causas especiais de variação, foram novamente elaboradas no *software* Minitab as cartas de controlo da média e da amplitude, figura 4.44.

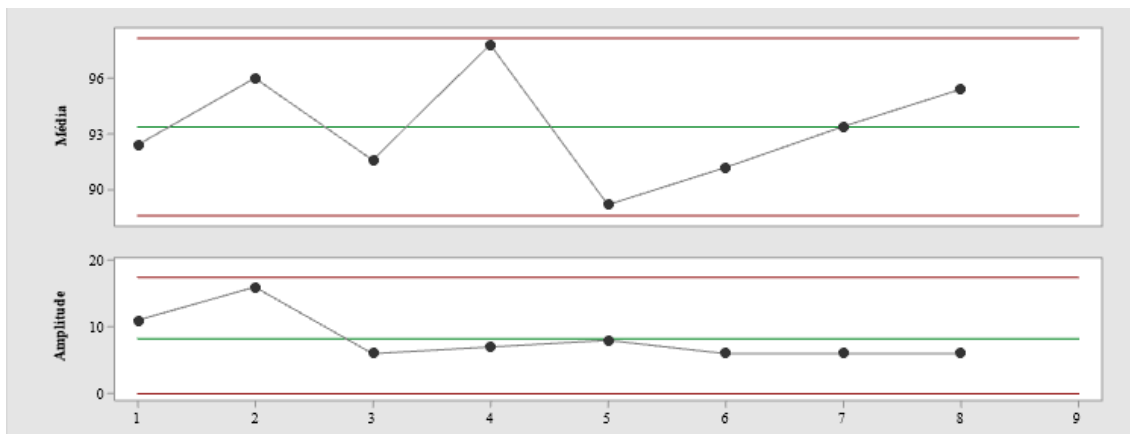


Fig. 4.44 - Cartas de Controlo da média e amplitude, ensaio de melhoria, após eliminadas causas especiais de variação

Normalidade

Agora sem causas especiais de variação, os dados foram testados quanto à normalidade, onde se comprovou com uma confiança de 95% que são de facto normais, ajustam-se à reta de Henry, tendo-se obtido um p-value de 0.209, como se vê na figura 4.45 e não se detetaram pontos fora dos limites de controlo nas cartas de controlo.

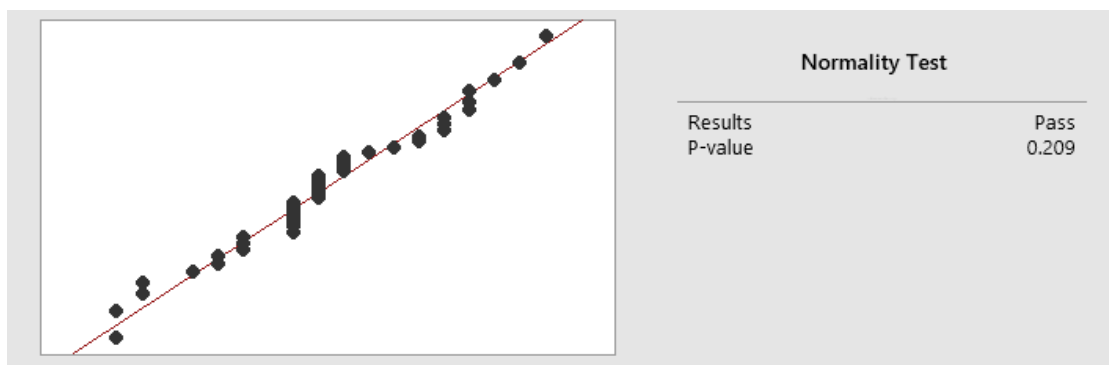


Fig. 4.45 - Teste de normalidade, ensaio de melhoria

Antes de se ter passado à análise de capacidade da variável em estudo, foi importante tecer algumas considerações, em relação à média e desvio padrão obtidos. Comparando com os dados anteriormente analisados, os resultados são à partida bastante satisfatórios, com os níveis dos fatores nos valores ótimos identificados, obtém-se uma média global de 93.37mg, ao ser comparada com o valor da média *spider 4* obtida antes da introdução destes níveis que era de 97.08mg, é claro que se aproxima do valor nominal da especificação, 90mg. Quanto ao desvio padrão global, constatou-se que diminuiu bastante, apesar da dimensão da amostra recolhida com os níveis ótimos ser bastante menor, do valor anterior de 11mg para 4.35mg.

Análise de capacidade

Com o teste de normalidade, concluiu-se com uma confiança de 95% que os dados eram normais, e assim, foi calculado o índice de capacidade, C_p e de capacidade potencial do processo, C_{pk} com as equações 16 e 17, recorrendo-se ao software Minitab. O C_{pk} foi posteriormente traduzido no nível sigma correspondente e no número de defeitos por milhão de oportunidades (DPMO).

O índice de capacidade potencial obtido foi de 2.08, tendo-se concluído que o processo era capaz, atingindo-se assim um dos objetivos definidos anteriormente, aumentar a capacidade do processo de aplicação de composto vedante na linha PM1 para valor acima de 1.33.

O valor de \widehat{C}_{pk} foi também superior ao objetivo traçado de 1.33, tendo-se obtido 1.84 para o índice de capacidade do processo, diminuindo-se consideravelmente a dispersão como se previa pelo valor do desvio padrão. Comparando os valores de $(\widehat{C}_{pk})_I$ e $(\widehat{C}_{pk})_S$, 2.32 e 1.84, respetivamente, pôde-se afirmar que o processo não se encontrava centrado. A figura 4.46 mostra-nos que apesar do processo não estar centrado, estar desviado para a direita do valor objetivo, não há esboços a serem produzidos com valores acima ou abaixo dos limites de especificação.

CAPÍTULO 4 – CASO DE ESTUDO

Adicionalmente, se todas as oscilações e desvios do processo forem eliminados, é possível chegar à capacidade potencial apresentada na figura 4.46 a tracejado.

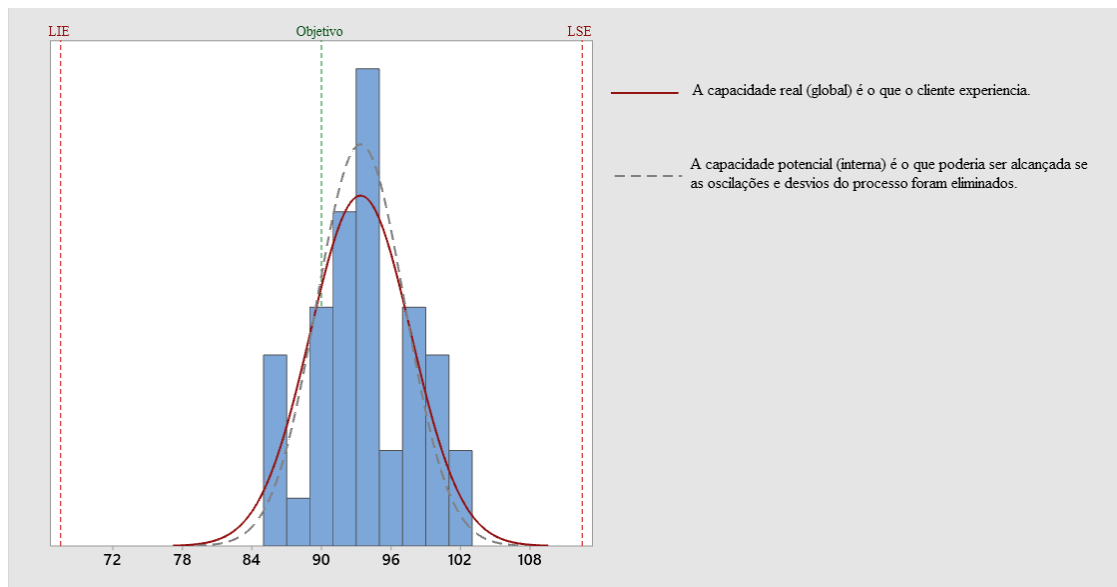


Fig. 4.46 - Histograma resultados ensaio de melhoria, capacidade real e potencial

Quanto ao nível sigma, como se confirmou a normalidade dos dados, basta multiplicar o Cpk obtido por 3, obtendo-se o valor de 5.52 que corresponde a 29.66 defeitos por cada milhão de oportunidades.

4.4.4. Quantificação das melhorias

É importante analisar as melhorias obtidas comparando o “Antes” e o “Depois” da sua implementação, na tabela 4.18, apresentam-se as métricas de desempenho utilizadas, calculadas na fase *Measure*, antes da introdução dos níveis ótimos e as obtidas com o ensaio de melhoria.

Tabela 4.18 – Comparação das métricas, Antes-Depois

| | \widehat{C}_p | $(\widehat{C}_{pk})_I$ | $(\widehat{C}_{pk})_S$ | \widehat{C}_{pk} | Nível sigma | DPMO |
|--------|-----------------|------------------------|------------------------|--------------------|-------------|---------|
| Antes | 0.79 | 1.04 | 0.54 | 0.54 | 1.62 | 452 256 |
| Depois | 1.84 | 2.32 | 1.84 | 1.84 | 5.52 | 29.66 |

Verificou-se que os resultados obtidos com os níveis ótimos foram muito satisfatórios, o valor de Cpk obtido, objetivo principal do projeto que se revelou acima do mesmo.

De salientar a redução do desperdício concretizada na métrica DPMO, antes da implementação dos níveis ótimos, por cada milhão de esboços produzidos na linha PM1, 452 256 eram não conformes, com a pressão de 1.02 bar, 35 cliques e um ajuste de 12 mm obteve-se um valor de 29.66

CAPÍTULO 4 – CASO DE ESTUDO

esboços não conformes, isto é, os esboços entregues ao cliente estarão na sua esmagadora maioria com o peso de composto vedante correto.

É importante referir que o DPMO calculado tem como foco de análise o peso de composto vedante aplicada, no entanto, no momento de análise, não existia na empresa um sistema que rejeitasse os esboços com um peso fora dos limites de especificação, esta análise era apenas feita pelas câmaras de visão.

Não obstante, cada esboço produzido na empresa tem um custo de 0.04€, sendo que antes das melhorias os esboços não conformes representavam 18 090.24€ por cada milhão de esboços produzidos, após as melhorias, representam apenas aproximadamente 1,19€. Constatou-se assim, uma grande redução dos custos de não qualidade.

Os resultados obtidos com o ensaio de melhoria foram muito satisfatórios, passando-se agora para a sua implementação à escala real. Para isso é necessário o apoio dos *stakeholders* do projeto, que pela *Stakeholder Analysis* conduzida na fase *Define*, concluiu-se quais os mais determinantes para a implementação das melhorias.

Após a consulta dos *Stakeholders*, as medidas foram recebidas com entusiasmo e implementadas na empresa.

Irá ser realizado um desenho de experiências para cada uma das *spiders* em falta, as *spiders* 1, 2 e 3 à semelhança do realizado na *spider* 4, encontrando-se valores ótimos para os fatores que influenciam a variável resposta, o peso de composto vedante em cada esboço.

Tollgate da fase Improve

À semelhança das fases anteriores, para dar como concluída a fase *Improve*, a equipa de melhoria reuniu-se para dar resposta a uma série de questões.

A equipa concordou que a documentação de como foi obtida a solução para o problema era adequada e que os resultados do ensaio de melhoria foram muito satisfatórios. Os níveis ótimos encontrados serão introduzidos na *spider* 4 e será nestes que esta irá funcionar. Adicionalmente, o processo será repetido para as outras *spider* no que diz respeito à busca e implementação de níveis ótimos.

No que diz respeito ao *timing* do projeto, concordou-se que este está a cumprir tanto com os prazos como com os objetivos, estando em condições de se prosseguir para a fase seguinte.

4.5. Fase Control

Depois de se ter comprovado que as melhorias sugeridas podiam de facto trazer benefícios para a empresa, foi determinante traçar um plano de controlo para assegurar que as melhorias implementadas permanecessem ativas na empresa. A fase de controlo irá compreender apenas o plano de controlo e sugestões de trabalhos futuros a serem desenvolvidos como mostra a figura 4.47.

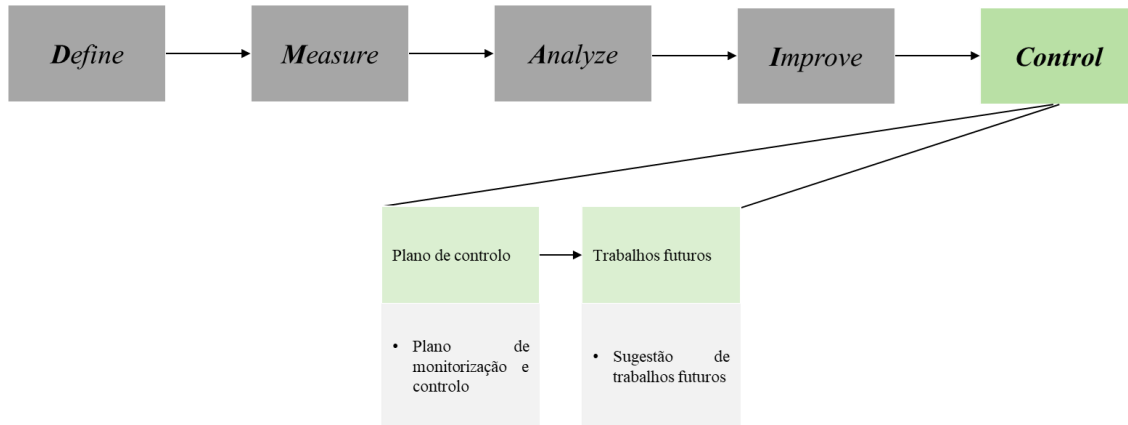


Fig. 4.47 - Fase Control, passos e ferramentas

4.5.1. Plano de controlo

O seguimento dos processos a longo prazo é determinante para o sucesso de qualquer projeto de melhoria. É por isso importante definir que atividades implementar para que a melhoria alcançada com este projeto perdure.

1. Verificação do cumprimento dos procedimentos

Com a revisão do procedimento de pesagem virá uma mudança no dia a dia dos operadores de qualidade. Esta mudança pode tornar-se mais complicada de interiorizar devido aos hábitos adquiridos ao longo de anos e anos de trabalho. Posto isto, deve ser observado pelo *WCP Quality Engineer* o cumprimento deste procedimento, nomeadamente o fecho das portas aquando da utilização da balança de precisão.

2. Análises estatísticas

No que toca às análises estatísticas conduzidas na empresa, sugere-se que seja realizada uma análise mais profunda de cada processo, nomeadamente considerando-se a autocorrelação dos dados quando esta existe, e os limites de controlo ao invés dos de especificação nas cartas de controlo.

Para isto, sugere-se a formação dos operadores responsáveis pelo tratamento dos dados estatísticos para que os processos possam ser analisados corretamente.

3. Manutenção

Por último, talvez a mais importante ação de controlo será a existência de uma manutenção ativa na empresa, nomeadamente a implementação de um plano de manutenção preventiva dedicado às *spiders* da linha PM1. Isto é, foram definidos níveis ótimos para a aplicação de composto vedante na *spider* 4, no entanto, se a esta *spider* continuar a deteriorar-se, estes níveis passarão num futuro próximo a obsoletos, sendo de pouco em pouco tempo necessário um novo DOE para se manter o nível sigma atingido com este estudo.

4.5.2. Trabalhos futuros

A grande chave do crescimento de uma empresa é a melhoria contínua, a busca constante de novas tecnologias que aumentem o controlo sobre os processos, e que o tornem dinâmico e em tempo real.

Posto isto, uma ideia sobre o caminho a seguir é a implementação de duas balanças na linha, que pesem automaticamente todos os tampos produzidos antes e após a deposição de composto vedante, assim, os dados disponíveis para analisar o processo seriam bastante mais reais e, se interligados com um sistema de autocontrolo que, ou totalmente autónomo ou com assistência do mecânico da linha, alertasse para variações indesejadas no processo de aplicação de composto vedante. A presença de uma inteligência artificial, *self-learning* seria uma grande vantagem pois com o tempo iria conseguir controlar perfeitamente o processo, aprendendo a ajustar os níveis de pressão, cliques e ajuste das *spiders* para se obter o valor pretendido de composto vedante em cada tampo. Esta inteligência artificial poderia ainda intersetar o peso do composto vedante com os defeitos de visão, aprendendo a diminuí-los.

Além disto, é importante atentar às causas identificadas no diagrama de Ishikawa que não foram objeto de ações de melhoria neste projeto. São feitas sugestões de uma forma global de como podem ser endereçadas:

- Composto vedante em más condições – inspeção periódica do composto vedante.
- Folga nos braços da *spider* – implementação de plano de manutenção corretiva e preventiva periódica.
- Desgaste do bico de aplicação – implementação de plano de manutenção corretiva e preventiva periódica.
- Problemas à retirada do bico de aplicação para limpeza – criação de um procedimento de retirada e limpeza do bico de aplicação.
- Temperatura ambiente variável – manutenção às instalações da fábrica, de forma a diminuir as amplitudes térmicas dentro da mesma.

CAPÍTULO 4 – CASO DE ESTUDO

É importante também referir que seria de elevado valor para a empresa a realização de um desenho de experiências para as *spiders* que ficaram por analisar na linha PM1, as *spiders* 1, 2 e 3.



CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES GERAIS

Terminadas a revisão bibliográfica e a implementação prática do Seis Sigma por via de um ciclo DMAIC e as ferramentas subjacentes, foram retiradas as devidas conclusões em relação ao trabalho desenvolvido.

5.1 Conclusões do Estudo

O estudo desenvolvido nesta dissertação corrobora a relevância e aplicabilidade do Seis Sigma como estratégia de melhoria. Com base em dados e factos foi possível melhorar o processo de aplicação de composto vedante numa indústria de produção de embalagens alimentares.

Por via do ciclo de melhoria DMAIC, este estudo foi conduzido criteriosamente e atingiu resultados bastante interessantes e satisfatórios. As diferentes fases ajudaram a construir um raciocínio lógico através da aplicação de métodos, técnicas e ferramentas para se chegar ao resultado pretendido.

O projeto desenvolvido inserido no programa *Spoilage Reduction* deu continuidade à filosofia de melhoria, Seis Sigma que já existia na empresa, tendo trazido diversos benefícios. Nomeadamente através da sugestão de revisão do procedimento de pesagem dos esboços, da sugestão de revisão das cartas de controlo utilizadas na empresa, da introdução da equipa de melhoria à autocorrelação dos dados, do estado de degradação da pistola da *spider 4*, e por último ao foco do projeto, a melhoria da capacidade do processo de aplicação de composto vedante de 0.54 para 1.84, correspondendo ao aumento do nível sigma de 1.62 para 5.52 e conseqüente redução de esboços defeituosos. Importa referir que as melhorias alcançadas devem ser mantidas, sendo este o grande objetivo da fase *Control* do ciclo de melhoria.

Posto isto, conclui-se que os objetivos do projeto de melhoria foram parcialmente atingidos, isto é, de facto verificou-se a melhoria da capacidade do processo de aplicação de composto vedante em tampos de latas de atum para um valor acima de 1.33 bem como a redução do desperdício através da definição de níveis ótimos para os parâmetros que influenciam a característica da

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

qualidade estudada. No entanto, com o horizonte temporal definido para o projeto, apenas para uma das *spiders*, a *spider 4*. Com a melhoria desta *spider*, foi atingido o segundo objetivo do estudo, a redução do desperdício, por cada milhão de esboços produzidos sejam poupados aproximadamente 18 000€ em custos de não qualidade.

A título de conclusão importa fazer mais uma observação. Como referido no estudo, os níveis obtidos como ótimos foram os níveis máximos experimentados para cada um dos fatores, estando estes muito longe dos recomendados pelos fabricantes das máquinas. Acontece que, a falta de manutenção existente faz com que os mecânicos de linha estejam permanentemente a ajustar os parâmetros das *spiders* para que o produto final seja conforme, “escondendo” assim o verdadeiro problema, a falta de manutenção.

A empresa pretende que os parâmetros sejam ajustados o mínimo de vezes possível, para que a variabilidade da quantidade de composto vedante aplicada seja mínima. Isto só se poderá verificar com uma profunda manutenção nas máquinas e como dito na fase *Control*, com a implementação de um programa de manutenção preventiva.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Achterkamp, M. C., & Vos, J. F. J. (2008). Investigating the use of the stakeholder notion in project management literature, a meta-analysis. *International Journal of Project Management*, 26(7), 749–757. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2007.10.001>

Aflaki, S., & Memarzadeh, M. (2011). Using two-way ANOVA and hypothesis test in evaluating crumb rubber modification (CRM) agitation effects on rheological properties of bitumen. *Construction and Building Materials*, 25(4), 2094–2106. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.11.028>

Frank T. Anbari, & Young Hoon Kwak. (2004). Success Factors in Managing Six Sigma Projects. Project Management Institute Research Conference, London, UK.

Anhøj, J. (2015). Diagnostic Value of Run Chart Analysis: Using Likelihood Ratios to Compare Run Chart Rules on Simulated Data Series. *PLOS ONE*, 10(3), e0121349. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0121349>

Antony, J., & Banuelas, R. (2002). Key ingredients for the effective implementation of Six Sigma program. *Measuring Business Excellence*, 6(4), 20–27. <https://doi.org/10.1108/13683040210451679>

Antony, J., Gijo, E. V., & Childe, S. J. (2012). Case study in Six Sigma methodology: Manufacturing quality improvement and guidance for managers. *Production Planning & Control*, 23(8), 624–640. <https://doi.org/10.1080/09537287.2011.576404>

Arcidiacono, G., & Nuzzi, S. (2017). *A Review of the Fundamentals on Process Capability, Process Performance, and Process Sigma, and an Introduction to Process Sigma Split*. 12(14), 15.

