



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Departamento de Engenharia Química

**Ferramentas da Qualidade no Processo de Soldadura
numa Indústria de Sistemas de Escapes**

MARIA MADALENA MESTRE BELO

(Licenciada em Saúde Ambiental)

Trabalho de Projeto ou Dissertação de natureza científica para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia da Qualidade e Ambiente

Orientador (es):

Doutora Isabel Maria da Silva João

Engenheiro Paulo Jorge Frederico Carraça

Júri:

Presidente: António Victor Carreira de Oliveira, Especialista, ISEL/IPL

Vogais:

António Gonçalves da Silva, Especialista, OE

Doutora Isabel Maria da Silva João, ISEL/IPL

Dezembro de 2022



INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

Departamento de Engenharia Química

**Ferramentas da Qualidade no Processo de Soldadura
numa Indústria de Sistemas de Escapes**

MARIA MADALENA MESTRE BELO

(Licenciada em Saúde Ambiental)

Trabalho de Projeto ou Dissertação de natureza científica para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia da Qualidade e Ambiente

Orientador (es):

Doutora Isabel Maria da Silva João

Engenheiro Paulo Jorge Frederico Carraça

Júri:

Presidente: António Victor Carreira de Oliveira, Especialista, ISEL/IPL

Vogais:

António Gonçalves da Silva, Especialista, OE

Doutora Isabel Maria da Silva João, ISEL/IPL

Dezembro de 2022

Agradecimentos

Se o desenvolvimento deste trabalho foi possível é fruto da colaboração e influência de muitas pessoas que participaram construtivamente em mais uma etapa da minha vida.

Em primeiro lugar começo por expressar o meu especial agradecimento à Tenneco Portugal, incluindo o diretor da fábrica, Victor de Sousa, que me acolheu ainda durante a licenciatura e me deu a oportunidade, suporte e disponibilidade em fornecer todas as condições para a realização dos estudos necessários para o desenvolvimento deste trabalho final de mestrado. Um agradecimento especial a todos os intervenientes deste meio tão exigente e competitivo como é o ramo automóvel, todos demonstraram vontade de partilhar o seu conhecimento e percebo que por vezes torna-se complicado chegar a todo o lado.

À minha chefe, Ana Afonso, por todo o incentivo, paciência, sugestões e amizade, tem sido um exemplo tanto a nível pessoal como profissional.

Ao Engenheiro Paulo Carraça, por todo o acompanhamento, transmissão de conhecimentos e disponibilidade que se revelaram de extrema importância na minha evolução.

Em especial quero agradecer à minha família por todo o apoio, paciência e esforço ao longo de todo o meu percurso académico e pessoal, em especial aos meus pais e irmão que me conseguiram sempre motivar e permitiram que tudo isto fosse possível, revelando-se o meu maior apoio.

Quero ainda agradecer aos meus amigos por todo companheirismo e amizade, não apenas ao longo deste período, mas também ao longo de todo o meu percurso académico e da minha vida pessoal.

Agradeço ao Instituto Superior de Engenharia de Lisboa e aos professores que me acompanharam nestes dois anos de mestrado pela formação e conhecimentos fornecidos no meu percurso académico. Uma atenção muito especial à minha orientadora, Doutora Isabel João, por todo o apoio prestado e que sempre se mostrou disponível para me ajudar, sem dúvida alguém com muito conhecimento e muito para ensinar.

A todos muito grata!

Resumo

Atualmente, as empresas do setor automóvel encontram-se no cerne da economia mundial, estando sujeitas a um grau de exigência cada vez maior por parte do consumidor final e sendo conseqüentemente obrigadas a melhorar a eficiência das suas operações de modo a estabelecerem objetivos e estratégias consistentes a partir de um sistema robusto. O presente trabalho explicita sintetizadamente o desenvolvimento e implementação de algumas ferramentas estatísticas da qualidade numa indústria automóvel, fazendo ponte com a contextualização do sistema de gestão da qualidade automóvel, a IATF 16949:2016. Este referencial contempla ferramentas e metodologias que devem ser implementadas, pelo que surgiu a necessidade de aplicar um estudo de Análise de Sistemas de Medição numa empresa de sistemas de escapes, de modo a assegurar o controlo estatístico de todos os equipamentos e sistemas de medição. Com o sistema de medição necessário verificado, foi ainda realizado um Planeamento de Desenho de Experiências de forma a perceber quais são as melhores condições de trabalho a adotar no processo de soldadura para uma referência produzida nas instalações da fábrica, especificamente em dois estágios de produção, face à preocupação no cumprimento das especificações de soldadura definidas pelo cliente.

Este trabalho veio dar resposta ao objetivo de implementar medidas para melhorar os processos produtivos, pois estas técnicas estatísticas de controlo e melhoria da qualidade constituem numa abordagem de suporte à redução da variabilidade e à monitorização do desempenho do processo produtivo com o objetivo de promover a estabilidade do processo de soldadura e melhorar a sua capacidade, e assim servir de base para consulta futura em casos semelhantes.

Palavras-chave: Qualidade, ferramentas da qualidade, indústria automóvel, Estudo MSA, Planeamento de Experiências

Abstract

Currently, companies of the automotive branch are one of the main points of the world economy, being subject to an ever-increasing degree of demand from the end consumer and consequently, based on a robust system, obliged to improve the efficiency of their operations in order to establish consistent objectives and strategies.

This work briefly explains the development and implementation of some statistical quality tools in the automotive industry, which make the bridge with the context of the automotive quality management system, the IATF 16949:2016.

This reference includes tools and methodologies which must be implemented, leading to the need to apply a Measurement Systems Analysis study in an exhaust systems company, in order to ensure the statistical control of all equipment and measurement systems.

With the necessary measurement system verified, an Experience Design Plan was also carried out in order to understand which are the best working conditions to adopt in the welding process, for a reference produced in the facilities, specifically in two stages of the production, with the aim to comply with the welding specifications defined by the customer

This work was a response to the objective of implementing measures to improve production processes, as these statistical control and quality improvement techniques are the support approach to reduce variability and monitoring the process performance of the production with the aim of promoting stability of the welding process as well as improving its capability, and thus serve as a basis for future consultation in similar cases

Keywords: Quality, quality tools, automotive industry, MSA Study, Design of Experiences

Lista de abreviaturas

| | |
|-------|---|
| AIAG | <i>Automotive Industry Action Group</i> |
| ANFIA | <i>Associazione Nazionale Filiera Indústria Automobilistica</i> |
| ANOVA | <i>Analysis Of Variance</i> |
| ANSI | <i>American National Standards Institute</i> |
| APQP | <i>Advanced Product Quality Planning</i> |
| ASQ | <i>American Society for Quality</i> |
| AVSQ | <i>ANFIA Valutazione Sistemi Qualità</i> |
| CEQ | Controlo Estatístico da Qualidade |
| CMM | Máquina de Medição por Coordenadas |
| COA | Robô/ Máquina de Soldadura Circular Automática |
| CQI | <i>Continuous Quality Improvement</i> |
| DFMEA | <i>Design Failure Mode and Effect Analysis</i> |
| DOE | <i>Design Of Experiments</i> |
| EAQF | <i>Evaluation Aptitude Qualité Fournisseur</i> |
| EFQM | <i>European Foundation for Quality Management</i> |
| EMM | Equipamento de Medição e Monitorização |
| FAC | Função de Autocorrelação |
| FACP | Função de Autocorrelação Parcial |
| FIFO | <i>Firt In First Out</i> |
| FMEA | <i>Failure Mode and Effect Analysis</i> |
| GWC | Comité de Garantia Global |
| IATF | <i>International Automotive Task Force</i> |
| IMDS | <i>International Material Data System</i> |
| IPQ | Instituto Português da Qualidade |
| ISO | <i>International Organization for Standardization</i> |
| ISQ | Instituto de Soldadura e Qualidade |
| JIS | <i>Just In Sequence</i> |
| JIT | <i>Just In Time</i> |
| KPI | <i>Key Performance Indicators</i> |
| LC | Limite Central |
| LIC | Limite Inferior de Controlo |
| LIE | Limite Inferior de Especificação |

| | |
|---------|---|
| LSC | Limite Superior de Controlo |
| LSE | Limite Superior de Especificação |
| MF | Montagem Final |
| MLA | <i>Maturity Level Assurance</i> |
| MSA | <i>Measurement System Analysis</i> |
| MTBF | <i>Mean Time Between Failures</i> |
| MTFF | <i>Mean Time to First Failure</i> |
| NHTSA | National Highway Traffic and Safety Administration |
| OE | <i>Original Equipment</i> |
| OEM | <i>Original Equipment Manufacturer</i> |
| OFAT | <i>One factor at time</i> |
| PEX-SPQ | Prémio de Excelência – Sistema Português da Qualidade |
| PFMEA | <i>Process Failure Mode and Effect Analysis</i> |
| PPAP | <i>Production Part Approval Process</i> |
| PSCR | Representante da Segurança e Conformidade do Produto |
| PSW | <i>Part Submission Warrant</i> |
| R&R | Repetibilidade e Reprodutibilidade |
| ROB | Robô/ Máquina de Soldadura Automática |
| RSM | Metodologia de Superfície de Resposta |
| RSMS | Padrão de Gestão de Substâncias Restritas |
| SGQ | Sistema de Gestão da Qualidade |
| SOP | <i>Start Of Production</i> |
| SPC | <i>Statistical Process Control</i> |
| SS | Somas Quadráticas |
| TQM | <i>Total Quality Management</i> |
| VDA | Associação Alemã da Indústria Automóvel |
| WIP | <i>Work in Progress</i> |

Índice

| | |
|--|------|
| Agradecimentos | iii |
| Resumo | iv |
| Abstract..... | v |
| Lista de abreviaturas | vi |
| Índice | viii |
| Índice de Figuras | x |
| Índice de Tabelas | xii |
| Capítulo 1 Introdução | 1 |
| 1.1 Enquadramento | 1 |
| 1.2 Contextualização do problema..... | 2 |
| 1.3 Objetivo | 5 |
| 1.4 Estrutura..... | 6 |
| Capítulo 2 A Empresa em estudo | 8 |
| 2.1 História da Tenneco | 8 |
| 2.2 Segurança e Qualidade do Produto | 11 |
| 2.3 A Tenneco em Portugal | 14 |
| 2.3.1 Sistema de Gestão da Qualidade na Tenneco Portugal | 15 |
| 2.3.2 <i>Just In Time / Just In Sequence</i> na Tenneco Portugal | 16 |
| 2.3.3 Estrutura organizacional | 18 |
| Capítulo 3 Gestão da Qualidade | 25 |
| 3.1 Evolução histórica da Qualidade | 25 |
| 3.2 Conceito de Qualidade | 29 |
| 3.3 As sete ferramentas básicas da qualidade | 33 |
| Capítulo 4 Desenho de Experiências | 37 |
| 4.1 Etapas de um desenho de experiências | 38 |
| 4.2 Experimentação Tradicional – OFAT..... | 40 |
| 4.3 Desenho Fatorial | 40 |
| 4.3.1 Desenho Fatorial Completo 2 ^k | 41 |
| Capítulo 5 Gestão da Qualidade Automóvel: IATF 16949 | 50 |
| 5.1 Ferramentas recomendadas pela IATF 16949 | 51 |
| 5.1.1 Controlo Estatístico do Processo | 56 |
| 5.1.2 Cartas de Controlo | 57 |

| | | |
|------------|---|-----|
| 5.1.3 | Estudos de Análise dos Sistemas e Medição | 66 |
| Capítulo 6 | Metodologia e Parte experimental | 72 |
| 6.1 | Estudo MSA..... | 74 |
| 6.1.1 | Estudo de estabilidade | 77 |
| 6.1.2 | Estudo de tendência (<i>bias</i>) e linearidade | 79 |
| 6.1.3 | Estudo de Repetibilidade e Reprodutibilidade | 81 |
| 6.1.4 | Análise dos resultados obtidos no estudo MSA | 85 |
| 6.2 | Desenho de Experiências | 87 |
| 6.2.1 | Planeamento Fatorial Completo 2^3 | 90 |
| Capítulo 7 | Considerações finais e conclusões..... | 98 |
| 7.1 | Perspetivas Futuras | 101 |
| | Referências Bibliográficas..... | 103 |
| | Anexos..... | 108 |
| I. | Fatores para construção das cartas de controlo por variáveis..... | 108 |
| II. | Procedimento estudos MSA - Parte do documento | 109 |
| III. | Interações entre fatores | 113 |
| II.I. | Efeitos dos fatores para a soldadura linear 5.1 | 113 |
| II.II. | Efeitos dos fatores para a soldadura circular 8..... | 114 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1: Linha cronológica da evolução da Tenneco..... | 9 |
| Figura 2: Distribuição mundial das empresas da Tenneco | 10 |
| Figura 3: Clientes da Tenneco (Customers, 2022) | 10 |
| Figura 4: Pirâmide das "obrigações" dos requisitos da legislação europeia..... | 12 |
| Figura 5: Localização geográfica da Tenneco Portugal | 14 |
| Figura 6: Política da Qualidade da Tenneco..... | 15 |
| Figura 7: Estrutura do SGQ da documentação da Tenneco..... | 16 |
| Figura 8: Organograma da Tenneco Portugal | 18 |
| Figura 9: <i>Layout</i> da fábrica da Tenneco, em Palmela | 19 |
| Figura 10: Fluxograma do processo produtivo em geral..... | 21 |
| Figura 11: Organização dos laboratórios existentes na empresa..... | 22 |
| Figura 12: Função perda de Taguchi | 30 |
| Figura 13: Aplicação das ferramentas básicas da qualidade | 36 |
| Figura 14: Representação geométrica do fatorial simples 2^2 | 42 |
| Figura 15: Representação geométrica dos contrastes correspondendo aos efeitos e às interações do fatorial 2^3 | 46 |
| Figura 16: Planeamento de projetos na indústria automóvel..... | 56 |
| Figura 17: Esquema de uma carta de controlo | 59 |
| Figura 18: Fluxograma para seleção de cartas de controlo | 59 |
| Figura 19: Carta com padrões representativos de cada regra | 62 |
| Figura 20: Diagrama de causas e efeitos da variação dos sistemas de medição | 67 |
| Figura 21: Possíveis fontes de variação num processo..... | 68 |
| Figura 22: Gráfico da Estabilidade | 68 |
| Figura 23: Desvio (<i>bias</i>)..... | 69 |
| Figura 24: Gráficos da Linearidade ao longo do tempo | 69 |
| Figura 25: Gráfico da Repetibilidade | 70 |
| Figura 26: Gráfico da Reprodutibilidade..... | 70 |
| Figura 27: Ciclo de atividades dos estudos MSA..... | 73 |
| Figura 28: Paquímetro digital em estudo..... | 75 |
| Figura 29: Método de medição de soldaduras | 75 |
| Figura 30: Característica do tubo de entrada a medir..... | 76 |

| | |
|---|-----|
| Figura 31: Análise das Cartas de Controlo para a Estabilidade do sistema de medição, <i>Minitab 20.3</i> | 78 |
| Figura 32: Análise da linearidade e desvio do sistema de medição, <i>Minitab 20.3</i> | 80 |
| Figura 33: Resultado da análise R&R ao equipamento de medição, <i>excel</i> | 83 |
| Figura 34: Análise do estudo R&R da média e amplitude dos resultados, com recurso ao <i>software Minitab 20.3</i> | 84 |
| Figura 35: Análise do estudo R&R, com recurso do <i>software Minitab 20.3</i> | 84 |
| Figura 36: Pontos de soldadura de um sistema de escape numerados..... | 87 |
| Figura 37: Macrografia do ponto 5.1 com soldadura linear mais larga (Penetração no silencioso de 0,396mm e no gancho de 0,575mm)..... | 88 |
| Figura 38: Macrografia do ponto 5.1 com soldadura linear mais fina (Penetração no silencioso de 0,440mm e no gancho de 1,940mm)..... | 88 |
| Figura 39: Macrografia do ponto 8 com soldadura circular mais larga (Penetração de 0,825mm)..... | 89 |
| Figura 40: Macrografia do ponto 8 com soldadura circular mais fina (Penetração de 0,360mm)..... | 89 |
| Figura 41: Medição da largura de uma soldadura | 90 |
| Figura 42: Gráfico de probabilidade normal dos efeitos para a soldadura linear 5.1, realizado com o apoio do <i>software Minitab 20.3</i> | 93 |
| Figura 43: Gráfico de probabilidade normal dos efeitos para a soldadura circular 8, realizado com o apoio do <i>software Minitab 20.3</i> | 96 |
| Figura 44: Gráfico dos efeitos dos fatores principais da soldadura linear 5.1 | 113 |
| Figura 45: Gráfico dos efeitos das interações dos fatores da soldadura linear 5.1 | 113 |
| Figura 46: Gráfico dos efeitos dos fatores principais da soldadura circular 8 | 114 |
| Figura 47: Gráfico dos efeitos das interações dos fatores da soldadura circular 8..... | 114 |

Índice de Tabelas

| | |
|--|-----|
| Tabela 1: Arranjo dos dados para o fatorial 2^2 (adaptado de Montgomery, 2009) | 42 |
| Tabela 2: Tabela de sinais para o fatorial simples 2^2 (adaptado de Montgomery, 2009) | 43 |
| Tabela 3: Tabela de Análise da Variância | 45 |
| Tabela 4: Quadro de sinais algébricos para o fatorial 2^3 | 47 |
| Tabela 5: Frequência de estudos MSA aplicada aos equipamentos de medição de acordo com a sua utilidade | 76 |
| Tabela 6: Recolha de dados para o estudo de Estabilidade | 77 |
| Tabela 7: Dados para estudo de Linearidade, <i>excel</i> | 79 |
| Tabela 8: Dados recolhidos para o estudo R&R do sistema de medição, <i>excel</i> | 82 |
| Tabela 9: Tabela ANOVA, com recurso ao <i>software Minitab 20.3</i> | 83 |
| Tabela 10: Matriz ortogonal com os níveis dos fatores em estudo | 91 |
| Tabela 11: Matriz de Desenho Fatorial 2^3 , <i>excel</i> | 91 |
| Tabela 12: Respostas do Desenho fatorial completo para a soldadura linear 5.1, <i>excel</i> | 92 |
| Tabela 13: Algoritmo de <i>Yates</i> soldadura linear 5.1, <i>excel</i> | 92 |
| Tabela 14: Tabela ANOVA para o estudo da soldadura linear 5.1, com recurso ao <i>software Minitab 20.3</i> | 92 |
| Tabela 15: Modelo de Regressão Linear para largura da soldadura linear 5.1, <i>software Minitab 20.3</i> | 94 |
| Tabela 16: Resposta prevista pelo modelo de regressão (soldadura linear 5.1), <i>excel</i> ... | 94 |
| Tabela 17: Melhores níveis de trabalho para a resposta da soldadura linear 5.1 | 94 |
| Tabela 18: Respostas e soma do Desenho fatorial completo para a soldadura circular 8, <i>excel</i> | 95 |
| Tabela 19: Algoritmo de <i>Yates</i> soldadura circular 8, <i>excel</i> | 95 |
| Tabela 20: Tabela ANOVA para o estudo da soldadura circular 8, com recurso ao <i>software Minitab 20.3</i> | 95 |
| Tabela 21: Modelo de Regressão Linear para largura da soldadura circular 8, <i>software Minitab 20.3</i> | 97 |
| Tabela 22: Resposta prevista pelo modelo de regressão (soldadura circular 8), <i>excel</i> ... | 97 |
| Tabela 23: Melhores níveis de trabalho para a resposta da soldadura circular 8 | 97 |
| Tabela 24: Fatores para a construção de cartas de controlo | 108 |

Capítulo 1 Introdução

1.1 Enquadramento

Nos últimos anos a exigência dos clientes relativamente à qualidade dos produtos e dos serviços tem vindo a aumentar de forma significativa, o que requer um acompanhamento por parte das organizações dos fatores que afetam a qualidade de modo a responder às necessidades, expectativas e requisitos não só dos clientes, mas de todas as partes interessadas, como é o caso de acionistas, fornecedores, o estado e ainda os colaboradores de uma empresa.

A consciencialização da importância da satisfação de cliente no desenvolvimento de produtos conduziu ao aparecimento e desenvolvimento dos Sistemas de Gestão da Qualidade (SGQ), pelo que a implementação destes sistemas pretendem fomentar o compromisso das organizações perante a qualidade dos produtos e serviços e a satisfação dos seus clientes, aplicando mecanismos de controlo e garantia da conformidade através de processos e procedimentos robustos, reforçando a sua imagem, acompanhando a evolução dos mercados e ganhando alguma vantagem competitiva.

Para a indústria automóvel, a qualidade é crucial e de elevada complexidade tendo em conta os requisitos não só da NP EN ISO 9001:2015, como da norma IATF 16949:2016, sendo este o único referencial reconhecido a nível internacional utilizado para a correta gestão da qualidade aplicada a organizações que participem na cadeia de fornecimento de produtos automóveis. A norma IATF 16949 encontra-se alinhada com o referencial ISO 9001 e como tal uma organização da indústria automóvel que possua a certificação IATF 16949 também deve cumprir com a estrutura e requisitos da norma ISO 9001.

A norma IATF 16949 possibilita a implementação integrada e coerente de procedimentos e ferramentas centrados nas especificidades do sector automóvel. Esta norma prevê que seja aplicado um conjunto de ferramentas essenciais da qualidade como uma estratégia para reduzir a variabilidade que pode ocorrer em toda a cadeia de valor, idealizando a utilização de abordagens e filosofias que constituem a base de um sistema eficaz de gestão da qualidade. Assim, esta norma definiu um conjunto de ferramentas e metodologias que são um requisito para o cumprimento da mesma, como é o caso da Análise de Sistemas de Medição (do inglês, *Measurement System Analysis* - MSA), o Processo de Aprovação Parcial de Produção (*Production Part Approval Process* – PPAP), o Planeamento Avançado da Qualidade do Produto (*Advanced Product Quality Planning* – APQP), a

análise de modos de falha e seus efeitos (*Failure Mode and Effect Analysis – FMEA*), o conhecido Controlo Estatístico de Processo (*Statistical Process Control – SPC*), e ainda a ferramenta 8D para a resolução de problemas.

Existem ainda dezenas de ferramentas da qualidade, pelo que as mais comuns são as sete ferramentas básicas, como é o caso dos fluxogramas, cartas de controlo, diagramas de causa-efeito, folhas de verificação, histogramas, gráficos de dispersão e os diagramas de Pareto. Existem outros tipos de técnicas que são utilizadas dependendo das necessidades de estudo, como é o caso do Desenho de Experiências (*Design of Experiences – DOE*) que é muito usual na indústria automóvel (Pacheco et al, 2022).

1.2 Contextualização do problema

O desenvolvimento deste trabalho centra-se numa empresa de produção de sistemas de escapes para duas marcas automóveis, como é o caso da Renault e da Volkswagen. Esta organização faz parte da cadeia de produção no setor automóvel, sendo exigida a sua certificação pela norma de Sistema de Gestão da Qualidade para empresas da indústria automóvel, a IATF 16496:2016 (anteriormente designada por ISO/TS16949), que é uma norma complementar à NP ISO 9001:2015 (IATF, 2016; IPQ, 2015c).

Esta norma define requisitos desde a fase de projeto, desenvolvimento, conceção até à produção em série de produtos (Pauliková, 2022; Tunes, 2018).

O objetivo inicial da sua implementação foi o de criar uma única norma de requisitos da qualidade na indústria automóvel, promovendo o alinhamento entre os principais referenciais normativos e requisitos específicos dos Fabricantes de Equipamentos Originais (*Original Equipment Manufacturer – OEM*) aplicados à indústria automóvel, eliminando assim a necessidade dos fornecedores terem de ser certificados por diversas normas, tais como a Avaliação da Aptidão da Qualidade do Fornecedor, da França (*Evaluation Aptitude Qualité Fournisseur – EAQF*), a Associação Alemã da Indústria Automóvel (VDA), da Alemanha (também designada como *Verband der Automobilindustrie*), a Avaliação do Sistema da Qualidade da ANFIA, de Itália (*ANFIA Valutazione Sistemi Qualità – AVSQ*) e a Sociedade Americana da Qualidade, dos Estados Unidos (*American Society for Quality – ASQ*), harmonizando os diferentes Sistemas de Avaliação e Certificação na cadeia de abastecimento do setor automóvel a nível global (Karthä, 2004; Tunes, 2018).

Neste referencial são ainda abordados outros temas direcionados para o controle de qualidade, como é o caso da realização de auditorias de processo, pela VDA 6.3, pois ajuda a otimizar os processos de acordo com os referenciais standard para processos, e ainda a realização de auditorias de produto pela VDA 6.5, em que se pretende verificar se o produto se encontra dentro das especificações dimensionais. A empresa onde o trabalho se desenvolve tem como atividade empresarial a fabricação de componentes e/ou acessórios para veículos automóveis, desenvolvendo a sua atividade no sector de fabrico de sistemas de escape. Neste tipo de indústria de fabrico de escapes que incorpora atividades de soldadura, existem ainda outras normas internas de clientes a satisfazer como por exemplo as normas internas da Volkswagen e Renault para a verificação da existência de penetração de soldadura ou de material de soldadura (macrografia) nos sistemas.

Nesta última abordagem, a existência de penetração de soldadura na união das peças é um fator muito importante para o cliente, porém, isto depende de algumas condições do processo produtivo, desde a própria matéria prima e componentes do sistema final, tipo de soldadura, parâmetros de soldadura, máquina de trabalho e ainda da montagem dos componentes. A otimização do processo de soldadura pode ser efetuada através do planeamento, condução, análise e interpretação de testes realizados em ambiente controlado de forma a poder avaliar os fatores que controlam o valor de um determinado parâmetro ou resposta em estudo.

De uma forma geral as experiências industriais são realizadas em processos para a resolução de problemas críticos e minimizar a variabilidade dos processos e/ou produtos, comparar e decidir sobre a primazia de alguns processos de fabrico e ainda de uma forma geral entender a influência de determinados fatores para de certa forma satisfazer alguns objetivos. Um dos principais objetivos de um Desenho de Experiências (*Design Of Experiments* – DOE) é encontrar condições de operação de processos que otimizem a resposta razão pela qual este tipo de metodologia pode ser de grande utilidade numa grande variedade de situações experimentais e uma mais valia na otimização dos processos de soldadura. Um DOE visa a definição de um dano causado por um problema, selecionar os fatores para a sua investigação, selecionar a variável de resposta tendo em conta o dano identificado, averiguar e implementar o tipo de experimentação a utilizar, analisar os dados e retirar as conclusões necessárias da experimentação efetuada.

A IATF contempla ferramentas e metodologias a implementar de modo a assegurar o controlo estatístico de processo, e o controlo de todos os sistemas de medição a partir de estudos MSA, utilizados para determinar a variação que existe num processo de medição uma vez que esta pode contribuir diretamente para a variabilidade geral do processo. O MSA na empresa onde o estudo se desenvolve é usado com o intuito de garantir que os sistemas de medição estão em conformidade com os requisitos e assegurar que podem ser utilizados para a medição de componentes e de soldaduras ao longo do processo produtivo. Com o intuito de analisar os sistemas de medição, a avaliação da fiabilidade dos equipamentos de medição requer a utilização de algumas técnicas e procedimentos como os estudos de estabilidade do sistema, de tendência ou desvio, de linearidade, repetibilidade e reprodutibilidade, que vão ajudar a definir ações e retirar conclusões pertinentes acerca do mesmo.

Dado que a empresa em questão é uma fábrica “*Just In Sequence*” (JIS), ou seja, adota uma metodologia de produção de componentes mediante o pedido efetuado pelo cliente na hora e é enviado imediatamente ao cliente, então isto significa que os níveis de exigência na qualidade do produto são bastante elevados tendo sempre em consideração o tempo disponível, pois os prazos de entrega são cada vez mais curtos, requerendo uma resposta mais rápida das equipas de apoio.

1.3 Objetivo

Dado o aumento da exigência por parte dos clientes e a globalização da inovação tecnológica, as empresas têm necessidade de adotar as melhores condições para o processo produtivo e apostar em materiais e equipamentos que lhes permitam responder de forma rápida e eficaz, no sentido de fornecer confiabilidade nos dados gerados pelos sistemas de medição.

Este projeto tem como principal foco aplicar métodos de melhoria do processo produtivo de sistemas de escape numa empresa de indústria automóvel de acordo com a norma aplicável.