Ashok Sarkar, S., Ranjan Mukhopadhyay, A., & Ghosh, S. K. (2013). Root cause analysis, Lean Six Sigma and test of hypothesis. *The TQM Journal*, 25(2), 170–185. <https://doi.org/10.1108/17542731311299609>

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Banuelas Coronado, R., & Antony, J. (2002). Critical success factors for the successful implementation of six sigma projects in organisations. *The TQM Magazine*, 14(2), 92–99. <https://doi.org/10.1108/09544780210416702>

Bhuiyan, N., & Baghel, A. (2005). An overview of continuous improvement: From the past to the present. *Management Decision*, 43(5), 761–771. <https://doi.org/10.1108/00251740510597761>

Brugha, R., & Varvasovszky, Z. (2000). Stakeholder analysis: A review. *Health Policy and Planning*, 15(3), 239–246. <https://doi.org/10.1093/heapol/15.3.239>

Caffyn, S. (1999). Development of a continuous improvement self-assessment tool. *International Journal of Operations & Production Management*, 19(11), 1138–1153. <https://doi.org/10.1108/01443579910291050>

Carboneau, C., Bengé, E., Jaco, M. T., & Robinson, M. (2010). A Lean Six Sigma Team Increases Hand Hygiene Compliance and Reduces Hospital-Acquired MRSA Infections by 51%. *Journal for Healthcare Quality*, 32(4), 61–70. <https://doi.org/10.1111/j.1945-1474.2009.00074.x>

Caulcutt, R. (1996). Statistical process control (SPC). *Statistical Process Control*, 16(4), 7. <http://dx.doi.org/10.1108/01445159610150972>

Caulcutt, R. (2001). Why is Six Sigma so successful? *Journal of Applied Statistics*, 28(3–4), 301–306. <https://doi.org/10.1080/02664760120034045>

Cavazzuti, M. (2013). Design of Experiments. Em M. Cavazzuti, *Optimization Methods* (pp. 13–42). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-31187-1_2

Chen, Y., Corr, D. J., & Durango-Cohen, P. L. (2014). Analysis of common-cause and special-cause variation in the deterioration of transportation infrastructure: A field application of statistical process control for structural health monitoring. *Transportation Research Part B: Methodological*, 59, 96–116. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2013.11.002>

Chiarini, A. (2011). Japanese total quality control, TQM, Deming's system of profound knowledge, BPR, Lean and Six Sigma: Comparison and discussion. *International Journal of Lean Six Sigma*, 2(4), 332–355. <https://doi.org/10.1108/20401461111189425>

Ciaramella, A., G. C. A. Cimino, M., Lazzarini, B., & Marcelloni, F. (2009). USING BPMN AND TRACING FOR RAPID BUSINESS PROCESS PROTOTYPING ENVIRONMENTS: *Proceedings of the 11th International Conference on Enterprise Information*, 206–212. <https://doi.org/10.5220/0002005002060212>

Crosby, P. B. (1980). *Quality is free: The art of making quality certain* (1.^a ed.). McGraw-Hill.

Curry, A., & Kadasah, N. (2002). Focusing on key elements of TQM – evaluation for sustainability. *The TQM Magazine*, 14(4), 207–216. <https://doi.org/10.1108/09544780210429816>

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Dahlgaard, J. J., & Mi Dahlgaard-Park, S. (2006). Lean production, six sigma quality, TQM and company culture. *The TQM Magazine*, 18(3), 263–281. <https://doi.org/10.1108/09544780610659998>
- Drohmeretski, E., Gouvea da Costa, S. E., Pinheiro de Lima, E., & Garbuio, P. A. da R. (2014). Lean, Six Sigma and Lean Six Sigma: An analysis based on operations strategy. *International Journal of Production Research*, 52(3), 804–824. <https://doi.org/10.1080/00207543.2013.842015>
- Eckes, G. (2001). *The six sigma revolution: How General Electric and others turned process into profits*. John Wiley.
- Feigenbaum, A. V. (1991). *Total Quality Control* (3.^a ed.). McGraw-Hill Companies.
- Ge, Z., & Song, Z. (2013). *Multivariate Statistical Process Control*. Springer London. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4513-4>
- Gijo, E. V., Scaria, J., & Antony, J. (2011). Application of six sigma methodology to reduce defects of a grinding process. *Quality and Reliability Engineering International*, 27(8), 1221–1234. <https://doi.org/10.1002/qre.1212>
- Goh, T. N., & Xie, M. (2004). Improving on the six sigma paradigm. *The TQM Magazine*, 16(4), 235–240. <https://doi.org/10.1108/09544780410541882>
- Hakimi, S., Zahraee, S. M., & Mohd Rohani, J. (2018). Application of Six Sigma DMAIC methodology in plain yogurt production process. *International Journal of Lean Six Sigma*, 9(4), 562–578. <https://doi.org/10.1108/IJLSS-11-2016-0069>
- Hellsten, U., & Klefsjö, B. (2000). TQM as a management system consisting of values, techniques and tools. *The TQM Magazine*, 12(4), 13.
- Holtz, R., & Campbell, P. (2003). Six Sigma: Its implementation in Ford's facility management and maintenance functions. *Journal of Facilities Management*, 2(4), 320–329. <https://doi.org/10.1108/14725960410808285>
- Hung, H.-C., & Sung, M.-H. (2011). Applying six sigma to manufacturing processes in the food industry to reduce quality cost. *Sci. Res. Essays*, 12.
- Ilzarbe, L., Álvarez, M. J., Viles, E., & Tanco, M. (2008). Practical applications of design of experiments in the field of engineering: A bibliographical review. *Quality and Reliability Engineering International*, 24(4), 417–428. <https://doi.org/10.1002/qre.909>
- IPQ. (2008). *Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM) – Guia ISO/IEC 99:2007* (3.^a ed.). Ministério da Economia e da Inovação.
- Ismail Salaheldin, S. (2003). The implementation of TQM strategy in Egypt: A field-force analysis. *The TQM Magazine*, 15(4), 266–274. <https://doi.org/10.1108/09544780310486173>

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Jaeger, M., & Adair, D. (2016). Perception of TQM benefits, practices and obstacles: The case of project managers and quality management representatives in Kuwait. *The TQM Journal*, 28(2), 317–336. <https://doi.org/10.1108/TQM-10-2014-0091>

Jirasukprasert, P., Arturo Garza-Reyes, J., Kumar, V., & K. Lim, M. (2014). A Six Sigma and DMAIC application for the reduction of defects in a rubber gloves manufacturing process. *International Journal of Lean Six Sigma*, 5(1), 2–21. <https://doi.org/10.1108/IJLSS-03-2013-0020>

Joiner, T. A. (2007). Total quality management and performance: The role of organization support and co-worker support. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 24(6), 617–627. <https://doi.org/10.1108/02656710710757808>

Juran, J. M., & Godfrey, A. B. (Eds.). (1998). *Juran's quality handbook* (5. ed). McGraw-Hill.

Kalenkova, A., Burattin, A., de Leoni, M., van der Aalst, W., & Sperduti, A. (2019). Discovering high-level BPMN process models from event data. *Business Process Management Journal*, 25(5), 995–1019. <https://doi.org/10.1108/BPMJ-02-2018-0051>

Kim, T. K. (2017). *Understanding one-way ANOVA using conceptual figures*. 70(1), 5.

Kiran, D. R. (2017a). Seven Traditional Tools of TQM. Em *Total Quality Management* (pp. 271–290). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811035-5.00020-9>

Kiran, D. R. (2017b). The Seven Modern Tools of TQM. Em *Total Quality Management* (pp. 291–311). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811035-5.00021-0>

Koutras, M. V., Bersimis, S., & Maravelakis, P. E. (2007). Statistical Process Control using Shewhart Control Charts with Supplementary Runs Rules. *Methodology and Computing in Applied Probability*, 9(2), 207–224. <https://doi.org/10.1007/s11009-007-9016-8>

Kubiak, T. M., & Benbow, D. W. (2009). *The certified six sigma black belt handbook* (2nd ed). ASQ Quality Press.

Kwak, Y. H., & Anbari, F. T. (2006). Benefits, obstacles, and future of six sigma approach. *Technovation*, 26(5–6), 708–715. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2004.10.003>

Lizarelli, F. L., Toledo, J. C. de, & Alliprandini, D. H. (2019). Relationship between continuous improvement and innovation performance: An empirical study in Brazilian manufacturing companies. *Total Quality Management & Business Excellence*, 1–24. <https://doi.org/10.1080/14783363.2019.1653178>

Macpherson, W. G., Lockhart, J. C., Kavan, H., & Iaquinto, A. L. (2015). Kaizen: A Japanese philosophy and system for business excellence. *Journal of Business Strategy*, 36(5), 3–9. <https://doi.org/10.1108/JBS-07-2014-0083>

Marques, P. A., & Requeijo, J. G. (2009). *SIPOC: A Six Sigma Tool Helping on ISO 9000 Quality Management Systems*. 10.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Marriott, B., Arturo Garza-Reyes, J., Soriano-Meier, H., & Antony, J. (2013). An integrated methodology to prioritise improvement initiatives in low volume-high integrity product manufacturing organisations. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 24(2), 197–217. <https://doi.org/10.1108/17410381311292304>
- McCarty, T., Bremer, M., Daniels, L., & Gupta, P. (2005). *The Six Sigma Black Belt Handbook* (1.^a ed.). McGraw-Hill Education.
- McKeever, C. (2006). *The Project Charter – Blueprint for Success*. 4.
- Mishra, P., & Kumar Sharma, R. (2014). A hybrid framework based on SIPOC and Six Sigma DMAIC for improving process dimensions in supply chain network. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 31(5), 522–546. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-06-2012-0089>
- Montgomery, D. C. (2009). *Introduction to Statistical Quality Control, Sixth Edition* (6.^a ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Montgomery, D. C. (2013). *Design and analysis of experiments* (8. ed.). Wiley.
- Pakdil, F. (2020). *Six Sigma for Students: A Problem-Solving Methodology*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-40709-4>
- Pan, J.-N. (2006). Evaluating the Gauge Repeatability and Reproducibility for Different Industries. *Quality & Quantity*, 40(4), 499–518. <https://doi.org/10.1007/s11135-005-1100-y>
- Pande, P., & Holpp, L. (2001). *What is Six Sigma?* McGraw-Hill.
- Parast, M. M. (2011). The effect of Six Sigma projects on innovation and firm performance. *International Journal of Project Management*, 29(1), 45–55. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2010.01.006>
- Park, S. H. (2003). *Six Sigma for quality and productivity promotion*. Asian Productivity Organization.
- Pereira, Z. L., & Requeijo, J. G. (2012). *Planeamento e Controlo Estatístico de Processos* (2.^a ed.). FFCT - Fundação da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa.
- Perla, R. J., Provost, L. P., & Murray, S. K. (2011). The run chart: A simple analytical tool for learning from variation in healthcare processes. *BMJ Quality & Safety*, 20(1), 46–51. <https://doi.org/10.1136/bmjqs.2009.037895>
- Pulakanam, V. (2012). Costs and Savings of Six Sigma Programs: An Empirical Study. *Quality Management Journal*, 19(4), 39–54. <https://doi.org/10.1080/10686967.2012.11918082>
- Pyzdek, T., & Keller, P. A. (2010). *Six Sigma Handbook (3rd Edition)*. McGraw-Hill Professional Publishing. <http://public.ebookcentral.proquest.com/choice/publicfullrecord.aspx?p=4657706>

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Radawski, D. (1999). Continuous Quality Improvement: Origins, Concepts, Problems, and Applications: *The Journal of Physician Assistant Education*, 10(1), 12–16. <https://doi.org/10.1097/01367895-199910010-00002>
- Ranjan Senapati, N. (2004). Six Sigma: Myths and realities. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 21(6), 683–690. <https://doi.org/10.1108/02656710410542070>
- Recker, J. (2010). Opportunities and constraints: The current struggle with BPMN. *Business Process Management Journal*, 16(1), 181–201. <https://doi.org/10.1108/14637151011018001>
- Rodgers, M., & Oppenheim, R. (2019). Ishikawa diagrams and Bayesian belief networks for continuous improvement applications. *The TQM Journal*, 31(3), 294–318. <https://doi.org/10.1108/TQM-11-2018-0184>
- Runje, B., Novak, A. H., & Razumić, A. (2017). *Measurement system analysis in production process*. 4.
- Schwering, R. E. (2003). Focusing leadership through force field analysis: New variations on a venerable planning tool. *Leadership & Organization Development Journal*, 24(7), 361–370. <https://doi.org/10.1108/01437730310498587>
- Sehgal, S., & Kaushish, D. (2013). *A State of Art of Review of DMAIC Approach*. 4(8), 3.
- Senol, S. (2004). Measurement system analysis using designed experiments with minimum α - β Risks and n. *Measurement*, 36(2), 131–141. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2004.05.001>
- Shankar, R. (2009). *Process improvement using Six Sigma: A DMAIC guide*. ASQ Quality Press.
- Somerville, S. E., & Montgomery, D. C. (1996). PROCESS CAPABILITY INDICES AND NON-NORMAL DISTRIBUTIONS. *Quality Engineering*, 9(2), 305–316. <https://doi.org/10.1080/08982119608919047>
- Srinivasan, K., Muthu, S., Devadasan, S. R., & Sugumaran, C. (2016). *Six Sigma through DMAIC phases: A literature review*. 22. <https://doi.org/10.1504/ijpqm.2016.074462>
- Stamatis, D. H. (2004). *Six Sigma fundamentals: A complete guide to the system, methods and tools*. Productivity Press.
- Stiehl, V. (2014). *Process-Driven Applications with BPMN*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-07218-0>
- Szeto, A. Y. T., & Tsang, A. H. C. (2005). Antecedents to successful implementation of Six Sigma. *International Journal of Six Sigma and Competitive Advantage*, 1(3), 307. <https://doi.org/10.1504/IJSSCA.2005.008094>

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Tarí, J. J., & Sabater, V. (2004). Quality tools and techniques: Are they necessary for quality management? *International Journal of Production Economics*, 92(3), 267–280. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2003.10.018>
- Thomas, J. (1985). Force field analysis: A new way to evaluate your strategy. *Long Range Planning*, 18(6), 54–59. [https://doi.org/10.1016/0024-6301\(85\)90064-0](https://doi.org/10.1016/0024-6301(85)90064-0)
- Toledo, M. (2003). *B-S line of balances • AB-S • PB-S (Version as from October 2003)*.
- Vilasini, N., Neitzert, T., & Rotimi, J. (2014). Developing and evaluating a framework for process improvement in an alliance project: A New Zealand case study. *Construction Management and Economics*, 32(6), 625–640. <https://doi.org/10.1080/01446193.2013.874565>
- Voehl, F., Harrington, H. J., Mignosa, C., & Charron, R. (2013). *The Lean Six Sigma Black Belt Handbook: Tools and Methods for Process Acceleration* (0 ed.). Productivity Press. <https://doi.org/10.1201/b15163>
- Weissman, S. A., & Anderson, N. G. (2015). Design of Experiments (DoE) and Process Optimization. A Review of Recent Publications. *Organic Process Research & Development*, 19(11), 1605–1633. <https://doi.org/10.1021/op500169m>
- Xie, M., Goh, T. N., & Kuralmani, V. (2002). *Statistical Models and Control Charts for High-Quality Processes*. Springer US. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1015-4>
- Yeung, S. M. C. (2009). Using Six Sigma – SIPOC for customer satisfaction. *International Journal of Six Sigma and Competitive Advantage*, 5(4), 312. <https://doi.org/10.1504/IJSSCA.2009.029912>
- Yusof, S. M., & Aspinwall, E. (2000). TQM implementation issues: Review and case study. *International Journal of Operations & Production Management*, 20(6), 634–655. <https://doi.org/10.1108/01443570010321595>
- Zarour, K., Benmerzoug, D., Guermouche, N., & Drira, K. (2019). A systematic literature review on BPMN extensions. *Business Process Management Journal*, 26(6), 1473–1503. <https://doi.org/10.1108/BPMJ-01-2019-0040>

ANEXOS

Anexo A: BPMN da linha PM1

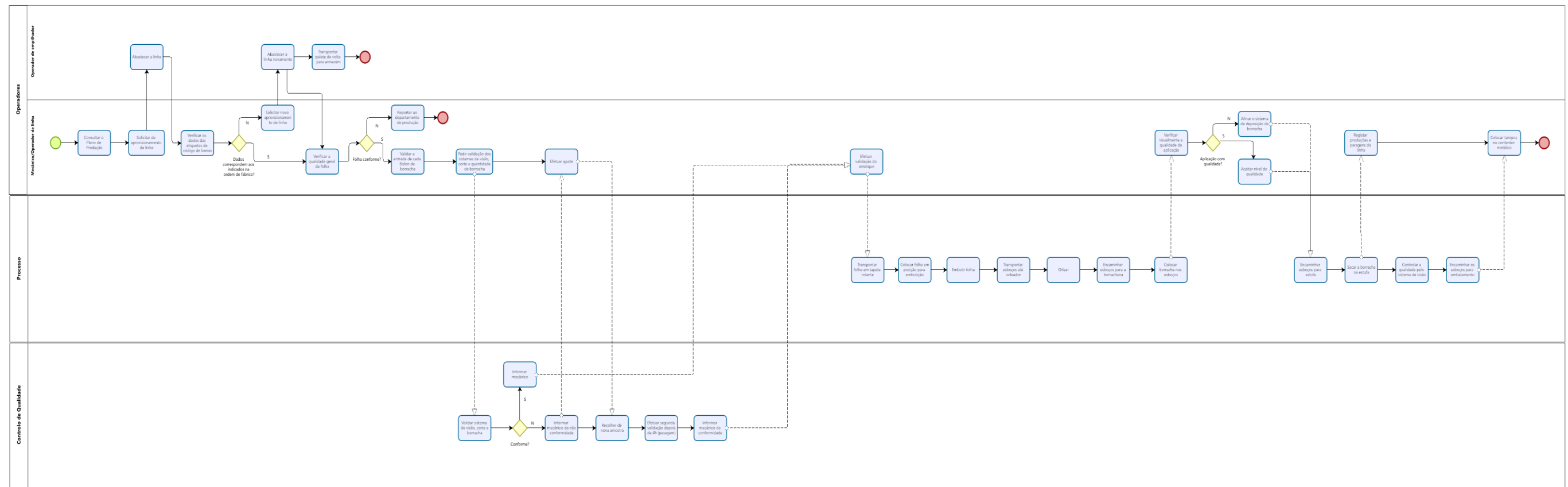


Fig. A. 1 - BPMN da linha PM1

Anexo B: Certificado de Calibração da balança Metler Toledo PB 153 – S



Signature Not Verified
 Digitally signed by
 LABMETRO Online
 Date: 2020.04.08
 09:29:29 +01:00
 Reason: Documento
 aprovado electronicamente

Laboratório de Calibração em
 Metrologia Física



Instalações de
 Oeiras

Certificado de Calibração

Data de emissão: 03/04/2020

Certificado nº CMAS 1318/20

Página 1 de 3

| | | | | |
|-------------|------------|----------------|-------------------------|--------------|
| Equipamento | Balança | | Intervalo de indicação: | 0,02 a 151 g |
| | Marca: | Mettler Toledo | Indicação: | Digital |
| | Modelo: | PB 153-S | Resolução: | 0,001 g |
| | Nº ident.: | C076 | | |
| | Nº série: | 1126102066 | | |

Cliente **CROWN CORK & SEAL DE PORTUGAL EMBALAGENS SA**
 SITIO DAS CARDEIRAS
 2890-159 ALCOCHETE

Data de calibração 02/04/2020

Condições ambientais Temperatura: 15,9 °C Humidade relativa: 63,3 %

Procedimento PO.M - DM / MAS 001 Edição M Rev. 02

Rastreabilidade
 Conjunto de massas padrão LM49, classe E1, rastreado à Kern

Local de ensaio Instalações do cliente

Estado do equipamento Não foram identificados aspectos relevantes que afectassem os resultados.

Resultados Encontram-se apresentados na(s) folha(s) seguinte(s).
 "A incerteza expandida apresentada, está expressa pela incerteza padrão multiplicada pelo factor de expansão k, o qual para uma distribuição normal corresponde a uma probabilidade de expansão de aproximadamente 95 %. A incerteza foi calculada de acordo com o documento EA-4/02."

Calibrado por

Ricardo Santos

Responsável pela Validação

Susana Cabecinhas (Técnico)

DM/064.2/07

instituto de soldadura
 e qualidade

Lisboa: Av. Prof. Cavaco Silva, 33 • Taguspark • 2740-120 Oeiras • Portugal
 Tels.: +351 21 422 90 34/ 81 86/90 20 • Fax: +351 21 422 81 02

labmetro@isq.pt

http://metrologia.isq.pt

Porto: Rua do Mirante, 258 • 4415-491 Grijó • Portugal
 Tels.: +351 22 747 19 10/50 • Fax: +351 22 747 19 19/745 57 78

O IPAC é signatário do Acordo de Reconhecimento Mútuo da EA e do ILAC para ensaios, calibrações e inspeções. IPAC is a signatory to the EA MLA and ILAC MRA for testing, calibration and inspection. Este documento só pode ser reproduzido na íntegra, excepto quando autorizado por escrito do ISQ. This document may not be reproduced other than in full, except with the prior written approval of the issuing laboratory.