Então surgiu a necessidade de adotar ferramentas de análise de Sistemas de Medição (MSA) de modo a conhecer possíveis fontes de variação do sistema e verificar se os sistemas de medição possuem características estatísticas compatíveis com as especificações do produto, assegurando o controlo estatístico de todos os equipamentos. A análise dos sistemas de medição é assim efetuada para quantificar a magnitude da variação que existe num processo de medição, uma vez que a variação no processo de medição pode contribuir diretamente para a variabilidade geral do processo.

Por outro lado, para que o produto corresponda às exigências do cliente, deve, em geral, ser produzido por um processo de soldadura que seja estável. Então, para se conseguir melhorar a capacidade do processo e ainda reduzir custos operacionais desnecessários, pretende-se realizar um Desenho de Experiências (DOE) como uma abordagem de suporte para estabelecer um método de trabalho standard nas diferentes etapas do processo produtivo para uma referência produzida nas instalações da fábrica.

Desdobrando os objetivos anteriormente referidos, têm-se os seguintes pontos:

- Caracterização da empresa de sistemas de escapes de forma a entender o seu processo produtivo e características significativas dos seus clientes;
- Analisar as bases teóricas das ferramentas da qualidade a aplicar, da metodologia dos estudos MSA e do Desenho de Experiências para promover a sua aplicabilidade na organização;
- Recolha de dados para efetuar um estudo MSA;
- Identificar se existem desvios nos sistemas de medição ou no processo;
- Estudar e analisar o processo de soldadura e verificar quais são os fatores críticos associados a esta característica para obtenção de penetração de soldadura no

material de uma referência de escape realizando um DOE para as células de trabalho aplicáveis.

Com a aplicação destas metodologias no controlo do processo de soldadura de componentes, desde o início da produção até à etapa de expedição do material para o cliente, pretende-se a adotar novas abordagens e filosofias de controlo de processo, com o intuito de reduzir a sua variabilidade e monitorizá-lo de forma contínua.

1.4 Estrutura

Este projeto é composto por um conjunto de sete capítulos.

No primeiro capítulo, encontra-se descrito o âmbito da elaboração do projeto, incluindo a contextualização do problema e os principais objetivos da investigação aplicada. No segundo capítulo descreve-se a empresa que é objeto de estudo. Explica-se de uma forma sucinta a sua evolução histórica, é descrita de forma pormenorizada a empresa em Portugal e toda a sua estrutura organizacional bem como o seu processo produtivo.

É apenas no terceiro capítulo que é analisado o estado de arte da qualidade, revelando-se a evolução da história da qualidade, o conceito da qualidade a partir de diversos modelos conceptuais expostos por diferentes “gurus” da qualidade, e em que contexto podem ser aplicados. Neste capítulo são também referenciadas e descritas as sete ferramentas da qualidade.

No quarto capítulo deste trabalho é aprofundado o tema do Desenho de Experiências (DOE) e as técnicas clássicas mais utilizadas em geral neste tipo de experiências, onde se incluem os desenhos fatoriais completos. São também abordados os métodos de análise de variância e o algoritmo de *Yates*.

O quinto capítulo foca-se na norma IATF 16949:2016 aplicada à indústria automóvel e nas suas *core tools*, com especial ênfase no controlo estatístico de processo, nas cartas de controlo e nos estudos de análise dos sistemas de medição, incorporando as várias ferramentas e regras utilizadas na interpretação de cartas de controlo, bem como o enfoque dado nos estudos de análise de sistemas de medição, explicitando as técnicas utilizadas para esses estudos.

No capítulo seis são exploradas e aplicadas as metodologias e técnicas referidas ao longo da revisão bibliográfica e à posteriori serão discutidos e analisados os resultados provenientes dos estudos aplicados.

Por último e mais importante, no sétimo capítulo são apresentadas as conclusões e considerações finais do estudo efetuado na organização traduzindo-se em sugestões e perspectivas futuras a aplicar futuramente na empresa.

Capítulo 2 A Empresa em estudo

2.1 História da Tenneco

A Tenneco Inc. foi inicialmente fundada em 1943, no Tennessee, com o intuito de produzir componentes para a indústria automóvel, do Texas para West Virginia.

A empresa operou nessa altura inúmeros postos de combustíveis, no entanto foram todos fechados ou substituídos em meados de 1990 (Tenneco, 2022b).

A sua primeira fábrica na Europa foi implementada em 1959, em Sint-Truiden, na Bélgica, e é até hoje a maior fábrica de produtos para desempenho de automóveis na Europa, empregando no total cerca de 1100 trabalhadores. A história da Tenneco como entidade independente apenas começou em 1999, denominada como Tenneco Automotive.

Em 2005 a empresa mudou de nome para Tenneco a fim de refletir as alterações desenvolvidas e representar o crescente número de mercados que atendia. Com o objetivo de incutir o crescimento da produção de veículos leves, a Tenneco expandiu significativamente a sua presença global durante o início do século 21, tornando-se um dos primeiros fornecedores da indústria automóvel a estabelecer operações na China (Tenneco, 2022b).

Esta organização multinacional foi também uma das primeiras a comercializar filtros de partículas na Europa, e continua a liderar a indústria através de tecnologias de pós-tratamento para motores a gasolina e a diesel, incluindo a redução catalítica seletiva, tecnologias avançadas de mistura, filtros de partículas de gasolina e sistemas de exaustão a frio.

Após quase duas décadas em constante crescimento, impulsionada tanto pela expansão geográfica como de produtos, a Tenneco obteve duas aquisições que ajudou a garantir um futuro de sucesso contínuo. A primeira aquisição decorreu em 2018 quando a Tenneco adquiriu a Federal-Mogul, EUA, que se apresentava como um fornecedor automóvel parceiro desde 1899. Esta aquisição duplicou a Tenneco e consequentemente permitiu adicionar cerca de 25 marcas de pós-venda ao seu negócio *Powertrain OE*.

Por outro lado, em 2019, a Tenneco adquiriu outra empresa, desta vez sueca, com mais de 40 anos de excelência no desenvolvimento de sistemas de suspensão avançados, a Öhlins Racing.

A partir da linha cronológica presente na Figura 1 é possível verificar a evolução da Tenneco desde a sua fundação, com os marcos mais importantes.

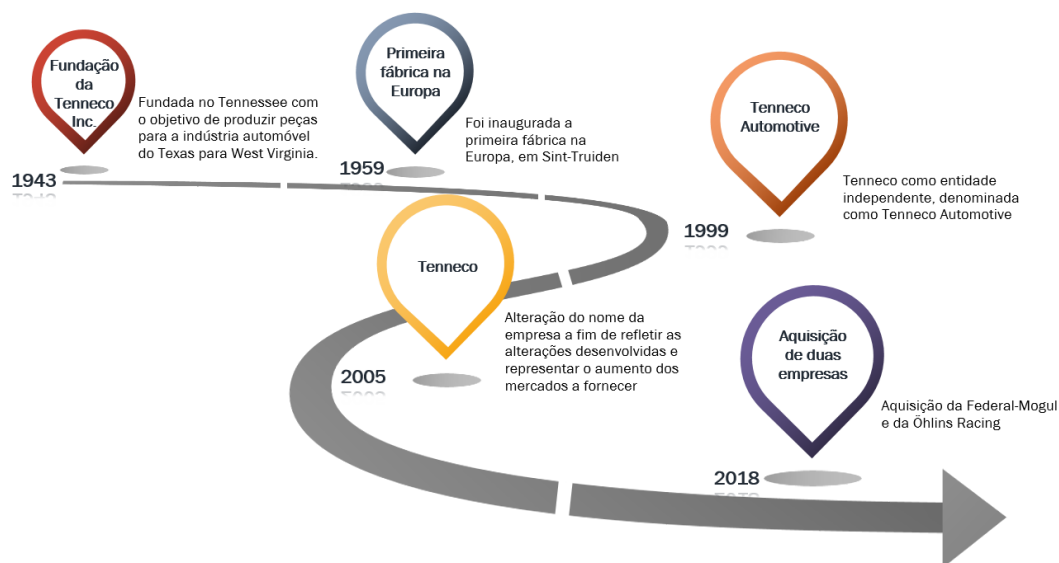


Figura 1: Linha cronológica da evolução da Tenneco

A partir da sua expansão, a Tenneco teve que se tornar mais competitiva, como tal teve que aprimorar as suas operações de engenharia e de produção em todo o mundo. Consequentemente, nos dias de hoje esta é uma das organizações líderes do mercado mundial automóvel e atende às necessidades e expectativas dos seus clientes a partir dos recursos de design, desenvolvimento, engenharia, fabrico e distribuição de produtos em cadeia. Esta é composta por quatro grupos de negócio distintos e complementares entre si, *Ride Performance*, *Motorparts*, *Clean Air* e *Powertrain*, sendo o grupo “*Clean Air*” responsável pela produção de produtos de sistemas de escape, permitindo aos seus clientes cumprir com os regulamentos de controlo de emissões de gases provenientes do motor, minimizar o ruído e economizar combustível na viatura (Conceição, 2018). Por outro lado, os sistemas de suspensão (*Ride Performance*) abastecem o mercado de veículos automóveis ligeiros, camiões comerciais e outros tipos de veículos, pelo que permite combinar o negócio com algumas marcas muito fortes no mercado, tais como a Monroe®, Walker®, XNOx™ e Clevite®Elastomer (Tenneco, 2022a).

Apesar de apresentar os produtos originais (*Original Equipment – OE*) de componentes para veículos, a Tenneco ainda fornece um mercado de reposição/ reparação em todo o mundo, denominado de pós-venda ou “*Aftermarket*”.

Com sede em Lake Forest, Illinois desde 1888, atualmente esta organização multinacional emprega aproximadamente 71.000 funcionários em todo o mundo. Apresenta ainda cerca de 196 unidades fabris distribuídas por 24 países diferentes em todo o mundo (Figura 2)

com 38 centros técnicos de engenharia, e tem os principais centros de operações na América do Norte, Europa, Austrália e Ásia (Tenneco, 2022c).



Figura 2: Distribuição mundial das empresas da Tenneco

A Tenneco possui mais de 23% da sua participação no mercado da Europa e produz cerca 93 milhões de amortecedores por ano (Redeinnov, 2016).

A Tenneco produz produtos OE e *Aftermarket* para clientes automóveis reconhecidos (Figura 3) como a VW, Ford, Daimler, Toyota, Nissan, grupo PSA, e, sendo marcas bastante exigentes, significa que existe confiança nos seus produtos e estas apresentam uma longa história que ajuda a definir a Tenneco de hoje.



Figura 3: Clientes da Tenneco (Customers, 2022)

2.2 Segurança e Qualidade do Produto

A entrega de produtos com qualidade está diretamente relacionada com a integridade do produto. Cada organização dentro da cadeia de fornecedores no setor automóvel é obrigada a garantir que os seus produtos se encontrem sob condições previsíveis de segurança e em conformidade de acordo com os requisitos legais e regulamentares especificados pelo cliente.

Como tal, a Tenneco está comprometida com a garantia e qualidade do produto e serviços, com especial relevância para a superação de requisitos e consequente satisfação do cliente. Para fornecer confiabilidade nos seus produtos, esta deve manter um desempenho elevado e ainda proteger a saúde e a segurança dos seus clientes, criando uma reputação como fornecedor fiável.

Para este fim, todos os processos, produtos, e serviços fornecidos ao cliente devem cumprir com os requisitos legais e regulamentares do país de exportação, e do país de destino especificado pelo cliente, ou seja, os estatutos legais vigentes sobre a integridade do produto devem ser observados e as expectativas de segurança justificáveis e atendidas. Estes requisitos legais e estatutários encontram-se no topo da pirâmide das “obrigações” dos requisitos, utilizando a legislação europeia como exemplificado na Figura 4.

Com produtos ostensivamente “inseguros” no mercado, ou cuja conformidade de acordo com os requisitos legais seja questionável, é necessário a implementação de ações. As normas do SGQ, como por exemplo a NP EN ISO 9001 e a IATF 16949, requerem que as organizações tenham uma abordagem baseada no risco para definir processos e métodos, pois de acordo com a cláusula 4.4.1.2 da IATF 16949:2016, a organização deve ter processos para a gestão da segurança do produto documentados e ainda realça a necessidade de haver um Representante da Segurança e Conformidade do Produto (PSCR) que garanta que o produto fornecido cumpre com os requisitos legais e regulatórios relacionados com a sua segurança. Este Representante da Segurança e Conformidade do Produto é nomeado pela gestão de topo.

Para além da IATF 16949 (IATF, 2016), o volume da Associação Alemã da Indústria Automóvel (VDA) sobre a Integridade do Produto (PSCR) (VDA, 2018) detalha alguns requisitos acerca deste tema uma vez que as organizações são responsáveis pela integridade dos seus próprios produtos durante a totalidade do ciclo de vida do mesmo.

Para conhecer e entender os diversos requisitos de um representante de segurança do produto, são necessárias informações completas e a qualificação do mesmo.

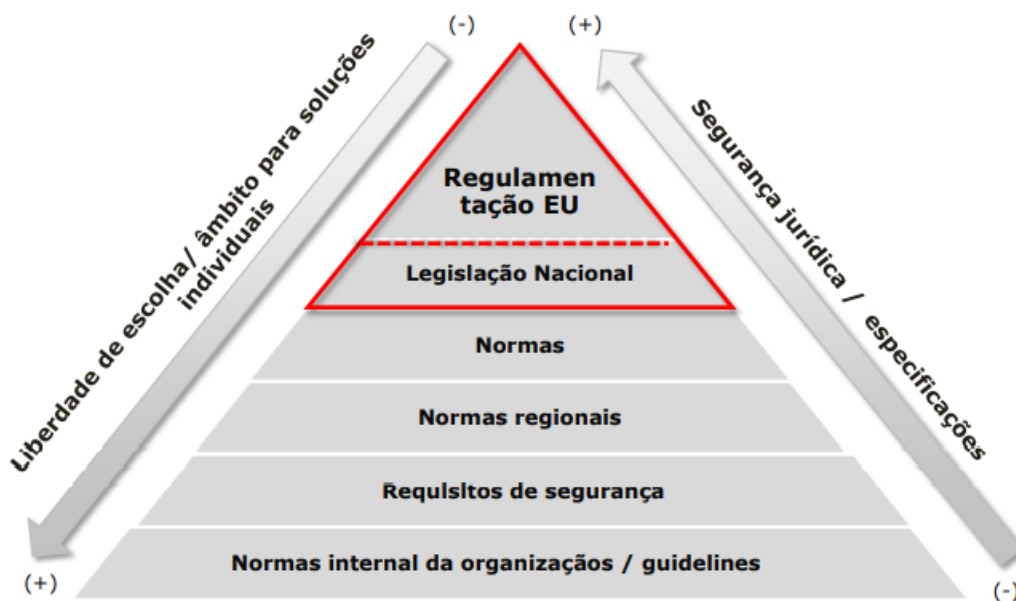


Figura 4: Pirâmide das "obrigações" dos requisitos da legislação europeia

A Tenneco realiza avaliações de segurança em cada estágio dos processos de gestão para ajudar a manter a qualidade dos seus produtos. Quando o produto é lançado no mercado é recolhido o “*feedback*” dos clientes para compreender o seu grau de satisfação e desta forma desencadear ações para melhorar o desempenho dos processos de produção de forma contínua. Este ciclo de avaliação contínua permite uma abordagem completa da qualidade e entrega de componentes automóveis confiáveis.

Em conformidade com os requisitos da qualidade, todos os componentes da Tenneco, desde matérias-primas a sistemas finais, são reportados no Sistema Internacional de Dados de Material (*International Material Data System - IMDS*). O IMDS é um repositório ou uma base de dados global de materiais utilizados na indústria automóvel com todas as informações acerca do mesmo. O IMDS é utilizado assim para atender às obrigações impostas aos produtores de automóveis e de componentes automóveis através de padrões nacionais e internacionais, incluindo leis e regulamentos. Por outro lado, o Padrão de Gestão de Substâncias Restritas (*Restricted Substance Management Standard – RSMS*) também apoia o compromisso da Tenneco para que todos os materiais satisfaçam na sua totalidade os padrões regulamentares e normas dos clientes aplicáveis. Além disso, o RSMS informa os fornecedores das substâncias ou materiais que devem ser excluídas dos seus produtos e que podem comprometer a segurança do produto na íntegra.

O Comité de Garantia Global (GWC) supervisiona a segurança e a qualidade do produto para promover uma abordagem multifuncional e gerir o escalonamento de quaisquer

problemas de garantia do produto. O GWC representa os líderes executivos e funcionais dos departamentos de Engenharia, Qualidade e de Operações de produção.

Este comitê de garantia total tem um processo de escalonamento para a segurança potencial do produto e para problemas significativos de qualidade, que possam ser observados.

2.3 A Tenneco em Portugal

A Tenneco em Portugal nasceu em 1999, no Parque Industrial da Autoeuropa, sendo que a sua atividade de fabrico está centrada na produção de sistemas de escape e componentes para os diferentes motores de diferentes modelos automóveis. As atividades de produção nesta empresa são essencialmente a dobragem de tubos, processos de soldadura manual – automática, a montagem de silenciosos dianteiros e traseiros e a sequenciação de sistemas finais.

A Tenneco Portugal foi construída com o objetivo de fornecer diretamente as linhas de montagem da fábrica do Grupo Volkswagen Portugal numa dinâmica *Just In Time* (JIT) ou *Just in Sequence* (JIS), metodologia esta que será descrita no subcapítulo 2.3.2, sendo este o principal cliente da organização em Portugal. A Volkswagen absorve atualmente cerca de 95% da produção da Tenneco em Portugal, pelo que os restantes 5% de produção abastece outras marcas automóveis, como é o caso da Renault. O presente trabalho encontra-se focado apenas para os produtos de maior volume na empresa, ou seja, para os produtos a fornecer à Volkswagen Autoeuropa.

A fábrica portuguesa, situada na Quinta do Anjo, em Palmela (Figura 5), fornece sistemas de escape para diferentes motores dos diferentes modelos automóveis.

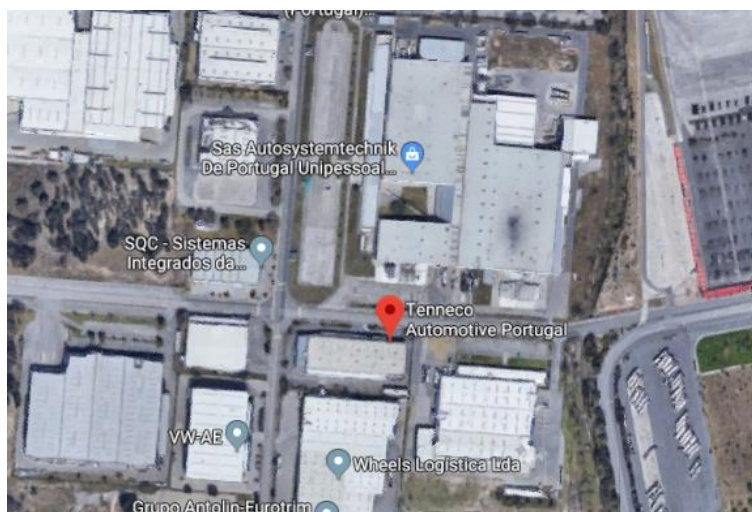


Figura 5: Localização geográfica da Tenneco Portugal

Esta empresa para além de se reger pela legislação nacional em vigor, orienta-se também pelas políticas internas da Tenneco, e pelas normas europeias, pois é uma empresa certificada em qualidade pela NP EN ISO 9001:2015 (IPQ, 2015c) e pela IATF 16949:2016 (IATF, 2016), e também certificada pela norma do ambiente, NP EN ISO 14001:2015 (IPQ, 2015a). Em consonância com estas certificações, a Tenneco tem implementada a política da Qualidade, de forma a alcançar o “fazer bem à primeira vez,

sempre”, e ainda a política de Ambiente, Saúde e Segurança que visa oferecer através do compromisso da liderança ambientes de trabalho mais seguros e saudáveis, evitar a poluição e melhorar o ambiente através da eficiência dos recursos e otimização do consumo da energia. Em suma, a Tenneco possui uma cultura de “tolerância zero” que visa zero defeitos, zero impactes ambientais e zero acidentes.

2.3.1 Sistema de Gestão da Qualidade na Tenneco Portugal

O sistema de gestão da qualidade da Tenneco em Portugal está certificado segundo a IATF 16949:2016 (IATF, 2016), que é o referencial obrigatório para todas as organizações fabricantes de peças para a indústria automóvel e é também um requisito de cliente. Uma vez que este referencial normativo está alinhado com o referencial NP EN ISO 9001:2015 (IPQ, 2015c), o sistema de gestão da qualidade da Tenneco em Portugal também respeita a estrutura e requisitos deste último referencial.

A Tenneco tem como missão fornecer uma estrutura para entregar consistentemente produtos e serviços que sejam seguros, compatíveis e preferidos. A Política da Qualidade, que se encontra na Figura 6, é definida e aprovada pela Equipa de Gestão da Tenneco e é comunicada e disponibilizada às partes interessadas. Esta é compreendida por todas as divisões da Tenneco e é revista para adequação contínua às Políticas da Tenneco, estando associada ao SGQ.



Figura 6: Política da Qualidade da Tenneco

Esta política encontra-se em consonância com a Política da Conformidade da Qualidade do Produto, que fornece uma base para o desenvolvimento de todo o SGQ e estabelece a

estrutura (Figura 7) para definir objetivos de qualidade que colocam a política em prática para atingir os resultados pretendidos e atende às especificações do cliente e requisitos legais e regulamentares.

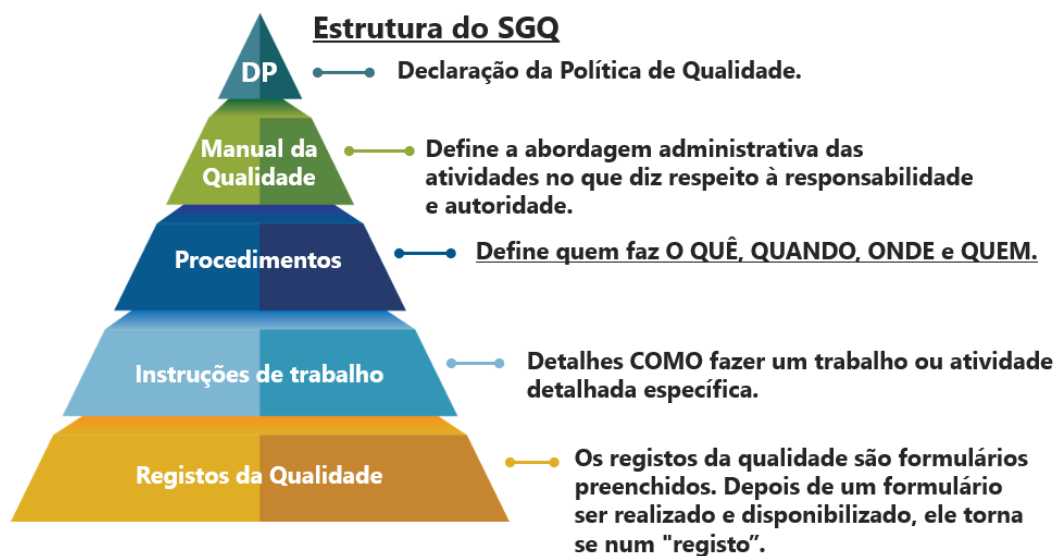


Figura 7: Estrutura do SGQ da documentação da Tenneco

A Tenneco adota uma cultura com base nos seus valores que orientam o pensamento, comportamento e sucesso, e que refletem a sua dedicação em liderar sempre com integridade, atuar como uma equipa, adotar soluções que tornem o amanhã melhor e atuar com vontade de vencer ao atingir a satisfação do cliente (Environmental, 2021).

A política de conformidade do produto representa um importante instrumento de integridade corporativa, o que significa que há evidências para demonstrar que o produto atende aos requisitos essenciais de legislação e do Cliente na forma de diretivas, regulamentos e padrões estabelecidos.

O Manual de Políticas de Conformidade, as políticas de recursos humanos e outras políticas e procedimentos aplicáveis na Tenneco contêm orientações mais específicas sobre as expectativas da Empresa. As políticas refletem o compromisso da empresa com os mais elevados padrões legais e éticos (Tenneco, 2021).

2.3.2 *Just In Time / Just In Sequence* na Tenneco Portugal

Após a crise de 1929 ter afetado vários sistemas de produção, os gestores da Toyota precisavam de um modelo de gestão que reduzisse os inventários e os custos no geral (Ohno, 1989).

Como tal, o JIT foi originalmente desenvolvido numa fábrica no Japão, pela Toyota, nos anos 60 e faz parte de um dos pilares da casa do “lean” (As suas técnicas de produção foram a base do que se chama “produção magra”, ou “lean production”). O JIT define-se como um sistema no qual a produção e movimentação de materiais ocorrem à medida que estes são necessários, ou seja, produto certo, no momento certo, nas quantidades certas, quando o cliente (ou processo a jusante) o consome (Carvalho, 2000).

Este sistema é caracterizado pelo fabrico de material apenas quando existe procura, o que proporciona algumas vantagens como o facto de ter níveis de stock e inventário mais baixos, redução de custos eliminando o desperdício em todos os processos, vai também diminuir a variabilidade do processo e está vocacionado para uma maior capacidade de resposta aos mercados (Hirano, 2009).

O JIT é ao mesmo tempo uma filosofia, um conjunto de técnicas e um método de gestão empresarial para o planeamento e controlo das operações com foco na qualidade e na redução de desperdícios, como é o caso de produções desnecessárias, transporte e movimentação de material desnecessária, produtos não conformes e ainda material em espera até passar para a próxima transformação/ produção (Shinohara, 1988).

A abordagem JIT permite que uma empresa produza uma variedade de produtos em pequenas quantidades, rapidamente e de acordo com as especificações dos clientes e tendo como elemento chave o *layout* das empresas (Shinohara, 1988).

Por outro lado, o *Just In Sequence* (JIS) é apenas uma estratégia pormenorizada para alcançar a abordagem JIT. O JIS é uma das aplicações mais extremas do conceito, onde os componentes chegam *Just In Time* e são sequenciados para consumo, ou seja, enquanto num ambiente JIT a sequência das peças não importa, no JIS os componentes corretos têm que ser entregues à linha seguinte na sequência correta.

Para as linhas de produção flexíveis, como é o caso das linhas de montagem automóveis, a variedade de componentes é uma opção para se produzir diretamente os pedidos dos clientes. Assim que o cliente efetua o pedido seguinte e este chega ao seu fornecedor, o fornecedor executa os pedidos alinhados pela sequência de produção nas linhas de produção final, que depois vão integrar esses componentes nas montagens finais de forma a facilitar a rapidez de entrega.

2.3.3 Estrutura organizacional

De forma a compreender a estrutura da empresa e os vários departamentos, de produção e apoio à produção, apresenta-se na Figura 8 a estrutura organizacional da empresa da Tenneco em Portugal. Existem no total cerca de 65 trabalhadores na empresa em Palmela.

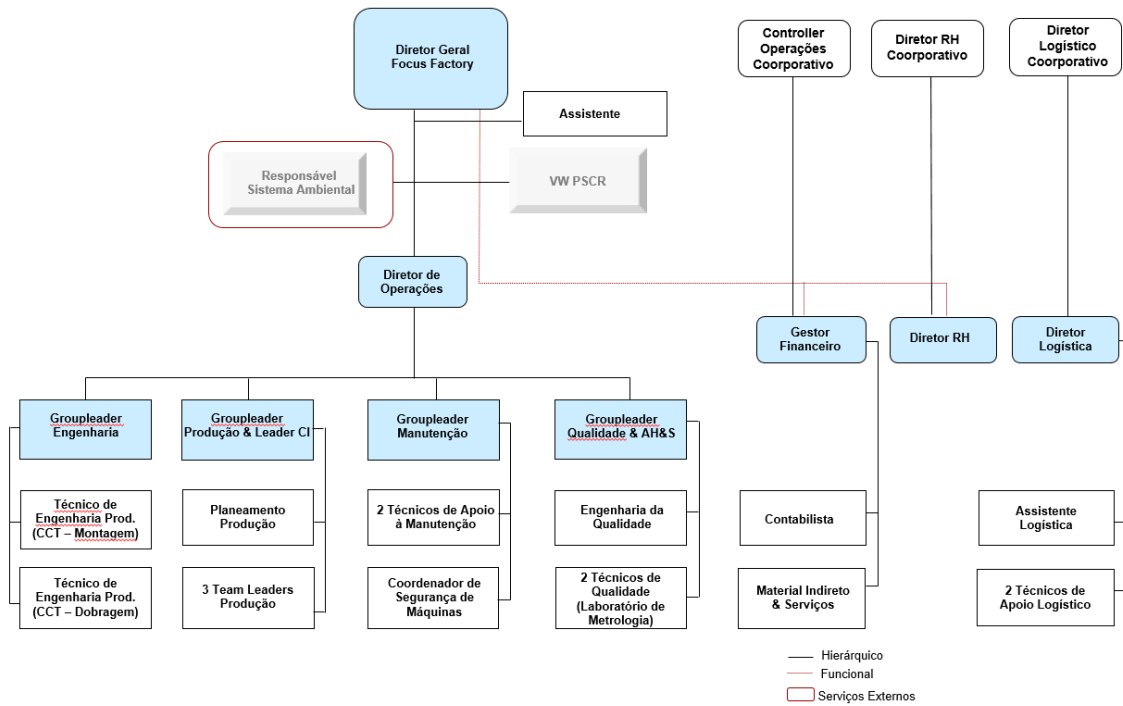


Figura 8: Organograma da Tenneco Portugal

A estrutura de gestão encontra-se dividida em seis departamentos principais que se encontram no organograma a azul, sendo que é a direção de operações que gere três desses departamentos, onde será dada especial atenção uma vez que contém os departamentos de Produção/ Engenharia, Manutenção e Qualidade. Para cada departamento estão definidas as funções, responsabilidades e autoridades.

2.3.3.1 Descrição do processo produtivo e layout

Para perceber melhor as atividades desenvolvidas dentro da Tenneco Portugal, torna-se importante caracterizar o processo produtivo da empresa e os respetivos postos de trabalho. O departamento da produção engloba o responsável pelo planeamento da produção, e ainda a função produção, tal como se pode visualizar no organograma da Figura 8. Esta é composta por três equipas rotativas em três turnos diários chefiados por um chefe de equipa (Team Leader). Cada turno é acompanhado por um elemento das equipas de apoio da manutenção, da engenharia e da qualidade. A partir da previsão das

encomendas do cliente, é executado um planeamento da produção dos produtos requeridos.

O processo produtivo da Tenneco assenta essencialmente em dois grandes setores de engenharia/ tecnológicos, a dobragem de tubos (setor “*bending*” ou “dobragem de tubos”, que na Figura 9 se pode visualizar encontrando-se rodeado a preto) e a montagem e soldadura (setor “*welding*” ou “soldadura de componentes”, que na Figura 9 se encontra rodeado a azul). Contudo, como resultado de alterações organizacionais, o setor da dobragem encontra-se em extinção na fábrica de Palmela, pelo que o foco da organização se encontra centrado na montagem e soldadura manual e automática de componentes. Apesar da dobragem se encontrar em extinção, ainda são dobrados alguns tubos diretos que são transformados em tubos de entrada e tubos de saída para abastecer as linhas de soldadura.

Na Figura 9 pode ser observado o *layout* da fábrica em Palmela que identifica a respetiva alocação de cada setor, sendo o setor da dobragem constituído por quatro linhas de produção (linhas 1, 3, 4 e 5), em que são realizadas atividades de dobragem, corte, escovagem, calibração, prensagem, marcação e lavagem final de tubos.

Por outro lado, o setor da soldadura é composto pelas restantes células, desde robôs/ máquinas de soldadura automática (ROB), robôs/ máquinas de soldadura circular automática (COA) e ainda Montagens Finais (MF). Todas as células do setor de soldadura são munidas de posto de recuperação de soldadura manual que visam a realização de pequenas recuperações em caso de falha da soldadura automática do robô.

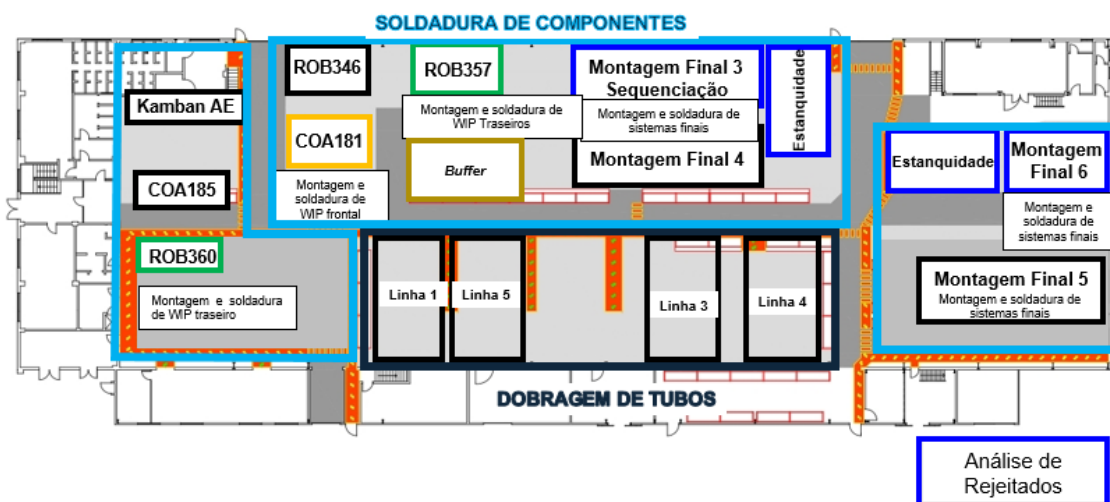


Figura 9: *Layout* da fábrica da Tenneco, em Palmela

No geral, todo o processo se inicia com a receção e armazenagem de material vindo de diversos fornecedores, podendo estes componentes ser tubos de entrada, silenciosos,

tubos intermédios dobrados, ganchos, tubos de saída (ou ponteiras) e borrachas de suporte. Estes componentes encontram-se identificados no fluxograma da Figura 10 de uma referência de um sistema final. Este fluxograma traduz o que é realizado no setor da soldadura e em que célula de trabalho, pois para a produção de um sistema completo procede-se primeiro à transformação de peças *Work In Progress* (WIP), a partir de materiais recebidos do fornecedor, ou tubos que são dobrados no setor da dobragem internamente. A transformação de peças WIP é um processo produtivo intermédio que é realizado nos robôs antes de chegarem à montagem final. No exemplo do fluxograma da Figura 10 temos a produção de peças WIP frontais, que é o conjunto do escape que fica na frente da viatura e que são produzidas nas máquinas de soldadura automática circular COA. Nestas células são montados na ferramenta do robô as peças que compõem o WIP frontal tal como o pré-silencioso e o tubo de entrada, e são sujeitos apenas por uma soldadura circular. Em caso de falha de soldadura, o operador deve recuperar a soldadura no posto de recuperação manual. No caso da produção de peças WIP traseiros, estas compõem a parte de trás do sistema final que fica na traseira do carro e são produzidos nas células com as máquinas ROB. Nestes robôs são montados o pré-silencioso, os tubos de saída e os ganchos, e são soldados. Após a produção dos componentes estes são colocados em contentores e as peças WIP são encaminhadas para o “supermercado”, que é um espaço próprio (“*buffer*”) para abastecer diretamente as montagens finais, sem nunca esquecer de cumprir a regra *Firt In First Out* (FIFO).

Nas MF é marcado o tubo de ligação intermédio num marcador automático, com a respetiva homologação, e no robô são montados e soldados os WIP traseiros e frontais com os restantes componentes, como o gancho de entrada e o tubo de ligação, obtendo assim o sistema final. Após a produção do sistema final, este é ainda sujeito a um teste de fugas, sendo este teste denominado de teste de estanquidade, pois é uma característica específica de cliente. Este teste é efetuado por um aparelho/ banco de estanquidade e serve de controlo contínuo para todos os sistemas finais, em que é registado o valor da fuga no computador, não podendo exceder o seu limite. No final, o sistema finalizado é colocado em *Racks*¹ para seguir diretamente para o cliente.

¹ É um equipamento industrial que tem como função a armazenagem de produtos sendo um recurso organizado e eficiente que facilita a movimentação e transporte de produtos, não colocando em causa a sua geometria.

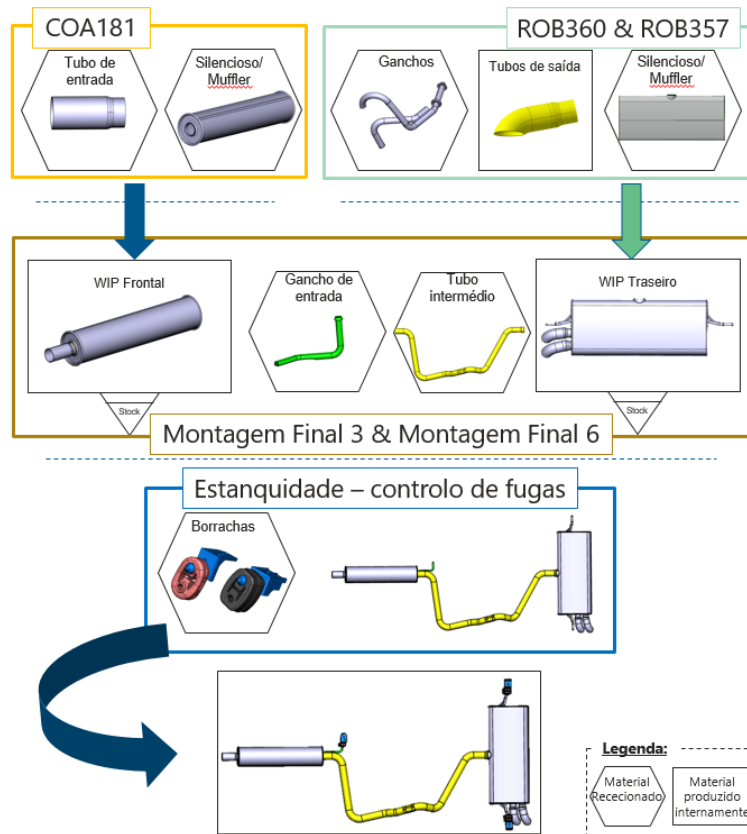


Figura 10: Fluxograma do processo produtivo em geral

Para a Tenneco Palmela, os dois principais clientes apresentam características especiais ou significativas, porém, no que diz respeito ao principal cliente, a Volkswagen Palmela, este impõe quatro características especiais de processo devendo ter-se especial atenção e controlo às mesmas, sendo estas o diâmetro do tubo de entrada do sistema, o comprimento das soldaduras, a homologação do sistema de escape (marcação) e a estanquidade.

2.3.3.2 Departamento da Qualidade

A empresa em Portugal possui um departamento interno de Qualidade qualificado devido ao tipo de atividades exercidas na fábrica. Este departamento conta com o desempenho de quatro pessoas como descrito no organograma presente na Figura 8, o groupleader da qualidade que é responsável pelo departamento, um engenheiro da qualidade e dois técnicos da qualidade.

Em Portugal, as instalações da Tenneco apresentam dois laboratórios internos, um de metrologia e outro de ensaios, dotados de competências técnicas e recursos para realizar todas as medições e ensaios necessários para validar a conformidade do produto e/ou processo, de acordo com as especificações internas e as dos clientes. O organograma que

se encontra na Figura 11 contempla as duas unidades laboratoriais que têm funções bem definidas bem como dos responsáveis pelas atividades a desenvolver nos órgãos.

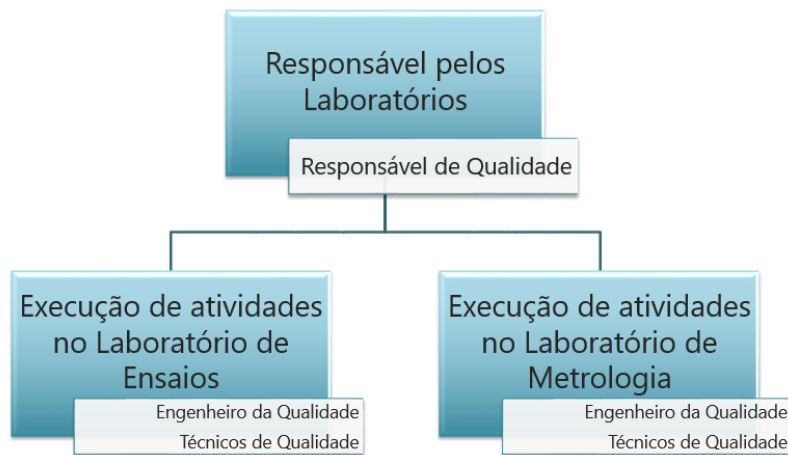


Figura 11: Organização dos laboratórios existentes na empresa

Estes laboratórios foram construídos com o objetivo de fornecer todas as condições necessárias para realização de atividades em cada laboratório:

- Laboratório de Metrologia:
 - Medição dimensional a partir de Equipamentos de Medição e Monitorização (EMM) que sejam identificados como essenciais para a empresa tal como paquímetros, bancos de estanquidade, entre outros;
 - Calibração e verificação dimensional, pois é necessário garantir que os EMM forneçam resultados que sejam fiáveis e funcionem corretamente, com uma probabilidade de erro aceitável tendo em atenção da normalização existente e adotada pela empresa, e com uma precisão adequada às características que medem;
 - Medição tridimensional, no interior deste laboratório é possível medir peças, gabaritos de controlo, entre outros no espaço a partir de uma Máquina de Medição por Coordenadas (CMM), ou Máquina de Medição Tridimensional;
 - Estudos de avaliação de sistemas de medição;
 - Medição de fugas (equipamentos pneumáticos).
- Laboratório de Ensaios:
 - Ensaios metalúrgicos de soldadura, pois é necessário material para realização de provetes de soldadura, tais como ácidos, *hotte* de laboratório, balanças;
 - Medição da rugosidade.

Complementarmente às atividades descritas, são ainda realizados:

- Estudos de avaliação dos sistemas de medição (Repetibilidade e/ou Reprodutibilidade);
- Desenvolvimento e adequação dos procedimentos internos e específicos relativos aos Laboratórios;
- Contactos com os Laboratórios externos;
- Análise e aprovação de certificados de calibração externos;
- Validação da conformidade dos resultados obtidos;
- Realização de ensaios segundo normas aplicáveis, especificações dos clientes ou exigências regulamentares;
- Participação na elaboração de cadernos de encargos para aquisição de Instrumentos de Medição;
- Medição e relatórios das amostras iniciais.

No geral, o departamento da Qualidade é responsável por:

- Implementar e manter o SGQ de acordo com os requisitos da norma IATF 16949:2016, assegurar que a política da qualidade, os objetivos a esta associada e os requisitos da gestão da qualidade sejam conhecidos a todos os níveis da empresa;
- Cumprir com os requisitos, regulamentos e leis aplicáveis, melhorar de forma contínua o SGQ para garantir a segurança do produto, prevenir possíveis incidentes de qualidade e eliminar defeitos através da revisão dos objetivos e resultados da qualidade (*Key Performance Indicators* – KPI);
- Definir, acompanhar as fases de projeto e aceitar todo o equipamento de controlo necessário à verificação dos produtos, em fase de pré-produção e/ou em série;
- Lançar e aceitar amostras iniciais, gerindo os respetivos ficheiros informáticos;
- Desenvolver documentos de controlo de qualidade do produto necessários em todas as fases do processo;
- Executar todos os estudos de medição inerentes ao processo produtivo;
- Gerir a receção técnica de matéria prima e componentes recebidos pelos fornecedores;

- Gerir todos os problemas relacionados com a qualidade, tanto não conformidades de cliente ou a fornecedores.

Este departamento vai também fomentar uma mentalidade de qualidade com o objetivo de fornecer produtos com zero defeitos, aplicando e apostando na melhoria continua e na adoção de comportamentos e boas práticas (Homem, 2016), tendo sempre como base a sua política, “fazer sempre bem, à primeira vez”.

Este departamento tem a autoridade para interromper qualquer linha imediatamente no caso de não conformidade do produto. Cada turno deve ter pessoal responsável ou responsabilidade delegada para garantir a conformidade com os requisitos do produto.

Capítulo 3 Gestão da Qualidade

3.1 Evolução histórica da Qualidade

O modo como a qualidade é vista por parte das organizações e consumidores finais tem evoluído ao longo do tempo de uma forma significativa (Raja et al, 2017).

A qualidade é um tema que é abordado desde o início dos anos 20 a partir de vários autores, pelo que foi nesta época que foi sendo concebido o abrangente conceito de Gestão da Qualidade nas várias fases do seu desenvolvimento, através de atividades de inspeção, controlo estatístico, garantia e motivação para a qualidade de produtos (Montgomery, 2009). Estas atividades foram surgindo e aprimoradas em diferentes períodos, pelo que, segundo Garvin (1988), a qualidade é descrita em quatro eras, sendo a primeira a era da inspeção (nos anos 20), a era do controlo estatístico de processo (anos 30 e 40), a era da garantia da qualidade (anos 50) e a era da gestão estratégica da qualidade (a partir dos anos 80).

As origens da preocupação com a qualidade remontam para a Idade Média, em que a qualidade era obtida de uma forma muito diferente da que existe nos dias de hoje. No sentido de aptidão e construção de qualquer produto, este era desenvolvido em pequena escala por meio de artesãos, pelo que estes concebiam o produto, fabricavam-no, vendiam-no e prestavam ainda assistência após venda (Pires, 2007). Esta fase foi caracterizada pela atribuição da responsabilidade do controlo de qualidade a um determinado indivíduo que participava em todo o processo desde a conceção à venda e que como tal tinha uma perceção apurada do produto desde a identificação das necessidades do cliente até à entrega do produto e verificação da satisfação do cliente.

Com a Revolução Industrial assistiu-se ao advento da produção em massa que por sua vez teve por base o conceito de trabalho especializado. As falhas ocorridas no equipamento militar da primeira guerra mundial deram origem a estudos que tinham como objetivo determinar as respetivas causas, sendo que um dos problemas detetados foi a ausência de instruções de trabalho para as pessoas, o que constituía um risco no que diz respeito à conformidade dos produtos relativamente às suas especificações (Montgomery, 2009). Então, verificada esta condição, no período entre 1920 e 1940 assume-se a primeira e significativa atividade da função da qualidade, a inspeção (Feigenbaum, 1983). Isto originou a criação de departamentos gigantescos de inspeção em várias unidades fabris (Pereira e Requeijo, 2008) pelo engenheiro e executivo

Frederick W. Taylor, também conhecido como o pai da gestão científica (Foster, 2001; Garvin, 1988). Taylor acreditava que mesmo que os colaboradores trabalhassem o máximo possível não eram tão eficientes quanto otimizar a forma como o trabalho era desempenhado. Foi então que surgiu a divisão do trabalho entre as atividades de planeamento e de execução (Hamid et al., 2019). Frederick Taylor determinou que havendo instruções sistemáticas e adequadas para os trabalhadores, haveria possibilidade de fazê-los produzir mais e com melhor qualidade, conseguindo grandes resultados especialmente ao nível da produtividade. Ele achava que todo e qualquer trabalho necessita, preliminarmente, de um estudo para que seja determinada uma metodologia própria com vista ao seu máximo desenvolvimento (Taylor, 2014).

Em 1924, Walter A. Shewhart foi autor da aplicação e introdução de métodos estatísticos para a melhoria da qualidade e prevenção de problemas no que diz respeito ao controlo da qualidade durante a produção, desenvolvendo as cartas de controlo de modo a resolver a questão da variação (Rinehart, 1993).

Segundo Feigenbaum (1983), a fase seguinte de evolução do processo foi a fase do controlo estatístico da qualidade, pois denotou-se um aumento acentuado nas exigências de produção devido à Segunda Guerra Mundial e dado que a inspeção de material a 100% não consistia numa alternativa prática e traduzia-se na necessidade de muitos inspetores, então, como alternativa, Harold F. Dodge e Harry G. Romig desenvolveram a Amostragem de Aceitação a partir de planos de recolha de amostras (*sampling*), a qual consiste na inspeção e classificação de uma amostra de unidades selecionadas aleatoriamente, de um lote superior (Montgomery, 2009).

Já nos anos 50, os Estados Unidos introduzem pela primeira vez os métodos de desenho de experiências (DOE) para produtos e processos, contudo estes métodos estatísticos foram publicados e lançados numa primeira instância em artigos científicos por Ronald A. Fisher, em conjunto com F. Yates e D. J. Finney, que desenvolveram em Inglaterra toda uma teoria científica de experimentação no domínio da agricultura e biologia (Fisher, 1942; Pereira e Requeijo, 2008). O seu desenvolvimento tornou mais eficiente e vigilante o processo de controlo e garantia da qualidade (Foster, 2001).

A introdução e aplicação destes métodos de DOE melhorou exponencialmente nos anos 90, promovendo a capacidade de produção e o desempenho industrial, permitindo minimizar custos, obter um tempo de desenvolvimento de produto inferior, analisar os

problemas de qualidade durante a produção e conseqüentemente melhorar continuamente o desempenho de qualquer processo produtivo (Taguchi, 2004).

A terceira era da qualidade surge a partir dos anos 60 e é denominada como a era da garantia da qualidade, que foi marcada pela contribuição de Juran, pois este começa a dar ênfase aos métodos de gestão e, pela primeira vez, a qualidade deixa de ser vista apenas como uma característica do produto ou do serviço, e passa a ser entendida como um sistema da qualidade (Juran, 1974). As empresas começaram a constatar que a maioria dos defeitos identificados não está associada à produção, mas sim a outro tipo de desvios. Esta era foi marcada pela padronização e envolvimento gradual de diversos departamentos no controlo da qualidade, incentivando um paradigma de que a produção com qualidade só seria possível com a contribuição de todos os departamentos e assim reconhece-se a qualidade como uma preocupação e responsabilidade de toda a organização havendo uma preocupação uma focalização no sistema da qualidade (Lucinda, 2010). Esta era é ainda marcada pela filosofia “zero defeitos” de Crosby, baseada em fazer bem à primeira vez, e os “círculos da qualidade”, que tinham como base o envolvimento de elementos dos vários níveis de gestão.

Nas últimas décadas, a partir dos anos 80, a qualidade tem se convertido num fator de competitividade nas indústrias, pois o consumidor está constantemente a elevar a sua exigência a nível de qualidade. Algumas empresas começaram a sofrer grandes perdas. Para garantir a fidelidade dos seus clientes, as empresas fornecedoras viram-se na necessidade de inovar no que diz respeito à qualidade e de se tornarem mais flexíveis para uma constante mudança de produtos, levando à adoção de técnicas que ajudem realmente a qualidade do produto no anseio de alcançar níveis de excelência, o que incentivou as organizações a adotar a filosofia da Gestão pela Qualidade Total (*Total Quality Management – TQM*), pois o objetivo é a satisfação total, quer de clientes internos, quer de externos, onde os colaboradores de equipas multidisciplinares desempenham um papel fundamental na definição de sistemas e processos de gestão.

Conseqüentemente, surgiu a abordagem seis sigma (6σ) que é uma metodologia que foi desenvolvida pela Motorola em 1997 e consiste na redução de variabilidade de características chave do produto a um nível em que a ocorrência de falhas ou defeitos seja muito improvável (Montgomery, 2009).

Neste contexto e sendo a qualidade um fator de diferenciação das organizações, foi instituído nos Estados Unidos da América o prémio nacional da qualidade, denominado

prémio *Malcolm Baldrige* (1987) com intuito de harmonizar e valorizar as práticas da TQM (Lisboa et al., 2011). Por outro lado, na Europa foram criadas organizações responsáveis por sistemas de normas e linhas de orientação para suportar os conceitos da qualidade, como é o caso da *International Organization for Standardization* (ISO) e da *American National Standards Institute* (ANSI). Neste âmbito, em 1987 foi criada a primeira série das normas ISO 9000 (Campos, 2010).

Em 1989 foi fundada a *European Foundation for Quality Management* (EFQM), com o objetivo de desenvolver um modelo de excelência de aplicação a qualquer organização para alcançar o sucesso e melhorar significativamente o seu desempenho. Este modelo foi utilizado pela primeira vez em 1992 para a atribuição do Prémio Europeu da Qualidade (*European Quality Award*) (APQ, 2022). Em Portugal foi criado em 1992, o Prémio de Excelência – Sistema Português da Qualidade (PEX-SPQ) que distingue organizações que se destaquem pelos resultados obtidos através da aplicação dos métodos de Gestão pela Qualidade Total no Caminho para a Excelência, contudo tem por base o modelo EFQM e segue as metodologias do Prémio Europeu da Qualidade (IPQ, 2022),

Resumidamente, a evolução dos conceitos da qualidade segue a seguinte sequência cronológica (Lucinda, 2010):

- Era da Inspeção: introdução de atividades de medição, verificação e comparação;
- Era do controlo da qualidade: introdução das atividades que se centram na monitorização do processo, nomeadamente na análise dos desvios e reposição dos parâmetros dos processos nas condições desejadas a partir de cartas de controlo e desenho de experiências;
- Era da garantia da qualidade: atividades planeadas e sistemáticas que de uma forma integrada podem garantir que a qualidade desejada está a ser alcançada.
- Era da qualidade total: cultura de empresa capaz de assegurar a satisfação dos clientes e acompanhar a sua exigência.

A qualidade passou por várias eras e todas trouxeram novas formas de olhar a qualidade cada vez com uma perceção mais global. Hoje em dia colocam-se novos desafios com a chegada da indústria 4.0, pois também a qualidade se modifica com um menor foco na simples recolha e análise de dados de uma forma passiva, mas sim com maior foco na tomada de decisões estratégicas de uma forma ativa e com uma atuação cada vez mais preventiva, antecipando as necessidades (Pires, 2007). Esta nova era da qualidade assenta na priorização do planeamento estratégico das empresas com o objetivo de maximizar a

satisfação dos clientes ao menor custo. As organizações de hoje precisam de identificar os riscos e oportunidades associados às suas atividades considerando as questões externas e internas, as necessidades e expectativas das partes interessadas, e tomar ações para reduzir os efeitos indesejáveis dos riscos e aumentar os efeitos desejáveis das oportunidades e neste sentido pode-se afirmar que esta nova era da qualidade é a era da estratégia (Lucinda, 2010).

3.2 Conceito de Qualidade

Os conceitos e definições da qualidade concebidos e idealizados foram sendo aprimorados no decorrer dos anos e, no início do século XX a qualidade começou a ser considerada como um pilar para as organizações de excelência, tornando-se num fator de competitividade para qualquer empresa em função do aumento da escala de produção e da produção em massa de todo o tipo de produtos. Nos dias de hoje as organizações tendem a considerar a política da qualidade como um padrão base imprescindível a todo o processo produtivo na organização.

No geral, parece que existe uma concordância entre as diversas definições de qualidade e os meios de gestão da qualidade, embora diferentes autores usem diferentes terminologias e abordagens, dependendo do contexto. Portanto, parece não haver conflito ou discussão entre os autores, pois depende do contexto. Acredita-se que os padrões da literatura de gestão da qualidade são influenciados pelo pensamento dos grandes gurus da qualidade, como por exemplo Walter Shewhart, Edward Deming, Armand Feigenbaum, Philip Crosby, Joseph Juran, Kaoru Ishikawa, Masaki Imai, Taiichi Ohno e Genichi Taguchi, que refletem o fluxo e a direção do movimento da qualidade e da sua evolução até aos dias de hoje (Hamid et al., 2019).

De acordo com a norma NP EN ISO 9000:2015, p.16, e a NP EN ISO 9001:2015, p.10, a “Qualidade é o grau de satisfação de requisitos dado por um conjunto de características intrínsecas” estando bem presente que as características extrínsecas não são características da qualidade (IPQ, 2015b, 2015c).

Para Crosby (1979), a “Qualidade é a conformidade com as especificações” e Juran (1974) diz que a “Qualidade é a adequação ao uso”. Segundo Montgomery (2009), consideram-se três aspetos gerais da filosofia de Juran (conhecidos como “trilogia de

Juran” parra a gestão da qualidade): planeamento, controlo e melhoria. Salienta ainda que “a qualidade é inversamente proporcional à variabilidade”, ou seja, se a variação associada às características críticas de um produto decresce, significa que a qualidade desse produto aumenta. Esta definição é de extrema relevância pois alerta para o facto de os problemas de qualidade estarem inevitavelmente associados a problemas de variabilidade razão pela qual a redução continua da variabilidade dos processos conduz a aumentos progressivos da qualidade com o intuito de atingir a excelência organizacional. Por outro lado, Edward Deming (2000) refere que a gestão tem um papel determinante nas ações a desenvolver numa organização para a redução do efeito provocado pelas causas comuns de variação e como tal se uma organização tem interesse em melhorar a sua qualidade precisa de identificar as causas raiz dos problemas e a gestão tem de iniciar os esforços e as ações para a resolução dos problemas. Deming revolucionou a qualidade e a produtividade desenvolvendo catorze recomendações da qualidade.