Fig. B. 1 - Página 1 do Certificado de Calibração da balança Metler Toledo PB 153 - S



Laboratório de Calibração em
Metrologia Física



Certificado de Calibração

Certificado nº CMAS 1318/20

Página 2 de 3

Ensaio de linearidade:

Valores antes de ajuste

| Valor referência (g) | Indicação (g) | Erro (g) | Incerteza expandida (g) | Factor de expansão k | Gr. de liberdade V _{ef} |
|-------------------------|------------------|-------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------------------|
| 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,00092 | 2,02 | 106 |
| 0,020 | 0,020 | 0,000 | 0,00092 | 2,02 | 107 |
| 1,000 | 1,000 | 0,000 | 0,00093 | 2,02 | 110 |
| 50,000 | 49,993 | -0,007 | 0,00099 | 2,02 | 143 |
| 100,000 | 99,988 | -0,012 | 0,0011 | 2,01 | 221 |
| 151,000 | 150,982 | -0,018 | 0,0014 | 2,00 | > 500 |

Foi efectuado um ajuste à balança segundo as instruções do fabricante.

A massa utilizada no ajuste foi uma massa externa do Labmetro.

Obs: O ensaio de linearidade é realizado de forma descontinua e por ordem crescente de massa.



Calibrado por

Ricardo Santos

Responsável pela Validação

Susana Cabecinhas (Técnico)

DM/064-2/07

**instituto de soldadura
e qualidade**

Lisboa: Av. Prof. Cavaco Silva, 33 • Taguspark • 2740-120 Oeiras • Portugal
Tels.: +351 21 422 90 34/81 86/90 20 • Fax: +351 21 422 81 02

labmetro@isq.pt

<http://metrologia.isq.pt>

Porto: Rua do Mirante, 258 • 4415-491 Grijó • Portugal
Tels.: +351 22 747 19 10/50 • Fax: +351 22 747 19 19/745 57 78

O IPAC é signatário do Acordo de Reconhecimento Mútuo da EA e do ILAC para ensaios, calibrações e inspeções. IPAC is a signatory to the EA MLA and ILAC MRA for testing, calibration and inspection. Este documento só pode ser reproduzido na íntegra, excepto quando autorização por escrito do ISQ. This document may not be reproduced other than in full, except with the prior written approval of the issuing laboratory.

Fig. B. 2 - Página 2 do Certificado de Calibração da balança Metler Toledo PB 153 - S



Laboratório de Calibração em Metrologia Física



Certificado de Calibração

Certificado nº CMAS 1318/20

Página 3 de 3

Ensaio de linearidade:

Valores depois de ajuste

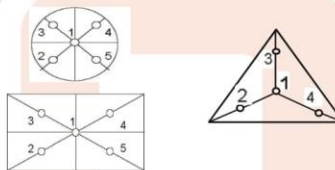
| Valor referência (g) | Indicação (g) | Erro (g) | Incerteza expandida (g) | Factor de expansão k | Gr. de liberdade ν_{ef} |
|----------------------|---------------|----------|-------------------------|----------------------|-----------------------------|
| 0,000 | 0,000 | 0,000 | 0,00092 | 2,02 | 106 |
| 0,020 | 0,020 | 0,000 | 0,00092 | 2,02 | 107 |
| 1,000 | 1,000 | 0,000 | 0,00093 | 2,02 | 110 |
| 50,000 | 50,000 | 0,000 | 0,00099 | 2,02 | 143 |
| 100,000 | 100,000 | 0,000 | 0,0011 | 2,01 | 221 |
| 151,000 | 151,000 | 0,000 | 0,0014 | 2,00 | > 500 |

Obs: O ensaio de linearidade é realizado de forma descontinua e por ordem crescente de massa.

Ensaio de excentricidade:

| Posição | Carga (g) | Indicação (g) |
|---------|-----------|---------------|
| Nº 1 | 100 | 100,000 |
| Nº 2 | 100 | 100,000 |
| Nº 3 | 100 | 100,000 |
| Nº 4 | 100 | 100,000 |
| Nº 5 | 100 | 100,000 |

Excentricidade máxima = 0,000 g



Ensaio de repetibilidade:

| Carga (g) | Indicação (g) | | | | | Desvio padrão (g) |
|-----------|---------------|---------|---------|---------|---------|-------------------|
| | Nº 1 | Nº 2 | Nº 3 | Nº 4 | Nº 5 | |
| 100 | 100,000 | 100,001 | 100,000 | 100,000 | 100,000 | 0,0004 |

Ensaio de reprodutibilidade:

Não aplicável

Qualquer ajuste não realizado da forma indicada, pode invalidar os resultados da calibração.

Calibrado por

Ricardo Santos

Responsável pela Validação

Susana Cabecinhas (Técnico)

DM/064-2/07

instituto de soldadura e qualidade

Lihoa: Av. Prof. Cavaco Silva, 33 • Taguspark • 2740-120 Oeiras • Portugal
Tels.: +351 21 422 90 34/81 86/90 20 • Fax: +351 21 422 81 02

labmetro@isq.pt

<http://metrologia.isq.pt>

Porto: Rua do Mirante, 258 • 4415-431 Grãojô • Portugal
Tels.: +351 22 747 19 10/50 • Fax: +351 22 747 19 19/745 57 78

O IPAC é signatário do Acordo de Reconhecimento Mútuo da EA e do ILAC para ensaios, calibrações e inspeções. IPAC is a signatory to the EA MLA and ILAC MRA for testing, calibration and inspection. Este documento só pode ser reproduzido na íntegra, excepto quando autorizado por escrito do ISQ. This document may not be reproduced other than in full, except with the prior written approval of the issuing laboratory.

Fig. B. 3 - Página 3 do Certificado de Calibração da balança Metler Toledo PB 153 - S

Anexo C: Folha de Registo do Estudo R&R

Tabela C. 1 - Folha de Registo do Estudo R&R

| Medição | Parte | Operador | Resposta | Medição | Parte | Operador | Resposta |
|---------|-------|------------|----------|---------|-------|------------|----------|
| 1 | 5 | Operador 1 | 12.017 | 31 | 2 | Operador 1 | 12.160 |
| 2 | 8 | Operador 1 | 12.212 | 32 | 1 | Operador 1 | 12.122 |
| 3 | 2 | Operador 1 | 12.158 | 33 | 9 | Operador 1 | 12.187 |
| 4 | 1 | Operador 1 | 12.128 | 34 | 7 | Operador 1 | 12.185 |
| 5 | 4 | Operador 1 | 11.995 | 35 | 10 | Operador 1 | 12.136 |
| 6 | 10 | Operador 1 | 12.126 | 36 | 5 | Operador 1 | 12.024 |
| 7 | 3 | Operador 1 | 12.132 | 37 | 3 | Operador 1 | 12.120 |
| 8 | 9 | Operador 1 | 12.188 | 38 | 4 | Operador 1 | 11.998 |
| 9 | 7 | Operador 1 | 12.187 | 39 | 8 | Operador 1 | 12.215 |
| 10 | 6 | Operador 1 | 12.198 | 40 | 6 | Operador 1 | 12.203 |
| 11 | 10 | Operador 2 | 12.136 | 41 | 10 | Operador 2 | 12.134 |
| 12 | 6 | Operador 2 | 12.205 | 42 | 4 | Operador 2 | 11.993 |
| 13 | 7 | Operador 2 | 12.187 | 43 | 3 | Operador 2 | 12.117 |
| 14 | 1 | Operador 2 | 12.125 | 44 | 1 | Operador 2 | 12.119 |
| 15 | 3 | Operador 2 | 12.122 | 45 | 8 | Operador 2 | 12.212 |
| 16 | 5 | Operador 2 | 12.025 | 46 | 9 | Operador 2 | 12.182 |
| 17 | 2 | Operador 2 | 12.162 | 47 | 6 | Operador 2 | 12.201 |
| 18 | 4 | Operador 2 | 12.000 | 48 | 7 | Operador 2 | 12.180 |
| 19 | 9 | Operador 2 | 12.189 | 49 | 5 | Operador 2 | 12.021 |
| 20 | 8 | Operador 2 | 12.218 | 50 | 2 | Operador 2 | 12.158 |
| 21 | 3 | Operador 3 | 12.118 | 51 | 6 | Operador 3 | 12.160 |
| 22 | 8 | Operador 3 | 12.212 | 52 | 2 | Operador 3 | 12.202 |
| 23 | 1 | Operador 3 | 12.120 | 53 | 8 | Operador 3 | 12.212 |
| 24 | 9 | Operador 3 | 12.183 | 54 | 1 | Operador 3 | 12.119 |
| 25 | 5 | Operador 3 | 12.023 | 55 | 7 | Operador 3 | 12.183 |
| 26 | 2 | Operador 3 | 12.160 | 56 | 10 | Operador 3 | 12.135 |
| 27 | 6 | Operador 3 | 12.202 | 57 | 3 | Operador 3 | 12.118 |
| 28 | 4 | Operador 3 | 11.992 | 58 | 4 | Operador 3 | 11.993 |
| 29 | 10 | Operador 3 | 12.135 | 59 | 5 | Operador 3 | 12.023 |
| 30 | 7 | Operador 3 | 12.183 | 60 | 9 | Operador 3 | 12.184 |

Anexo D: Folha de Registo, Cartas de Controlo e Quadro Resumo da Análise de Variação do Estudo R&R após correções

Tabela D. 1 - Folha de Registo do Estudo R&R após correções

| Medição | Parte | Operador | Resposta | Medição | Parte | Operador | Resposta |
|---------|-------|------------|----------|---------|-------|------------|----------|
| 1 | 7 | Operador 1 | 12.187 | 31 | 4 | Operador 1 | 11.996 |
| 2 | 8 | Operador 1 | 12.215 | 32 | 9 | Operador 1 | 12.188 |
| 3 | 9 | Operador 1 | 12.188 | 33 | 3 | Operador 1 | 12.121 |
| 4 | 5 | Operador 1 | 12.024 | 34 | 6 | Operador 1 | 12.204 |
| 5 | 10 | Operador 1 | 12.136 | 35 | 10 | Operador 1 | 12.136 |
| 6 | 4 | Operador 1 | 11.998 | 36 | 1 | Operador 1 | 12.124 |
| 7 | 3 | Operador 1 | 12.122 | 37 | 8 | Operador 1 | 12.216 |
| 8 | 6 | Operador 1 | 12.204 | 38 | 5 | Operador 1 | 12.024 |
| 9 | 2 | Operador 1 | 12.159 | 39 | 7 | Operador 1 | 12.188 |
| 10 | 1 | Operador 1 | 12.122 | 40 | 2 | Operador 1 | 12.162 |
| 11 | 1 | Operador 2 | 12.125 | 41 | 1 | Operador 2 | 12.122 |
| 12 | 7 | Operador 2 | 12.186 | 42 | 9 | Operador 2 | 12.188 |
| 13 | 8 | Operador 2 | 12.210 | 43 | 7 | Operador 2 | 12.187 |
| 14 | 9 | Operador 2 | 12.185 | 44 | 8 | Operador 2 | 12.214 |
| 15 | 3 | Operador 2 | 12.119 | 45 | 6 | Operador 2 | 12.204 |
| 16 | 6 | Operador 2 | 12.202 | 46 | 4 | Operador 2 | 11.997 |
| 17 | 5 | Operador 2 | 12.022 | 47 | 2 | Operador 2 | 12.161 |
| 18 | 2 | Operador 2 | 12.160 | 48 | 5 | Operador 2 | 12.023 |
| 19 | 4 | Operador 2 | 11.994 | 49 | 3 | Operador 2 | 12.121 |
| 20 | 10 | Operador 2 | 12.133 | 50 | 10 | Operador 2 | 12.136 |
| 21 | 9 | Operador 3 | 12.187 | 51 | 7 | Operador 3 | 12.185 |
| 22 | 5 | Operador 3 | 12.018 | 52 | 4 | Operador 3 | 11.994 |
| 23 | 8 | Operador 3 | 12.211 | 53 | 6 | Operador 3 | 12.198 |
| 24 | 6 | Operador 3 | 12.198 | 54 | 3 | Operador 3 | 12.131 |
| 25 | 3 | Operador 3 | 12.131 | 55 | 9 | Operador 3 | 12.187 |
| 26 | 1 | Operador 3 | 12.128 | 56 | 2 | Operador 3 | 12.159 |
| 27 | 10 | Operador 3 | 12.127 | 57 | 10 | Operador 3 | 12.127 |
| 28 | 7 | Operador 3 | 12.186 | 58 | 8 | Operador 3 | 12.212 |
| 29 | 2 | Operador 3 | 12.158 | 59 | 5 | Operador 3 | 12.018 |
| 30 | 4 | Operador 3 | 11.995 | 60 | 1 | Operador 3 | 12.129 |

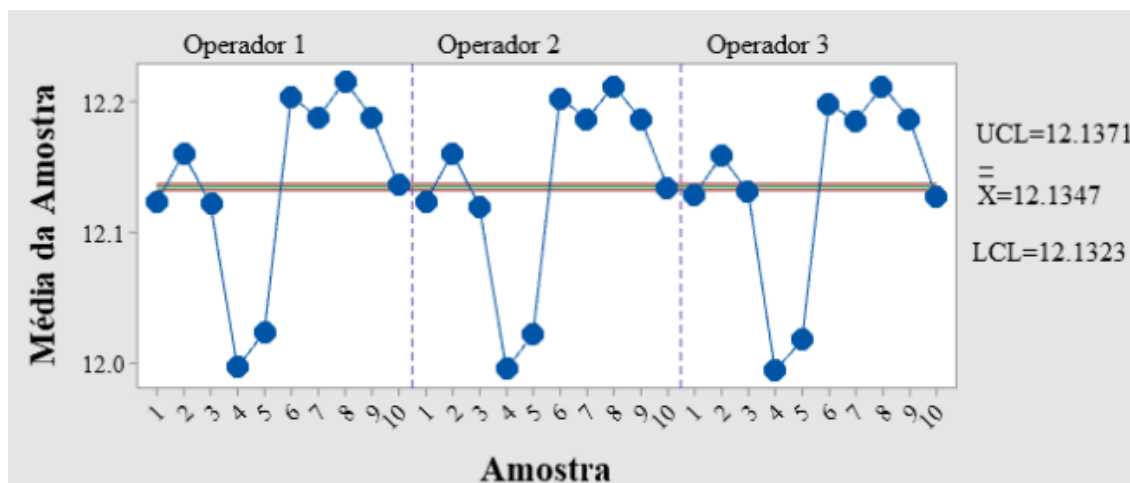


Fig. D. 2 - Carta de Controle da Média do Estudo R&R após correções

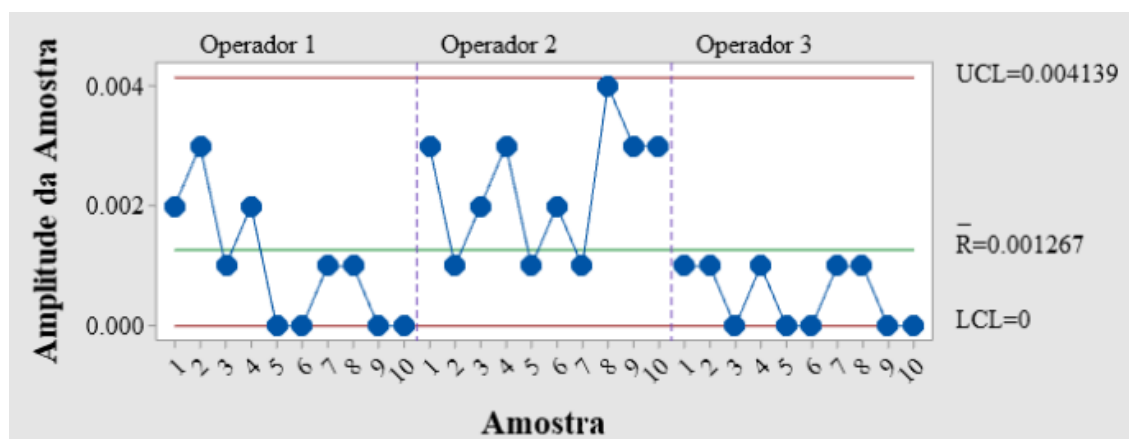


Fig. D. 1 - Carta de Controle da Amplitude do Estudo R&R após correções

Tabela D. 2 - Quadro Resumo - Análise da Variação do Sistema de Medição após correções

| Fonte | Desvio Padrão | Variação | Variação (%) |
|---------------------|---------------|----------|--------------|
| Repetibilidade | 0.0003 | 0.0073 | 1.64 |
| Reprodutibilidade | 0.0012 | 0.0182 | 1.29 |
| Total do estudo R&R | 0.0033 | 0.0196 | 2.09 |
| Parte a Parte | 0.0734 | 0.4428 | 99.98 |
| Total | 0.0739 | 0.4432 | 100 |

ANEXOS

Anexo E: Análise de Variância, Two-Way-Anova para amostras aleatórias

Tabela E. 1 - Two-Way-Anova para amostra aleatória 1

| Fonte | Graus de Liberdade | SS Ajustado | MS Ajustado | P-Value |
|---------------|--------------------|-------------|-------------|---------|
| <i>Spider</i> | 3 | 61.52 | 20.51 | 0.470 |
| Referência | 2 | 58.20 | 29.10 | 0.313 |
| Erro | 14 | 322.16 | 23.10 | |
| Total | 19 | 420.55 | | |

Tabela E. 2 - Two-Way-Anova para amostra aleatória 2

| Fonte | Graus de Liberdade | SS Ajustado | MS Ajustado | P-Value |
|---------------|--------------------|-------------|-------------|---------|
| <i>Spider</i> | 3 | 109.85 | 36.62 | 0.349 |
| Referência | 2 | 41.46 | 20.73 | 0.526 |
| Erro | 14 | 496.41 | 31.03 | |
| Total | 19 | 625.86 | | |

Tabela E. 3 - Two-Way-Anova para amostra aleatória 3

| Fonte | Graus de Liberdade | SS Ajustado | MS Ajustado | P-Value |
|---------------|--------------------|-------------|-------------|---------|
| <i>Spider</i> | 3 | 81.44 | 27.15 | 0.516 |
| Referência | 2 | 38.95 | 19.47 | 0.577 |
| Erro | 14 | 476.90 | 34.06 | |
| Total | 19 | 586.95 | | |

Tabela E. 4 - Two-Way-Anova para amostra aleatória 4

| Fonte | Graus de Liberdade | SS Ajustado | MS Ajustado | P-Value |
|---------------|--------------------|-------------|-------------|---------|
| <i>Spider</i> | 3 | 45.57 | 15.191 | 0.491 |
| Referência | 2 | 47.87 | 23.936 | 0.295 |
| Erro | 14 | 251.15 | 17.939 | |
| Total | 19 | 320.00 | | |