Taguchi (1986) refere que “A qualidade é a perda que um produto confere à sociedade desde o momento em que é entregue” Para se compreender melhor este conceito, Taguchi introduz a noção original de que há perdas sempre que há desvios relativamente ao valor objetivo, contrariamente à noção tradicional de que não há prejuízo desde que os desvios se mantenham dentro dos limites especificados. O conceito de “função de perda de qualidade” encontra-se representado na Figura 12, onde se pode verificar que existem diferentes níveis de qualidade mesmo para produtos que estejam a ser produzidos dentro de especificação. À medida que se produz mais próximo do valor alvo (m), o nível de qualidade aumenta e existe menor variação (Montgomery, 2009). Os seus métodos estão direcionados para a otimização do processo e do produto, em especial na fase de pré-fabrico (Richardson, 1997).

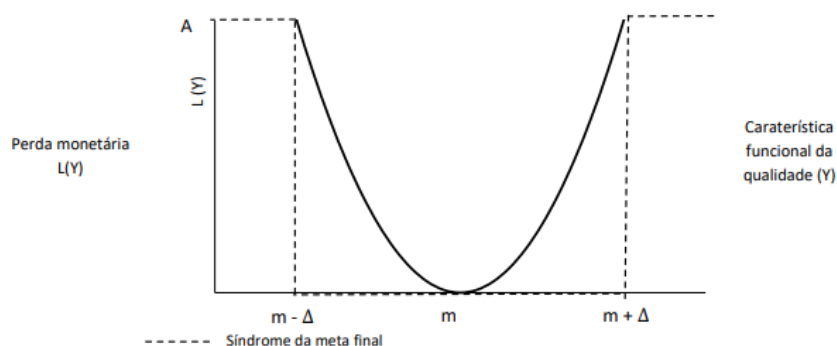


Figura 12: Função perda de Taguchi

Pires (2007) constata que alcançar a qualidade não é tarefa fácil, pois existem várias abordagens acerca do que é a qualidade. Assim, existe cada vez mais a necessidade de

uma interdisciplinaridade para que possa ser percebida na sua totalidade e perceber a sua importância de modo a serem tomadas ações no sentido de promover a melhoria contínua de um processo.

Então, Garvin (1987) decidiu decompor o conceito de qualidade em oito dimensões para poder analisar as características da qualidade, sendo elas:

- O desempenho, que está associado à capacidade de um produto ser adequado para a função pretendida.
- A fiabilidade, que está associada à frequência com que um produto falha. Entre as medidas mais comuns de fiabilidade temos o *Mean Time to First Failure* (MTFF), o *Mean Time Between Failures* (MTBF) e a percentagem de falhas por unidade de tempo.
- A durabilidade, que está relacionada com o período de tempo em que o produto é adequado para o fim que foi concebido.
- A aparência, que se refere à estética ou apelo sensorial do produto;
- O serviço, que se refere à capacidade de o fornecedor disponibilizar serviços adicionais de apoio de reparação e manutenção;
- As características secundárias, que envolve todos os elementos considerados acessórios ou de segundo plano num produto;
- A imagem, que percebe a subjetiva de qualidade e a reputação da empresa ou do produto associada à marca;
- A conformidade com as especificações que está relacionada com a capacidade de um produto obedecer às exigências impostas.

As características da qualidade podem estar relacionadas direta ou indiretamente com as dimensões da qualidade referidas, pois a partir das definições apresentadas, podemos afirmar que a qualidade é um conceito multidimensional. A existência excessiva de variabilidade no desempenho do processo vai resultar num aumento do desperdício. Portanto, uma definição alternativa é que, o aumento da qualidade é a redução do desperdício (Montgomery, 2009).

Uma vez que a variabilidade só pode ser descrita em termos estatísticos, os métodos estatísticos desempenham um papel central nos esforços de melhoria da qualidade. O Controlo Estatístico do Processo (SPC) e o Desenho de Experiências (DOE) muito úteis na melhoria da qualidade e desempenham um papel fundamental na redução da variabilidade. O SPC permite reduzir os desperdícios provocados pela produção de

produto não conforme, e é útil na redução de retrabalho uma vez que usa ferramentas estatísticas para prever quando os parâmetros do processo/ produto podem sair da sua especificação de forma a que ações preventivas apropriadas possam ser tomadas. O SPC trata do reconhecimento de padrões e da procura de tendências nos dados, além de permitir gerir quaisquer alterações nos processos para garantir que a integridade do processo consiga ser mantida em todos os estágios do mesmo. Para um controlo estatístico de processo eficaz, o uso de experiências devidamente planeadas (DOE) são usadas para aprender o máximo possível sobre o processo a partir de um número limitado de experiências. Pode ser muito importante de forma a definir quais os melhores níveis de trabalho dos fatores de controlo. No DOE as experiências são projetadas com estatísticas em mente para que os dados recolhidos possam ser analisados com as ferramentas estatísticas relevantes.

A engenharia de Qualidade incorpora um conjunto de abordagens ou atividades operacionais de gestão e de engenharia utilizadas para uma organização assegurar que as características da qualidade de um determinado produto, processo ou sistema se encontram dentro do valor alvo, com o mínimo de variabilidade possível em torno desse valor (Montgomery, 2009).

As técnicas e ferramentas da qualidade usadas pelos profissionais da qualidade formam grande parte da metodologia básica usada por engenheiros e outros profissionais técnicos para atingir o mínimo de variabilidade possível.

3.3 As sete ferramentas básicas da qualidade

Existem sete ferramentas básicas da qualidade que podem auxiliar uma organização na identificação e resolução de problemas na implementação de melhorias de processos. Um dos primeiros autores da gestão associado ao uso das ferramentas de controlo de qualidade foi o Dr. Kaoru Ishikawa que, em 1968 publicou o livro “*Gemba no Quality Control Shuho*” que tratava da gestão da qualidade através de técnicas e práticas para empresas japonesas. Foi neste livro que as sete ferramentas básicas da qualidade foram propostas pela primeira vez (Neyestani, 2017b). No entanto, Ishikawa não as chamou de sete ferramentas básicas de controle de qualidade. Este descritor veio mais tarde em 1971 numa tradução para o inglês do livro do Dr. Ishikawa, intitulada “*Guide to Quality Control*”, amplamente utilizado e é ainda um recurso valioso ao usar as sete ferramentas básicas da qualidade (Ishikawa, 1971).

Entre os especialistas foram surgindo algumas classificações sobre a forma de agrupar e utilizar algumas ferramentas da qualidade, como, por exemplo, ferramentas de controlo ou de planeamento. Outras, utilizadas com menos frequência, ou mais aplicáveis a determinados contextos, fazem parte do acervo característico, mas não recebem classificações especiais (Lopes e Capricho, 2007). As ferramentas mais utilizadas são:

- Folha de Verificação – As folhas de verificação são formulários simples com formatos diversificados que podem ajudar o registo sistemático dos dados de uma empresa. Esta ferramenta é muito utilizada para quantificar a frequência com que certos eventos ocorrem, durante um determinado período de tempo. Facilita e organiza o processo de recolha e análise de dados e preparam uma “abordagem consistente, eficaz e económica” que pode ser aplicada numa auditoria de garantia de qualidade para rever e seguir as etapas de um determinado processo. As principais vantagens das fichas de verificação é o facto de serem facilmente aplicadas e compreendidas, e ajudam a dar uma imagem clara da situação e condição da organização (Montgomery, 2009; Omachonu e Ross, 2004).
- Fluxograma – Representação gráfica que demonstra a sequência de um trabalho de forma analítica, caracterizando as operações, os responsáveis e/ou as unidades organizacionais envolvidas no processo. Identifica também as entradas, atividades, pontos de decisão e saídas para entender facilmente o objetivo geral do processo. O fluxograma utiliza símbolos padronizados, que facilitam a representação dos processos e de entendimento rápido. Este gráfico serve como

uma ferramenta de solução de problemas que pode ser aplicado metodicamente para detetar e analisar as áreas ou pontos do processo que podem ter tido problemas potenciais ao “documentar” e explicar uma operação, por isso é muito útil para encontrar e melhorar a qualidade dos processos implementados (Montgomery, 2009).

- Histograma – O histograma é uma ferramenta muito útil para descrever um sentido da distribuição de frequência dos valores observados de uma determinada variável em estudo. É um tipo de gráfico de barras que mostra a distribuição da amostra por categorias e visualiza os dados de atributos e variáveis de um produto ou processo, verificando a distribuição dos dados e a quantidade de variação dentro de um processo. Exibe as diferentes medidas de tendência central (média, moda e média) (Forbes e Ahmed, 2011; Omachonu e Ross, 2004).
- Diagrama de dispersão – Gráfico que ajuda na visualização da relação entre variáveis e permite em muitos casos detetar e analisar um padrão entre duas variáveis, uma independente e uma dependente, e perceber se existe uma relação entre elas e se o relacionamento é fraco, forte, positivo ou negativo. A forma do diagrama de dispersão geralmente mostra o grau e a direção da relação entre as duas variáveis, e a correlação pode revelar possíveis causas de um problema (Montgomery, 2009).
- Diagrama ou gráfico de Pareto – Esta ferramenta foi introduzida por Vilfredo Pareto, economista italiano que percebeu no século XIX que 80% da riqueza pertencia a apenas 20% da população. Em 1950 Juran desenvolveu o gráfico de Pareto com o objetivo de descobrir os diferentes tipos de “não conformidade” a partir dados recolhidos e classificá-los. Esta abordagem estatística permite, através de uma representação de um gráfico de barras, identificar aspetos relevantes relacionados com a qualidade mostrando a importância relativa das variáveis, priorizadas por ordem decrescente da esquerda para a direita do gráfico. Além disso, o gráfico de Pareto pode ser um meio de alcançar a melhoria da qualidade e melhorar a eficiência, o desperdício de material, conservação de energia, questões de segurança e redução de custos antes e depois de se introduzir alterações (Juran e Godfrey, 1998).
- Diagrama de Causa e Efeito – Também conhecido como diagrama de Ishikawa ou diagrama “Espinha de Peixe” desenvolvido por Kaoru Ishikawa. Pode ser

assim denominado como espinha de peixe devido à forma do diagrama se parecer com o esqueleto de um peixe para identificar problemas de qualidade, com base no seu grau de importância (Neyestani, 2017a). É uma ferramenta de resolução de problemas que investiga e analisa sistematicamente todas as causas potenciais ou reais que resultam num determinado efeito. Este diagrama é uma técnica de resolução de problemas que reúne e organiza as possíveis causas de um problema, alcançando um entendimento comum e expondo as lacunas no conhecimento existente, classificando as causas mais prováveis e estudando cada uma. São seis os elementos (causas) possíveis que se encontram neste diagrama, sendo eles o ambiente, os materiais, a máquina, a medição, o homem e/ou o método (Montgomery, 2009).

- Cartas de Controlo – Shewhart desenvolveu esta ferramenta na década de 1920 no Bell Telephone Laboratories e é provavelmente a técnica mais complexa criada para a gestão da qualidade (Montgomery, 2009). É um tipo específico de gráfico que serve para analisar e ajustar a variação de um processo ao longo do tempo. As cartas de controlo são muito importantes, pois consegue-se observar e monitorar um processo e estudar se que está em “controlo estatístico” (sem problemas com a qualidade) de acordo com as amostras ou se estas se encontram entre o Limite Superior de Controlo (LSC) e o Limite Inferior de Controlo (LIC). Se o processo não se encontra entre estes dois valores, então significa que o processo se encontra fora de controlo e pode ser analisada a carta de modo a encontrar as causas do problema de qualidade. Este tema será abordado ao pormenor no subcapítulo 5.1.2 (Montgomery, 2009).

As sete ferramentas básicas da qualidade têm em comum o facto de contribuírem para a melhoria contínua da qualidade através da identificação e análise dos problemas que ocorrem. Contudo, de acordo com Omachonu e Ross (2004), as ferramentas em causa apresentam particularidades uma vez que estão associadas a etapas distintas do processo que têm por finalidade a eliminação de uma falha. Assim, como se depreende da análise da Figura 13, existem três categorias diferentes às quais se aplicam as ferramentas básicas da qualidade.

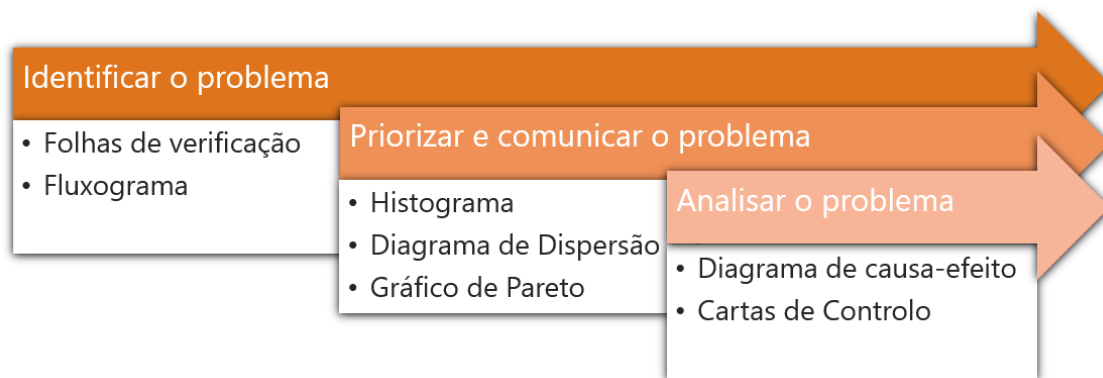


Figura 13: Aplicação das ferramentas básicas da qualidade (Adaptado de Omachonu e Ross, 2004)

Denota-se a existência de ferramentas da qualidade que estão vocacionadas para a identificação do problema, permitindo de certa forma organizar, compreender, interpretar e apresentar os dados recolhidos. Para a resolução de um determinado problema é essencial saber a sua gravidade e definir uma ordem de prioridade de resolução do mesmo. Existem ainda outras ferramentas que permitem a análise e investigação das causas das falhas e de certa forma podem sugerir ações corretivas (Omachonu e Ross, 2004). No geral, as ferramentas da qualidade mais do que formas sofisticadas de tratamento de dados ou abordagens estritamente formais este conjunto de ferramentas com elevado teor visual auxilia os profissionais que os utilizam a pensar de forma estruturada sobre os dados e factos disponíveis.

Capítulo 4 Desenho de Experiências

O Planejamento de Experiências ou Desenho de Experiências (DOE) consiste num método estatístico associado à resolução de problemas e à melhoria de desempenho de processo/produto. Esta ferramenta de otimização é atualmente aplicada em vários domínios, em especial na indústria química, farmacêutica e automóvel, pois permitiu melhorar a capacidade de produção e o desempenho industrial, atingindo menores custos, maior produtividade e redução de variabilidade.

Esta metodologia foi desenvolvida inicialmente por Fisher em meados de 1922, em conjunto com F. Yates e D. J. Finney. Fisher iniciou os primeiros estudos práticos com objetivo de comprovar as teorias científicas desenvolvidas no campo da agricultura para a cultura de cereais (Fisher e Yates, 1971). Estas teorias científicas conduziram à publicação de uma série de artigos científicos sobre o DOE e a sua aplicação nas ciências agrárias e na biologia (Street, 1990). A introdução desta técnica teve um grande impacto na ciência agrícola. Com a introdução do DOE surge o conceito de Análise de Variância (ANOVA).

Mais tarde, em 1932, uma indústria têxtil britânica e uma indústria química Alemã começaram a utilizar o DOE introduzido por Fisher no desenvolvimento dos seus produtos e processos.

Em 1951 surge a primeira era industrial quando G. E. P. Box e K. B. Wilson publicaram trabalhos relevantes sobre os desenhos de experiências e introduzem a Metodologia de Superfície de Resposta (RSM). O RSM foi desenvolvido por BOX e Wilson e consiste numa abordagem estatística e matemática que determina a relação matemática entre a variável de resposta e os vários fatores, tendo em conta que essa, na maioria das vezes, é desconhecida (Box e Hunter, 1978). Após esta data, as aplicações na indústria química começaram a crescer.

A segunda era industrial surge em 1975, também conhecida como a revolução da qualidade. Foi nesta altura que começaram a surgir livros de DOE orientados para os engenheiros e cientistas e a qualidade nas empresas começou a melhorar significativamente, pois a indústria automóvel japonesa começou a adotar procedimentos estatísticos de controlo de qualidade e implementou experiências que deram início a esta nova era (*A Quick History of the Design of Experiments (DOE) | STAT 503, 2022*). Surgiram ainda outras técnicas de gestão tais como a Gestão da Qualidade Total (*Total Quality Management – TQM*) e a Melhoria Contínua da Qualidade (*Continuous Quality*

Improvement – CQI). Genichi Taguchi, especialista Japonês em controlo da qualidade, destacou-se ao publicar os conceitos de arranjos ortogonais e análise de experiências. O método de Taguchi é uma estratégia de qualidade abrangente que cria o conceito de e robustez do processo/produto e o design robusto de parâmetros. Este método é considerado uma combinação de princípios de projetos de engenharia robustos, chamado de experiências de matrizes ortogonais, que são discutidas neste capítulo. Os seus métodos foram largamente difundidos no Japão e começaram a surgir nos Estados Unidos da América. Tanto no Japão como nos países ocidentais, o DOE foi se revelando de extrema utilidade na conceção e desenvolvimento de novos produtos e processos, quer por si só quer quando utilizado em metodologias de projeto que integram várias técnicas e ferramentas.

Em 1980 os desenhos experimentais foram adotados por diversas indústrias como a eletrónica, aeroespacial, semicondutores e indústria automóvel.

Após a revolução da qualidade veio a era moderna que começou por volta de 1990 quando a competitividade económica e a globalização obrigaram as empresas a serem mais competitivas. Então surge o conceito de seis sigma que correspondeu a uma nova forma de representar o CQI e que é uma técnica estatística muito útil.

4.1 Etapas de um desenho de experiências

Qualquer DOE requer uma abordagem sistemática ou um procedimento delineado antes da sua execução para se obter resultados satisfatórios. O planeamento pré-experimental envolve o reconhecimento e definição do problema, a escolha dos fatores de controlo e respetivos níveis de trabalho e a seleção da variável de resposta bem como do tipo de desenho a utilizar. Depois da fase de planeamento vem a fase de execução da experimentação seguida da análise e conclusões. As etapas práticas necessárias para planear e conduzir a experimentação incluem:

1. Reconhecer e definir o(s) dano(s) causado(s) pelo problema;
2. Escolher os fatores e os respetivos níveis de estudo para investigar o problema;
3. Selecionar a variável de resposta correlacionada com o(s) dano(s);
4. Selecionar o desenho a utilizar;
5. Execução da experimentação;
6. Análise estatística dos dados da experimentação;

7. Conclusões e recomendações da experimentação efetuada.

A partir do desenho de experiências, o experimentador consegue compreender o processo e determinar a forma como é que as variáveis independentes em estudo (fatores de controlo), podem ter impacto na variável dependente ou na característica da qualidade em estudo (resposta). Desta forma, o desenho de experiências envolve o planeamento das experiências, a recolha e análise dos dados por métodos estatísticos, tendo como resultado da sua análise conclusões pertinentes e objetivas acerca do problema em estudo (Maria, 2004).

Para obtenção de resultados eficientes, tem que se ter como base o que se quer avaliar e quais são os tipos de experimentação a realizar.

Para um Planeamento de Experiências é necessário ter em conta os seguintes princípios:

- Réplica – Consiste na execução de um teste mais do que uma vez sob condições preestabelecidas em que se obtém uma estimativa do erro experimental;
- Aleatoriedade – Técnica estatística em que a sequência das experiências é aleatória e a escolha dos materiais que serão utilizados também é aleatória. Vai permitir obter uma análise dos resultados é que as variáveis estudadas e os erros experimentais observados apresentam um carácter aleatório, o que é conseguido pelo emprego desta técnica.
- Partição em Blocos – É uma técnica muito utilizada nas indústrias, que tem como intuito o aumento da precisão. Em certos processos, pode-se controlar e avaliar sistematicamente a variabilidade resultante da presença de fatores que perturbam o sistema, mas que não se tem interesse em estudá-los.

Para a utilização do desenho de experiências (DOE) é assim importante ter uma abordagem sistemática, seguindo um conjunto de etapas bem definidas, de forma que a sua aplicação produza os resultados desejados. Existem diferentes tipos bem estabelecidos de desenhos de experiências, no entanto neste trabalho apenas serão explicitados os desenhos fatoriais completos e fracionados que são uma abordagem alternativa e muito mais eficiente do que a experimentação tradicional de fazer variar *one factor at time* (OFAT).

4.2 Experimentação Tradicional – OFAT

A experimentação fatorial constitui uma alternativa mais eficiente à experimentação tradicional (*One factor at time* – OFAT), na qual se faz variar um fator da cada vez, mantendo os restantes fatores constantes ou fixos. Porém, esta experimentação é incapaz de detetar interações entre os fatores, não permitindo estudar a variação que a mudança num nível de um fator produz na resposta quando o outro fator se encontra em determinado nível, o que condiciona as conclusões dos resultados obtidos a partir do mesmo pois não se consegue analisar sinergias entre fatores ou efeitos adversos provocados pela interação entre os fatores.

Portanto, uma experiência fatorial bem planeada e executada pode fornecer muitas informações acerca do efeito sobre uma variável de resposta devido a um ou mais fatores bem como ao efeito das interações sobre a variável de resposta em estudo, algo que pela técnica de experimentação OFAT não é possível de obter (Montgomery, 2009).

4.3 Desenho Fatorial

Contrariamente à experimentação OFAT, a utilização do método de experimentação fatorial é adequada quando existem vários fatores a investigar e que podem influenciar uma determinada variável de resposta.

Nesta abordagem é selecionado um número fixo de níveis para os vários fatores em estudo e efetuam-se experiências com as várias combinações de níveis dos fatores de modo a observar-se o efeito na resposta selecionada. Caso o desenho fatorial considere todas as combinações possíveis para os fatores em estudo, este designa-se por fatorial completo (Montgomery, 2009). Num planeamento fatorial completo vai ser investigado o efeito de um fator, que corresponde à variação na resposta dos níveis do fator em estudo.

À medida que o número de fatores que podem influenciar uma determinada característica de resposta aumenta, o número de experiências a executar aumenta também e isto torna o processo de experimentação difícil devido ao elevado custo e tempo despendido. O elevado número de fatores a estudar leva as empresas a aplicar diferentes tipos de desenhos de experiências para evitar custos desnecessários e assim considerar todas as combinações possíveis para os diferentes níveis dos fatores em estudo e conhecer quais

são os fatores que influenciam o processo, com finalidade de os regular ao melhor nível de trabalho (Taguchi, 2004).

Então, a utilização de fatoriais fracionados revelam se muito úteis nas fases iniciais de trabalho experimental, quando existem muitos fatores a investigar, sendo os desenhos fatoriais fracionados muito utilizados na fase de triagem onde se pretende determinar quais os fatores de controlo que têm maior influência sobre uma determinada variável de resposta em estudo.

4.3.1 Desenho Fatorial Completo 2^k

O desenho fatorial completo é um método muito utilizado em casos que envolvem vários fatores em que é necessário investigar o efeito conjunto dos fatores e das interações (efeitos principais) na variável de resposta.

Um caso especial com interesse no desenho fatorial é aquele onde todos os fatores em estudo têm apenas dois níveis de trabalho atribuídos. Estes níveis podem ser classificados numa escala qualitativa ou quantitativa, pelo que é usual atribuir a cada fator selecionado um nível codificado identificado por nível alto (representado por “+”, por “+1” ou por “2”) ou um nível codificado identificado por nível baixo (representado por “-”, por “-1” ou por “1”). O desenho fatorial em causa é designado por 2^k , em que k representa o número de fatores de controlo em estudo, e 2 representa os dois níveis a que cada fator é estudado (Montgomery, 2009).

No geral, os fatoriais do tipo 2^k ou os fatoriais fracionados do tipo 2^{k-p} são muito úteis nas fases iniciais de trabalho experimental quando há muitos fatores a analisar, pois permitem a realização do menor número de experiências para estudar os k fatores e identificar os efeitos dos fatores principais e das interações (Taguchi, 2004).

4.3.1.1 Fatorial 2^2

O fatorial 2^2 constitui a forma mais simples do fatorial 2^k , ou seja, k = dois fatores, identificados por A e B, dos quais cada um é experimentado a dois níveis. O mais usual é designar os níveis de cada fator quantitativamente, nível baixo (-1) e nível alto (+1) (Montgomery, 2009).

A Tabela 1 demonstra os arranjos possíveis dos dados para desenhos fatoriais experimentais com dois fatores, variando em dois níveis.

Tabela 1: Arranjo dos dados para o fatorial 2^2 (adaptado de Montgomery, 2009)

| | | Fator B | |
|---------|--|----------|----------|
| Fator A | | B(-) | B(+) |
| A(-) | | A(-)B(-) | A(-)B(+) |
| A(+) | | A(+B(-) | A(+B(+) |

O fatorial 2^2 pode também ser representado geometricamente através de um quadrado uma vez que existem quatro combinações de níveis dos fatores, e que facilita a interpretação dos dados (Figura 14).

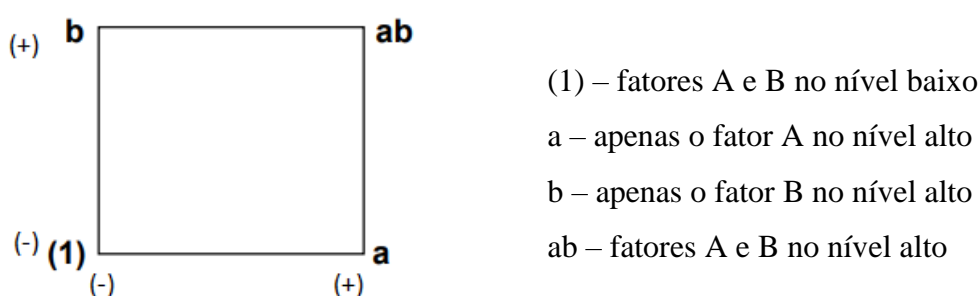


Figura 14: Representação geométrica do fatorial simples 2^2 (adaptado de Montgomery, 2009)

Através da Figura 14 é possível confirmar que existem quatro combinações de ensaios possíveis para os fatores A e B, pois as letras a, b, ab e (1) também representam os totais das n observações (replicações) recolhidas nos respetivos pontos da experimentação. De forma geral cada combinação vai ser representada por um conjunto de letras minúsculas. Se a letra está presente, significa que o fator correspondente a essa letra se encontra no nível alto. Caso se encontre ausente, o fator em causa encontra-se no nível baixo (Montgomery, 2009).

Os efeitos com interesse no fatorial 2^2 são os efeitos principais de A e B, e ainda o efeito da interação entre os fatores principais, a interação AB.

Para estimar o efeito principal A, é calculada a média das observações das letras a e ab (lado direito do quadro), pois é onde o fator A se encontra no nível alto, e subtrai-se a esse valor obtido a média das observações das letras (1) e b (lado esquerdo do quadro) que é onde o fator A se encontra no nível baixo:

$$A = \bar{Y}_{A^+} - \bar{Y}_{A^-} \quad (4.1)$$

$$A = \frac{a+ab}{2n} - \frac{b+(1)}{2n} = \frac{1}{2n} [a + ab - b - (1)] \quad (4.2)$$

De forma idêntica, o efeito principal do fator B é obtido pela média das observações das letras b e ab (topo do quadro), pois é onde o fator B se encontra no nível alto, e subtrai-

se a esse valor obtido a média das observações das letras (1) e a (base do quadro) que é onde o fator B se encontra no nível baixo:

$$B = \bar{Y}_{B^+} - \bar{Y}_{B^-} \quad (4.3)$$

$$B = \frac{ab+b}{2n} - \frac{a+(1)}{2n} = \frac{1}{2n} [ab + b - a - (1)] \quad (4.4)$$

Por outro lado, a interação AB é estimada a partir da diferença das médias na diagonal do quadrado:

$$AB = \frac{ab+(1)}{2n} - \frac{a+b}{2n} = \frac{1}{2n} [ab + (1) - a - b] \quad (4.5)$$

Os números que se encontram entre parêntesis retos chamam-se contrastes que corresponde à combinação linear dos níveis do fator em estudo. O caso do fator B, o seu contraste é igual a $ab + b - a - (1)$.

Nestes casos pode ainda recorrer-se a uma tabela de sinais, Tabela 2, que permite a determinação dos sinais de cada contraste individualmente. Para calcular os contrastes a partir da tabela, multiplica-se os sinais da coluna apropriada pelas combinações listadas nas várias linhas e calcula-se a sua soma.

Tabela 2: Tabela de sinais para o fatorial simples 2^2 (adaptado de Montgomery, 2009)

| Combinação | I | A | B | AB |
|------------|---|----|----|----|
| (1) | 1 | -1 | -1 | 1 |
| a | 1 | 1 | -1 | -1 |
| b | 1 | -1 | 1 | -1 |
| ab | 1 | 1 | 1 | 1 |

Então, a tabela de sinais vai ser útil para a determinação de cada contraste os quais, serão utilizados para o cálculo das estimativas dos efeitos e das somas quadráticas de A, B, e da interação AB. Então, os efeitos são obtidos através das seguintes fórmulas:

$$Efeito_A = \frac{[a+ab-b-(1)]}{2n} \quad (4.6)$$

$$Efeito_B = \frac{[ab+b-a-(1)]}{2n} \quad (4.7)$$

$$Efeito_{AB} = \frac{[ab+(1)-a-b]}{2n} \quad (4.8)$$

Consequentemente, as somas quadráticas são obtidas a partir das seguintes fórmulas:

$$SS_{A \text{ ou fator linha}} = \frac{[a+ab-b-(1)]^2}{4n} \quad (4.9)$$

$$SS_{B \text{ ou fator coluna}} = \frac{[ab+b-a-(1)]^2}{4n} \quad (4.10)$$

$$SS_{AB \text{ ou interação}} = \frac{[ab+(1)-a-b]^2}{4n} \quad (4.11)$$

A análise de variância vai ser usada como ferramenta para a análise estatística dos dados. No caso de utilização de dois fatores, deve considerar-se o modelo de dois fatores mais geral da equação 4.12:

$$X_{ijk} = \mu_{ij} + \varepsilon_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \gamma_{ij} + \varepsilon_{ijk} \quad (4.14)$$

Em que,

i = índice que denota os diferentes níveis de um dos fatores ($i = 1, 2, \dots, I$)

j = índice relativo ao nível do segundo fator ($j = 1, 2, \dots, J$)

k = índice relativo a cada observação dentro de cada célula (i, j) ($k=1, 2, \dots, K$, sendo $K > 1$)

X_{ijk} = k -ésima observação da célula (i, j)

μ_{ij} = valor esperado das observações incluídas na célula (i, j)

μ = parâmetro global

α_i = efeito do primeiro fator (fator A)

β_j = efeito do segundo fator (fator B)

γ_{ij} = efeito da interação (AB), quando $\gamma_{ij} = 0$ a interação é nula, quando $\gamma_{ij} \neq 0$ existe interação

ε_{ijk} = erro aleatório

A variação total (SS_T) pode ser dada pela equação 4.13 ou pode-se decompor nas várias fontes de variação da equação 4.14:

$$SS_T = \sum_i \sum_j \sum_k (x_{ijk} - \bar{x}_{...})^2 \quad (4.13)$$

$$SS_T = SS_A + SS_B + SS_{AB} + SS_{erro} \quad (4.14)$$

Em que,

$\bar{x}_{...}$ = média global das observações

$\bar{x}_{i.}$ = média amostral das observações incluídas na linha i

$\bar{x}_{.j}$ = média amostral das observações incluídas na coluna j

A utilização da Análise de Variância (ANOVA) para o tratamento dos dados obtidos constitui uma ferramenta para a análise estatística dos dados e permite identificar a forma como cada fator contribui para o desvio do resultado relativamente à média dos dados, a quantidade de variação produzida pela variação dos níveis dos fatores e a

quantidade de variação devida ao erro aleatório. A variação devido ao erro aleatório pode ser dada por:

$$SS_{erro} = \sum_i \sum_j \sum_k (x_{ijk} - \bar{x}_{ij})^2 \quad (4.15)$$

A ANOVA permite testar de forma objetiva quais são os fatores e as interações de fatores controláveis que afetam de forma significativa os efeitos da resposta em estudo, comparando o $F_{\text{tabelado}} = F_{\text{nível de significância; graus liberdade (g.l) fator A; g.l erro}}$, com o $F_{\text{calculado}}$ a partir da tabela da ANOVA que contém o cálculo das Somas Quadráticas (SS), do número de graus liberdade (g.l.) e ainda dos desvios quadráticos médios, para cada fator e interação (Tabela 3). Posteriormente é possível determinar a combinação de níveis que conduz à maximização da característica estabelecida. Os sinais tal como a ordem de grandeza dos coeficientes e a presença ou ausência de interações sobre o sistema em estudo constitui informação de grande utilidade para o experimentador retirar conclusões.

A ANOVA é apresentada normalmente sob a forma de tabela identicamente à Tabela 3.

Tabela 3: Tabela de Análise da Variância

| ANOVA | SS | g.l. | DQM | F |
|--------------|---|------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| A | $\frac{[a + ab - b - (1)]^2}{4n}$ | Número de níveis (i) - 1 | $\frac{SS_A}{g.l._A}$ | $\frac{DQM_A}{DQM_{erro}}$ |
| B | $\frac{[ab + b - a - (1)]^2}{4n}$ | Número de níveis (j) - 1 | $\frac{SS_B}{g.l._B}$ | $\frac{DQM_B}{DQM_{erro}}$ |
| AB | $\frac{[ab + (1) - a - b]^2}{4n}$ | i x j | $\frac{SS_{AB}}{g.l._{AB}}$ | $\frac{DQM_{AB}}{DQM_{erro}}$ |
| erro | $\sum_i \sum_j \sum_k (x_{ijk} - \bar{x}_{ij})^2$ | graus liberdade totais - (I-J- x) | $\frac{SS_{erro}}{g.l._{erro}}$ | |
| TOTAL | $SS_T = SS_A + SS_B + SS_{AB} + SS_{erro}$ | Número de observações - 1 | | |

A aplicação do desenho de experiências pressupõe a construção de um modelo empírico, com o objetivo de maximizar a resposta em estudo e baseia-se na análise da significância estatística dos efeitos dos fatores e interações em análise. Então, a partir da conversão das estimativas dos efeitos num modelo de regressão, é possível prever a resposta em qualquer ponto do espaço coberto pelos níveis dos fatores (Montgomery, 2009). Então, num exemplo com dois fatores significativos A e B e interação AB também significativa, o modelo de regressão a utilizar poderá ser:

$$\bar{Y} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \varepsilon \quad (4.16)$$

$$\beta_0 = \frac{\text{total de observações}}{n \times 2^2} \quad (4.17)$$

$$\beta_1 = \frac{\text{efeito}_A}{2} \quad (4.18)$$

$$\beta_2 = \frac{\text{efeito}_B}{2} \quad (4.19)$$

$$\beta_{12} = \frac{\text{efeito}_{AB}}{2} \quad (4.20)$$

De acordo com as equações apresentadas acima, os coeficientes de regressão são $\beta_1, \beta_2, \beta_{12}$, e correspondem a metade das estimativas dos efeitos e β_0 corresponde à média global das observações.

4.3.1.2 Fatorial 2^k ($k \geq 3$)

No subcapítulo 4.3.1.1 foi apresentado o método mais simples para um fatorial com apenas dois fatores ($k=2$), em que cada um se encontrava a dois níveis, no entanto é possível estender a mais do que dois fatores, a tantos quanto desejável.

Adaptando o caso anterior, mas para três fatores A, B e C com dois níveis, isto perfaz um fatorial 2^3 com um total de oito combinações possíveis entre os três fatores. Este tipo de fatorial também pode ser representado geometricamente por um cubo (Figura 15), com as oito combinações formando os vértices do referido cubo em que as interações podem ser na diagonal em seis sentidos e entre as faces do cubo. Com este tipo de planejamento fatorial pode-se estimar os efeitos dos três fatores envolvidos (A, B e C), bem como as interações de dois fatores (AB, AC e BC) e a interação dos três fatores (ABC).

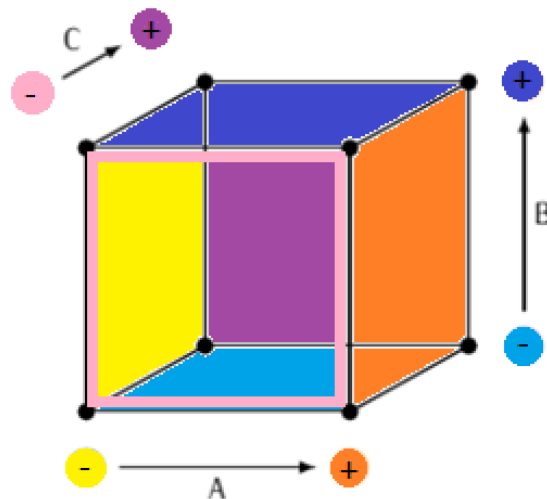


Figura 15: Representação geométrica dos contrastes correspondendo aos efeitos e às interações do fatorial 2^3

Para determinar os efeitos dos fatores e das interações, procede-se identicamente ao caso do fatorial 2^2 . No caso do fator A, determina-se a média das quatro combinações do lado direito do cubo, onde A se encontra no nível alto e subtrai-se a esta quantidade a média

das quatro combinações do lado esquerdo do cubo onde A se encontra no nível baixo. Então, o efeito médio de A será dado por:

$$Efeito_A = \bar{Y}_{A^+} - \bar{Y}_{A^-} = \frac{1}{4n} [a + ab + ac + abc - b - c - bc - (1)] \quad (4.21)$$

De forma análoga, o efeito B e C correspondem a:

$$Efeito_B = \bar{Y}_{B^+} - \bar{Y}_{B^-} = \frac{1}{4n} [b + ab + bc + abc - a - c - ac - (1)] \quad (4.22)$$

$$Efeito_C = \bar{Y}_{C^+} - \bar{Y}_{C^-} = \frac{1}{4n} [c + ac + bc + abc - a - b - ab - (1)] \quad (4.23)$$

Desta forma, a interação AB corresponde à diferença nas médias entre as experiências dos dois planos diagonais do cubo. Usando a mesma lógica obtém-se para as interações AC e BC:

$$Interação_{AB} = \frac{1}{4n} [ab + (1) + abc + c - a - b - ac - bc] \quad (4.24)$$

$$Interação_{AC} = \frac{1}{4n} [ac + (1) + abc + b - a - c - ab - bc] \quad (4.25)$$

$$Interação_{BC} = \frac{1}{4n} [bc + (1) + abc + a - c - b - ab - ac] \quad (4.26)$$

A interação ABC pode ser definida como a diferença média entre a interação AB para os dois níveis de C:

$$Interação_{ABC} = \frac{1}{4n} [abc + a + b + c - (1) + ab - ac - bc] \quad (4.27)$$

O quadro de sinais para o fatorial 2^3 pode ser apresentado de encontro à Tabela 4.

Tabela 4: Quadro de sinais algébricos para o fatorial 2^3

| Combinações | I | A | B | AB | C | AC | BC | ABC |
|-------------|---|----|----|----|----|----|----|-----|
| (1) | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 |
| a | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 |
| b | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 |
| ab | 1 | 1 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 |
| c | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 |
| ac | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 |
| bc | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 |
| abc | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

De uma forma geral, para qualquer fatorial do tipo 2^k , pode-se determinar o efeito principal ou interação multiplicando a combinação da primeira coluna da tabela pelos sinais da coluna correspondendo ao fator em causa ou à interação correspondendo esta

soma ao contraste dividindo de seguida o contraste por metade do número de observações de acordo com,

$$Efeito = \frac{contraste}{n2^{k-1}} \quad (4.28)$$

$$SS = \frac{(contraste)^2}{n2^k} \quad (4.29)$$

Enquanto o número de fatores do desenho fatorial 2^k aumenta, o número de experiências necessárias também aumenta. Por exemplo, um fatorial do tipo 2^5 requer 32 experiências. Neste fatorial, dos 31 graus de liberdade totais apenas 5 graus de liberdade dizem respeito aos efeitos principais, 10 graus de liberdade correspondem às interações de dois fatores e 16 graus de liberdade são usados para estimar interações de ordem superior. Por vezes não existe muito interesse nestas interações de ordem superior, particularmente no início do estudo de um processo. Se pudermos assumir que algumas interações de ordem superior são desprezáveis então poder-se-á usar um planeamento fatorial fracionado, que é um desenho experimental que consiste numa fração do desenho fatorial completo, envolvendo um número inferior de experiências relativamente ao conjunto completo de 2^k de forma a obter informação dos efeitos principais e interações de ordem mais baixa.

Existem outros métodos para além do método dos contrastes que podem ser utilizados para calcular os efeitos e as variações dos fatores e das interações, como é o caso do algoritmo de *Yates* (Montgomery, 2009).

O algoritmo de *Yates* é outro método que permite calcular os contrastes, necessários para o cálculo dos efeitos dos fatores e das somas dos quadrados, nos planos fatoriais 2^k . Este algoritmo consiste na construção de uma tabela, e tem o seguinte procedimento de acordo com Monteiro e Oliveira (2007):

- As primeiras duas colunas da tabela deverão ser consideradas como a coluna da ordem dos padrões e a coluna das experiências numeradas, respetivamente, que deve ser preenchida pelos padrões na ordem standard das experiências;
- A terceira coluna da tabela é a coluna das respostas, ou seja, a coluna que para cada experiência deve ser preenchida com a soma total das respostas para cada um dos tratamentos.

Para além destas colunas, a tabela do algoritmo de *Yates* tem mais uma coluna para cada um dos fatores do DOE. Se o DOE tiver dois fatores então acrescentam-se mais duas colunas, se tiver três fatores acrescentam-se mais três colunas, ou seja, no caso de um

desenho fatorial 2^k tem-se mais k colunas. O preenchimento das k colunas é realizado da seguinte forma:

- Os primeiros 2^{k-1} elementos são calculados através da soma dos pares de respostas adjacentes (o primeiro elemento da primeira k coluna é calculado pela soma das duas primeiras respostas, o segundo pela soma da terceira e quarta resposta, e por aí adiante);
- Os restantes 2^{k-1} elementos da coluna k_1 são calculados de forma análoga através da diferença dos pares de respostas adjacentes;
- As colunas seguintes calculam-se de forma idêntica, mas usando sempre os valores da coluna anterior;
- A última destas colunas, ou seja, a k -ésima coluna é considerada a coluna dos contrastes, para o efeito respetivo de cada uma das experiências que se apresentam nas linhas. A partir desta coluna constroem-se as duas colunas seguintes: a coluna das estimativas dos efeitos e a coluna das somas quadráticas (SS).

A coluna das estimativas dos efeitos dos fatores e das interações obtém-se dividindo a coluna dos contrastes pelo número de observações.

A coluna das somas quadráticas obtém-se elevando ao quadrado a coluna dos contrastes e dividindo pelo dobro do número de observações.

Capítulo 5 Gestão da Qualidade Automóvel: IATF 16949

A competitividade do mercado automóvel por posições estratégicas é uma das mais rigorosas do tecido empresarial. Esta indústria é constantemente confrontada com desafios uma vez que existe uma rápida evolução e inovação da tecnologia, aplicação de requisitos legislativos cada vez mais restritos (emissão de gases poluentes), bem como a necessidade de gestão de uma rede global de fornecedores, com ciclos de desenvolvimento de produtos cada vez mais curtos, tornando-se numa cadeia de ciclos infinita.

Para as empresas conseguirem responder às exigências a que são submetidas, as diferentes cadeias de abastecimento associadas à indústria automóvel, como a conceção e o desenvolvimento, produção e serviços, estas devem procurar sempre adotar uma política de zero defeitos.

Porém, dado que existe uma crescente pressão causada pela relação tempos/custos e dado o aumento da quantidade de modelos a produzir, esta pressão tem originado um aumento no número de recolhas de unidades por parte dos fabricantes automóveis, devido a problemas com diferentes origens. Este tipo de cenários pode ser uma manifestação da qualidade insuficiente dos processos produtivos (Garvin, 1987). Para além de poderem afetar significativamente a situação financeira das empresas, estes custos externos prejudicam o seu desempenho no mercado, provando a importância da implementação de SGQ robustos na indústria automóvel (Sabbagha, 2016).

Considerando todos os desafios com que o setor automóvel tem de lidar e, uma vez que a adoção de práticas estabelecidas pela norma NP EN ISO 9001 na sua versão de 2015 acrescentam valor às organizações que a adotam, pensou-se em criar um suplemento a esta norma. Este suplemento teve o apoio de vários fabricantes de automóveis como a Daimler Chrysler, Ford, BMW, PSA Peugeot Citroën, Renault SA, Fiat, Volkswagen e GM, que, em conjunto com associações do comércio automóvel como a AIAG (América), VDA/QMC (Alemanha), ANFIA (Itália), FIEV (França) e SMMT (Reino Unido) criaram a IATF. Segundo a British Standards Institution (2014), a *International Automotive Task Force* (IATF) desenvolveu em 1995 a ISO/TS16949 como um suplemento à norma ISO 9001 com o intuito de adotar um referencial de SGQ como estímulo à melhoria de toda a cadeia da indústria automóvel e ajudar as empresas a satisfazer as expectativas dos seus clientes, dando relevância à prevenção de defeitos, à redução da variabilidade assim como do desperdício ao longo da cadeia de abastecimento (British Standards Institution, 2014).

Este referencial normativo comum foi sofrendo sucessivas revisões até à versão atual, a norma IATF 16949 de 2016, cujo âmbito é a definição de requisitos necessários para a implementação de um SGQ para concepção, desenvolvimento, produção e, onde aplicável, instalação e serviços pós-venda de produtos ligados ao setor automóvel.

Deliberando um termo de comparação entre as duas normas, enquanto a ISO 9001 tem o seu âmbito focado na organização e nos seus clientes, bem como nas partes interessadas relevantes que influenciam a qualidade dos produtos desenvolvidos, por outro lado, a IATF 16949 atribui uma maior importância aos *Original Equipment Manufacturer* (OEM) e aos requisitos legislativos e de regulamentação. Assim, esta deve ser sempre vista como um suplemento e aplicada em conjunto com a ISO 9001 (IATF, 2016). A IATF 16949, anteriormente designada como ISO/TS 16949, é dedicada à implementação de um sistema de gestão da qualidade na indústria automóvel. Baseia-se nos requisitos da ISO 9001 e incorpora ferramentas com uma abordagem específica para a indústria automóvel (Chiarin e Cherrafi, 2017).

5.1 Ferramentas recomendadas pela IATF 16949

A norma IATF 16949:2016 identicamente à ISO 9001, está alinhada com o pensamento baseado no risco. Este tipo de pensamento procura primeiramente prevenir eventuais problemas de forma a que eles não ocorram, recorrendo à definição e gestão do risco, à avaliação criteriosa dos requisitos específicos de clientes, bem como a planos de auditorias, tanto internas como externas, de modo a avaliar o desempenho do SGQ, minimizar os custos associados à produção e custos de não conformidades, enquanto se maximiza a fiabilidade nos processos produtivos internos (Simões, 2020).

Para este efeito, a IATF definiu um conjunto de ferramentas e metodologias (denominadas como “*Automotive Core Tools*”) consideradas ferramentas e metodologias essenciais para o desenvolvimento de um Sistema de Gestão da Qualidade capaz de responder aos requisitos específicos dos clientes, sendo eficiente e eficaz nesta resposta. As ferramentas chave na indústria automóvel consideradas essenciais para a prevenção de defeitos, redução da variação e resolução de problemas, são:

- FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*) - Análise do Modo de Efeito e Falha. Ferramenta que permite analisar os diversos meios de um processo, elencando os modos de falha que poderão ocorrer, as causas e os efeitos que destas falhas

advêm. A FMEA é também vista como uma ferramenta que permite avaliar e minimizar os riscos associados a produtos e processos. Esta avaliação é feita analisando as falhas possíveis e respetivas ações corretivas que permitam eliminar ou mitigar as primeiras, aumentando a fiabilidade e qualidade dos produtos, processos ou serviços. Porém, dependendo da análise que se faz quer seja a processos ou produtos, a nomenclatura desta ferramenta altera, pois se estiver relacionada com o processo, esta denomina-se por PFMEA (*Process Failure Mode and Effect Analysis*). Por outro lado, se esta estiver relacionada com o produto, a nomenclatura a utilizar deverá ser DFMEA (*Design Failure Mode and Effect Analysis*). Idealmente a aplicação desta ferramenta deve acontecer durante a fase inicial de um projeto para que possam ser tomadas ações preventivas e definidas ações corretivas consoante os resultados da análise efetuada. No caso de ser efetuada de uma forma exaustiva e detalhada, terá como benefícios uma diminuição drástica das reclamações dos clientes, assim como dos custos associados, pois caracteriza-se pela resposta aos efeitos, modos e causas das eventuais falhas encontradas ao nível de um processo de fabrico, montagem e procedimentos logísticos implementados. A análise das falhas tem como origem o estudo das diversas componentes que contribuem para o mesmo, podendo estas causas ser os meios humanos, os materiais, o meio envolvente e os equipamentos (AIAG, 2019).

- PPAP (*Production Part Approval Process*) - Processo de Aprovação da Peça de Produção. Este processo é utilizado na indústria automóvel permitindo estabelecer uma relação de confiança entre fornecedores e clientes, facilitando a comunicação entre estes. O PPAP tem como principal função estabelecer o processo de aprovação de novos componentes, componentes que necessitaram de alterações na sua conceção, ou ainda de componentes que resultem de processos produtivos novos ou que tenham sido alterados. Assim é possível garantir que os requisitos e as necessidades do cliente são compreendidos pelo fornecedor, desde as especificações dos desenhos dos componentes, à capacidade do processo produtivo, isto é, a capacidade que o processo desenhado tem de produzir, consistentemente, peças conformes, dentro dos parâmetros estabelecidos e nas quantidades e prazos definidos (AIAG, 2006). A submissão de um PPAP é um

processo complexo e só termina após completar todos os elementos necessários com a submissão do *Part Submission Warrant* (PSW).

- APQP (*Advanced Product Quality Planning*) - Planeamento Avançado da Qualidade do Produto. É um ponto que aborda todo o ciclo de desenvolvimento de novos produtos e processos. Esta ferramenta estabelece a metodologia apropriada para definir e implementar as etapas necessárias para assegurar que o produto desenvolvido vai satisfazer os requisitos do cliente (AIAG, 2008). A implementação desta ferramenta numa indústria é essencial a ponto de quase se confundir com a implementação do SGQ, dado o envolvimento necessário de toda a estrutura (Bobrek e Sokovic, 2005). Para obter estes benefícios e atingir os seus objetivos o manual APQP define cinco fases principais na elaboração e implementação do projeto, sendo elas o Planeamento e Definição do Programa, a Conceção e Desenvolvimento do Produto, a Conceção e Desenvolvimento do Processo, a Validação do Produto e do Processo e ainda a Avaliação e Medidas Corretivas a desenvolver. Associados a estas cinco fases são também definidos alguns princípios essenciais como a definição do âmbito do projeto, a definição de uma equipa multidisciplinar que seja capaz de compreender e responder às necessidades e expectativas do cliente, mantendo-o informado, a capacidade de resolução de problemas que possam surgir e ainda caso necessário, a implementação de planos de formação;
- Metodologia 8D – Resolução de problemas. A metodologia 8D é uma ferramenta estruturada e sistemática orientada para a resolução de problemas e prevenção de recorrências. Dada a complexidade dos problemas encontrados, é benéfico a existência de perspetivas apresentadas por elementos de uma equipa com um cariz multidisciplinar, sendo esta ferramenta estruturada por oito etapas, de que resulta do seu nome (Riesenberger e Sousa, 2010). Esta metodologia serve como um processo que o fornecedor tem de seguir para solucionar reclamações de cliente. A metodologia 8D dá ênfase às sinergias de trabalho e por isso vai desde a etapa inicial do plano até à etapa final de comemoração do resultado o que ajuda a construir uma cultura onde o trabalho em equipa consolida as novas práticas adotadas. Como tal, a metodologia 8D compreende as seguintes etapas: 1ºD - Definir a equipa; 2ºD – Descrever o problema; 3ºD – Implementar e verificar medidas de contenção provisórias; 4ºD – Definir e verificar a causa principal; 5ºD

- Escolher as ações corretivas permanentes; 6ºD – Implementar as ações corretivas permanentes; 7ºD – Prevenir a recorrência de problemas; 8ºD – Documentar e felicitar a equipa.
- SPC (*Statistical Process Control*) - Controlo Estatístico de Processo. Caracterizado por um conjunto de ferramentas e técnicas estatísticas que têm como objetivo monitorizar e assegurar que um processo se encontra sob controlo estatístico, o que significa que o processo é estável e tem apenas presente variação aleatória da característica do processo. Ao utilizar o SPC, a organização consegue manter os seus processos sob controlo e produzir peças conformes, dentro do intervalo de especificação. As primeiras considerações sobre o controlo estatístico de um processo, num contexto de produção industrial, foram feitas por Walter Shewhart nos anos 20 ao criar as cartas de controlo que permitem distinguir a variação aleatória característica do processo, da variação não aleatória provocada por causas especiais ou assinaláveis. As cartas de controlo permitem, portanto, acompanhar o comportamento de um determinado parâmetro e têm por objetivo evidenciar se o processo se encontra sob controlo estatístico, assinalar a presença de causas especiais de variação e ainda orientar a introdução de melhorias no funcionamento do processo. Para que os processos produtivos apresentem níveis de qualidade desejáveis para os produtos que executam, foram criados limites de aceitação, que permitem a redução de desperdício e ainda a implementação de medidas assim que sejam detetadas ocorrências (Bramwell, 2013). Para processos que se encontram sob controlo estatístico é possível realizar estudos de capacidade ou de capacidade do processo, permitindo concluir se estes serão capazes de satisfazer as especificações definidas pelo cliente, assim como determinar a probabilidade de um produto ser, consistentemente, fabricado dentro dos parâmetros ou faixa de especificação estabelecidos e atender às expectativas do cliente. Para analisar a capacidade do processo, são normalmente utilizados os índices de capacidade (KPI), como é o caso do C_p e C_{pk} (Montgomery, 2009), sendo que o C_p descreve a relação entre o espaço disponível para variação de acordo com as especificações e o espaço ocupado pela variação do processo. Para caracterizar a localização do processo usa-se o C_{pk} .
 - MSA (*Measurement System Analysis*) – Análise do Sistema de Medição. O MSA consiste numa metodologia que tem por objetivo a determinação dos erros e

desvios dos sistemas de medição (e.g. equipamentos de medição, sensores e outros dispositivos de medição) para verificar se estes se mantêm dentro de valores aceitáveis tendo em conta as exigências das especificações de produto e/ou processo e se são estáveis ao longo do tempo. No que diz respeito ao MSA, a IATF 16949 contém critérios específicos, pois conforme a cláusula 7.1.5.1.1, Análise do Sistema de Medição (IATF, 2016): “Estudos estatísticos devem ser conduzidos para analisar a variação presente nos resultados de cada tipo de sistema de medição, e identificados nos planos de controlo. Os métodos analíticos e os critérios de aceitação usados devem estar em conformidade com aqueles dos manuais de referência do cliente para as análises dos sistemas de medição. Outros métodos analíticos e critérios de aceitação podem ser usados se aprovados pelo cliente. A priorização dos estudos de MSA deverá focar nas características críticas ou especiais do produto ou processo.”. As orientações do MSA permitem avaliar todo o processo de medição desde o método de ensaio e equipamentos de medição, até ao processo de obtenção de medições, de modo a assegurar a integridade dos dados utilizados no controlo da qualidade e de compreender as implicações dos erros de medição para as decisões tomadas sobre um produto ou processo.

Para o Planeamento e lançamento de projetos na indústria automóvel é necessário ter em atenção os requisitos e características especiais de cliente antes de serem definidos os passos e estudos a desenvolver antes e depois do início da produção em série de um produto (SOP – *Start of Production*), tal como se visualiza na Figura 16, de modo a otimizar o processo produtivo na fase de pré-produção, definir os métodos de trabalho mais apropriados, ferramentas, métodos de controlo de produção e prevenir possíveis riscos. Assim, a melhor metodologia a adotar deverá ser de acordo com o exigido pelo cliente na gestão e desenvolvimento de produtos, adotando as normas AIAG e/ ou VDA.