Anexo F: Run Charts, spiders 1, 2 e 4

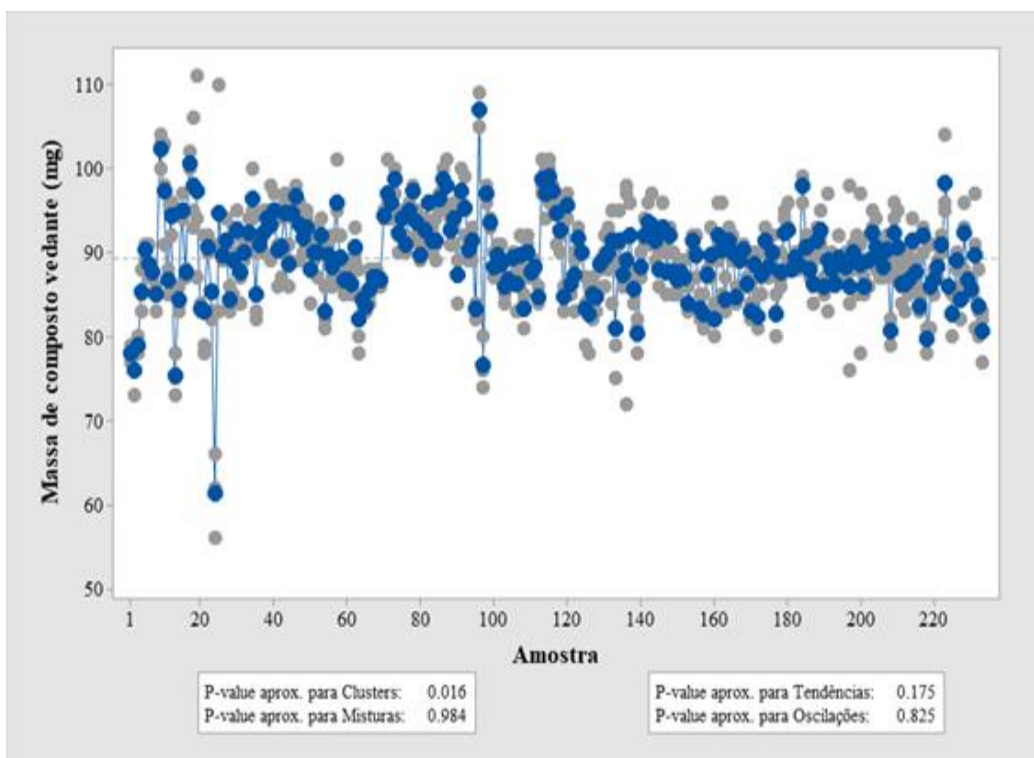


Fig. F. 1 - Run Chart, spider 1

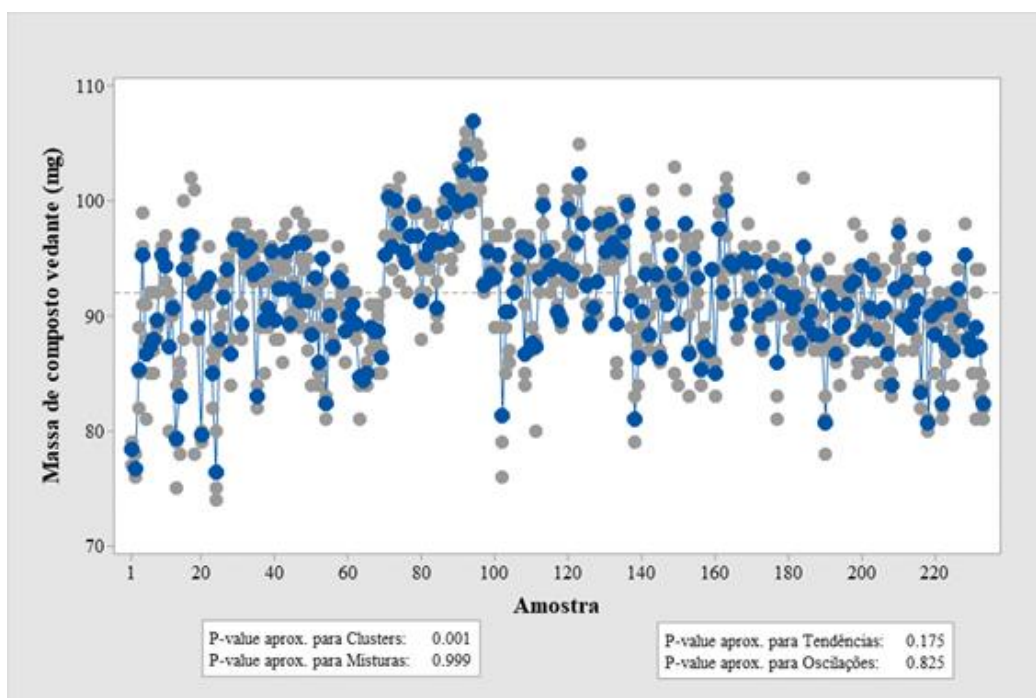


Fig. F. 2 - Run Chart, spider 2

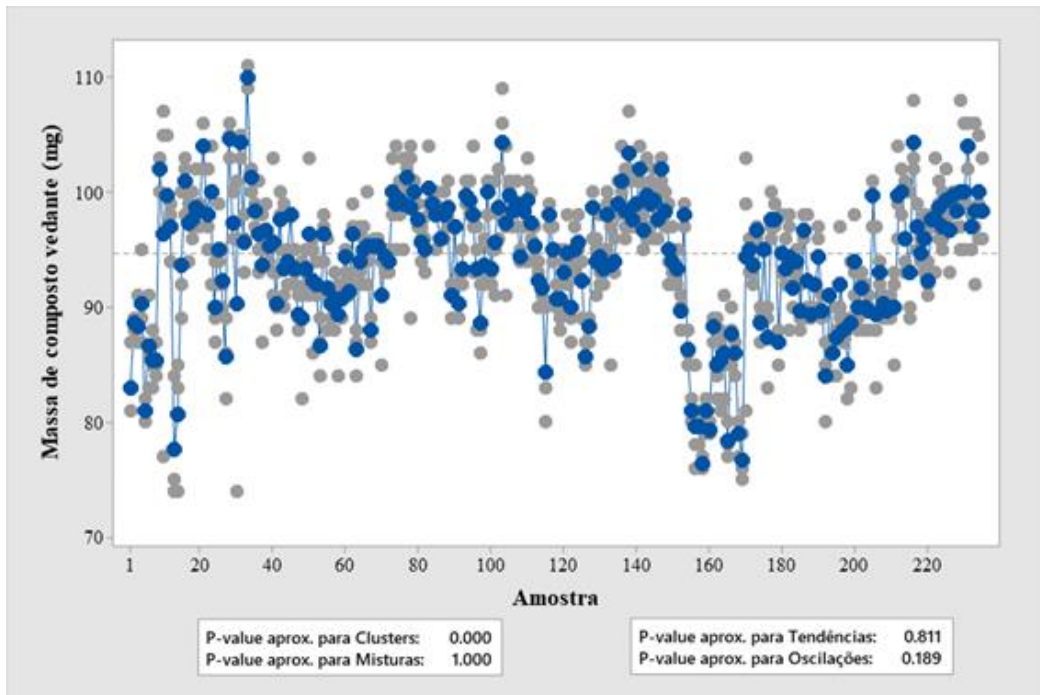


Fig. F. 3 - Run Chart, spider 4

Anexo G: Dados, confirmação analítica da autocorrelação

Tabela G. 1 - Dados, confirmação analítica da autocorrelação, spider 1

| Nº | x ₁ | x ₂ | x ₃ | \bar{X} | S | Nº | x ₁ | x ₂ | x ₃ | \bar{X} | S | Nº | x ₁ | x ₂ | x ₃ | \bar{X} | S |
|----|----------------|----------------|----------------|-----------|-------|----|----------------|----------------|----------------|-----------|------|-----|----------------|----------------|----------------|-----------|-------|
| 1 | 90 | 88 | 87 | 88.33 | 1.53 | 46 | 86 | 90 | 88 | 88.00 | 2.00 | 91 | 87 | 86 | 85 | 86.00 | 1.00 |
| 2 | 91 | 91 | 87 | 89.67 | 2.31 | 47 | 91 | 92 | 96 | 93.00 | 2.65 | 92 | 87 | 83 | 97 | 89.00 | 7.21 |
| 3 | 91 | 87 | 88 | 88.67 | 2.08 | 48 | 85 | 88 | 90 | 87.67 | 2.52 | 93 | 87 | 90 | 87 | 88.00 | 1.73 |
| 4 | 89 | 85 | 84 | 86.00 | 2.65 | 49 | 90 | 93 | 93 | 92.00 | 1.73 | 94 | 86 | 87 | 86 | 86.33 | 0.58 |
| 5 | 87 | 86 | 87 | 86.67 | 0.58 | 50 | 88 | 90 | 85 | 87.67 | 2.52 | 95 | 92 | 88 | 88 | 89.33 | 2.31 |
| 6 | 89 | 89 | 90 | 89.33 | 0.58 | 51 | 87 | 88 | 85 | 86.67 | 1.53 | 96 | 89 | 88 | 89 | 88.67 | 0.58 |
| 7 | 83 | 88 | 88 | 86.33 | 2.89 | 52 | 87 | 87 | 89 | 87.67 | 1.15 | 97 | 88 | 90 | 87 | 88.33 | 1.53 |
| 8 | 89 | 88 | 92 | 89.67 | 2.08 | 53 | 89 | 86 | 86 | 87.00 | 1.73 | 98 | 98 | 84 | 76 | 86.00 | 11.14 |
| 9 | 85 | 81 | 84 | 83.33 | 2.08 | 54 | 86 | 83 | 83 | 84.00 | 1.73 | 99 | 91 | 88 | 91 | 90.00 | 1.73 |
| 10 | 87 | 91 | 92 | 90.00 | 2.65 | 55 | 90 | 92 | 92 | 91.33 | 1.15 | 100 | 85 | 92 | 90 | 89.00 | 3.61 |
| 11 | 87 | 88 | 88 | 87.67 | 0.58 | 56 | 90 | 87 | 92 | 89.67 | 2.52 | 101 | 91 | 78 | 97 | 88.67 | 9.71 |
| 12 | 89 | 88 | 88 | 88.33 | 0.58 | 57 | 82 | 85 | 83 | 83.33 | 1.53 | 102 | 87 | 85 | 86 | 86.00 | 1.00 |
| 13 | 84 | 84 | 86 | 84.67 | 1.15 | 58 | 82 | 81 | 85 | 82.67 | 2.08 | 103 | 86 | 92 | 89 | 89.00 | 3.00 |
| 14 | 97 | 98 | 101 | 98.67 | 2.08 | 59 | 87 | 88 | 87 | 87.33 | 0.58 | 104 | 95 | 93 | 89 | 92.33 | 3.06 |
| 15 | 97 | 94 | 100 | 97.00 | 3.00 | 60 | 93 | 87 | 89 | 89.67 | 3.06 | 105 | 88 | 90 | 94 | 90.67 | 3.06 |
| 16 | 100 | 96 | 101 | 99.00 | 2.65 | 61 | 82 | 84 | 80 | 82.00 | 2.00 | 106 | 91 | 87 | 90 | 89.33 | 2.08 |
| 17 | 98 | 98 | 96 | 97.33 | 1.15 | 62 | 91 | 96 | 89 | 92.00 | 3.61 | 107 | 88 | 87 | 90 | 88.33 | 1.53 |
| 18 | 91 | 97 | 96 | 94.67 | 3.21 | 63 | 90 | 96 | 85 | 90.33 | 5.51 | 108 | 89 | 90 | 92 | 90.33 | 1.53 |
| 19 | 96 | 90 | 92 | 92.67 | 3.06 | 64 | 83 | 87 | 83 | 84.33 | 2.31 | 109 | 79 | 82 | 81 | 80.67 | 1.53 |
| 20 | 83 | 86 | 85 | 84.67 | 1.53 | 65 | 90 | 93 | 91 | 91.33 | 1.53 | 110 | 96 | 94 | 87 | 92.33 | 4.73 |
| 21 | 94 | 97 | 96 | 95.67 | 1.53 | 66 | 89 | 89 | 92 | 90.00 | 1.73 | 111 | 89 | 95 | 88 | 90.67 | 3.79 |
| 22 | 87 | 87 | 85 | 86.33 | 1.15 | 67 | 84 | 86 | 84 | 84.67 | 1.15 | 112 | 89 | 84 | 86 | 86.33 | 2.52 |
| 23 | 90 | 89 | 83 | 87.33 | 3.79 | 68 | 89 | 89 | 89 | 89.00 | 0.00 | 113 | 83 | 90 | 86 | 86.33 | 3.51 |
| 24 | 92 | 90 | 93 | 91.67 | 1.53 | 69 | 89 | 91 | 91 | 90.33 | 1.15 | 114 | 85 | 88 | 87 | 86.67 | 1.53 |
| 25 | 90 | 90 | 90 | 90.00 | 0.00 | 70 | 86 | 87 | 86 | 86.33 | 0.58 | 115 | 94 | 89 | 91 | 91.33 | 2.52 |
| 26 | 84 | 87 | 79 | 83.33 | 4.04 | 71 | 83 | 82 | 84 | 83.00 | 1.00 | 116 | 86 | 88 | 89 | 87.67 | 1.53 |
| 27 | 86 | 84 | 78 | 82.67 | 4.16 | 72 | 89 | 87 | 90 | 88.67 | 1.53 | 117 | 83 | 85 | 83 | 83.67 | 1.15 |
| 28 | 86 | 82 | 87 | 85.00 | 2.65 | 73 | 85 | 81 | 81 | 82.33 | 2.31 | 118 | 93 | 93 | 90 | 92.00 | 1.73 |
| 29 | 83 | 85 | 86 | 84.67 | 1.53 | 74 | 90 | 87 | 85 | 87.33 | 2.52 | 119 | 81 | 78 | 80 | 79.67 | 1.53 |
| 30 | 89 | 89 | 88 | 88.67 | 0.58 | 75 | 93 | 90 | 91 | 91.33 | 1.53 | 120 | 81 | 91 | 86 | 86.00 | 5.00 |
| 31 | 90 | 86 | 92 | 89.33 | 3.06 | 76 | 90 | 87 | 88 | 88.33 | 1.53 | 121 | 88 | 87 | 85 | 86.67 | 1.53 |
| 32 | 93 | 89 | 88 | 90.00 | 2.65 | 77 | 89 | 92 | 89 | 90.00 | 1.73 | 122 | 89 | 87 | 89 | 88.33 | 1.15 |
| 33 | 84 | 95 | 95 | 91.33 | 6.35 | 78 | 80 | 83 | 85 | 82.67 | 2.52 | 123 | 92 | 91 | 90 | 91.00 | 1.00 |
| 34 | 89 | 79 | 75 | 81.00 | 7.21 | 79 | 90 | 86 | 87 | 87.67 | 2.08 | 124 | 95 | 96 | 104 | 98.33 | 4.93 |
| 35 | 95 | 88 | 91 | 91.33 | 3.51 | 80 | 94 | 88 | 95 | 92.33 | 3.79 | 125 | 86 | 86 | 86 | 86.00 | 0.00 |
| 36 | 89 | 86 | 87 | 87.33 | 1.53 | 81 | 93 | 96 | 89 | 92.67 | 3.51 | 126 | 85 | 80 | 83 | 82.67 | 2.52 |
| 37 | 97 | 72 | 98 | 89.00 | 14.73 | 82 | 88 | 88 | 88 | 88.00 | 0.00 | 127 | 88 | 90 | 89 | 89.00 | 1.00 |
| 38 | 96 | 88 | 92 | 92.00 | 4.00 | 83 | 89 | 90 | 89 | 89.33 | 0.58 | 128 | 86 | 82 | 85 | 84.33 | 2.08 |
| 39 | 84 | 86 | 87 | 85.67 | 1.53 | 84 | 88 | 90 | 88 | 88.67 | 1.15 | 129 | 88 | 93 | 96 | 92.33 | 4.04 |

ANEXOS

Tabela G.1 - Dados, confirmação analítica da autocorrelação, spider 1 – continuação

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|----|----|----|-------|------|----|----|----|----|-------|------|-----|----|----|----|-------|------|
| 40 | 82 | 81 | 78 | 80.33 | 2.08 | 85 | 99 | 96 | 99 | 98.00 | 1.73 | 130 | 86 | 87 | 87 | 86.67 | 0.58 |
| 41 | 87 | 88 | 90 | 88.33 | 1.53 | 86 | 89 | 91 | 92 | 90.67 | 1.53 | 131 | 86 | 86 | 85 | 85.67 | 0.58 |
| 42 | 91 | 91 | 94 | 92.00 | 1.73 | 87 | 89 | 88 | 87 | 88.00 | 1.00 | 132 | 97 | 91 | 81 | 89.67 | 8.08 |
| 43 | 92 | 96 | 93 | 93.67 | 2.08 | 88 | 89 | 84 | 86 | 86.33 | 2.52 | 133 | 80 | 83 | 88 | 83.67 | 4.04 |
| 44 | 97 | 92 | 91 | 93.33 | 3.21 | 89 | 93 | 91 | 90 | 91.33 | 1.53 | 134 | 77 | 82 | 83 | 80.67 | 3.21 |
| 45 | 93 | 89 | 92 | 91.33 | 2.08 | 90 | 95 | 91 | 92 | 92.67 | 2.08 | | | | | | |

Tabela G. 2 - Dados, confirmação analítica da autocorrelação, spider 2

| Nº | x ₁ | x ₂ | x ₃ | \bar{X} | S | Nº | x ₁ | x ₂ | x ₃ | \bar{X} | S | Nº | x ₁ | x ₂ | x ₃ | \bar{X} | S |
|----|----------------|----------------|----------------|-----------|------|----|----------------|----------------|----------------|-----------|------|-----|----------------|----------------|----------------|-----------|------|
| 1 | 77 | 79 | 79 | 78.33 | 1.15 | 46 | 93 | 92 | 90 | 91.67 | 1.53 | 91 | 100 | 101 | 100 | 100.33 | 0.58 |
| 2 | 76 | 78 | 76 | 76.67 | 1.15 | 47 | 95 | 93 | 94 | 94.00 | 1.00 | 92 | 94 | 97 | 97 | 96.00 | 1.73 |
| 3 | 89 | 85 | 82 | 85.33 | 3.51 | 48 | 88 | 84 | 88 | 86.67 | 2.31 | 93 | 100 | 101 | 99 | 100.00 | 1.00 |
| 4 | 69 | 76 | 83 | 76.00 | 7.00 | 49 | 97 | 97 | 96 | 96.67 | 0.58 | 94 | 102 | 93 | 99 | 98.00 | 4.58 |
| 5 | 77 | 73 | 76 | 75.33 | 2.08 | 50 | 96 | 98 | 96 | 96.67 | 1.15 | 95 | 97 | 95 | 95 | 95.67 | 1.15 |
| 6 | 77 | 79 | 77 | 77.67 | 1.15 | 51 | 91 | 89 | 88 | 89.33 | 1.53 | 96 | 95 | 97 | 92 | 94.67 | 2.52 |
| 7 | 79 | 76 | 77 | 77.33 | 1.53 | 52 | 98 | 94 | 95 | 95.67 | 2.08 | 97 | 97 | 97 | 97 | 97.00 | 0.00 |
| 8 | 75 | 70 | 69 | 71.33 | 3.21 | 53 | 97 | 97 | 94 | 96.00 | 1.73 | 98 | 100 | 99 | 100 | 99.67 | 0.58 |
| 9 | 72 | 72 | 71 | 71.67 | 0.58 | 54 | 95 | 93 | 93 | 93.67 | 1.15 | 99 | 97 | 95 | 99 | 97.00 | 2.00 |
| 10 | 76 | 76 | 70 | 74.00 | 3.46 | 55 | 83 | 84 | 82 | 83.00 | 1.00 | 100 | 92 | 88 | 94 | 91.33 | 3.06 |
| 11 | 75 | 71 | 69 | 71.67 | 3.06 | 56 | 89 | 97 | 96 | 94.00 | 4.36 | 101 | 92 | 99 | 95 | 95.33 | 3.51 |
| 12 | 79 | 74 | 74 | 75.67 | 2.89 | 57 | 93 | 85 | 91 | 89.67 | 4.16 | 102 | 96 | 98 | 94 | 96.00 | 2.00 |
| 13 | 83 | 81 | 84 | 82.67 | 1.53 | 58 | 90 | 93 | 89 | 90.67 | 2.08 | 103 | 96 | 98 | 96 | 96.67 | 1.15 |
| 14 | 72 | 72 | 71 | 71.67 | 0.58 | 59 | 95 | 96 | 96 | 95.67 | 0.58 | 104 | 90 | 89 | 93 | 90.67 | 2.08 |
| 15 | 68 | 67 | 70 | 68.33 | 1.53 | 60 | 93 | 88 | 88 | 89.67 | 2.89 | 105 | 95 | 95 | 99 | 96.33 | 2.31 |
| 16 | 87 | 86 | 87 | 86.67 | 0.58 | 61 | 88 | 94 | 95 | 92.33 | 3.79 | 106 | 100 | 97 | 100 | 99.00 | 1.73 |
| 17 | 89 | 84 | 87 | 86.67 | 2.52 | 62 | 94 | 97 | 86 | 92.33 | 5.69 | 107 | 101 | 101 | 101 | 101.00 | 0.00 |
| 18 | 79 | 86 | 86 | 83.67 | 4.04 | 63 | 98 | 95 | 94 | 95.67 | 2.08 | 108 | 94 | 101 | 95 | 96.67 | 3.79 |
| 19 | 84 | 83 | 86 | 84.33 | 1.53 | 64 | 89 | 90 | 89 | 89.33 | 0.58 | 109 | 99 | 100 | 101 | 100.00 | 1.00 |
| 20 | 90 | 92 | 92 | 91.33 | 1.15 | 65 | 92 | 92 | 93 | 92.33 | 0.58 | 110 | 103 | 100 | 96 | 99.67 | 3.51 |
| 21 | 80 | 83 | 86 | 83.00 | 3.00 | 66 | 91 | 99 | 99 | 96.33 | 4.62 | 111 | 102 | 103 | 103 | 102.67 | 0.58 |
| 22 | 75 | 77 | 76 | 76.00 | 1.00 | 67 | 90 | 89 | 95 | 91.33 | 3.21 | 112 | 105 | 106 | 101 | 104.00 | 2.65 |
| 23 | 90 | 87 | 92 | 89.67 | 2.52 | 68 | 98 | 94 | 97 | 96.33 | 2.08 | 113 | 100 | 101 | 99 | 100.00 | 1.00 |
| 24 | 99 | 96 | 91 | 95.33 | 4.04 | 69 | 92 | 95 | 87 | 91.33 | 4.04 | 114 | 107 | 107 | 107 | 107.00 | 0.00 |
| 25 | 88 | 91 | 81 | 86.67 | 5.13 | 70 | 89 | 84 | 92 | 88.33 | 4.04 | 115 | 105 | 102 | 100 | 102.33 | 2.52 |
| 26 | 85 | 85 | 92 | 87.33 | 4.04 | 71 | 92 | 91 | 97 | 93.33 | 3.21 | 116 | 104 | 102 | 101 | 102.33 | 1.53 |
| 27 | 92 | 85 | 87 | 88.00 | 3.61 | 72 | 84 | 89 | 85 | 86.00 | 2.65 | 117 | 93 | 93 | 92 | 92.67 | 0.58 |
| 28 | 89 | 88 | 92 | 89.67 | 2.08 | 73 | 97 | 95 | 93 | 95.00 | 2.00 | 118 | 96 | 98 | 93 | 95.67 | 2.52 |
| 29 | 95 | 96 | 95 | 95.33 | 0.58 | 74 | 83 | 83 | 81 | 82.33 | 1.15 | 119 | 93 | 94 | 94 | 93.67 | 0.58 |
| 30 | 97 | 93 | 93 | 94.33 | 2.31 | 75 | 90 | 91 | 89 | 90.00 | 1.00 | 120 | 89 | 94 | 97 | 93.33 | 4.04 |
| 31 | 92 | 80 | 90 | 87.33 | 6.43 | 76 | 88 | 87 | 87 | 87.33 | 0.58 | 121 | 97 | 95 | 94 | 95.33 | 1.53 |
| 32 | 91 | 91 | 90 | 90.67 | 0.58 | 77 | 96 | 93 | 91 | 93.33 | 2.52 | 122 | 76 | 89 | 79 | 81.33 | 6.81 |
| 33 | 79 | 75 | 84 | 79.33 | 4.51 | 78 | 94 | 93 | 92 | 93.00 | 1.00 | 123 | 97 | 85 | 89 | 90.33 | 6.11 |

ANEXOS

Tabela G.2 - Dados, confirmação analítica da autocorrelação, spider 2 – continuação

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|-----|-----|-----|-------|-------|----|----|----|----|-------|------|-----|-----|-----|----|-------|------|
| 34 | 85 | 78 | 86 | 83.00 | 4.36 | 79 | 86 | 90 | 90 | 88.67 | 2.31 | 124 | 86 | 98 | 87 | 90.33 | 6.66 |
| 35 | 94 | 88 | 100 | 94.00 | 6.00 | 80 | 89 | 89 | 92 | 90.00 | 1.73 | 125 | 92 | 92 | 92 | 92.00 | 0.00 |
| 36 | 97 | 96 | 95 | 96.00 | 1.00 | 81 | 89 | 92 | 92 | 91.00 | 1.73 | 126 | 93 | 94 | 95 | 94.00 | 1.00 |
| 37 | 102 | 96 | 93 | 97.00 | 4.58 | 82 | 92 | 88 | 88 | 89.33 | 2.31 | 127 | 97 | 94 | 97 | 96.00 | 1.73 |
| 38 | 78 | 101 | 97 | 92.00 | 12.29 | 83 | 89 | 84 | 81 | 84.67 | 4.04 | 128 | 84 | 91 | 85 | 86.67 | 3.79 |
| 39 | 88 | 88 | 91 | 89.00 | 1.73 | 84 | 84 | 85 | 84 | 84.33 | 0.58 | 129 | 94 | 97 | 96 | 95.67 | 1.53 |
| 40 | 80 | 80 | 79 | 79.67 | 0.58 | 85 | 86 | 85 | 84 | 85.00 | 1.00 | 130 | 87 | 89 | 87 | 87.67 | 1.15 |
| 41 | 92 | 93 | 93 | 92.67 | 0.58 | 86 | 87 | 91 | 89 | 89.00 | 2.00 | 131 | 88 | 80 | 94 | 87.33 | 7.02 |
| 42 | 96 | 93 | 91 | 93.33 | 2.52 | 87 | 89 | 89 | 88 | 88.67 | 0.58 | 132 | 94 | 94 | 92 | 93.33 | 1.15 |
| 43 | 82 | 87 | 86 | 85.00 | 2.65 | 88 | 91 | 90 | 85 | 88.67 | 3.21 | 133 | 101 | 100 | 98 | 99.67 | 1.53 |
| 44 | 75 | 80 | 74 | 76.33 | 3.21 | 89 | 87 | 85 | 87 | 86.33 | 1.15 | 134 | 96 | 95 | 96 | 95.67 | 0.58 |
| 45 | 88 | 87 | 89 | 88.00 | 1.00 | 90 | 97 | 97 | 92 | 95.33 | 2.89 | | | | | | |

Tabela G. 3 - Dados, confirmação analítica da autocorrelação, spider 3

| Nº | x ₁ | x ₂ | x ₃ | \bar{X} | S | Nº | x ₁ | x ₂ | x ₃ | \bar{X} | S | Nº | x ₁ | x ₂ | x ₃ | \bar{X} | S |
|----|----------------|----------------|----------------|-----------|------|----|----------------|----------------|----------------|-----------|------|----|----------------|----------------|----------------|-----------|------|
| 1 | 91 | 93 | 89 | 91.00 | 2.00 | 46 | 105 | 101 | 99 | 101.67 | 3.06 | 91 | 85 | 84 | 89 | 86.00 | 2.65 |
| 2 | 86 | 88 | 87 | 87.00 | 1.00 | 47 | 97 | 97 | 99 | 97.67 | 1.15 | | | | | | |
| 3 | 99 | 98 | 96 | 97.67 | 1.53 | 48 | 94 | 98 | 98 | 96.67 | 2.31 | | | | | | |
| 4 | 89 | 84 | 86 | 86.33 | 2.52 | 49 | 99 | 94 | 94 | 95.67 | 2.89 | | | | | | |
| 5 | 92 | 97 | 95 | 94.67 | 2.52 | 50 | 102 | 99 | 98 | 99.67 | 2.08 | | | | | | |
| 6 | 100 | 94 | 92 | 95.33 | 4.16 | 51 | 98 | 97 | 102 | 99.00 | 2.65 | | | | | | |
| 7 | 89 | 87 | 90 | 88.67 | 1.53 | 52 | 95 | 101 | 99 | 98.33 | 3.06 | | | | | | |
| 8 | 98 | 99 | 98 | 98.33 | 0.58 | 53 | 100 | 100 | 100 | 100.00 | 0.00 | | | | | | |
| 9 | 96 | 96 | 97 | 96.33 | 0.58 | 54 | 97 | 98 | 98 | 97.67 | 0.58 | | | | | | |
| 10 | 93 | 98 | 101 | 97.33 | 4.04 | 55 | 101 | 97 | 96 | 98.00 | 2.65 | | | | | | |
| 11 | 95 | 87 | 92 | 91.33 | 4.04 | 56 | 98 | 100 | 98 | 98.67 | 1.15 | | | | | | |
| 12 | 93 | 100 | 97 | 96.67 | 3.51 | 57 | 90 | 93 | 89 | 90.67 | 2.08 | | | | | | |
| 13 | 96 | 96 | 95 | 95.67 | 0.58 | 58 | 96 | 93 | 93 | 94.00 | 1.73 | | | | | | |
| 14 | 97 | 97 | 95 | 96.33 | 1.15 | 59 | 95 | 98 | 100 | 97.67 | 2.52 | | | | | | |
| 15 | 95 | 96 | 95 | 95.33 | 0.58 | 60 | 93 | 95 | 93 | 93.67 | 1.15 | | | | | | |
| 16 | 93 | 99 | 97 | 96.33 | 3.06 | 61 | 91 | 101 | 97 | 96.33 | 5.03 | | | | | | |
| 17 | 95 | 94 | 89 | 92.67 | 3.21 | 62 | 99 | 99 | 98 | 98.67 | 0.58 | | | | | | |
| 18 | 94 | 101 | 98 | 97.67 | 3.51 | 63 | 98 | 97 | 97 | 97.33 | 0.58 | | | | | | |
| 19 | 102 | 102 | 103 | 102.33 | 0.58 | 64 | 91 | 94 | 89 | 91.33 | 2.52 | | | | | | |
| 20 | 99 | 99 | 99 | 99.00 | 0.00 | 65 | 97 | 94 | 97 | 96.00 | 1.73 | | | | | | |
| 21 | 96 | 97 | 96 | 96.33 | 0.58 | 66 | 89 | 92 | 90 | 90.33 | 1.53 | | | | | | |
| 22 | 93 | 94 | 101 | 96.00 | 4.36 | 67 | 101 | 97 | 93 | 97.00 | 4.00 | | | | | | |
| 23 | 100 | 99 | 106 | 101.67 | 3.79 | 68 | 97 | 94 | 96 | 95.67 | 1.53 | | | | | | |
| 24 | 102 | 101 | 96 | 99.67 | 3.21 | 69 | 92 | 90 | 97 | 93.00 | 3.61 | | | | | | |
| 25 | 98 | 101 | 90 | 96.33 | 5.69 | 70 | 87 | 88 | 85 | 86.67 | 1.53 | | | | | | |
| 26 | 89 | 90 | 95 | 91.33 | 3.21 | 71 | 83 | 86 | 89 | 86.00 | 3.00 | | | | | | |
| 27 | 94 | 101 | 91 | 95.33 | 5.13 | 72 | 88 | 91 | 92 | 90.33 | 2.08 | | | | | | |
| 28 | 89 | 90 | 92 | 90.33 | 1.53 | 73 | 94 | 91 | 89 | 91.33 | 2.52 | | | | | | |

ANEXOS

Tabela G.3 - Dados, confirmação analítica da autocorrelação, spider 3 – continuação

| | | | | | | | | | | | |
|----|-----|-----|-----|--------|------|----|----|-----|----|-------|------|
| 29 | 99 | 102 | 102 | 101.00 | 1.73 | 74 | 97 | 98 | 97 | 97.33 | 0.58 |
| 30 | 91 | 91 | 94 | 92.00 | 1.73 | 75 | 93 | 96 | 96 | 95.00 | 1.73 |
| 31 | 96 | 98 | 99 | 97.67 | 1.53 | 76 | 85 | 88 | 95 | 89.33 | 5.13 |
| 32 | 97 | 86 | 94 | 92.33 | 5.69 | 77 | 90 | 89 | 86 | 88.33 | 2.08 |
| 33 | 93 | 96 | 98 | 95.67 | 2.52 | 78 | 95 | 101 | 99 | 98.33 | 3.06 |
| 34 | 97 | 95 | 94 | 95.33 | 1.53 | 79 | 93 | 88 | 93 | 91.33 | 2.89 |
| 35 | 100 | 97 | 98 | 98.33 | 1.53 | 80 | 88 | 90 | 91 | 89.67 | 1.53 |
| 36 | 97 | 94 | 94 | 95.00 | 1.73 | 81 | 92 | 89 | 93 | 91.33 | 2.08 |
| 37 | 103 | 102 | 100 | 101.67 | 1.53 | 82 | 94 | 94 | 88 | 92.00 | 3.46 |
| 38 | 97 | 99 | 98 | 98.00 | 1.00 | 83 | 94 | 89 | 89 | 90.67 | 2.89 |
| 39 | 99 | 96 | 91 | 95.33 | 4.04 | 84 | 78 | 80 | 75 | 77.67 | 2.52 |
| 40 | 103 | 100 | 98 | 100.33 | 2.52 | 85 | 85 | 79 | 72 | 78.67 | 6.51 |
| 41 | 98 | 100 | 99 | 99.00 | 1.00 | 86 | 83 | 87 | 87 | 85.67 | 2.31 |
| 42 | 95 | 96 | 99 | 96.67 | 2.08 | 87 | 78 | 80 | 82 | 80.00 | 2.00 |
| 43 | 98 | 98 | 101 | 99.00 | 1.73 | 88 | 75 | 79 | 81 | 78.33 | 3.06 |
| 44 | 101 | 100 | 98 | 99.67 | 1.53 | 89 | 86 | 87 | 86 | 86.33 | 0.58 |
| 45 | 97 | 102 | 101 | 100.00 | 2.65 | 90 | 81 | 84 | 89 | 84.67 | 4.04 |

Tabela G. 4 - Dados, confirmação analítica da autocorrelação, spider 4

| Nº | x ₁ | x ₂ | x ₃ | \bar{X} | S | Nº | x ₁ | x ₂ | x ₃ | \bar{X} | S | Nº | x ₁ | x ₂ | x ₃ | \bar{X} | S |
|----|----------------|----------------|----------------|-----------|------|----|----------------|----------------|----------------|-----------|------|-----|----------------|----------------|----------------|-----------|------|
| 1 | 105 | 103 | 105 | 104.33 | 1.15 | 46 | 99 | 103 | 95 | 99.00 | 4.00 | 91 | 92 | 98 | 94 | 94.67 | 3.06 |
| 2 | 93 | 96 | 98 | 95.67 | 2.52 | 47 | 102 | 100 | 102 | 101.33 | 1.15 | 92 | 87 | 89 | 94 | 90.00 | 3.61 |
| 3 | 110 | 109 | 111 | 110.00 | 1.00 | 48 | 104 | 103 | 89 | 98.67 | 8.39 | 93 | 97 | 95 | 93 | 95.00 | 2.00 |
| 4 | 102 | 102 | 100 | 101.33 | 1.15 | 49 | 100 | 101 | 99 | 100.00 | 1.00 | 94 | 98 | 95 | 94 | 95.67 | 2.08 |
| 5 | 99 | 99 | 97 | 98.33 | 1.15 | 50 | 97 | 99 | 97 | 97.67 | 1.15 | 95 | 94 | 94 | 89 | 92.33 | 2.89 |
| 6 | 95 | 93 | 101 | 96.33 | 4.16 | 51 | 96 | 94 | 97 | 95.67 | 1.53 | 96 | 85 | 87 | 85 | 85.67 | 1.15 |
| 7 | 87 | 96 | 98 | 93.67 | 5.86 | 52 | 96 | 93 | 96 | 95.00 | 1.73 | 97 | 89 | 87 | 89 | 88.33 | 1.15 |
| 8 | 96 | 95 | 99 | 96.67 | 2.08 | 53 | 98 | 104 | 99 | 100.33 | 3.21 | 98 | 100 | 96 | 100 | 98.67 | 2.31 |
| 9 | 96 | 94 | 96 | 95.33 | 1.15 | 54 | 99 | 99 | 99 | 99.00 | 0.00 | 99 | 91 | 96 | 95 | 94.00 | 2.65 |
| 10 | 91 | 103 | 93 | 95.67 | 6.43 | 55 | 95 | 100 | 99 | 98.00 | 2.65 | 100 | 92 | 93 | 98 | 94.33 | 3.21 |
| 11 | 88 | 90 | 93 | 90.33 | 2.52 | 56 | 96 | 96 | 96 | 96.00 | 0.00 | 101 | 93 | 92 | 95 | 93.33 | 1.53 |
| 12 | 100 | 95 | 98 | 97.67 | 2.52 | 57 | 100 | 98 | 96 | 98.00 | 2.00 | 102 | 95 | 100 | 99 | 98.00 | 2.65 |
| 13 | 90 | 91 | 99 | 93.33 | 4.93 | 58 | 101 | 98 | 97 | 98.67 | 2.08 | 103 | 97 | 99 | 85 | 93.67 | 7.57 |
| 14 | 95 | 92 | 95 | 94.00 | 1.73 | 59 | 89 | 92 | 92 | 91.00 | 1.73 | 104 | 93 | 93 | 96 | 94.00 | 1.73 |
| 15 | 98 | 98 | 98 | 98.00 | 0.00 | 60 | 97 | 97 | 97 | 97.00 | 0.00 | 105 | 98 | 98 | 101 | 99.00 | 1.73 |
| 16 | 93 | 92 | 95 | 93.33 | 1.53 | 61 | 93 | 89 | 89 | 90.33 | 2.31 | 106 | 104 | 99 | 100 | 101.00 | 2.65 |
| 17 | 88 | 89 | 91 | 89.33 | 1.53 | 62 | 95 | 92 | 93 | 93.33 | 1.53 | 107 | 96 | 97 | 102 | 98.33 | 3.21 |
| 18 | 94 | 91 | 82 | 89.00 | 6.24 | 63 | 99 | 99 | 101 | 99.67 | 1.15 | 108 | 102 | 107 | 101 | 103.33 | 3.21 |
| 19 | 92 | 95 | 93 | 93.33 | 1.53 | 64 | 101 | 99 | 98 | 99.33 | 1.53 | 109 | 98 | 98 | 97 | 97.67 | 0.58 |
| 20 | 95 | 91 | 103 | 96.33 | 6.11 | 65 | 97 | 104 | 93 | 98.00 | 5.57 | 110 | 98 | 98 | 101 | 99.00 | 1.73 |
| 21 | 86 | 95 | 96 | 92.33 | 5.51 | 66 | 88 | 97 | 95 | 93.33 | 4.73 | 111 | 101 | 101 | 104 | 102.00 | 1.73 |
| 22 | 91 | 94 | 91 | 92.00 | 1.73 | 67 | 86 | 92 | 88 | 88.67 | 3.06 | 112 | 98 | 95 | 97 | 96.67 | 1.53 |

ANEXOS

Tabela G.4 - Dados, confirmação analítica da autocorrelação, spider 4 – continuação

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----|-----|-----|-----|--------|------|----|-----|-----|-----|--------|------|-----|-----|-----|-----|--------|------|
| 23 | 84 | 87 | 89 | 86.67 | 2.52 | 68 | 93 | 92 | 96 | 93.67 | 2.08 | 113 | 100 | 96 | 103 | 99.67 | 3.51 |
| 24 | 97 | 94 | 98 | 96.33 | 2.08 | 69 | 101 | 101 | 98 | 100.00 | 1.73 | 114 | 97 | 99 | 101 | 99.00 | 2.00 |
| 25 | 91 | 88 | 96 | 91.67 | 4.04 | 70 | 95 | 93 | 92 | 93.33 | 1.53 | 115 | 102 | 100 | 96 | 99.33 | 3.06 |
| 26 | 91 | 91 | 89 | 90.33 | 1.15 | 71 | 91 | 95 | 101 | 95.67 | 5.03 | 116 | 96 | 98 | 99 | 97.67 | 1.53 |
| 27 | 91 | 88 | 93 | 90.67 | 2.52 | 72 | 96 | 98 | 102 | 98.67 | 3.06 | 117 | 102 | 101 | 103 | 102.00 | 1.00 |
| 28 | 84 | 92 | 92 | 89.33 | 4.62 | 73 | 98 | 109 | 106 | 104.33 | 5.69 | 118 | 100 | 97 | 98 | 98.33 | 1.53 |
| 29 | 92 | 91 | 89 | 90.67 | 1.53 | 74 | 91 | 104 | 97 | 97.33 | 6.51 | 119 | 99 | 94 | 92 | 95.00 | 3.61 |
| 30 | 95 | 95 | 93 | 94.33 | 1.15 | 75 | 98 | 100 | 101 | 99.67 | 1.53 | 120 | 92 | 93 | 97 | 94.00 | 2.65 |
| 31 | 91 | 92 | 91 | 91.33 | 0.58 | 76 | 97 | 99 | 99 | 98.33 | 1.15 | | | | | | |
| 32 | 93 | 97 | 99 | 96.33 | 3.06 | 77 | 97 | 99 | 101 | 99.00 | 2.00 | | | | | | |
| 33 | 88 | 87 | 84 | 86.33 | 2.08 | 78 | 95 | 94 | 94 | 94.33 | 0.58 | | | | | | |
| 34 | 97 | 93 | 92 | 94.00 | 2.65 | 79 | 99 | 97 | 99 | 98.33 | 1.15 | | | | | | |
| 35 | 96 | 97 | 92 | 95.00 | 2.65 | 80 | 101 | 94 | 103 | 99.33 | 4.73 | | | | | | |
| 36 | 94 | 92 | 100 | 95.33 | 4.16 | 81 | 100 | 96 | 96 | 97.33 | 2.31 | | | | | | |
| 37 | 88 | 87 | 89 | 88.00 | 1.00 | 82 | 97 | 94 | 95 | 95.33 | 1.53 | | | | | | |
| 38 | 95 | 96 | 95 | 95.33 | 0.58 | 83 | 93 | 94 | 90 | 92.33 | 2.08 | | | | | | |
| 39 | 95 | 96 | 95 | 95.33 | 0.58 | 84 | 92 | 92 | 91 | 91.67 | 0.58 | | | | | | |
| 40 | 94 | 85 | 94 | 91.00 | 5.20 | 85 | 90 | 80 | 83 | 84.33 | 5.13 | | | | | | |
| 41 | 95 | 95 | 93 | 94.33 | 1.15 | 86 | 99 | 97 | 98 | 98.00 | 1.00 | | | | | | |
| 42 | 94 | 95 | 93 | 94.00 | 1.00 | 87 | 94 | 94 | 97 | 95.00 | 1.73 | | | | | | |
| 43 | 99 | 98 | 103 | 100.00 | 2.65 | 88 | 92 | 90 | 90 | 90.67 | 1.15 | | | | | | |
| 44 | 104 | 98 | 95 | 99.00 | 4.58 | 89 | 88 | 89 | 95 | 90.67 | 3.79 | | | | | | |
| 45 | 99 | 101 | 98 | 99.33 | 1.53 | 90 | 95 | 94 | 90 | 93.00 | 2.65 | | | | | | |

Anexo H: Matrizes de correlação

Fig. H. 1 - Matriz de correlação, *spider 1*

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0.497 & 0.563 \\ 0.497 & 1 & 0.544 \\ 0.563 & 0.544 & 1 \end{bmatrix}$$

Fig. H. 2 - Matriz de correlação, *spider 2*

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0.401 & 0.804 \\ 0.401 & 1 & 0.366 \\ 0.804 & 0.366 & 1 \end{bmatrix}$$

Fig. H. 3 - Matriz de correlação, *spider 3*

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0.816 & 0.717 \\ 0.816 & 1 & 0.815 \\ 0.727 & 0.815 & 1 \end{bmatrix}$$

Fig. H. 4 - Matriz de correlação, *spider 4*

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0.682 & 0.573 \\ 0.682 & 1 & 0.612 \\ 0.573 & 0.612 & 1 \end{bmatrix}$$