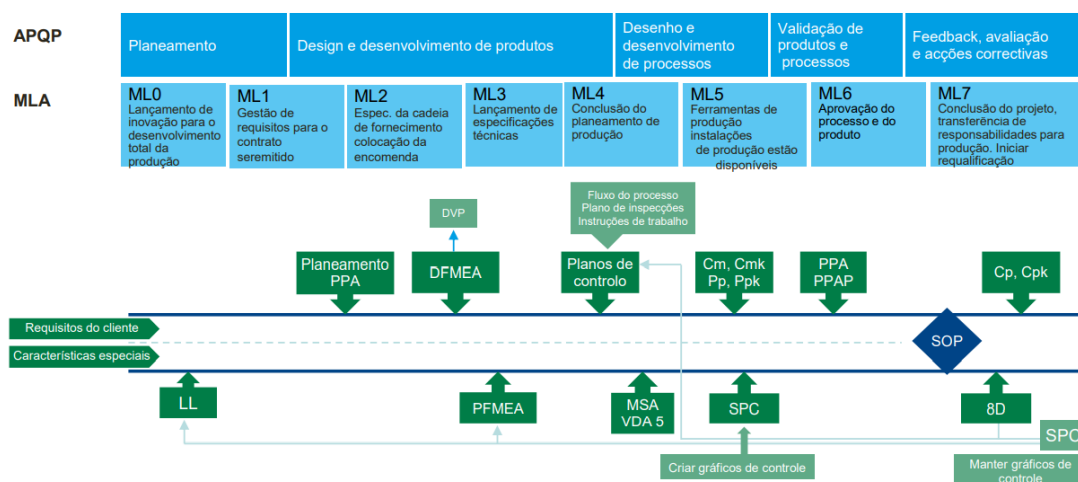


Figura 16: Planeamento de projetos na indústria automóvel

5.1.1 Controlo Estatístico do Processo

O *Statistical Process Control* (SPC), em português denominado como Controlo Estatístico do Processo, é caracterizado por um conjunto de metodologias, ferramentas e regras estatísticas que ao serem aplicadas num processo produtivo permitem a sua caracterização, a identificação e eliminação de problemas da qualidade de uma forma preventiva. Estas ferramentas têm como objetivo monitorizar e assegurar que um processo produz peças conformes, dentro do que estava inicialmente previsto.

Em contexto industrial, as primeiras considerações acerca deste tema foram realizadas nos anos 20 do século XX por Walter Shewhart ao criar as cartas de controlo, como ferramenta para avaliar a variação de um processo na Western Electric Company (Best & Neuhauser, 2006; Western Electric, 1958). Mais tarde, em 1950, Deming contribuiu para a popularização da implementação de técnicas estatísticas com base na utilização da cartas de controlo (Chapman, 1994).

Assim, com o objetivo de assegurar que o processo atua de acordo com o expectável, produz o máximo de produtos conformes e gera o mínimo desperdício, são utilizadas Cartas de Controlo (*Control Charts*) como ferramenta do SPC, cujo estudo e análise permitem a rápida deteção de situações fora de controlo estatístico, bem como compreender a variação aleatória característica do processo e ainda a rápida identificação de situações de fora de controlo estatístico. Estas podem ser resultantes de variação de maior magnitude provocada por causas assinaláveis e/ou a existência de padrões não aleatórios na carta de controlo cuja presença levará à adoção de ações corretivas de forma a colocar o processo novamente sob controlo.

5.1.2 Cartas de Controlo

O controlo e a melhoria da qualidade tornaram-se as estratégias de negócio mais importantes para a indústria, pois é considerada um método para reduzir a variação dos produtos, entregas, processos, materiais e equipamentos (Montgomery, 2009).

A adaptação, o controlo e a melhoria contínua devem ser um objetivo permanente de qualquer organização e a utilização de técnicas e ferramentas da qualidade podem auxiliar as empresas a alcançar os objetivos e na redução da variabilidade de processos e na eliminação da produção de peças não conformes.

A utilização de cartas de controlo permite verificar se existe ou não estabilidade no processo e identificar possíveis variações devido a causas comuns ou causas especiais.

Por um lado, as causas comuns estão relacionadas com fontes de variação que estão diretamente ligadas às características do próprio processo. Por outro lado, as causas especiais são aquelas que devem ser evitadas e/ou eliminadas, pois forçam um sistema a ficar fora de controlo. São exemplos de causas especiais o desgaste de ferramentas, a fadiga do operador, matéria prima com variações, entre outras (Montgomery, 2009). As causas especiais de variação são normalmente identificadas pelos operadores e as ações a desenvolver para a sua eliminação são tipicamente desenvolvidas ao nível da gestão das operações.

A aplicação de cartas de controlo é um dos métodos estatísticos mais usuais para a monitorização e verificação da estabilidade do processo produtivo, na ótica da melhoria contínua, tal como descrito no subcapítulo das ferramentas da qualidade.

Podem também ser definidas por um gráfico que mostra a evolução ao longo do tempo de uma estatística (ω) referente a uma determinada característica da qualidade que foi medida ou calculada. Estes gráficos apresentam limites de controlo.

5.1.2.1 Modelo e construção de uma carta de controlo

Para a correta construção de cartas de controlo torna-se necessário seguir alguns passos (Pereira, Z. L.; Requeijo, 2008):

1. Seleção da característica da qualidade (ω);
2. Desenvolvimento do plano de qualidade, com o método e equipamento de medição;

3. Seleção do tipo de carta de controlo a aplicar, se por atributos (dados qualitativos) ou variáveis (dados quantitativos);
4. Seleção da carta de controlo mais adequada;
5. Definição da frequência da amostragem e da dimensão da amostra;
6. Definição dos métodos de recolha de dados e construção das folhas para registo dos dados;
7. Determinação dos limites de controlo e da linha central;
8. Detetar a presença de causas especiais de variação e eliminar essas causas;
9. Evidência de processo sob controlo estatístico.

Por norma os gráficos de controlo são compostos por três linhas horizontais das quais duas correspondem aos limites de controlo inferior e superior, e a terceira linha corresponde à linha central, ou valor médio que deverá ser tanto quanto possível próximo do valor nominal. Estes limites de controlo são construídos com base nos dados da amostragem retirada ao longo do processo produtivo e mostram a evolução de uma estatística (ω) ao longo do tempo (t) referente a uma determinada característica da qualidade de modo a que, se o processo estiver sob controlo, quase todos os pontos representados na carta se encontram entre esses limites de controlo (Montgomery, 2009; Read e Kume, 1989).

Considerando μ_ω a média da estatística de uma característica da qualidade e o desvio padrão dessa estatística σ_ω , então a linha central representa o valor médio da característica da qualidade (LC), enquanto que as restantes duas linhas designam-se por limite superior de controlo (LSC) e limite inferior de controlo (LIC). L deve ser a distância entre os limites de controlo e a linha central, expresso em unidades de desvio padrão. Então os limites podem ser dados por (Montgomery, 2009):

$$LSC = \mu_\omega + L\sigma_\omega \quad (5.1)$$

$$LSC = \mu_\omega \quad (5.2)$$

$$LIC = \mu_\omega - L\sigma_\omega \quad (5.3)$$

As cartas de controlo informam sobre o comportamento do processo permitindo verificar se este se encontra sob controlo estatístico ou em caso negativo, no caso de um ou mais pontos da distribuição não se encontrar entre os limites de controlo superior e inferior, identificar as causas especiais ou assinaláveis no sentido de implementar medidas de forma a tornar o processo estável e previsível. Para além disso também existe um conjunto de regras adicionais para deteção de situações de fora de controlo estatístico.

Na Figura 17 encontra-se o esquema geral da estrutura de uma carta de controle.

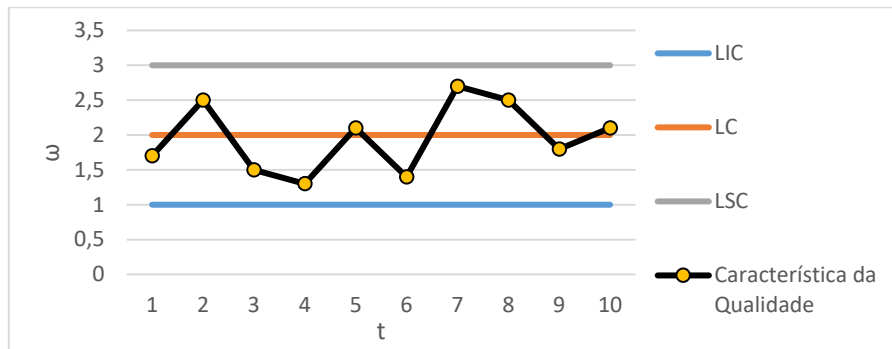


Figura 17: Esquema de uma carta de controle

Nesta pode-se observar a linha central da carta, os limites de controle e a representação ao longo do tempo da característica da qualidade a ser seguida. Para que o processo se encontre sob controle estatístico, as observações registadas na carta têm assim que evidenciar um padrão aleatório, existindo um conjunto de regras bem definidas para a detecção de padrões não aleatórios nas cartas de controle.

5.1.2.2 Tipos de Cartas de Controle

As cartas de controle podem ser divididas em duas categorias principais consoante o tipo de dados em análise (Figura 18): cartas de controle por atributos (qualitativas) ou ainda cartas de controle por variáveis (quantitativas) (Montgomery, 2009).

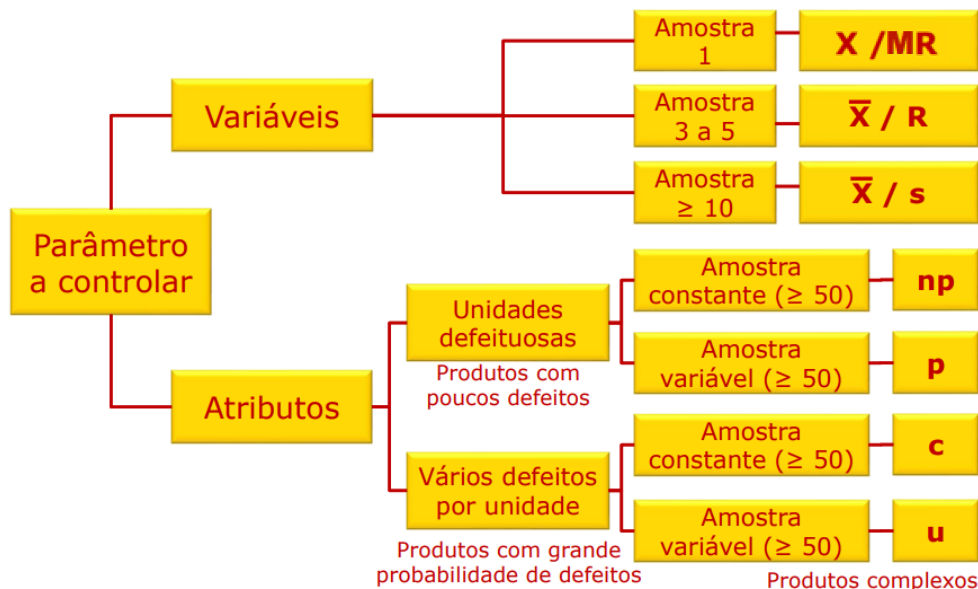


Figura 18: Fluxograma para seleção de cartas de controle (OPCO, 2022)

No caso de controle por variáveis foram projetadas para controlar parâmetros do produto ou processo que são medidos numa escala contínua. A recolha de dados deve ir ao

encontro da amostra e frequência definidas para cada carta. As cartas que são habitualmente utilizadas para dados por variáveis, tal como demonstra a Figura 18, são:

- As cartas de controlo das observações individuais e amplitudes móveis (\bar{X}/MR), que são baseadas em observações individuais, sendo X igual aos valores individuais e a amplitude móvel (MR) como sendo a diferença entre o maior e o menor de duas observações sucessivas;
- As cartas de controlo das médias e amplitudes ($\bar{\bar{X}}/R$), que permitem determinar se alguma das amostras se encontra fora de controlo.
- As cartas de médias e desvio padrão ($\bar{\bar{X}}/s$), que em vez da utilização da amplitude R pode-se utilizar o desvio padrão s para medir a dispersão, pois é mais eficiente especialmente para o caso de amostras maiores.

Por outro lado, tem-se ainda as cartas de controlo por atributos que, quando utilizadas de um modo apropriado, especialmente pela incorporação de uma análise de Pareto em tempo real, podem tornar-se em eficazes ferramentas de melhoria.

Atributos são características de um processo que se expressam em termos de grandezas não mesuráveis, classificando peças como boas ou más, aceitar ou rejeitar, OK e NOK, pois não dependem de uma distribuição estatística. As cartas de controlo por atributos não são tão sensíveis à variação como as por variáveis. Estas são utilizadas para cobrir diferentes não conformidades em simultâneo, em vez de várias cartas por variáveis, uma para cada característica. As cartas de controlo por atributos estão divididas de acordo com os defeitos a analisar:

- Unidades defeituosas:
 - Cartas de unidades não conformes (np), que avaliam o número de unidades contendo uma ou mais não conformidades;
 - Cartas que demonstram a percentagem de unidades não conformes (p). É avaliado o número de unidades contendo uma ou mais não conformidades divididas pelo número de unidades inspecionado.
- Vários defeitos por unidade:
 - Cartas com o número de não conformidades (c), onde cada unidade pode ter várias não conformidades.
 - Carta com o número de não conformidades por unidade (u), em que cada unidade constitui uma amostra e cada unidade pode ter mais do que uma não conformidade.

5.1.2.3 Regras para detecção de causas especiais de variação

Uma carta de controlo pode transmitir condições não normais como um ou mais pontos fora dos limites de controlo ou então, estes pontos exibirem um padrão de comportamento que não seja aleatório. Foi neste âmbito que Western Electric publicou um livro em 1959 onde constam oito regras para detetar causas especiais de variação e que indicam a ocorrência de uma situação fora de controlo estatístico (Pereira e Requeijo, 2008). Estas regras foram sendo aprimoradas ao longo dos anos.

Para aplicação das mesmas, considera-se que o intervalo compreendido entre os limites de controlo $LC \pm 3\sigma_\omega$ está dividido em seis zonas idênticas, cada uma com uma largura equivalente a $1\sigma_\omega$ e são designadas por A, B, C, C, B, A, em que a zona C é simétrica em relação à linha central (Figura 19). Neste trabalho foram adotadas as regras incluídas na norma ISO 780-2:2013, que são:

- Regra 1: Um ou mais pontos fora dos limites de controlo (Zona A);
- Regra 2: Nove pontos consecutivos na zona C ou para além da zona C do mesmo lado da linha central;
- Regra 3: Seis pontos consecutivos no sentido ascendente e descendente;
- Regra 4: Catorze pontos consecutivos alternando de cima para baixo;
- Regra 5: Dois de 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.

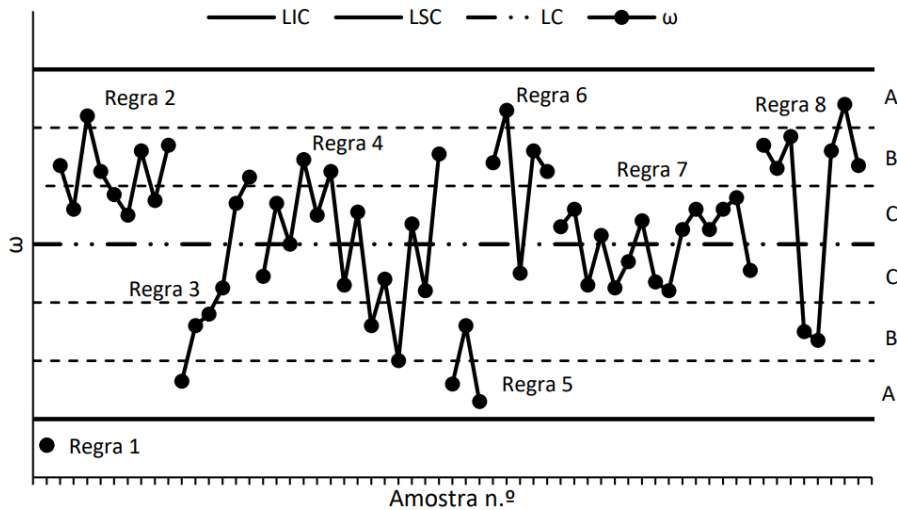


Figura 19: Carta com padrões representativos de cada regra (Adaptado de Nelson, 2018)

O objetivo da utilização destas regras consiste em aumentar a sensibilidade das cartas de controlo de Shewhart e ajudar na análise do processo de forma a retirar a melhor informação possível e detetar causas especiais de variação. Deve-se ponderar quanto à sua aplicação, pois a implementação simultânea de várias regras, pode aumentar o número de falsos alarmes, o que acarretaria custos de não qualidade.

5.1.2.4 Cartas de Controlo por variáveis

A escolha da carta de controlo faz-se em função do tipo de característica que se pretende observar. No caso de a característica ser expressa numa escala contínua, como por exemplo o peso, dimensão ou temperatura, deverão ser cartas de controlo de variáveis.

5.1.2.4.1 Cartas de Controlo da Média (\bar{X}) e da Amplitude (R)

Para controlar um processo por variáveis é necessário verificar tanto a tendência central (localização) como a dispersão da distribuição dos dados.

Para a construção destas cartas, no cálculo dos LSC e LIC é necessário estimar as Amplitudes (R), sendo esta dada pelo máximo valor observado subtraído pelo mínimo valor observado da amostra:

$$R = x_{max} - x_{min} \quad (5.4)$$

Assim, a amplitude média do processo pode ser calculada a partir das amplitudes das m amostras:

$$R = \frac{R_1 + R_2 + \dots + R_m}{m} \quad (5.5)$$

Então, os limites de controlo da carta da Média e da carta da Amplitude são calculados com recurso a *software* de estatística ou através das seguintes equações:

- Limites da Carta da Média

$$LIC = \bar{x} - A_2\bar{R} \quad (5.6)$$

$$LC = \bar{x} \quad (5.7)$$

$$LSC = \bar{x} + A_2\bar{R} \quad (5.8)$$

- Limites da Carta da Amplitude

$$LIC = D_3\bar{R} \quad (5.9)$$

$$LC = \bar{R} \quad (5.10)$$

$$LSC = D_4\bar{R} \quad (5.11)$$

As constantes A_2 , D_3 e D_4 estão dependentes da dimensão da amostra, e a tabela que determina estas constantes encontra-se disponível no Anexo I do presente trabalho.

Ao interpretar os padrões da carta \bar{X} e da carta R, as duas cartas devem ser consideradas conjuntamente. Se a distribuição for normal as variáveis aleatórias \bar{X} e R devem ser estatisticamente independentes, ou seja, devem-se comportar independentemente na carta de controlo.

5.1.2.4.2 Cartas de Controlo de Observações Individuais (X) e das Amplitudes Móveis (MR)

Existem muitas situações onde a dimensão da amostra é $n=1$, ou seja, a amostra consiste numa única observação. Quando isto acontece recorre-se à construção da carta das observações individuais X de forma a controlar a localização do processo e são registadas as observações individuais para cada instante i . Por outro lado, para se controlar a dispersão do processo é utilizada a carta das amplitudes móveis, MR. Esta é construída com base na diferença entre o valor maior e o menor de duas observações consecutivas:

$$MR = X_i - X_{i-1} \quad (5.12)$$

os limites de controlo da carta das observações individuais e da carta das amplitudes móveis podem ser calculados através das seguintes equações:

- Limites da Carta das Observações Individuais

$$LIC = \bar{x} - 3\frac{\overline{MR}}{d_2} \quad (5.13)$$

$$LC = \bar{x} \quad (5.14)$$

$$LSC = \bar{x} + 3 \frac{\overline{MR}}{d_2} \quad (5.15)$$

- Limites da Carta das Amplitudes Móveis

$$LIC = D_3 \overline{MR} \quad (5.16)$$

$$LC = \overline{MR} \quad (5.17)$$

$$LSC = D_4 \overline{MR} \quad (5.18)$$

As constantes d_2 , D_3 e D_4 estão dependentes da dimensão da amostra e encontram-se disponíveis no Anexo I. É de toda a importância verificar a normalidade quando se usam cartas de observações individuais, pois se a distribuição se afasta da normalidade os limites de controlo dos dados não serão apropriados.

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

Este tipo de cartas é preferível às cartas \bar{X} e R quando a dimensão das amostras se encontra acima de 10, pois o método das amplitudes para estimar σ perde eficiência estatística para amostras de dimensão moderada e elevada.

- Limites da Carta da Média

$$LIC = \bar{x} - A_3 \bar{S} \quad (5.13)$$

$$LC = \bar{x} \quad (5.14)$$

$$LSC = \bar{x} + A_3 \bar{S} \quad (5.15)$$

- Limites da Carta do Desvio Padrão

$$LIC = B_4 \bar{S} \quad (5.16)$$

$$LC = \bar{S} \quad (5.17)$$

$$LSC = B_4 \bar{S} \quad (5.18)$$

As constantes A_3 e B_4 estão dependentes da dimensão da amostra e encontram-se disponíveis na tabela do Anexo I do presente trabalho.

5.1.2.5 Condições de Utilização de Cartas de Controlo de Variáveis

A utilização de Cartas de Controlo de Variáveis pressupõe algumas condições associadas às observações recolhidas, nomeadamente a Normalidade, a independência e a

aleatoriedade das mesmas. Os dados relativos à característica a controlar devem, por isso, ser independentes e identicamente distribuídos, seguindo uma distribuição normal de média, μ , e variância, σ^2 .

5.1.2.5.1 Pressuposto da Normalidade dos dados

Os eventos naturais representados por dados contínuos assumem diferentes distribuições de frequência, entre elas tem-se a distribuição em forma de sino, chamada curva normal ou curva de Gauss.

A média, μ , de uma distribuição probabilística é análoga à média amostral de um histograma e, por conseguinte, representa a tendência central da distribuição. A variância, σ^2 , representa a variabilidade de uma distribuição.

A distribuição normal é a base das cartas de controlo, devido à relação existente entre o desvio padrão e a área sob a curva normal. A partir do valor nominal especificado, a relação entre desvio padrão e curva da normal verifica que a probabilidade de um acontecimento estar incluído num determinado intervalo, depende diretamente do desvio padrão:

- para um desvio padrão de 1, ou seja, de $\mu \pm 1$, a probabilidade de um acontecimento ocorrer é de 68,26%;
- para um desvio padrão de $\mu \pm 2$, a probabilidade de um acontecimento ocorrer é de 95,44%;
- para um desvio padrão de $\mu \pm 3$, a probabilidade de um acontecimento ocorrer é de 99,73%;

Se $X \sim N(\mu, \sigma^2)$, a transformação em distribuição normal padrão (média zero e variância 1) é dada por:

$$Z = \frac{X - \mu}{\sigma} \quad (5.19)$$

A normalidade dos dados está relacionada com a linearidade do gráfico, ou seja, quanto "mais linear" for o gráfico melhor a normalidade dos dados, e se os pontos estiverem perto da linha, este é um bom indicativo de normalidade.

De acordo com Pereira e Requeijo (2008), para determinado nível de significância alfa, α , se os dados amostrais seguirem uma distribuição aproximadamente normal, conclui-se também através de inferência estatística que a população de onde foram retiradas as amostras também deverá ser Normal. Caso contrário, se os dados amostrais não seguirem

uma distribuição Normal, pode concluir-se que a população à qual os dados amostrais pertencem também não é normal.

5.1.2.5.2 Pressuposto da Aleatoriedade dos dados

De modo a garantir a aleatoriedade dos dados, existem vários métodos relevantes e muito utilizados que permitem verificar a aleatoriedade ou não dos dados, tais como o teste modificado do quadrado médio das diferenças sucessivas, o teste das sequências e ainda o teste das sequências ascendentes e descendentes (Pereira e Requeijo, 2008). A verificação da não aleatoriedade dos dados pode advir da correlação entre observações consecutivas ou desfasadas no tempo, ou da mistura de populações diferentes.

5.1.2.5.3 Pressuposto da Independência dos dados

Quando não se verifica autocorrelação significativa entre os dados, significa que estes são independentes, isto é, o valor que a variável respeitante à característica da qualidade toma em determinado instante t não depende nem do seu valor no instante anterior ($t - 1$), nem do seu valor em qualquer instante desfasado de k instantes ($t - k$).

Este pressuposto pode ser verificado através da aplicação da Função de Autocorrelação (FAC) e da Função de Autocorrelação Parcial (FACP) (Pereira e Requeijo, 2008).

5.1.3 Estudos de Análise dos Sistemas e Medição

A *Measurement System Analysis* (MSA), em português Análise dos Sistemas de Medição, é um conjunto de técnicas utilizadas para aferir se um sistema de medição está capaz de satisfazer os requisitos do controlo de qualidade de um produto.

Esta ferramenta científica permite determinar a quantidade de variação contribuída pelo sistema de medição e tem como foco a verificação do equipamento de medição para o uso pretendido e avaliar a sua fiabilidade, indicando a capacidade do sistema em fornecer resultados confiáveis. Isto só será possível aplicando um controlo metrológico a todos os equipamentos de medição e assegurar o controlo estatístico dos mesmos, garantindo que estes se encontram em conformidade com os requisitos. Assim, a metrologia apresenta um papel fundamental na qualidade, pois é considerada como uma estratégia para o

crescimento das empresas, aumentando a produtividade e a qualidade dos produtos, reduzir custos e eliminar desperdícios.

O grupo AIAG (2010) salienta que a quarta edição do manual MSA tem como propósito apresentar diretrizes para a avaliação da qualidade de um sistema de medição. O principal ponto para análise dos sistemas de medição consiste em interpretarmos o sistema de medição como um processo. No processo de medição, um sistema de medição quantitativo pode estar sujeito a diversas fontes e fatores de variação, podendo ser variações aleatórias ou sistemáticas, provocadas por causas comuns ou especiais. Existem diversos métodos de apresentação e categorização dessas fontes de variação, contudo, no exemplo do diagrama de causa e efeito da Figura 20 pode observar-se as possíveis causas de variação de um sistema de medição.

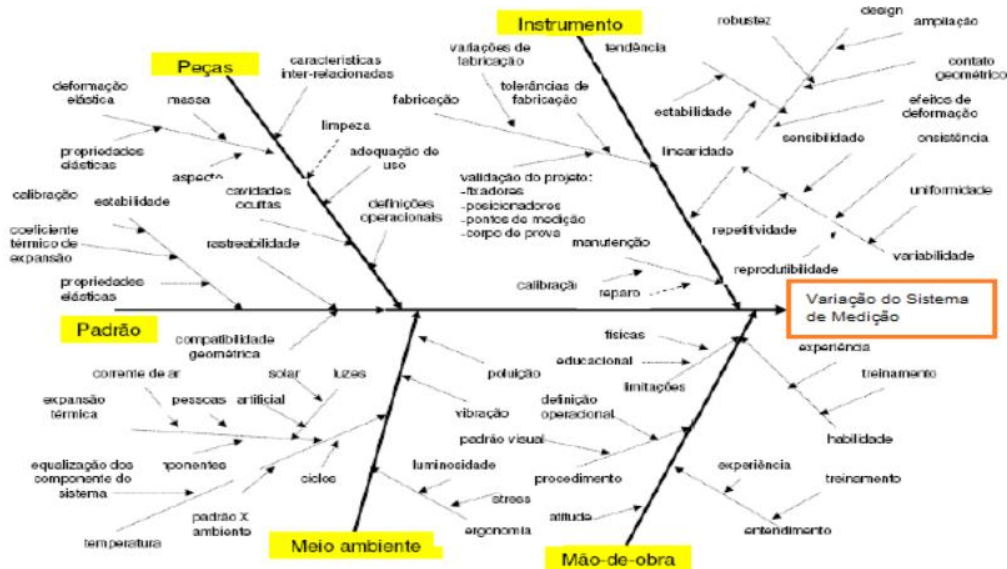


Figura 20: Diagrama de causas e efeitos da variação dos sistemas de medição (OPCO, 2022)

De modo a garantir que o correto funcionamento de um sistema de medição seja atendido, deve monitorizar os principais elementos de um sistema de medição genérico, sendo eles os padrões, as peças, o instrumento de medição, a formação das pessoas e cumprimento de procedimentos, e as condições ambientais.

Um sistema de medição é o conjunto de instrumentos, normas, operações, métodos, pessoal, entre outros, que podem ser possíveis fontes de variação num processo de medição (Figura 21), utilizados para quantificar uma unidade de medida ou avaliar uma característica (AIAG, 2010).

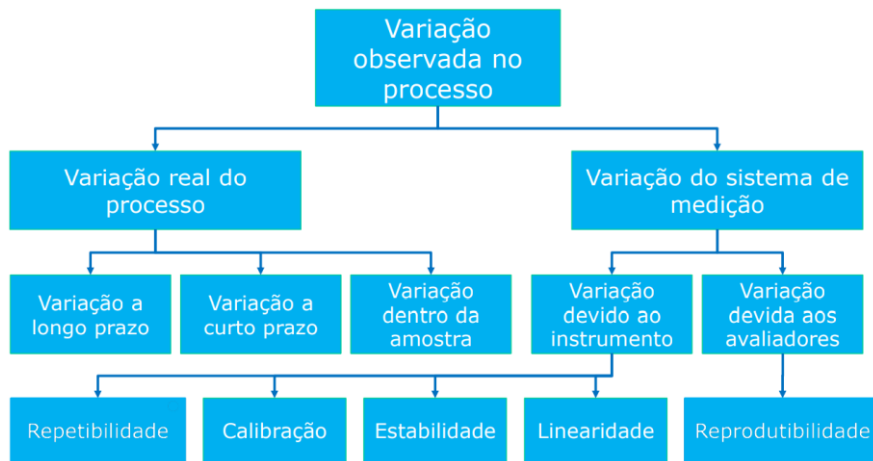


Figura 21: Possíveis fontes de variação num processo (OPCO, 2022)

Para que seja possível estudar a variação do processo, ou seja, aplicar o SPC, ou mesmo realizar estudos de uma característica de um produto, aplicando o Desenho de Experiências, é necessário identificar o sistema de medição nos planos de controlo do produto e garantir que este sistema seja fiável e capaz, de forma precisa. Caso contrário, ao medir as características de um processo, os produtos resultantes deste sistema de medição podem ser considerados como não conformes quando na verdade, estão dentro das especificações. Se esta situação for ignorada, não é possível assegurar que o sistema de medição funcione corretamente durante o processo de avaliação, podendo resultar em falhas na informação gerada e que será à posteriori estudada.

O erro de um sistema de medição pode ser estudado segundo cinco tipos de categorias, que por sua vez, apresentam diferentes causas possíveis permitindo retirar os dados pretendidos (AIAG, 2010):

- Estabilidade – é a variação total entre as medições obtidas com um determinado sistema de medição que mede uma única característica durante um determinado período. Representa a alteração do *bias* (também designado como desvio ou tendência) ao longo do tempo (Figura 22);

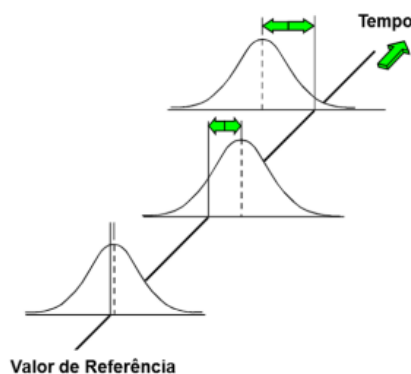


Figura 22: Gráfico da Estabilidade (AIAG, 2010)

Este estudo tem como objetivo avaliar a interação do sistema de medição com o meio ambiente, o desgaste dos componentes e o ajuste dos dispositivos e isto vai ajudar a definir a frequência de calibração e manutenção do equipamento, pois a falta de estabilidade pode estar relacionada com a carência de calibração, desgaste e/ou obsolescência dos instrumentos de medição, instrumentos de baixa qualidade, calibração inadequada e manutenção precária (AIAG, 2010).

O estudo de estabilidade assegura cientificamente o comportamento previsível do sistema de medição através do tempo e a análise da estabilidade pode ser realizada utilizando as cartas de controle de médias e amplitudes (\bar{X}/R) ou cartas da média e desvio padrão (\bar{X}/s).

- Tendência ou Desvio (*Bias*) – é a diferença entre o valor verdadeiro (valor de referência) e a média das medições observadas para uma determinada característica (Figura 23);

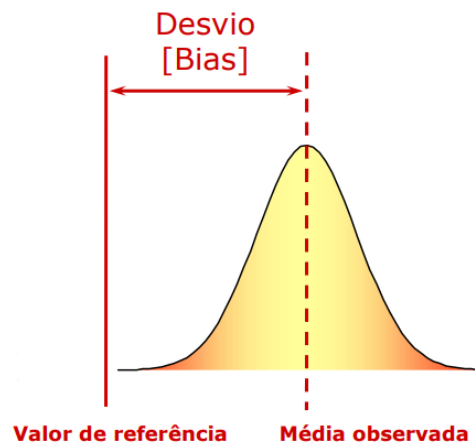


Figura 23: Desvio (*bias*) (AIAG, 2010)

- Linearidade – mede a variação da tendência ao longo do intervalo de medição de alcance ou escala do equipamento conforme apresentado na Figura 24;

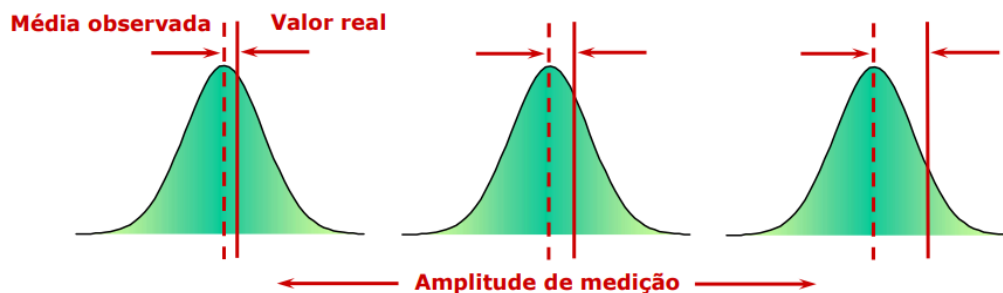


Figura 24: Gráficos da Linearidade ao longo do tempo (AIAG, 2010)

Os estudos de tendência e linearidade podem ser efetuados em simultaneamente através da construção de um gráfico com os valores de referência e os valores medidos ao longo do intervalo de medição ou escala do equipamento.

Problemas de tendência e linearidade podem ter como principais causas o desgaste do equipamento, falta de calibração e/ou calibração fora do prazo estabelecido do instrumento de medição, erro na medida de peças padrão, manutenção precária, falta de formação do operador a efetuar a medição, fadiga e condições ambientais inadequadas (AIAG, 2010). A análise da tendência e da linearidade acontece a partir da construção de um gráfico entre os dados dos valores de referência e os valores medidos.

- Repetibilidade – é a variação das medições obtidas com um instrumento de medição, usado diversas vezes por um operador, para medir a mesma característica de uma mesma peça (Figura 25);

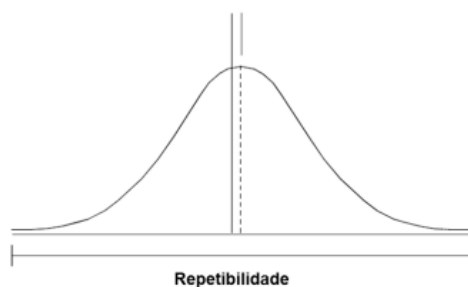


Figura 25: Gráfico da Repetibilidade (AIAG, 2010)

- Reprodutibilidade – é a variação das médias das medições feitas por diferentes colaboradores, que utilizam o mesmo instrumento de medição para medir a mesma característica de uma mesma peça (Figura 26).

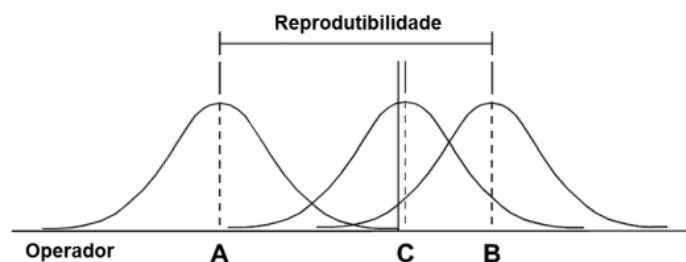


Figura 26: Gráfico da Reprodutibilidade (AIAG, 2010)

Os estudos de Repetibilidade e Reprodutibilidade (estudos R&R) podem ser realizados tanto para sistemas de medição por variáveis, como para sistemas de medição por atributos. A aceitação dos sistemas de medição segue um conjunto de regras pormenorizadas que consta na quarta edição do Manual MSA (AIAG, 2010).

Os sistemas de medição constituem fatores críticos no que diz respeito à análise de dados e, como tal, devem ser completamente compreendidos antes de se iniciar a recolha de dados.

Os resultados dos dados recolhidos devem ser avaliados para determinar se o instrumento de medição é aceitável para a sua aplicação e identificar possíveis causas. Antes de qualquer tipo de análise, o sistema de medição deve ser estável para que as medições realizadas possam ser válidas.

Capítulo 6 Metodologia e Parte experimental

No capítulo 4 abordou-se o desenho de experiências (DOE) numa perspetiva teórica de forma a fazer o enquadramento para o caso de estudo apresentado no presente capítulo.

No capítulo 5 realizou-se uma revisão da literatura existente sobre a evolução da gestão da qualidade dos serviços, processos e satisfação do cliente, com especial incidência na indústria automóvel de modo a perceber as necessidades de desenvolvimento do caso de estudo que será apresentado no presente capítulo.

Para se conseguir atender às exigências dos clientes e produzir produtos com qualidade estes devem ir ao encontro dos requisitos e especificações de cliente. Como tal, pode dizer-se que a qualidade está ligada ao processo de medição.

A parte experimental do trabalho pode ser dividida em duas etapas:

- 1) Avaliação de um processo de medição de diâmetros de tubos na linha de produção.
- 2) Otimização da característica de penetração de soldadura numa referência de sistema de escape produzido na Tenneco.

A primeira etapa consiste assim numa avaliação do processo de medição de diâmetros de tubos utilizando para tal um estudo MSA para garantir que o sistema de medição se encontra apto para a utilização pretendida. Esta primeira etapa surgiu uma vez que a prática dos estudos MSA na empresa se encontrava em cadência e limitada para equipamentos de controlo por atributos e variáveis. Tendo em conta que foram recentemente adquiridos equipamentos para controlo por variáveis para análise de características do processo, este trabalho pretende numa primeira instância avaliar um desses sistemas de medição por variáveis que é atualmente utilizado na empresa para medição de diâmetros e de soldaduras na linha de produção, em que se utiliza o paquímetro ou craveira. Atualmente existem vários instrumentos desta tipologia na empresa, porém, dado que todos contêm as mesmas características, foi selecionado aquele que é mais utilizado na produção e que se encontra sujeito a condições adversas, de modo a perceber o funcionamento do mesmo e efetuar uma análise do sistema de medição.

O estudo MSA consiste assim na seguinte sequência de atividades em consonância com a Figura 27:

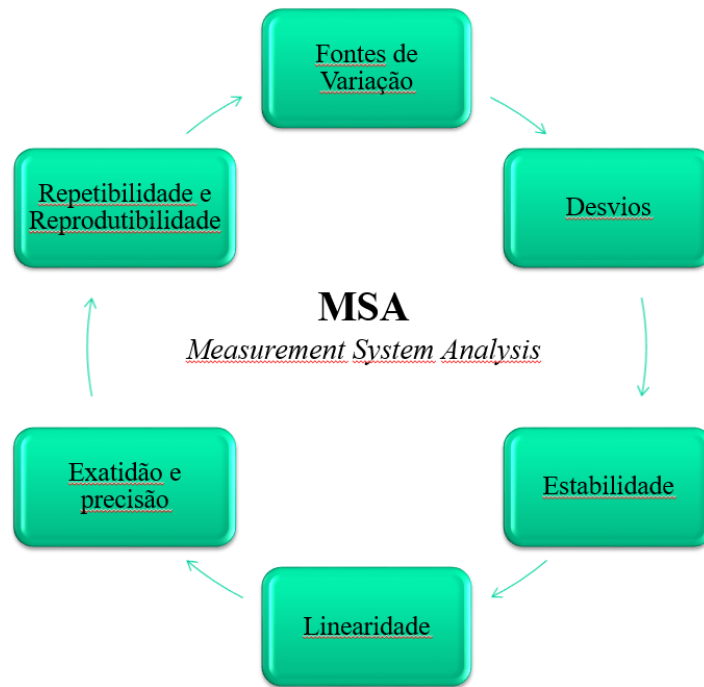


Figura 27: Ciclo de atividades dos estudos MSA

Para o estudo MSA realizado com o instrumento paquímetro foram planeadas cada uma das atividades referidas no ciclo da Figura 27 no subcapítulo 6.1.

A segunda etapa da parte experimental do trabalho consiste em desenvolver um Desenho de Experiências (DOE) de modo a perceber quais são as melhores condições de trabalho ou níveis dos parâmetros do processo/fatores de controlo para otimização da característica da qualidade que consiste na penetração de soldadura. Para esta investigação, verificou-se que a largura de cada soldadura influencia na penetração do material, e esta depende da definição dos parâmetros de soldadura para cada soldadura. Como tal, este estudo foi realizado utilizando como variável de resposta a largura da soldadura, e vai ser efetuado numa referência de sistema de escape produzido na Tenneco. Dado que existem dois métodos de soldadura distintos utilizados na Tenneco, soldaduras circulares e soldaduras direitas, o planeamento de experiências foi aplicado a estes dois tipos de soldaduras, de forma independente.

Para explorar as melhores condições de trabalho (i.e. melhores níveis dos fatores de controlo do processo de soldadura) desenvolveram-se as seguintes etapas:

1. Reconhecimento e identificação do problema – Verificou-se a existência insuficiente de penetração de soldadura em dois pontos de soldadura de um sistema de escape devido aos parâmetros de soldadura a ser utilizados;

2. Estabelecer um objetivo – Otimizar a penetração de soldadura em duas soldaduras de um sistema de escape, uma soldadura direita e uma soldadura circular. Sabe-se que para as soldaduras direitas, quanto menor for a largura da soldadura melhor a penetração. No caso das soldaduras circulares, quanto maior for a largura da soldadura, melhor a penetração de soldadura no material.
3. Escolha da variável resposta – Largura da soldadura de cada soldadura, nomeadamente da soldadura circular e a soldadura direita;
4. Seleção dos fatores de controlo e respetivos níveis de trabalho – Os fatores de controlo selecionados foram três parâmetros de soldadura dos robôs, sendo eles a intensidade de soldadura (V), a velocidade do robô de soldadura (cm/min) e a velocidade do arame de soldadura (m/min). Cada um destes fatores foram estudados em dois níveis de trabalho, a nível baixo (-1) e a nível alto (+1). Como em qualquer processo, existem fatores de ruído nas linhas de produção que não são controláveis e que podem afetar os resultados obtidos, tais como condições ambientais no interior das células, desgaste de ferramentas, desgaste do arame de soldadura, ou ainda diferenças entre os materiais recebidos dos fornecedores. Estes fatores de ruído devem ser verificados a longo prazo.
5. Seleção do tipo de desenho experimental adequado – O desenho experimental selecionado foi o desenho fatorial completo com utilização de réplicas;
6. Realização das experiências – Durante a realização dos estudos foi sendo controlado e avaliado o processo produtivo com a preocupação de que a implementação dos mesmos não vai reproduzir problemas de sucata ou no processo produtivo e para garantir que tudo está de acordo com o planeamento prévio;
7. Análise dos dados – Utilização da ANOVA e algoritmo de *Yates*;
8. Conclusões – Depois dos dados analisados, serão retiradas conclusões práticas e para tal são utilizados métodos gráficos para a apresentação dos resultados.

6.1 Estudo MSA

Antes de qualquer análise estatística devemos obter uma boa definição do sistema de medição. O equipamento de medição em análise é um paquímetro digital 0-150mm, de grandeza dimensional e resolução 0,01mm, conforme a Figura 28.



Figura 28: Paquímetro digital em estudo

Este equipamento é utilizado para a medição de diâmetros interiores e exteriores de tubos, e para medição de soldaduras Figura 29, tanto o seu comprimento como a sua largura. O equipamento encontra-se calibrado pelo Instituto de Soldadura e Qualidade (ISQ), não apresenta histórico de falhas e encontra-se diariamente na área produtiva da fábrica, à temperatura ambiente. O paquímetro em estudo é sujeito a calibrações anualmente de acordo com um plano de calibrações interno, pelo que a próxima verificação será realizada a 27 de maio de 2023.



Figura 29: Método de medição de soldaduras

Para retirar algumas conclusões acerca deste sistema de medição e tendo em consideração o planeamento para a execução destes estudos na empresa em estudo, este terá por base o procedimento aplicável na Tenneco, que se encontra no Anexo I – Procedimento estudos MSA. Na Tenneco existe uma listagem de todos os equipamentos de medição existentes sujeitos a estudos MSA anualmente de acordo com o plano de estudos. Para facilitar os estudos, os equipamentos de medição são agrupados por famílias e identificados com o tipo de estudo a realizar (por variáveis ou atributos) e quando.

A seleção dos equipamentos de medição tem um conjunto de requisitos por detrás do processo de aquisição, pois tem que se averiguar (AIAG, 2010):

- A especificação tendo em conta a utilização;
- Características dos sistemas de medição;

- Requisitos de segurança;
- Manuais de utilização e serviço;
- Requisitos técnicos e humanos para operar o EMM;
- Requisitos de manutenção e calibração;
- Requisitos normativos.

Todos os equipamentos de medição da Tenneco encontram-se obrigatoriamente sujeitos a calibrações de acordo com o plano de calibrações anual.

No caso dos estudos e análise dos sistemas de medição, a frequência de estudo de cada equipamento é definida de acordo com a tabela Tabela 5.

Tabela 5: Frequência de estudos MSA aplicada aos equipamentos de medição de acordo com a sua utilidade

| Frequência | Período | Tipo de equipamento a que normalmente se aplica |
|------------|---------|--|
| Elevada | 1 Ano | Equipamento novo ou sujeito a utilização intensa, condições ambientais agressivas e que no período transato, necessitou de manutenção. |
| Normal | 3 Anos | Periodicidade normal para todos os equipamentos. |

Para verificar a viabilidade do equipamento em estudo são aplicados os estudos de tendência, linearidade, estabilidade, repetibilidade e reprodutibilidade (estudo R&R), que serão os estudos a desenvolver de seguida de acordo com cada procedimento.

Para delinear e desenvolver o estudo em questão, a recolha das amostras foi ao encontro de uma referência/ *part number* de tubos de entrada produzidos na Tenneco, em apenas uma linha de produção. A característica a medir é o diâmetro exterior da referência do tubo de entrada, tal como se encontra na Figura 30.



Figura 30: Característica do tubo de entrada a medir

6.1.1 Estudo de estabilidade

Conforme os procedimentos internos da Tenneco e a quarta edição do manual MSA desenvolvido pelo grupo AIAG (2010), foi realizado um estudo preliminar que seguiu as diretrizes existentes para os estudos de estabilidade. É produzido apenas um lote da referência dos tubos de entrada por semana. As atividades desenvolvidas para a realização do estudo de estabilidade seguiram a seguinte ordem:

1. Foi criado um formulário para o registo dos dados recolhidos;
2. Mediu-se semanalmente uma peça aleatória da produção desta referência (com as mesmas características) durante seis meses. Esta foi alvo de três medições pelo inspetor da qualidade do turno da manhã, com recurso do paquímetro em análise.
3. Os dados foram analisados numa carta \bar{X}/R , por ordem cronológica, a partir da ferramenta *Minitab*, versão 20.3, selecionando *Stat > Cartas de Controlo > Gráficos de Variáveis para Subgrupos > Xbar-R* (Minitab, 2022).

Após as vinte semanas, a folha de registo de dados foi completada com os dados recolhidos, presente na Tabela 6. Esta folha também indica todas as características do equipamento e do estudo realizado.

Tabela 6: Recolha de dados para o estudo de Estabilidade

| ESTUDO DE ESTABILIDADE | | | | | | | |
|---|--------------------|--------------------|----------|-----------------------|----------------|-------|-------|
| SISTEMA DE MEDIÇÃO POR VARIÁVEIS - FOLHA DE DADOS | | | | | | | |
| Código Equipamento: | PDR 288 | Unidades: | mm | Conduzido por: | Madalena | | |
| Nome do Equipamento: | Paquímetro digital | Característica: | Diâmetro | Inspetor Qualidade: | Eduina Maria | | |
| Resolução: | 0,01 mm | Especificação: | 55 | Nome da peça: | Tubo calibrado | | |
| LSE (mm): | 55,3 | | | LIE (mm): | 54,7 | | |
| | | | | Intervalo Tolerância: | ±0,3 | mm | |
| Data | Hora (h) | Avaliador | Amostra | Medições (mm) | | | |
| | | | | 1 | 2 | 3 | Xbar |
| 01/04/2022 | 09:30 | Inspetor Qualidade | 1 | 55,10 | 55,09 | 55,09 | 55,09 |
| 08/04/2022 | 10:45 | Inspetor Qualidade | 2 | 55,15 | 55,14 | 55,15 | 55,15 |
| 14/04/2022 | 10:00 | Inspetor Qualidade | 3 | 55,08 | 55,10 | 55,09 | 55,09 |
| 22/04/2022 | 11:15 | Inspetor Qualidade | 4 | 54,98 | 55,01 | 54,99 | 54,99 |
| 28/04/2022 | 09:30 | Inspetor Qualidade | 5 | 55,04 | 55,03 | 55,04 | 55,04 |
| 03/05/2022 | 08:50 | Inspetor Qualidade | 6 | 55,09 | 55,09 | 55,10 | 55,09 |
| 09/05/2022 | 09:00 | Inspetor Qualidade | 7 | 55,11 | 55,11 | 55,12 | 55,11 |
| 17/05/2022 | 11:25 | Inspetor Qualidade | 8 | 55,09 | 55,10 | 55,10 | 55,10 |
| 23/05/2022 | 11:30 | Inspetor Qualidade | 9 | 55,09 | 55,08 | 55,10 | 55,09 |
| 31/05/2022 | 11:00 | Inspetor Qualidade | 10 | 55,10 | 55,10 | 55,08 | 55,09 |
| 09/06/2022 | 10:15 | Inspetor Qualidade | 11 | 54,98 | 54,99 | 55,01 | 54,99 |
| 17/06/2022 | 09:30 | Inspetor Qualidade | 12 | 55,08 | 55,09 | 55,08 | 55,08 |
| 21/06/2022 | 10:00 | Inspetor Qualidade | 13 | 55,06 | 55,07 | 55,08 | 55,07 |
| 30/06/2022 | 08:30 | Inspetor Qualidade | 14 | 55,07 | 55,06 | 55,06 | 55,06 |
| 05/07/2022 | 08:45 | Inspetor Qualidade | 15 | 55,08 | 55,09 | 55,08 | 55,08 |
| 12/07/2022 | 09:30 | Inspetor Qualidade | 16 | 55,06 | 55,07 | 55,08 | 55,07 |
| 21/07/2022 | 11:00 | Inspetor Qualidade | 17 | 55,06 | 55,06 | 55,07 | 55,06 |
| 24/08/2022 | 11:00 | Inspetor Qualidade | 18 | 55,13 | 55,11 | 55,11 | 55,12 |
| 30/08/2022 | 11:30 | Inspetor Qualidade | 19 | 55,10 | 55,11 | 55,11 | 55,11 |
| 06/09/2022 | 11:15 | Inspetor Qualidade | 20 | 55,11 | 55,12 | 55,11 | 55,11 |

Posteriormente à recolha de dados foram desenvolvidas as cartas de controlo de médias e amplitudes para verificar o comportamento do equipamento ao longo das vinte semanas (Figura 31). Estes gráficos foram realizados a partir do suporte do *software Minitab*, versão 20.3 (Minitab, 2022).

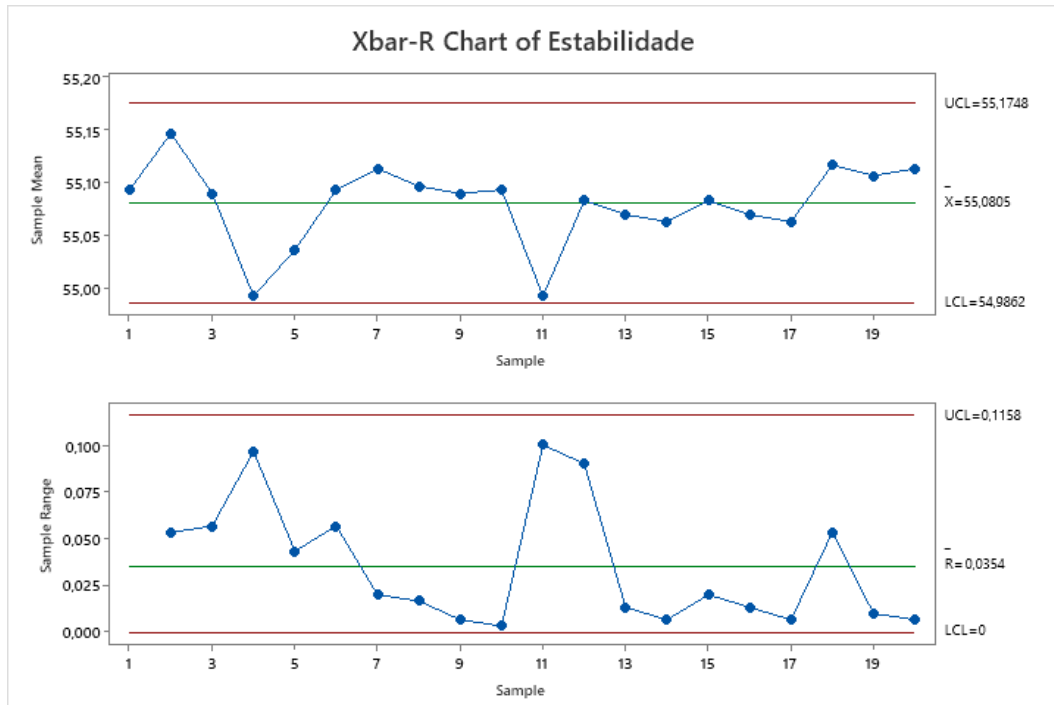


Figura 31: Análise das Cartas de Controlo para a Estabilidade do sistema de medição, *Minitab* 20.3

Analisando numa primeira instância o gráfico das amplitudes (R), não se verificam pontos fora dos limites de controlo nem sete ou mais pontos consecutivos crescentes ou decrescentes acima ou abaixo da linha média. Isto significa que o sistema de medição parece ter capacidade para detetar e indicar de forma fiável pequenas variações da grandeza que está a ser medida, pois a variação existente é baixa. O mesmo ocorre para a carta de controlo das médias. Foi utilizada a regra 1 referida no subcapítulo 5.1.2.3 para deteção de causas assinaláveis e uma vez que nem na carta R nem na carta de médias se observam pontos para além dos três sigma tal significa que todas as observações se encontram entre o valor da média mais ou menos os três sigma. Para além disso pode-se dizer que não existem padrões cíclicos nem tendências monótonas crescentes ou decrescentes. Também não se observam problemas de estratificação. Neste sentido pode-se concluir que o processo se encontra sob controlo estatístico.

Uma vez que foram utilizadas cartas de médias e de amplitudes não será necessário determinar a normalidade pois pelo teorema dos limites central, a distribuição das médias segue uma distribuição aproximadamente normal para amostras com dimensão igual ou

superior a 4, mesmo que os seus valores individuais não sigam este tipo de distribuição (Montgomery, 2009).

6.1.2 Estudo de tendência (*bias*) e linearidade

Como a linearidade mede a variação da tendência para diferentes valores de referência na faixa de interesse, então foi realizado o estudo de tendência (*bias*) e linearidade do sistema de medição, respeitando os seguintes passos:

1. Foi selecionado um conjunto de quatro tubos, cada um com diâmetro diferente e que se enquadrava na amplitude de medição do equipamento em estudo.
2. Cada uma destas quatro peças foi medida no laboratório de metrologia a partir da máquina de medição tridimensional (CMM), pois esses serão os valores de referência uma vez que a CMM é um equipamento de medição muito exato. Confirmou-se também que a amplitude de operação do dispositivo de medição em questão englobada as peças selecionadas.
3. As peças foram numeradas.
4. Cada peça foi medida dez vezes a partir do paquímetro em estudo, pelo mesmo inspetor de qualidade de forma a não acrescentar a variável da pessoa que estar a medir fazê-lo de forma diferente.
5. Representou-se graficamente a tendência vs valor de referência, com recurso ao *software Minitab*, versão 20.3, selecionando *Stat > Ferramentas da Qualidade > Estudo de medição > Estudo de linearidade e vício de medição*.

Na Tabela 7 pode observar-se a folha de recolha de dados para o estudo em questão que contém os valores de referência, que são os quatro diâmetros medidos pela CMM, e as dez medições a cada uma dessas peças a partir do paquímetro em estudo, que foram efetuadas pelo inspetor da qualidade.