Anexo I: Relação Nível Sigma, DPMO

Tabela I. 1 - Relação Nível Sigma, DPMO

| Nível Sigma | DPMO | Nível Sigma | DPMO | Nível Sigma | DPMO | Nível Sigma | DPMO | Nível Sigma | DPMO |
|-------------|--------|-------------|--------|-------------|--------|-------------|-------|-------------|-------|
| 0,00 | 933193 | 1,20 | 617911 | 2,40 | 184060 | 3,60 | 17864 | 4,80 | 483,4 |
| 0,05 | 926471 | 1,25 | 598706 | 2,45 | 171056 | 3,65 | 15778 | 4,85 | 404,1 |
| 0,10 | 919243 | 1,30 | 579260 | 2,50 | 158655 | 3,70 | 13903 | 4,90 | 336,9 |
| 0,15 | 911492 | 1,35 | 559618 | 2,55 | 146859 | 3,75 | 12224 | 4,95 | 280,3 |
| 0,20 | 903200 | 1,40 | 539828 | 2,60 | 135666 | 3,80 | 10724 | 5,00 | 232,6 |
| 0,25 | 894350 | 1,45 | 519939 | 2,65 | 125072 | 3,85 | 9387 | 5,05 | 192,6 |
| 0,30 | 884930 | 1,50 | 500000 | 2,70 | 115070 | 3,90 | 8198 | 5,10 | 159,1 |
| 0,35 | 874928 | 1,55 | 480061 | 2,75 | 105650 | 3,95 | 7143 | 5,15 | 131,1 |
| 0,40 | 864334 | 1,60 | 460172 | 2,80 | 96800 | 4,00 | 6210 | 5,20 | 107,8 |
| 0,45 | 853141 | 1,65 | 440382 | 2,85 | 88508 | 4,05 | 5386 | 5,25 | 88,4 |
| 0,50 | 841345 | 1,70 | 420740 | 2,90 | 80757 | 4,10 | 4661 | 5,30 | 72,3 |
| 0,55 | 828944 | 1,75 | 401294 | 2,95 | 73529 | 4,15 | 4025 | 5,35 | 59,1 |
| 0,60 | 815940 | 1,80 | 382089 | 3,00 | 66807 | 4,20 | 3467 | 5,40 | 48,1 |
| 0,65 | 802337 | 1,85 | 363169 | 3,05 | 60571 | 4,25 | 2980 | 5,45 | 39,1 |
| 0,70 | 788145 | 1,90 | 344578 | 3,10 | 54799 | 4,30 | 2555 | 5,50 | 31,7 |
| 0,75 | 773373 | 1,95 | 326355 | 3,15 | 49471 | 4,35 | 2186 | 5,55 | 25,6 |
| 0,80 | 758036 | 2,00 | 308538 | 3,20 | 44565 | 4,40 | 1866 | 5,60 | 20,7 |
| 0,85 | 742154 | 2,05 | 291160 | 3,25 | 40059 | 4,45 | 1589 | 5,65 | 16,6 |
| 0,90 | 725747 | 2,10 | 274253 | 3,30 | 35930 | 4,50 | 1350 | 5,70 | 13,3 |
| 0,95 | 708840 | 2,15 | 257846 | 3,35 | 32157 | 4,55 | 1144 | 5,75 | 10,7 |
| 1,00 | 691462 | 2,20 | 241964 | 3,40 | 28717 | 4,60 | 968 | 5,80 | 8,5 |
| 1,05 | 673645 | 2,25 | 226627 | 3,45 | 25588 | 4,65 | 816 | 5,85 | 6,8 |
| 1,10 | 655422 | 2,30 | 211855 | 3,50 | 22750 | 4,70 | 687 | 5,90 | 5,4 |
| 1,15 | 636831 | 2,35 | 197663 | 3,55 | 20182 | 4,75 | 577 | 5,95 | 4,3 |
| | | | | | | | | 6,00 | 3,4 |

ANEXOS

Anexo J: DOE 2 fatores a 3 níveis, combinações e ordem pela qual foram experimentadas, valores das respostas, massa de composto vedante e $-10\log(S^2)$

ANEXOS

Tabela J. 1 - DOE 2 fatores a 3 níveis, combinações e ordem pela qual foram experimentadas, valores das respostas, massa de composto vedante e $-10\log(S^2)$

| StdOrder | RunOrder | Pressão | Cliques | 1 | | | | 2 | | |
|----------|----------|---------|---------|-------------|-------------|------------------|------------|-------------|-------------|------------------|
| | | | | MASSA TAMPO | MASSA TOTAL | MASSA C. VEDANTE | CAM. VISÃO | MASSA TAMPO | MASSA TOTAL | MASSA C. VEDANTE |
| 3 | 1 | 0.8 | 35 | 12.17 | 12.228 | 0.058 | REJEITADO | 12.235 | 12.3 | 0.065 |
| 17 | 2 | 1.02 | 30 | 11.956 | 12.043 | 0.087 | ACEITE | 11.926 | 12.016 | 0.09 |
| 10 | 3 | 0.8 | 25 | 12.187 | 12.227 | 0.04 | REJEITADO | 12.082 | 12.119 | 0.037 |
| 16 | 4 | 1.02 | 25 | 11.734 | 11.801 | 0.067 | ACEITE | 11.716 | 11.765 | 0.049 |
| 1 | 5 | 0.8 | 25 | 11.929 | 11.976 | 0.047 | ACEITE | 11.949 | 11.999 | 0.05 |
| 6 | 6 | 0.96 | 35 | 12.183 | 12.249 | 0.066 | REJEITADO | 12.192 | 12.273 | 0.081 |
| 9 | 7 | 1.02 | 35 | 12.105 | 12.188 | 0.083 | REJEITADO | 12.104 | 12.183 | 0.079 |
| 13 | 8 | 0.96 | 25 | 12.127 | 12.185 | 0.058 | REJEITADO | 12.057 | 12.111 | 0.054 |
| 2 | 9 | 0.8 | 30 | 12.071 | 12.124 | 0.053 | REJEITADO | 12.073 | 12.128 | 0.055 |
| 15 | 10 | 0.96 | 35 | 12.083 | 12.176 | 0.093 | REJEITADO | 12.08 | 12.175 | 0.095 |
| 4 | 11 | 0.96 | 25 | 12.136 | 12.202 | 0.066 | REJEITADO | 12.104 | 12.17 | 0.066 |
| 18 | 12 | 1.02 | 35 | 12.179 | 12.285 | 0.106 | REJEITADO | 11.966 | 12.071 | 0.105 |
| 12 | 13 | 0.8 | 35 | 12.285 | 12.365 | 0.08 | REJEITADO | 12.218 | 12.299 | 0.081 |
| 11 | 14 | 0.8 | 30 | 12.084 | 12.147 | 0.063 | REJEITADO | 11.993 | 12.057 | 0.064 |
| 8 | 15 | 1.02 | 30 | 12.055 | 12.135 | 0.08 | REJEITADO | 12.072 | 12.153 | 0.081 |
| 7 | 16 | 1.02 | 25 | 12.011 | 12.069 | 0.058 | REJEITADO | 11.796 | 11.855 | 0.059 |
| 5 | 17 | 0.96 | 30 | 11.856 | 11.929 | 0.073 | REJEITADO | 12.062 | 12.135 | 0.073 |
| 14 | 18 | 0.96 | 30 | 12.121 | 12.189 | 0.068 | REJEITADO | 12.023 | 12.091 | 0.068 |

ANEXOS

Tabela J. 1 - DOE 2 fatores a 3 níveis, combinações e ordem pela qual foram experimentadas, valores das respostas, massa de composto vedante e $-10\log(S^2)$ - continuação

| | 3 | | | | 4 | | | | |
|------------|-------------|-------------|------------------|------------|-------------|-------------|------------------|------------|-------------|
| CAM. VISÃO | MASSA TAMPO | MASSA TOTAL | MASSA C. VEDANTE | CAM. VISÃO | MASSA TAMPO | MASSA TOTAL | MASSA C. VEDANTE | CAM. VISÃO | MASSA TAMPO |
| REJEITADO | 12.161 | 12.235 | 0.074 | ACEITE | 12.168 | 12.237 | 0.069 | ACEITE | 12.081 |
| ACEITE | 12.04 | 12.129 | 0.089 | ACEITE | 11.971 | 12.067 | 0.096 | ACEITE | 11.965 |
| REJEITADO | 12.103 | 12.136 | 0.033 | REJEITADO | 12.149 | 12.185 | 0.036 | REJEITADO | 12.155 |
| ACEITE | 11.745 | 11.818 | 0.073 | ACEITE | 11.779 | 11.852 | 0.073 | ACEITE | 12.091 |
| ACEITE | 12.01 | 12.06 | 0.05 | ACEITE | 11.882 | 11.924 | 0.042 | ACEITE | 12.061 |
| REJEITADO | 12.12 | 12.198 | 0.078 | REJEITADO | 12.164 | 12.244 | 0.08 | REJEITADO | 12.208 |
| REJEITADO | 12.18 | 12.257 | 0.077 | REJEITADO | 12.109 | 12.19 | 0.081 | REJEITADO | 12.089 |
| REJEITADO | 12.033 | 12.089 | 0.056 | REJEITADO | 12.038 | 12.095 | 0.057 | REJEITADO | 11.983 |
| REJEITADO | 12.121 | 12.177 | 0.056 | REJEITADO | 12.073 | 12.129 | 0.056 | REJEITADO | 12.094 |
| REJEITADO | 11.907 | 12.004 | 0.097 | REJEITADO | 11.942 | 12.036 | 0.094 | REJEITADO | 11.987 |
| REJEITADO | 12.188 | 12.252 | 0.064 | REJEITADO | 12.117 | 12.185 | 0.068 | REJEITADO | 12.116 |
| REJEITADO | 11.9 | 12.005 | 0.105 | REJEITADO | 11.894 | 12 | 0.106 | REJEITADO | 12.089 |
| REJEITADO | 12.197 | 12.277 | 0.08 | REJEITADO | 12.284 | 12.363 | 0.079 | REJEITADO | 12.212 |
| REJEITADO | 12.001 | 12.065 | 0.064 | REJEITADO | 11.938 | 12.001 | 0.063 | REJEITADO | 11.95 |
| REJEITADO | 12.016 | 12.097 | 0.081 | REJEITADO | 12.052 | 12.135 | 0.083 | REJEITADO | 12.049 |
| REJEITADO | 11.862 | 11.92 | 0.058 | REJEITADO | 11.873 | 11.933 | 0.06 | REJEITADO | 11.831 |
| REJEITADO | 12.115 | 12.188 | 0.073 | REJEITADO | 12.144 | 12.213 | 0.069 | REJEITADO | 12.201 |
| REJEITADO | 12.159 | 12.228 | 0.069 | REJEITADO | 12.027 | 12.088 | 0.061 | REJEITADO | 11.99 |

ANEXOS

Tabela J. 1 - DOE 2 fatores a 3 níveis, combinações e ordem pela qual foram experimentadas, valores das respostas, massa de composto vedante e $-10\log(S^2)$ - continuação

| 5 | | | 6 | | | | | |
|-------------|------------------|------------|-------------|-------------|------------------|------------|-------------|-------------|
| MASSA TOTAL | MASSA C. VEDANTE | CAM. VISÃO | MASSA TAMPO | MASSA TOTAL | MASSA C. VEDANTE | CAM. VISÃO | MASSA TAMPO | MASSA TOTAL |
| 12.154 | 0.073 | REJEITADO | 12.079 | 12.218 | 0.139 | ACEITE | 12.142 | 12.212 |
| 12.053 | 0.088 | ACEITE | 12.116 | 12.205 | 0.089 | ACEITE | 11.968 | 12.055 |
| 12.195 | 0.04 | REJEITADO | 12.125 | 12.16 | 0.035 | REJEITADO | 12.135 | 12.172 |
| 12.162 | 0.071 | ACEITE | 12.016 | 12.087 | 0.071 | ACEITE | 11.949 | 12.021 |
| 12.105 | 0.044 | ACEITE | 11.951 | 11.995 | 0.044 | REJEITADO | 12.036 | 12.087 |
| 12.285 | 0.077 | REJEITADO | 12.058 | 12.137 | 0.079 | REJEITADO | 12.154 | 12.234 |
| 12.17 | 0.081 | REJEITADO | 12.188 | 12.272 | 0.084 | REJEITADO | 12.119 | 12.201 |
| 12.038 | 0.055 | REJEITADO | 11.985 | 12.044 | 0.059 | REJEITADO | 12.077 | 12.135 |
| 12.15 | 0.056 | REJEITADO | 12.155 | 12.208 | 0.053 | REJEITADO | 12.088 | 12.142 |
| 12.081 | 0.094 | REJEITADO | 11.933 | 12.027 | 0.094 | REJEITADO | 12.127 | 12.22 |
| 12.182 | 0.066 | REJEITADO | 12.214 | 12.28 | 0.066 | REJEITADO | 12.208 | 12.274 |
| 12.195 | 0.106 | REJEITADO | 12.166 | 12.272 | 0.106 | REJEITADO | 12.111 | 12.216 |
| 12.294 | 0.082 | REJEITADO | 12.216 | 12.297 | 0.081 | REJEITADO | 12.231 | 12.307 |
| 12.012 | 0.062 | REJEITADO | 12.071 | 12.133 | 0.062 | REJEITADO | 11.908 | 11.97 |
| 12.13 | 0.081 | REJEITADO | 12.134 | 12.216 | 0.082 | REJEITADO | 12.045 | 12.124 |
| 11.891 | 0.06 | REJEITADO | 11.852 | 11.913 | 0.061 | REJEITADO | 11.923 | 11.981 |
| 12.268 | 0.067 | REJEITADO | 12.26 | 12.33 | 0.07 | REJEITADO | 12.134 | 12.202 |
| 12.057 | 0.067 | REJEITADO | 12.039 | 12.108 | 0.069 | REJEITADO | 11.946 | 12.016 |

ANEXOS

**Tabela J. 1 - DOE 2 fatores a 3 níveis, combinações e ordem pela qual foram experimentadas, valores das respostas, massa de composto vedante e $-10\log(S^2)$
- continuação**

| 7 | | 8 | | | | 9 | | |
|------------------|------------|-------------|-------------|------------------|------------|-------------|-------------|------------------|
| MASSA C. VEDANTE | CAM. VISÃO | MASSA TAMPO | MASSA TOTAL | MASSA C. VEDANTE | CAM. VISÃO | MASSA TAMPO | MASSA TOTAL | MASSA C. VEDANTE |
| 0.07 | REJEITADO | 12.177 | 12.247 | 0.07 | ACEITE | 12.15 | 12.156 | 0.006 |
| 0.087 | ACEITE | 11.935 | 12.027 | 0.092 | ACEITE | 11.924 | 12.014 | 0.09 |
| 0.037 | REJEITADO | 11.959 | 11.999 | 0.04 | REJEITADO | 12.084 | 12.119 | 0.035 |
| 0.072 | ACEITE | 11.89 | 11.964 | 0.074 | ACEITE | 11.872 | 11.941 | 0.069 |
| 0.051 | ACEITE | 11.916 | 11.971 | 0.055 | ACEITE | 11.908 | 11.962 | 0.054 |
| 0.08 | REJEITADO | 12.214 | 12.293 | 0.079 | REJEITADO | 12.213 | 12.294 | 0.081 |
| 0.082 | REJEITADO | 12.147 | 12.231 | 0.084 | REJEITADO | 12.076 | 12.157 | 0.081 |
| 0.058 | REJEITADO | 12.001 | 12.057 | 0.056 | REJEITADO | 11.976 | 12.033 | 0.057 |
| 0.054 | REJEITADO | 12.117 | 12.171 | 0.054 | REJEITADO | 12.152 | 12.209 | 0.057 |
| 0.093 | REJEITADO | 12.08 | 12.176 | 0.096 | REJEITADO | 12.056 | 12.15 | 0.094 |
| 0.066 | REJEITADO | 12.181 | 12.246 | 0.065 | REJEITADO | 12.249 | 12.316 | 0.067 |
| 0.105 | REJEITADO | 12.119 | 12.224 | 0.105 | REJEITADO | 12.137 | 12.243 | 0.106 |
| 0.076 | REJEITADO | 12.22 | 12.29 | 0.07 | REJEITADO | 12.191 | 12.257 | 0.066 |
| 0.062 | REJEITADO | 11.948 | 12.007 | 0.059 | REJEITADO | 11.995 | 12.057 | 0.062 |
| 0.079 | REJEITADO | 12.051 | 12.132 | 0.081 | REJEITADO | 12.164 | 12.244 | 0.08 |
| 0.058 | REJEITADO | 12.072 | 12.131 | 0.059 | REJEITADO | 12.013 | 12.073 | 0.06 |
| 0.068 | REJEITADO | 12.108 | 12.175 | 0.067 | REJEITADO | 12.095 | 12.164 | 0.069 |
| 0.07 | REJEITADO | 11.917 | 11.984 | 0.067 | REJEITADO | 12.025 | 12.092 | 0.067 |

ANEXOS

Tabela J. 1 - DOE 2 fatores a 3 níveis, combinações e ordem pela qual foram experimentadas, valores das respostas, massa de composto vedante e $-10\log(S^2)$ - continuação

| CAM. VISÃO | 10 | | | CAM. VISÃO | RESPOSTA | |
|------------|-------------|-------------|------------------|------------|------------|----------------|
| | MASSA TAMPO | MASSA TOTAL | MASSA C. VEDANTE | | Média (mg) | $(-10\log)S^2$ |
| ACEITE | 12.05 | 12.118 | 0.068 | REJEITADO | 69.20 | -19.13 |
| ACEITE | 11.946 | 12.038 | 0.092 | ACEITE | 90.00 | -14.37 |
| REJEITADO | 12.123 | 12.157 | 0.034 | REJEITADO | 36.70 | -14.14 |
| ACEITE | 11.714 | 11.767 | 0.053 | ACEITE | 67.20 | -15.98 |
| ACEITE | 12.024 | 12.082 | 0.058 | ACEITE | 49.50 | -3.01 |
| REJEITADO | 12.166 | 12.242 | 0.076 | REJEITADO | 77.70 | -21.39 |
| REJEITADO | 12.055 | 12.138 | 0.083 | REJEITADO | 81.50 | -15.27 |
| REJEITADO | 12.075 | 12.132 | 0.057 | REJEITADO | 56.70 | -16.07 |
| REJEITADO | 12.043 | 12.097 | 0.054 | REJEITADO | 54.80 | -24.59 |
| REJEITADO | 12.133 | 12.226 | 0.093 | REJEITADO | 94.30 | |
| REJEITADO | 12.174 | 12.236 | 0.062 | REJEITADO | 65.60 | |
| REJEITADO | 12.21 | 12.315 | 0.105 | REJEITADO | 105.50 | |
| REJEITADO | 12.274 | 12.343 | 0.069 | REJEITADO | 76.40 | |
| REJEITADO | 11.952 | 12.013 | 0.061 | REJEITADO | 62.20 | |
| REJEITADO | 12.005 | 12.087 | 0.082 | REJEITADO | 81.00 | |
| REJEITADO | 11.989 | 12.046 | 0.057 | REJEITADO | 59.00 | |
| REJEITADO | 12.018 | 12.088 | 0.07 | REJEITADO | 69.90 | |
| REJEITADO | 11.921 | 11.994 | 0.073 | REJEITADO | 67.90 | |

Anexo K: DOE 2 fatores a 3 níveis, gráficos de normalidade de resíduos, homocedasticidade e resíduos em função da ordem de realização das experiências

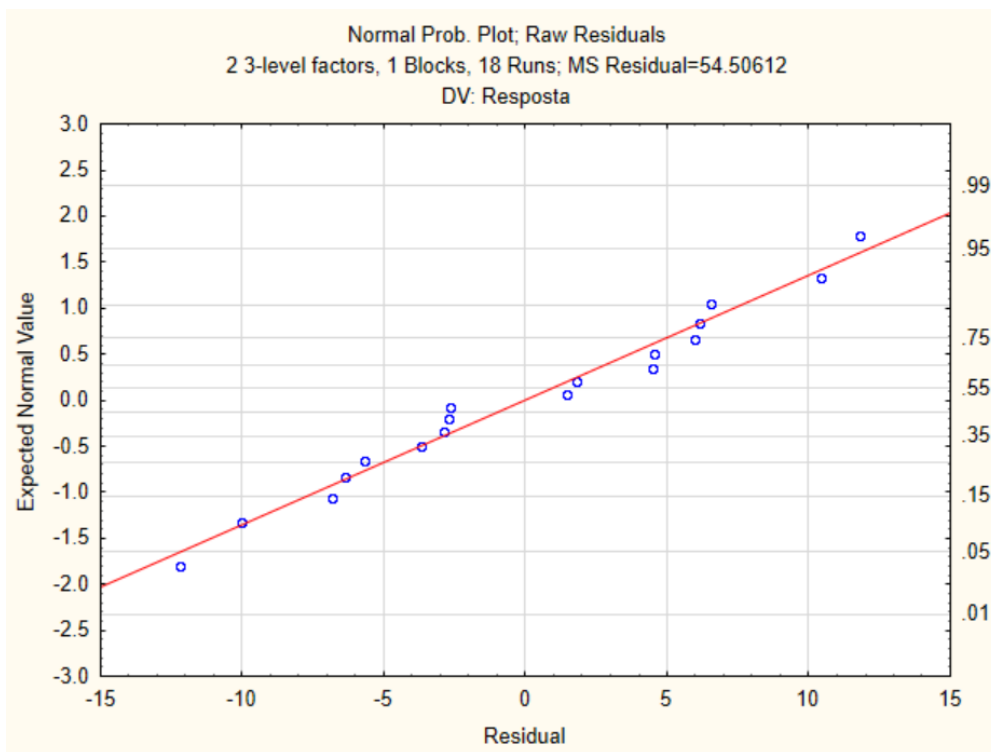


Fig. K. 1 - Gráfico de normalidade, DOE 2 fatores a 3 níveis

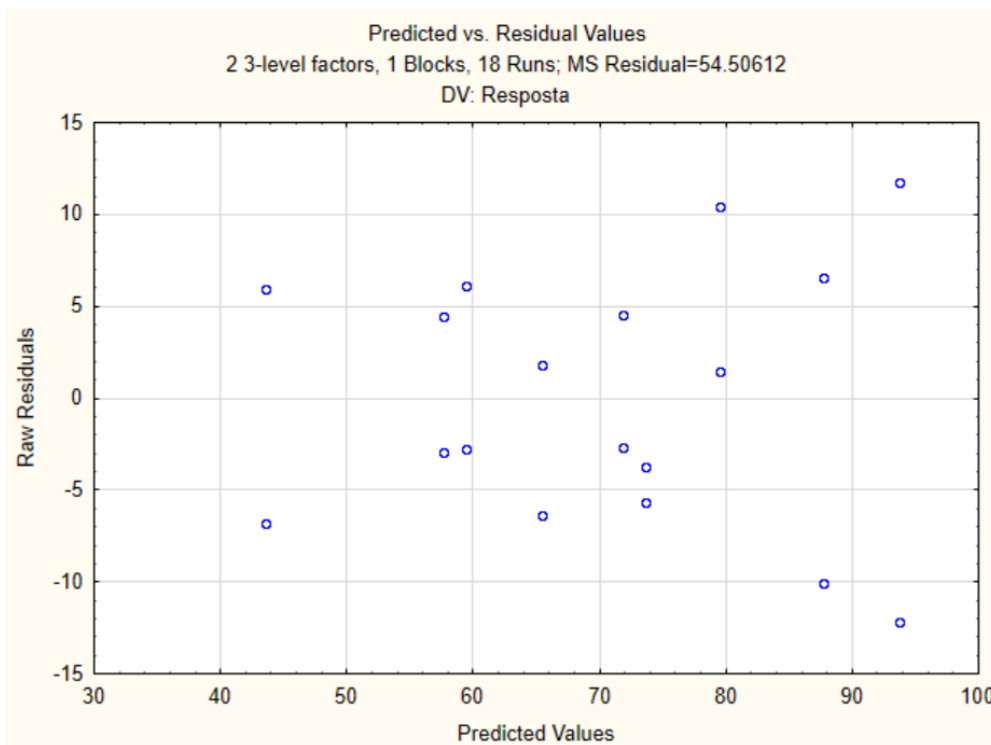


Fig. K. 2 - Gráfico homocedasticidade, DOE 2 fatores a 3 níveis

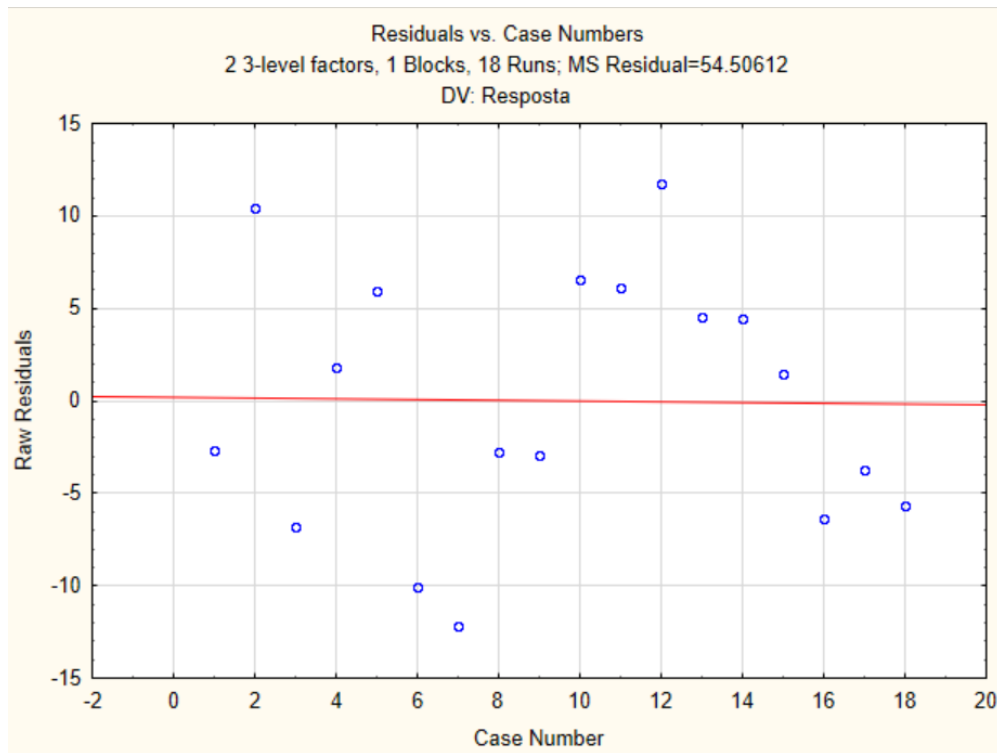


Fig. K. 3 - Gráfico dos resíduos em função da ordem das experiências, DOE 2 fatores a 3 níveis

Anexo L: DOE 2 fatores a 3 níveis, gráficos de normalidade de resíduos, homocedasticidade e resíduos em função da ordem de realização das experiências, $-10\log(S^2)$



Fig. L. 1 - Gráfico de normalidade, DOE 2 fatores a 3 níveis, $-10\log(S^2)$

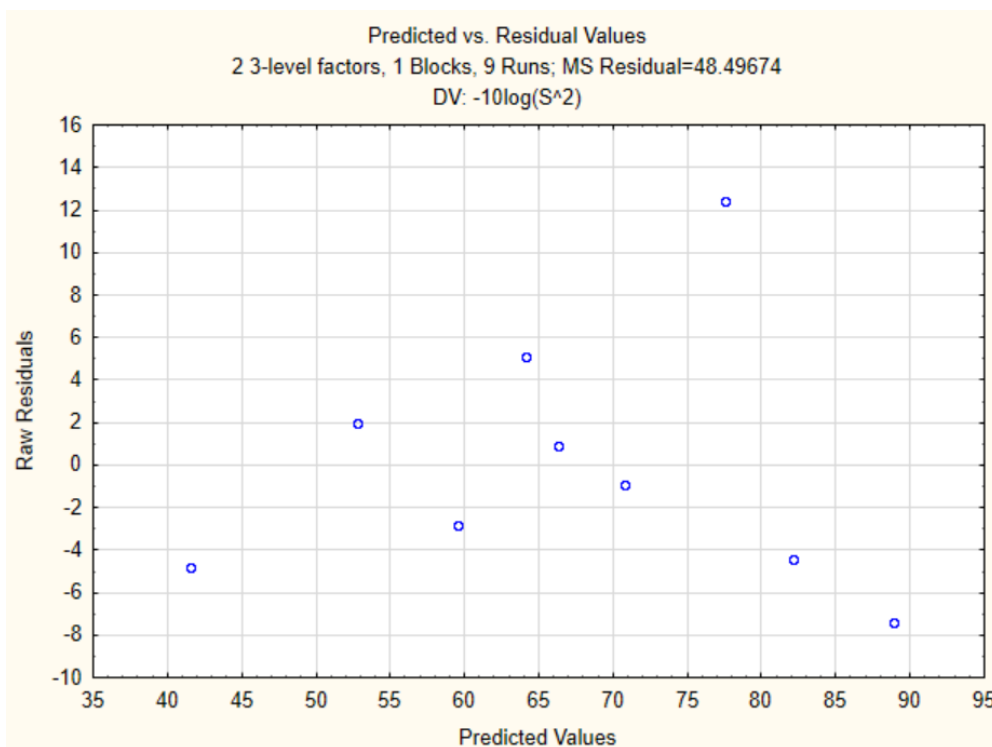


Fig. L. 2 - Gráfico homocedasticidade, DOE 2 fatores a 3 níveis $-10\log(S^2)$

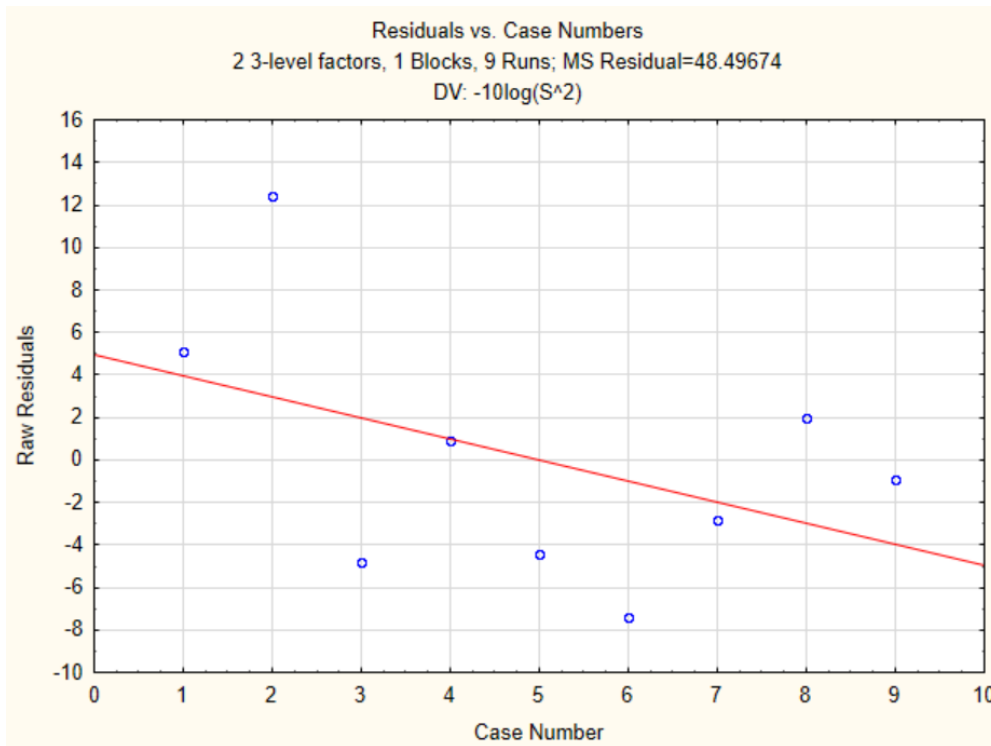


Fig. L. 3 - Gráfico dos resíduos em função da ordem das experiências, DOE 2 fatores a 3 níveis, $-10\log(S^2)$

ANEXOS

Anexo M: DOE 3 fatores a 3 níveis, combinações e ordem pela qual foram experimentadas, valores da resposta massa de composto vedante

ANEXOS

Tabela M. 1 - DOE 3 fatores a 3 níveis, combinações e ordem pela qual foram experimentadas, valores da resposta massa de composto vedante

| StdOrder | RunOrder | Pressão | Cliques | Ajuste | I | | | | MASSA TAMPO | MASSA TOTAL |
|----------|----------|---------|---------|--------|------------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | | | | MASSA C. VEDANTE | CAM. VISÃO | MASSA TAMPO | MASSA TOTAL | | |
| 25 | 1 | 1.02 | 35 | 12 | 12.158 | 12.245 | 0.087 | ACEITE | 12.015 | 12.102 |
| 7 | 2 | 0.8 | 35 | 12 | 12.246 | 12.312 | 0.066 | ACEITE | 12.154 | 12.218 |
| 12 | 3 | 0.96 | 25 | 20 | 12.044 | 12.086 | 0.042 | ACEITE | 11.92 | 11.96 |
| 6 | 4 | 0.8 | 30 | 20 | 12.187 | 12.236 | 0.049 | ACEITE | 12.151 | 12.199 |
| 2 | 5 | 0.8 | 25 | 16 | 12.134 | 12.168 | 0.034 | ACEITE | 12.113 | 12.144 |
| 20 | 6 | 1.02 | 25 | 16 | 11.928 | 11.972 | 0.044 | REJEITADO | 11.99 | 12.026 |
| 19 | 7 | 1.02 | 25 | 12 | 12.166 | 12.209 | 0.043 | REJEITADO | 12.075 | 12.116 |
| 23 | 8 | 1.02 | 30 | 16 | 12.114 | 12.185 | 0.071 | ACEITE | 11.868 | 11.937 |
| 1 | 9 | 0.8 | 25 | 12 | 11.924 | 11.96 | 0.036 | ACEITE | 12.036 | 12.071 |
| 3 | 10 | 0.8 | 25 | 20 | 12.122 | 12.155 | 0.033 | ACEITE | 12.081 | 12.112 |
| 18 | 11 | 0.96 | 35 | 20 | 12.025 | 12.103 | 0.078 | ACEITE | 11.996 | 12.074 |
| 16 | 12 | 0.96 | 35 | 12 | 12.16 | 12.237 | 0.077 | ACEITE | 12.195 | 12.272 |
| 22 | 13 | 1.02 | 30 | 12 | 12.063 | 12.133 | 0.07 | ACEITE | 12.152 | 12.224 |
| 4 | 14 | 0.8 | 30 | 12 | 12.183 | 12.232 | 0.049 | ACEITE | 12.08 | 12.129 |
| 8 | 15 | 0.8 | 35 | 16 | 12.186 | 12.248 | 0.062 | ACEITE | 12.105 | 12.172 |
| 5 | 16 | 0.8 | 30 | 16 | 12.009 | 12.058 | 0.049 | ACEITE | 12.037 | 12.087 |
| 14 | 17 | 0.96 | 30 | 16 | 12.053 | 12.113 | 0.06 | ACEITE | 11.929 | 11.992 |
| 13 | 18 | 0.96 | 30 | 12 | 12.005 | 12.065 | 0.06 | ACEITE | 12.126 | 12.186 |
| 26 | 19 | 1.02 | 35 | 16 | 11.913 | 11.996 | 0.083 | ACEITE | 11.995 | 12.078 |
| 17 | 20 | 0.96 | 35 | 16 | 12.064 | 12.142 | 0.078 | ACEITE | 12.073 | 12.15 |
| 15 | 21 | 0.96 | 30 | 20 | 12.233 | 12.296 | 0.063 | ACEITE | 12.087 | 12.151 |
| 27 | 22 | 1.02 | 35 | 20 | 12.162 | 12.245 | 0.083 | ACEITE | 11.852 | 11.936 |
| 10 | 23 | 0.96 | 25 | 12 | 12.171 | 12.209 | 0.038 | ACEITE | 12.175 | 12.214 |
| 21 | 24 | 1.02 | 25 | 20 | 12.157 | 12.203 | 0.046 | ACEITE | 12.197 | 12.239 |
| 24 | 25 | 1.02 | 30 | 20 | 11.98 | 12.052 | 0.072 | ACEITE | 11.957 | 12.028 |
| 11 | 26 | 0.96 | 25 | 16 | 12.143 | 12.182 | 0.039 | ACEITE | 12.144 | 12.185 |
| 9 | 27 | 0.8 | 35 | 20 | 11.869 | 11.933 | 0.064 | ACEITE | 11.946 | 12.01 |

ANEXOS

Tabela M. 1 - DOE 3 fatores a 3 níveis, combinações e ordem pela qual foram experimentadas, valores da resposta massa de composto vedante - continuação

| 2 | | 3 | | | | 4 | | |
|------------------|------------|-------------|-------------|------------------|------------|-------------|-------------|------------------|
| MASSA C. VEDANTE | CAM. VISÃO | MASSA TAMPO | MASSA TOTAL | MASSA C. VEDANTE | CAM. VISÃO | MASSA TAMPO | MASSA TOTAL | MASSA C. VEDANTE |
| 0.087 | ACEITE | 12.153 | 12.24 | 0.087 | ACEITE | 12.167 | 12.254 | 0.087 |
| 0.064 | ACEITE | 12.093 | 12.157 | 0.064 | ACEITE | 12.165 | 12.23 | 0.065 |
| 0.04 | ACEITE | 12.043 | 12.08 | 0.037 | ACEITE | 12.09 | 12.129 | 0.039 |
| 0.048 | ACEITE | 12.205 | 12.254 | 0.049 | ACEITE | 12.256 | 12.302 | 0.046 |
| 0.031 | ACEITE | 12.099 | 12.131 | 0.032 | ACEITE | 12.214 | 12.243 | 0.029 |
| 0.036 | REJEITADO | 12.134 | 12.179 | 0.045 | ACEITE | 12.237 | 12.281 | 0.044 |
| 0.041 | REJEITADO | 12.048 | 12.091 | 0.043 | REJEITADO | 12.059 | 12.102 | 0.043 |
| 0.069 | ACEITE | 11.962 | 12.029 | 0.067 | ACEITE | 11.848 | 11.916 | 0.068 |
| 0.035 | ACEITE | 12.14 | 12.175 | 0.035 | ACEITE | 12.022 | 12.055 | 0.033 |
| 0.031 | ACEITE | 12.111 | 12.143 | 0.032 | ACEITE | 12.147 | 12.18 | 0.033 |
| 0.078 | ACEITE | 12.056 | 12.134 | 0.078 | ACEITE | 11.874 | 11.95 | 0.076 |
| 0.077 | ACEITE | 12.114 | 12.19 | 0.076 | ACEITE | 12.175 | 12.252 | 0.077 |
| 0.072 | ACEITE | 12.223 | 12.295 | 0.072 | ACEITE | 12.28 | 12.353 | 0.073 |
| 0.049 | ACEITE | 11.863 | 11.914 | 0.051 | ACEITE | 11.951 | 12.001 | 0.05 |
| 0.067 | ACEITE | 12.007 | 12.072 | 0.065 | ACEITE | 12.076 | 12.138 | 0.062 |
| 0.05 | ACEITE | 12.088 | 12.137 | 0.049 | ACEITE | 12.023 | 12.072 | 0.049 |
| 0.063 | ACEITE | 12.151 | 12.214 | 0.063 | ACEITE | 11.776 | 11.84 | 0.064 |
| 0.06 | ACEITE | 12.263 | 12.322 | 0.059 | ACEITE | 12.059 | 12.118 | 0.059 |
| 0.083 | ACEITE | 12.143 | 12.224 | 0.081 | ACEITE | 12.207 | 12.29 | 0.083 |
| 0.077 | ACEITE | 12.135 | 12.212 | 0.077 | ACEITE | 11.851 | 11.926 | 0.075 |
| 0.064 | ACEITE | 12.168 | 12.232 | 0.064 | ACEITE | 12.311 | 12.376 | 0.065 |
| 0.084 | ACEITE | 11.881 | 11.964 | 0.083 | ACEITE | 11.997 | 12.082 | 0.085 |
| 0.039 | ACEITE | 12.154 | 12.195 | 0.041 | ACEITE | 12.178 | 12.22 | 0.042 |
| 0.042 | ACEITE | 12.148 | 12.19 | 0.042 | ACEITE | 12.216 | 12.258 | 0.042 |
| 0.071 | ACEITE | 12.182 | 12.252 | 0.07 | ACEITE | 12.219 | 12.289 | 0.07 |
| 0.041 | ACEITE | 12.227 | 12.267 | 0.04 | ACEITE | 12.197 | 12.238 | 0.041 |
| 0.064 | ACEITE | 12.176 | 12.239 | 0.063 | ACEITE | 12.076 | 12.137 | 0.061 |

ANEXOS

Tabela M. 1 - DOE 3 fatores a 3 níveis, combinações e ordem pela qual foram experimentadas, valores da resposta massa de composto vedante - continuação

| CAM. VISÃO | 5 | | | CAM. VISÃO | 6 | | | CAM. VISÃO | MASSA TAMPO |
|------------|-------------|-------------|------------------|------------|-------------|-------------|------------------|------------|-------------|
| | MASSA TAMPO | MASSA TOTAL | MASSA C. VEDANTE | | MASSA TAMPO | MASSA TOTAL | MASSA C. VEDANTE | | |
| ACEITE | 11.895 | 11.979 | 0.084 | ACEITE | 12.228 | 12.314 | 0.086 | ACEITE | 12.256 |
| ACEITE | 12.072 | 12.138 | 0.066 | ACEITE | 12.012 | 12.078 | 0.066 | ACEITE | 12.176 |
| ACEITE | 12.175 | 12.213 | 0.038 | ACEITE | 12.141 | 12.179 | 0.038 | ACEITE | 12.124 |
| ACEITE | 11.889 | 11.937 | 0.048 | ACEITE | 11.998 | 12.047 | 0.049 | ACEITE | 12.052 |
| ACEITE | 12.111 | 12.143 | 0.032 | ACEITE | 12.107 | 12.138 | 0.031 | ACEITE | 12.135 |
| REJEITADO | 12.142 | 12.182 | 0.04 | REJEITADO | 12.146 | 12.189 | 0.043 | ACEITE | 12.192 |
| REJEITADO | 12.085 | 12.129 | 0.044 | REJEITADO | 12.067 | 12.109 | 0.042 | REJEITADO | 12.083 |
| ACEITE | 11.906 | 11.974 | 0.068 | ACEITE | 12.137 | 12.206 | 0.069 | ACEITE | 11.95 |
| ACEITE | 12.022 | 12.058 | 0.036 | ACEITE | 11.987 | 12.022 | 0.035 | ACEITE | 12.004 |
| ACEITE | 12.18 | 12.214 | 0.034 | ACEITE | 12.119 | 12.151 | 0.032 | ACEITE | 12.17 |
| ACEITE | 11.815 | 11.892 | 0.077 | ACEITE | 11.808 | 11.886 | 0.078 | ACEITE | 12.121 |
| ACEITE | 12.262 | 12.339 | 0.077 | ACEITE | 12.229 | 12.306 | 0.077 | ACEITE | 12.147 |
| ACEITE | 12.198 | 12.27 | 0.072 | ACEITE | 12.222 | 12.292 | 0.07 | ACEITE | 12.291 |
| ACEITE | 11.962 | 12.013 | 0.051 | ACEITE | 11.919 | 11.968 | 0.049 | ACEITE | 11.95 |
| ACEITE | 12.005 | 12.07 | 0.065 | ACEITE | 11.991 | 12.057 | 0.066 | ACEITE | 12.003 |
| ACEITE | 12.036 | 12.084 | 0.048 | ACEITE | 12.099 | 12.147 | 0.048 | ACEITE | 12.059 |
| ACEITE | 11.895 | 11.959 | 0.064 | ACEITE | 12.024 | 12.088 | 0.064 | ACEITE | 11.829 |
| ACEITE | 12.197 | 12.256 | 0.059 | ACEITE | 12.28 | 12.34 | 0.06 | ACEITE | 12.097 |
| ACEITE | 11.934 | 12.016 | 0.082 | ACEITE | 12.069 | 12.15 | 0.081 | ACEITE | 12.158 |
| ACEITE | 11.961 | 12.038 | 0.077 | ACEITE | 11.949 | 12.026 | 0.077 | ACEITE | 11.93 |
| ACEITE | 12.089 | 12.154 | 0.065 | ACEITE | 12.167 | 12.23 | 0.063 | ACEITE | 12.296 |
| ACEITE | 11.856 | 11.939 | 0.083 | ACEITE | 11.933 | 12.016 | 0.083 | ACEITE | 12.061 |
| ACEITE | 12.177 | 12.217 | 0.04 | ACEITE | 12.167 | 12.206 | 0.039 | ACEITE | 12.179 |
| ACEITE | 12.145 | 12.189 | 0.044 | ACEITE | 12.155 | 12.197 | 0.042 | ACEITE | 12.169 |
| ACEITE | 12.149 | 12.217 | 0.068 | ACEITE | 12.221 | 12.291 | 0.07 | ACEITE | 12.27 |
| ACEITE | 12.135 | 12.174 | 0.039 | ACEITE | 12.177 | 12.217 | 0.04 | ACEITE | 12.22 |
| ACEITE | 12.023 | 12.086 | 0.063 | ACEITE | 12.191 | 12.253 | 0.062 | ACEITE | 12.115 |

ANEXOS

Tabela M. 1 - DOE 3 fatores a 3 níveis, combinações e ordem pela qual foram experimentadas, valores da resposta massa de composto vedante - continuação

| 7 | | | 8 | | | | | |
|-------------|------------------|------------|-------------|-------------|------------------|------------|-------------|-------------|
| MASSA TOTAL | MASSA C. VEDANTE | CAM. VISÃO | MASSA TAMPO | MASSA TOTAL | MASSA C. VEDANTE | CAM. VISÃO | MASSA TAMPO | MASSA TOTAL |
| 12.342 | 0.086 | ACEITE | 12.229 | 12.317 | 0.088 | ACEITE | 12.203 | 12.288 |
| 12.243 | 0.067 | ACEITE | 12.117 | 12.184 | 0.067 | ACEITE | 12.038 | 12.105 |
| 12.164 | 0.04 | ACEITE | 12.199 | 12.237 | 0.038 | ACEITE | 12.13 | 12.17 |
| 12.102 | 0.05 | ACEITE | 12.027 | 12.078 | 0.051 | ACEITE | 12.084 | 12.136 |
| 12.166 | 0.031 | ACEITE | 11.937 | 11.969 | 0.032 | ACEITE | 11.879 | 11.91 |
| 12.237 | 0.045 | REJEITADO | 12.175 | 12.22 | 0.045 | REJEITADO | 12.173 | 12.216 |
| 12.126 | 0.043 | REJEITADO | 11.986 | 12.029 | 0.043 | REJEITADO | 11.955 | 11.998 |
| 12.021 | 0.071 | ACEITE | 11.873 | 11.946 | 0.073 | ACEITE | 11.846 | 11.919 |
| 12.036 | 0.032 | ACEITE | 12.11 | 12.141 | 0.031 | ACEITE | 12.024 | 12.057 |
| 12.201 | 0.031 | ACEITE | 12.157 | 12.19 | 0.033 | ACEITE | 12.174 | 12.21 |
| 12.198 | 0.077 | ACEITE | 12.084 | 12.161 | 0.077 | ACEITE | 12.093 | 12.173 |
| 12.226 | 0.079 | ACEITE | 12.134 | 12.212 | 0.078 | ACEITE | 12.082 | 12.159 |
| 12.363 | 0.072 | ACEITE | 12.206 | 12.278 | 0.072 | ACEITE | 12.231 | 12.303 |
| 11.999 | 0.049 | ACEITE | 11.986 | 12.037 | 0.051 | ACEITE | 12.194 | 12.244 |
| 12.068 | 0.065 | ACEITE | 11.973 | 12.04 | 0.067 | ACEITE | 11.916 | 11.981 |
| 12.108 | 0.049 | ACEITE | 12.035 | 12.086 | 0.051 | ACEITE | 12.087 | 12.137 |
| 11.892 | 0.063 | ACEITE | 11.966 | 12.029 | 0.063 | ACEITE | 12.04 | 12.103 |
| 12.158 | 0.061 | ACEITE | 12.242 | 12.302 | 0.06 | ACEITE | 12.31 | 12.371 |
| 12.238 | 0.08 | ACEITE | 12.261 | 12.34 | 0.079 | ACEITE | 12.07 | 12.149 |
| 12.006 | 0.076 | ACEITE | 11.968 | 12.044 | 0.076 | ACEITE | 11.928 | 12.005 |
| 12.359 | 0.063 | ACEITE | 12.058 | 12.122 | 0.064 | ACEITE | 12.127 | 12.19 |
| 12.145 | 0.084 | ACEITE | 12.083 | 12.166 | 0.083 | ACEITE | 12.059 | 12.143 |
| 12.22 | 0.041 | ACEITE | 12.162 | 12.201 | 0.039 | ACEITE | 12.184 | 12.225 |
| 12.214 | 0.045 | ACEITE | 12.088 | 12.135 | 0.047 | ACEITE | 12.072 | 12.117 |
| 12.339 | 0.069 | ACEITE | 12.153 | 12.223 | 0.07 | ACEITE | 12.166 | 12.236 |
| 12.261 | 0.041 | ACEITE | 12.054 | 12.095 | 0.041 | ACEITE | 12.125 | 12.166 |
| 12.179 | 0.064 | ACEITE | 12.037 | 12.098 | 0.061 | ACEITE | 12.217 | 12.281 |

ANEXOS

Tabela M. 1 - DOE 3 fatores a 3 níveis, combinações e ordem pela qual foram experimentadas, valores da resposta massa de composto vedante - continuação

| 9 | | 10 | | | | RESPOSTA |
|------------------|------------|-------------|-------------|------------------|------------|------------|
| MASSA C. VEDANTE | CAM. VISÃO | MASSA TAMPO | MASSA TOTAL | MASSA C. VEDANTE | CAM. VISÃO | Média (mg) |
| 0.085 | ACEITE | 12.117 | 12.204 | 0.087 | ACEITE | 86.40 |
| 0.067 | ACEITE | 12.166 | 12.231 | 0.065 | ACEITE | 65.70 |
| 0.04 | ACEITE | 12.159 | 12.2 | 0.041 | ACEITE | 39.30 |
| 0.052 | ACEITE | 12.071 | 12.124 | 0.053 | ACEITE | 49.50 |
| 0.031 | ACEITE | 11.945 | 11.977 | 0.032 | ACEITE | 31.50 |
| 0.043 | REJEITADO | 12.187 | 12.229 | 0.042 | REJEITADO | 42.70 |
| 0.043 | REJEITADO | 11.949 | 11.99 | 0.041 | REJEITADO | 42.60 |
| 0.073 | ACEITE | 11.943 | 12.016 | 0.073 | ACEITE | 70.20 |
| 0.033 | ACEITE | 11.992 | 12.023 | 0.031 | ACEITE | 33.70 |
| 0.036 | ACEITE | 12.201 | 12.234 | 0.033 | ACEITE | 32.80 |
| 0.08 | ACEITE | 12.093 | 12.172 | 0.079 | ACEITE | 77.80 |
| 0.077 | ACEITE | 12.109 | 12.185 | 0.076 | ACEITE | 77.10 |
| 0.072 | ACEITE | 12.24 | 12.313 | 0.073 | ACEITE | 71.80 |
| 0.05 | ACEITE | 12.125 | 12.174 | 0.049 | ACEITE | 49.80 |
| 0.065 | ACEITE | 11.93 | 11.995 | 0.065 | ACEITE | 64.90 |
| 0.05 | ACEITE | 12.026 | 12.075 | 0.049 | ACEITE | 49.20 |
| 0.063 | ACEITE | 12.057 | 12.121 | 0.064 | ACEITE | 63.10 |
| 0.061 | ACEITE | 12.205 | 12.265 | 0.06 | ACEITE | 59.90 |
| 0.079 | ACEITE | 11.989 | 12.069 | 0.08 | ACEITE | 81.10 |
| 0.077 | ACEITE | 12 | 12.076 | 0.076 | ACEITE | 76.60 |
| 0.063 | ACEITE | 12.029 | 12.094 | 0.065 | ACEITE | 63.90 |
| 0.084 | ACEITE | 12.09 | 12.175 | 0.085 | ACEITE | 83.70 |
| 0.041 | ACEITE | 12.164 | 12.206 | 0.042 | ACEITE | 40.20 |
| 0.045 | ACEITE | 12.128 | 12.172 | 0.044 | ACEITE | 43.90 |
| 0.07 | ACEITE | 12.236 | 12.306 | 0.07 | ACEITE | 70.00 |
| 0.041 | ACEITE | 12.16 | 12.201 | 0.041 | ACEITE | 40.40 |
| 0.064 | ACEITE | 12.187 | 12.251 | 0.064 | ACEITE | 63.00 |

Anexo N: DOE 3 fatores a 3 níveis, gráficos de normalidade de resíduos, homocedasticidade e resíduos em função da ordem de realização das experiências

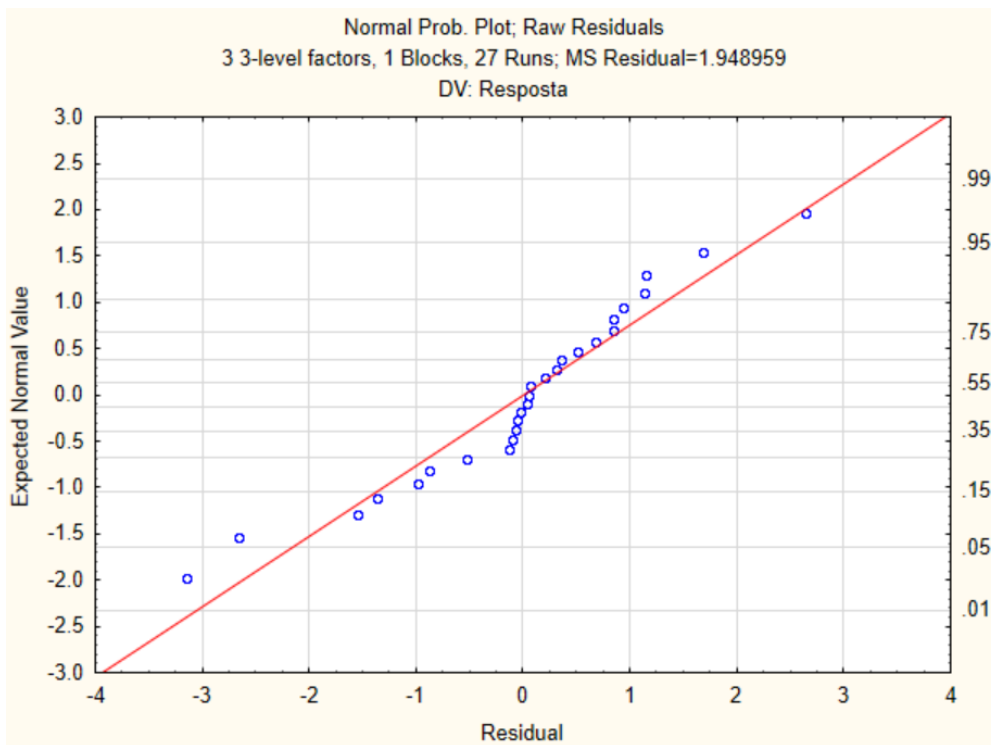


Fig. N. 1 - Gráfico de normalidade, DOE 3 fatores a 3 níveis

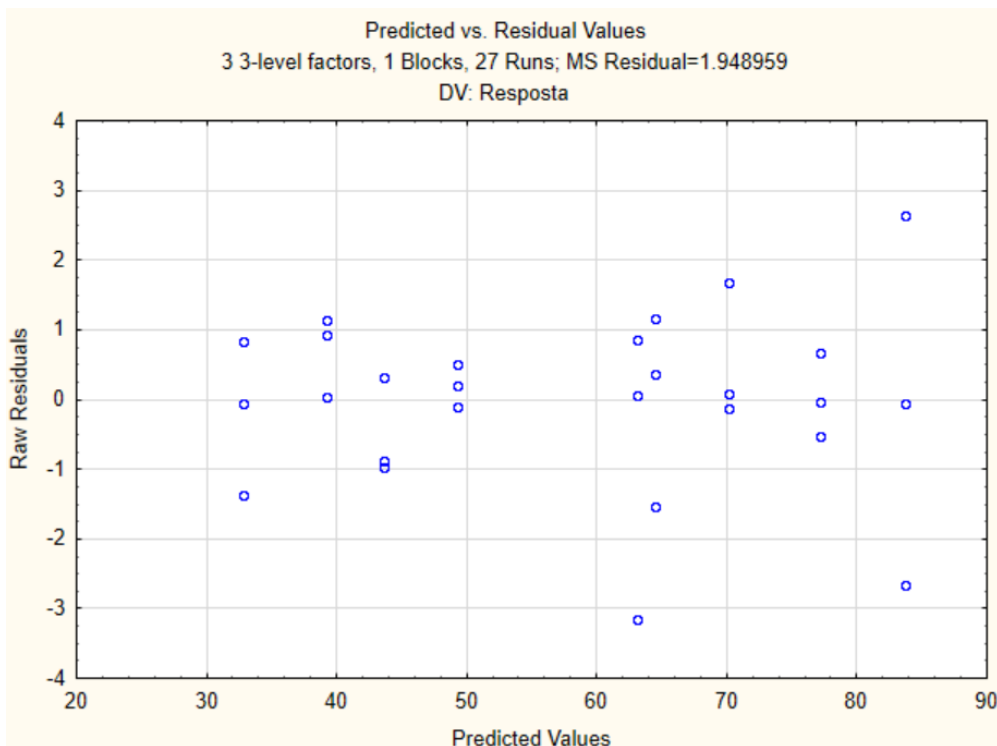


Fig. N. 2 - Gráfico de homocedasticidade, DOE 3 fatores a 3 níveis

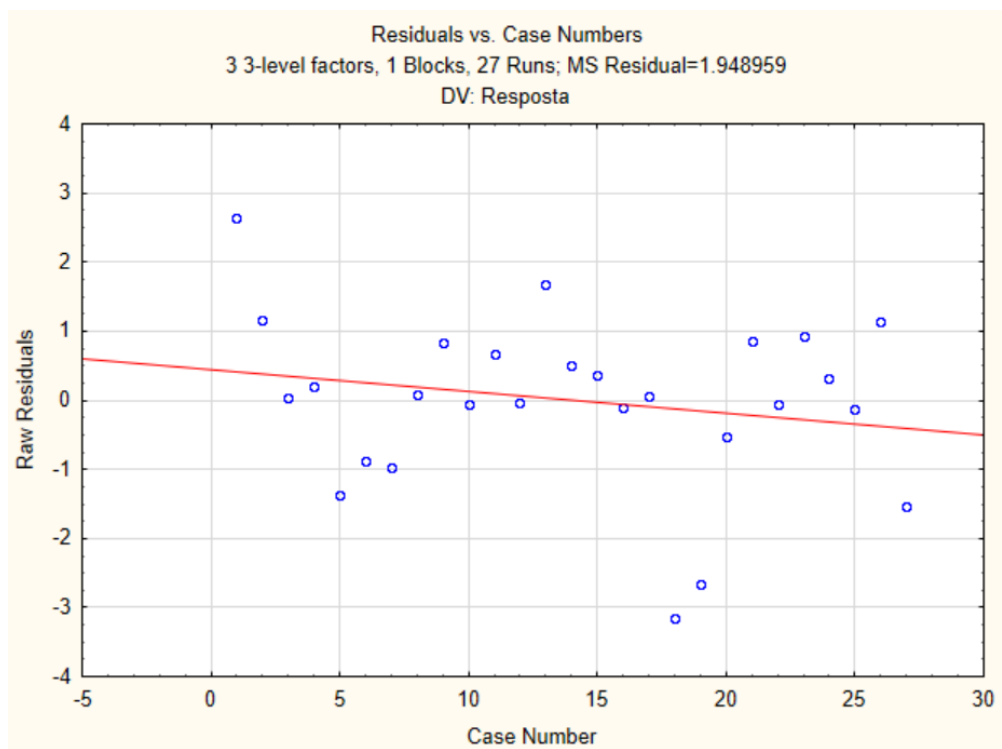


Fig. N. 3 - Gráfico dos resíduos em função da ordem das experiências, DOE 3 fatores a 3 níveis

ANEXOS

Anexo O: Dados pesagens ensaio de melhoria e análise pelas câmaras de visão

Tabela O. 1 - Dados pesagens ensaio de melhoria e análise pelas câmaras de visão

| Grupo | Nº tempo | Massa tempo | Massa total | Massa borracha | Câmara de visão |
|-------|----------|-------------|-------------|----------------|-----------------|
| 1 | 1 | 12.023 | 12.105 | 0.082 | ACEITE |
| | 2 | 12.164 | 12.246 | 0.082 | ACEITE |
| | 3 | 12.258 | 12.336 | 0.078 | ACEITE |
| | 4 | 11.975 | 12.052 | 0.077 | ACEITE |
| | 5 | 12.229 | 12.306 | 0.077 | ACEITE |
| 2 | 1 | 12.08 | 12.174 | 0.094 | ACEITE |
| | 2 | 12.315 | 12.4 | 0.085 | ACEITE |
| | 3 | 12.127 | 12.22 | 0.093 | ACEITE |
| | 4 | 12.224 | 12.32 | 0.096 | ACEITE |
| | 5 | 12.277 | 12.371 | 0.094 | ACEITE |
| 3 | 1 | 11.85 | 11.951 | 0.101 | ACEITE |
| | 2 | 12.199 | 12.285 | 0.086 | ACEITE |
| | 3 | 12.322 | 12.424 | 0.102 | ACEITE |
| | 4 | 12.143 | 12.235 | 0.092 | ACEITE |
| | 5 | 12.151 | 12.25 | 0.099 | ACEITE |
| 4 | 1 | 12.174 | 12.263 | 0.089 | ACEITE |
| | 2 | 12.188 | 12.278 | 0.09 | ACEITE |
| | 3 | 12.198 | 12.292 | 0.094 | ACEITE |
| | 4 | 12.179 | 12.274 | 0.095 | ACEITE |
| | 5 | 12.169 | 12.259 | 0.09 | ACEITE |
| 5 | 1 | 12.083 | 12.182 | 0.099 | ACEITE |
| | 2 | 12.06 | 12.16 | 0.1 | ACEITE |
| | 3 | 12.116 | 12.215 | 0.099 | ACEITE |
| | 4 | 12.114 | 12.212 | 0.098 | ACEITE |
| | 5 | 12.073 | 12.166 | 0.093 | ACEITE |
| 6 | 1 | 12.104 | 12.197 | 0.093 | ACEITE |
| | 2 | 12.114 | 12.2 | 0.086 | ACEITE |
| | 3 | 12.03 | 12.115 | 0.085 | ACEITE |
| | 4 | 12.11 | 12.202 | 0.092 | ACEITE |
| | 5 | 12.105 | 12.195 | 0.09 | ACEITE |
| 7 | 1 | 12.091 | 12.18 | 0.089 | ACEITE |
| | 2 | 12.124 | 12.212 | 0.088 | ACEITE |
| | 3 | 12.058 | 12.152 | 0.094 | ACEITE |
| | 4 | 11.942 | 12.035 | 0.093 | ACEITE |
| | 5 | 11.929 | 12.021 | 0.092 | ACEITE |

ANEXOS

Tabela O. 1 - Dados pesagens ensaio de melhoria e análise pelas câmaras de visão - continuação

| | | | | | |
|----|---|--------|--------|-------|--------|
| 8 | 1 | 11.935 | 12.027 | 0.092 | ACEITE |
| | 2 | 11.952 | 12.044 | 0.092 | ACEITE |
| | 3 | 11.934 | 12.027 | 0.093 | ACEITE |
| | 4 | 12.059 | 12.151 | 0.092 | ACEITE |
| | 5 | 12.116 | 12.214 | 0.098 | ACEITE |
| 9 | 1 | 12.043 | 12.141 | 0.098 | ACEITE |
| | 2 | 11.977 | 12.074 | 0.097 | ACEITE |
| | 3 | 12.168 | 12.26 | 0.092 | ACEITE |
| | 4 | 12.094 | 12.187 | 0.093 | ACEITE |
| | 5 | 12.087 | 12.184 | 0.097 | ACEITE |
| 10 | 1 | 11.994 | 12.09 | 0.096 | ACEITE |
| | 2 | 12.015 | 12.117 | 0.102 | ACEITE |
| | 3 | 12.05 | 12.148 | 0.098 | ACEITE |
| | 4 | 11.975 | 12.074 | 0.099 | ACEITE |
| | 5 | 12.055 | 12.158 | 0.103 | ACEITE |