Tabela 7: Dados para estudo de Linearidade, *excel*

| | | ESTUDO DE LINEARIDADE | | | | | | | | | |
|-------|-----------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | SISTEMA DE MEDIÇÃO POR VARIÁVEIS - FOLHA DE DADOS | | | | | | | | | |
| Peças | Valores de Referência | Medições | | | | | | | | | |
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 1 | 50,06 | 50,71 | 50,52 | 50,49 | 50,51 | 50,68 | 50,27 | 50,32 | 50,51 | 50,46 | 50,45 |
| 2 | 55,21 | 55,09 | 55,16 | 55,09 | 55,07 | 54,96 | 55,04 | 55,89 | 55,31 | 55,29 | 55,37 |
| 3 | 60,09 | 59,94 | 59,94 | 60,02 | 60,01 | 60,16 | 60,21 | 60,09 | 60,23 | 60,19 | 60,22 |
| 4 | 65,13 | 64,95 | 65,06 | 64,93 | 65,05 | 65,11 | 65,08 | 65,19 | 64,92 | 65,13 | 64,99 |

A análise da tendência e da linearidade ocorre a partir da construção de um gráfico entre os dados dos valores de referência e os valores medidos (Figura 32). Este gráfico foi realizado com o auxílio do *software Minitab*, versão 20.3, em que:

- Com os pontos medidos é obtido, por meio da análise da regressão linear, um modelo com o intervalo de confiança;
- Um sistema de medição é considerado bom para a linearidade quando a linha de tendência “zero” estiver completamente contida dentro do intervalo de confiança construído;
- A linearidade é avaliada pela inclinação da reta formada pelos diferentes valores de referência em relação à respectiva tendência. Quanto menos inclinada a reta, melhor será a qualidade do sistema de medição.

No caso da tendência, pode-se observar a dispersão dos pontos de cada valor de referência no gráfico.

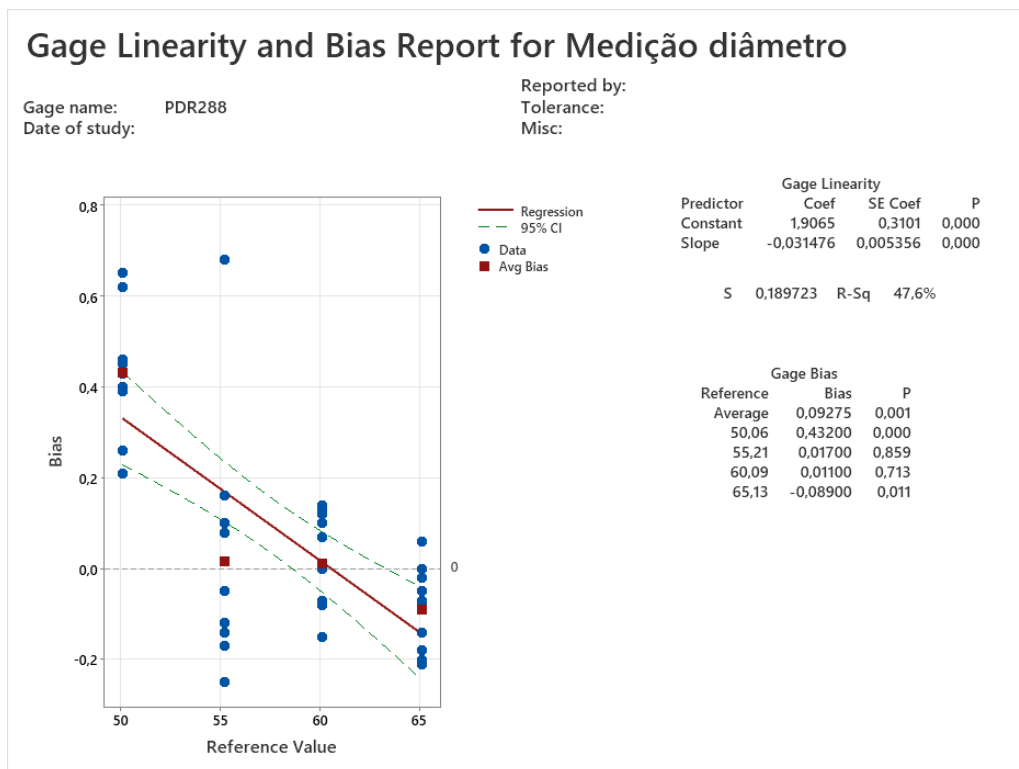


Figura 32: Análise da linearidade e desvio do sistema de medição, *Minitab 20.3*

Observando o gráfico da Figura 32, a linha de tendência “zero” encontra-se completamente contida dentro do intervalo de confiança construído, o que significa que o sistema de medição é considerado bom para a linearidade.

6.1.3 Estudo de Repetibilidade e Reprodutibilidade

Após o estudo de tendência e linearidade, foi realizado o estudo de repetibilidade e reprodutibilidade (R&R) do sistema de medição. Para tal, foi efetuado o seguinte procedimento:

Nota: De acordo com AIAG (2010), nos estudos de R&R deve-se ter $n \times k \geq 15$, onde n é o número de peças e k o número de operadores.

1. Portanto, selecionou-se uma amostra de dez tubos da mesma produção ($n=10$). Os tubos foram numerados de modo a que não ficasse visível, pois este cuidado evita a tendência natural das pessoas obterem o mesmo resultado que já observaram na medição anterior da peça;
2. De seguida, foram selecionados três avaliadores aleatórios do departamento da produção e foram identificados como A, B e C ($k=3$);
3. Desenvolvimento de uma folha de registo de dados;
4. Cada operador realizou três leituras do diâmetro de tubo de cada peça a partir do sistema de medição.
6. O estudo do R&R foi realizado com a Análise de Variância (ANOVA), a partir do *software Minitab*, versão 20.3, selecionando *Stat > Ferramentas da Qualidade > Estudo de medição > Estudo R&R (crossed)*.

O levantamento dos dados encontram-se disponíveis na Tabela 8 criada no *excel*. Com base nestes dados, realizou-se a partir do *software Minitab*, versão 20.3, a Figura 34 e a Figura 35. Para verificar se existe variação na medição pelo operador ou se as peças apresentam variação, desenvolveu-se ainda a tabela de Análise da Variância (Tabela 9) do estudo do sistema de medição.

Tabela 8: Dados recolhidos para o estudo R&R do sistema de medição, *excel*

| ESTUDO DE REPETIBILIDADE & REPRODUCTIBILIDADE | | | | | | | | | | | | |
|---|--------------------|-------|-----------------------------------|----------|-------|--------------------------|----------|-------|-------|-------|---------|-------|
| SISTEMA DE MEDIÇÃO POR VARIÁVEIS - FOLHA DE DADOS | | | | | | | | | | | | |
| Data: | 27/07/2022 | | Unidades: | mm | | Conduzido por: | Madalena | | | | | |
| Código Equipamento: | PDR 288 | | Característica: | Diâmetro | | Nr. Operador A: | A | | | | | |
| Nome do Equipamento: | Paquímetro digital | | Especificação: | 55 | | Nr. Operador B: | B | | | | | |
| Nome da peça: | Tubo calibrado | | Resolução: | 0,01 | | Nr. Operador C: | C | | | | | |
| Tamanho (p): | 10 | | Ensaio (n): | 3 | | Operadores (o): | 3 | | | | | |
| Limite Superior de Especificação: | 55,3 mm | | Limite Inferior de Especificação: | 54,7 mm | | Intervalo de Tolerância: | ±0,3 mm | | | | | |
| Operador A Ensaio | Peça | | | | | | | | | | Médias | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | | |
| 1 | 55,06 | 54,99 | 55,07 | 55,00 | 55,07 | 55,10 | 55,09 | 55,04 | 55,05 | 55,05 | 55,05 | |
| 2 | 55,07 | 54,99 | 55,06 | 55,00 | 55,07 | 55,10 | 55,10 | 55,04 | 55,05 | 55,06 | 55,05 | |
| 3 | 55,07 | 54,99 | 55,07 | 54,99 | 55,08 | 55,09 | 55,10 | 55,04 | 55,05 | 55,06 | 55,05 | |
| Média | 55,07 | 54,99 | 55,07 | 55,00 | 55,07 | 55,10 | 55,09 | 55,04 | 55,05 | 55,06 | Xbar(A) | 55,05 |
| Amplitude | 0,005 | 0,001 | 0,008 | 0,006 | 0,004 | 0,007 | 0,004 | 0,003 | 0,003 | 0,008 | Rbar(A) | 0,005 |
| Operador B Ensaio | Peça | | | | | | | | | | Médias | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | | |
| 1 | 55,06 | 55,00 | 55,06 | 55,00 | 55,07 | 55,10 | 55,10 | 55,04 | 55,05 | 55,06 | 55,05 | |
| 2 | 55,07 | 55,00 | 55,06 | 55,00 | 55,08 | 55,10 | 55,10 | 55,04 | 55,05 | 55,06 | 55,05 | |
| 3 | 55,07 | 55,00 | 55,07 | 55,00 | 55,08 | 55,10 | 55,10 | 55,04 | 55,05 | 55,05 | 55,05 | |
| Média | 55,07 | 55,00 | 55,07 | 55,00 | 55,07 | 55,10 | 55,10 | 55,04 | 55,05 | 55,06 | Xbar(B) | 55,05 |
| Amplitude | 0,010 | 0,006 | 0,010 | 0,003 | 0,004 | 0,005 | 0,001 | 0,005 | 0,006 | 0,006 | Rbar(B) | 0,006 |
| Operador C Ensaio | Peça | | | | | | | | | | Médias | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | | |
| 1 | 55,07 | 54,99 | 55,07 | 55,00 | 55,08 | 55,10 | 55,10 | 55,04 | 55,04 | 55,06 | 55,05 | |
| 2 | 55,06 | 55,00 | 55,07 | 55,00 | 55,08 | 55,10 | 55,10 | 55,04 | 55,05 | 55,05 | 55,05 | |
| 3 | 55,07 | 55,00 | 55,07 | 55,00 | 55,08 | 55,10 | 55,10 | 55,04 | 55,04 | 55,05 | 55,05 | |
| Média | 55,07 | 55,00 | 55,07 | 55,00 | 55,08 | 55,10 | 55,10 | 55,04 | 55,04 | 55,05 | Xbar(C) | 55,05 |
| Amplitude | 0,006 | 0,002 | 0,004 | 0,000 | 0,006 | 0,004 | 0,005 | 0,002 | 0,008 | 0,003 | Rbar(C) | 0,004 |

| ANÁLISE DO EQUIPAMENTO DE MEDIDA | VARIAÇÃO TOTAL EM % | | | | |
|---|--|---------------|---------------|--------|---|
| Repetibilidade - Variação do Equipamento (VE) $VE = \bar{R} \times K_1$ $= 0,0048 \times 0,5907$ $= 0,00285 \text{ mm}$ <table border="1" style="float: right;"> <tr> <td>Ensaio</td> <td>$K_1 = 1/d_2$</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>0,5907</td> </tr> </table> | Ensaio | $K_1 = 1/d_2$ | 3 | 0,5907 | $\% VE = 100 \times (VE / VT)$ $= 8,85\%$ |
| Ensaio | $K_1 = 1/d_2$ | | | | |
| 3 | 0,5907 | | | | |
| Reproducibilidade - Variação do Operador (VO) $VO = \sqrt{[(\bar{X}_{diff} \times K_2)^2 - \frac{VE^2}{n \times p}]}$ $= 0,00049 \text{ mm}$ <table border="1" style="float: right;"> <tr> <td>Utilizadores</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>$K_2 = 1/d_2$</td> <td>0,5236</td> </tr> </table> | Utilizadores | 3 | $K_2 = 1/d_2$ | 0,5236 | $\% VO = 100 \times (VO / VT)$ $= 1,52\%$ <small>p = número de peças n = número de provas</small> |
| Utilizadores | 3 | | | | |
| $K_2 = 1/d_2$ | 0,5236 | | | | |
| Repetibilidade & Reproducibilidade - (R&R) $R\&R = \sqrt{VE^2 + VO^2}$ $= 0,00290 \text{ mm}$ | $\% R\&R = 100 \times (R\&R / VT)$ $= 8,97\%$ | | | | |
| Variação das Peças - (VP) $VP = R_p \times K_3$ $= 0,03215 \text{ mm}$ <table border="1" style="float: right;"> <tr> <td>Peças</td> <td>$K_3 = 1/d_2$</td> </tr> <tr> <td>10</td> <td>0,3145</td> </tr> </table> | Peças | $K_3 = 1/d_2$ | 10 | 0,3145 | $\% VP = 100 \times (VP / VT)$ $= 99,60\%$ |
| Peças | $K_3 = 1/d_2$ | | | | |
| 10 | 0,3145 | | | | |
| Variação Total - (VT) $VT = \sqrt{R\&R^2 + VP^2}$ $= 0,03228 \text{ mm}$ | $ndc = 1,41 (VP / R\&R)$ $= 15,647$ | | | | |
| ANOTAÇÕES: | DECISÃO SOBRE O EQUIPAMENTO ATÉ 10% É ACEITÁVEL | | | | |

Figura 33: Resultado da análise R&R ao equipamento de medição, excel

Para determinar aceitabilidade do sistema de medição, são considerados as percentagens relativas à variação total (VT), que pode ser advinda da tolerância da peça ou do desvio padrão do processo. O resultado obtido no cálculo do estudo R&R é comparado com os critérios definidos pela AIAG (2010) e que se encontram no anexo I – Procedimento dos estudos MSA, onde se a %R&R for menor que 10% o sistema de medição é aceitável, se %R&R estiver entre 10% e 30% o sistema de medição pode ser aceite desde que adotadas medidas de contenção, e se a %R&R for maior que 30% o sistema de medição não pode ser aceite, pois sua variabilidade excessiva compromete a separação entre peças boas e ruins quando utilizado para verificar o atendimento as especificações.

Tabela 9: Tabela ANOVA, com recurso ao software Minitab 20.3

| Source | DF | SS | MS | F | P |
|------------------|----|----------|-----------|---------|-------|
| Parts | 9 | 0,103877 | 0,0115419 | 1157,48 | 0,000 |
| Operator | 2 | 0,000036 | 0,0000178 | 1,79 | 0,196 |
| Parts * Operator | 18 | 0,000179 | 0,0000100 | 1,19 | 0,298 |
| Repeatability | 60 | 0,000503 | 0,0000084 | | |
| Total | 89 | 0,104595 | | | |

alpha to remove interaction term = 0,05

Foi realizado ainda no *Minitab*, versão 20.3, os gráficos para complementar a análise da tabela ANOVA (Figura 34).

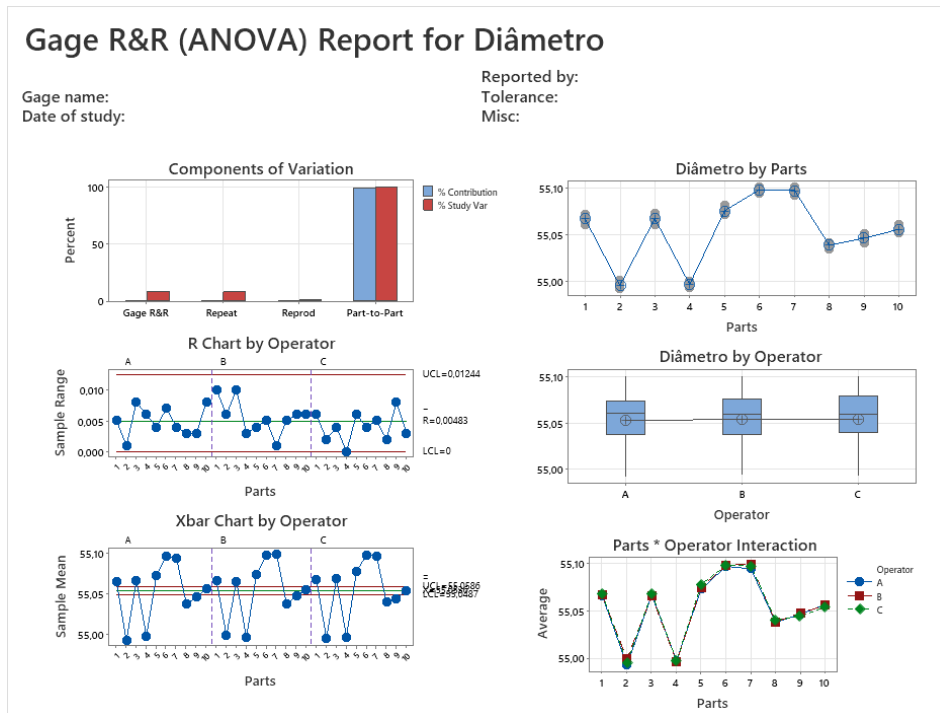


Figura 34: Análise do estudo R&R da média e amplitude dos resultados, com recurso ao *software Minitab 20.3*

Para ajudar na interpretação da aceitabilidade do sistema para este estudo R&R, realizou-se o relatório geral no *software* do *Minitab*, versão 20.3, que se encontra na Figura 35.

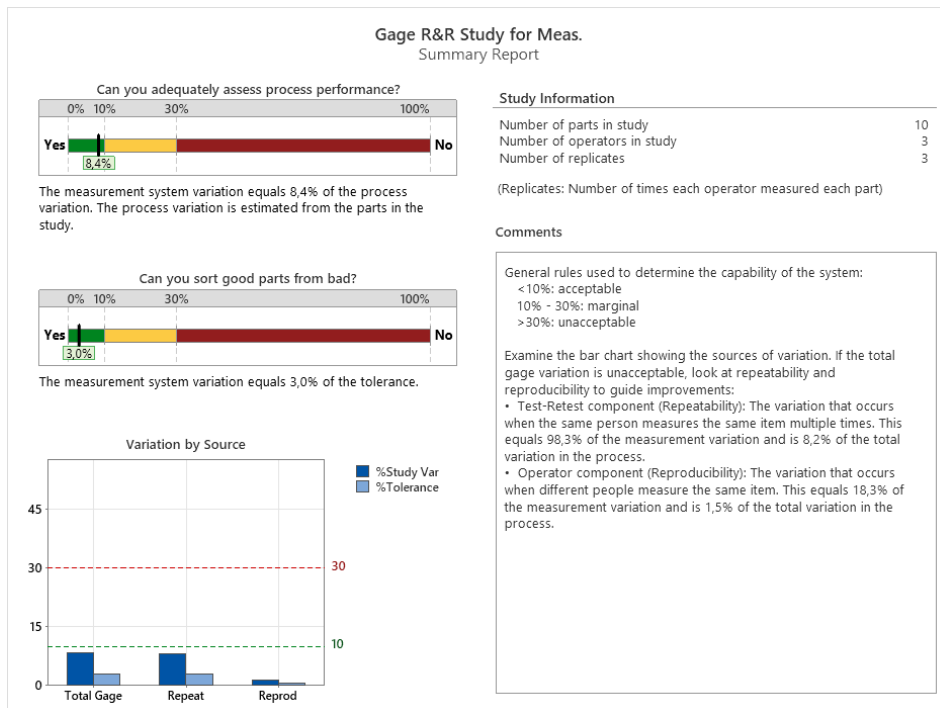


Figura 35: Análise do estudo R&R, com recurso do *software Minitab 20.3*

6.1.4 Análise dos resultados obtidos no estudo MSA

Considerando os resultados do estudo de estabilidade, tendência, linearidade e estudo R&R efetuados ao equipamento de medição, e tendo em conta as diretrizes do manual AIAG (2010), percebeu-se que:

- Durante o estudo de estabilidade foram desenvolvidas a partir do *software* do *Minitab*, versão 20.3, duas cartas de controlo para monitorizar a estabilidade do sistema de medição ao longo de vinte semanas. Então, de acordo com a carta de controlo das amplitudes, não se verificam pontos fora os limites de controlo, contudo denota-se alguma variação nas medições realizadas, o que é bom pois indica que o sistema de medição parece ter capacidade para detetar pequenas variações da grandeza que está a ser medida. Para a carta de controlo das médias, também não existe qualquer ponto fora dos limites de controlo, podendo afirmar que o sistema se encontra aceitável em termos de estabilidade.
- No gráfico da Figura 32 respeitante ao estudo da linearidade e desvio do sistema de medição, pode-se ver o resultado da diferença do desvio do equipamento ao longo da escala operacional. Verifica-se que a linha zero está contida dentro dos limites da faixa de confiança para a reta de regressão. A linearidade do sistema de medição é avaliada de acordo com a inclinação desta reta de regressão, pois quanto menor a inclinação, melhor a linearidade do sistema de medição. Então com um grau de confiança de 95%, e de acordo com a análise da ANOVA (*Analysis of Variance*) para o *bias*, à medida que o valor de referência a medir aumenta, o desvio do sistema de medição também aumenta, pois existe um desvio significativo para os valores de referência de 50 e 65mm, pelo que o equipamento não deve medir nessa escala, ou seja, só se encontra apto para medir entre 55 e 60mm (pois a um grau de confiança de 95%, o valor do *P* é inferior ao $\alpha=0,05$). Esta conclusão também pode ser visível a partir das cartas de controlo presentes na Figura 31.
- No estudo R&R, e com recurso à análise da variância (ANOVA), realizado no *excel* (apresentado na Figura 33) e, pela Figura 34, como pelo método ANOVA, visível na Tabela 9, pode-se dizer que existe algum efeito entre as peças (repetibilidade), pois a variação do sistema de medição equivale a 8,85% da tolerância, no entanto não é significativo, pelo que se conclui que a análise dos avaliadores é consistente e apresentam a formação adequada para a metodologia

de medição. O sistema de medição é capaz de detetar a variação de peça a peça. Dado que a junção entre a repetibilidade e a reprodutibilidade é inferior a 10%, então o equipamento encontra-se aceitável e capaz.

Então, no geral este sistema de medição cumpre com todos os requisitos de aceitabilidade, apesar de se verificar que existe uma necessidade de realização de um novo estudo de tendência e linearidade para averiguar com clareza a melhor resolução de medição para este sistema de medição.

6.2 Desenho de Experiências

Durante o processo de fabrico de produtos existem vários fatores e níveis que influenciam as características da qualidade de um produto. Como tal, existe a necessidade de estudar o efeito desses fatores a diferentes níveis por forma a conhecer-se aqueles que podem afetar o processo, com o intuito de o regular para as melhores condições e obter uma melhor qualidade. Numa primeira instância do planeamento foi identificado o problema em estudo. Para evitar a variabilidade durante o processo de soldadura e responder a uma série de requisitos relacionados com o estudo de penetração de soldadura, é necessário decidir entre diferentes processos e entender a influência de determinados fatores. O Desenho de Experiências é uma técnica muito utilizada para satisfazer alguns objetivos e obter a melhor resposta possível para evitar produtos com defeitos, perda de produtividade e redução de custos operacionais.

Um dos desafios encontrados no dia a dia das funções da qualidade na Tenneco é a obtenção de peças soldadas com penetração de material suficiente para satisfazer os requisitos do cliente. Devido a esta problemática e uma vez que existe um histórico dos pontos de soldadura com maiores dificuldades na obtenção de penetração de soldadura no material, então, determinou-se na segunda etapa do planeamento que o objetivo da aplicação deste Desenho de Experiências traduz-se em otimizar a penetração de soldadura desses dois pontos de uma referência de sistema de escape. De acordo com a Figura 36, os pontos de soldadura identificados como mais críticos são o ponto 5.1 do silencioso traseiro, que é uma soldadura linear, e o ponto de soldadura 8, que é uma soldadura circular.

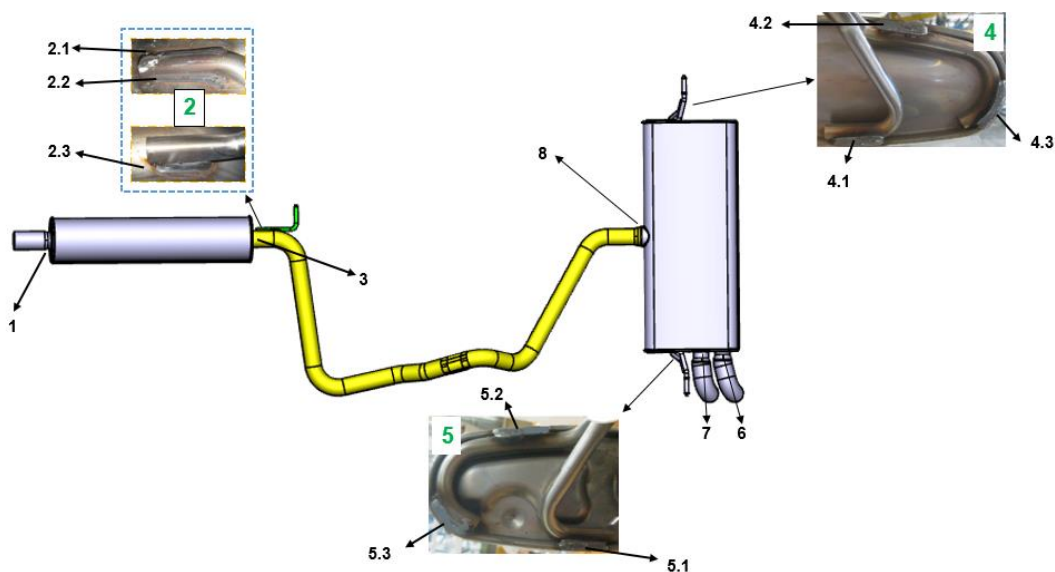


Figura 36: Pontos de soldadura de um sistema de escape numerados

Para perceber qual seria a melhor característica a analisar para promover o cumprimento das especificações de união de material, foram previamente realizados alguns estudos de penetração de soldadura nestes dois pontos com recurso de um microscópio existente no laboratório da qualidade qualificado para observações de macrografia de soldadura, pelo que se verificou que:

- Para o ponto 5.1, soldadura linear, quanto menor for a largura da soldadura, mais penetração temos. Na Figura 37 temos uma peça com uma soldadura de largura de 10,45mm e na Figura 38 temos outra peça com uma largura de 6,57mm.

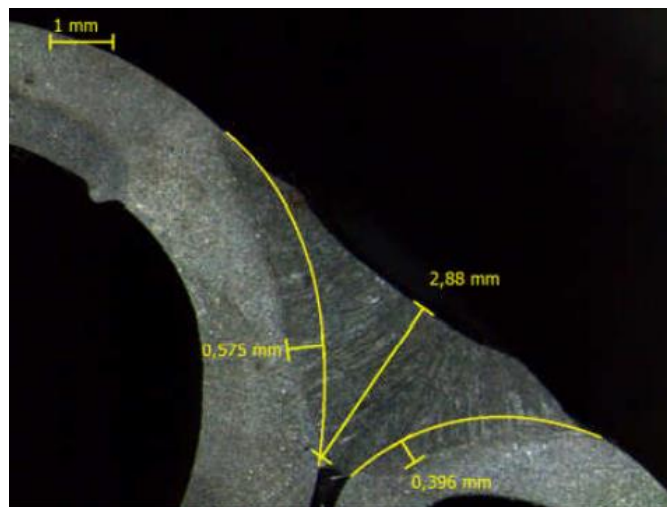


Figura 37: Macrografia do ponto 5.1 com soldadura linear mais larga (Penetração no silêncio de 0,396mm e no gancho de 0,575mm)

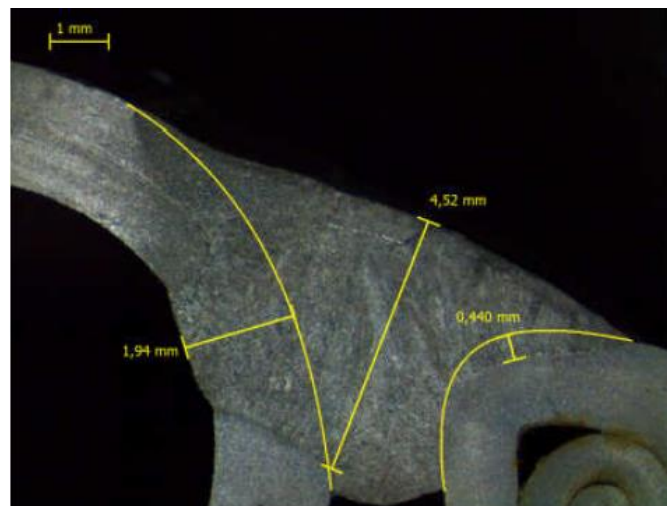


Figura 38: Macrografia do ponto 5.1 com soldadura linear mais fina (Penetração no silêncio de 0,440mm e no gancho de 1,940mm)

- Para o ponto 8, soldadura circular, quanto maior for a largura da soldadura, mais penetração existe. Na Figura 39 temos uma peça com uma soldadura de largura de 10,89mm e na Figura 40 temos outra peça com uma largura de 7,32mm.

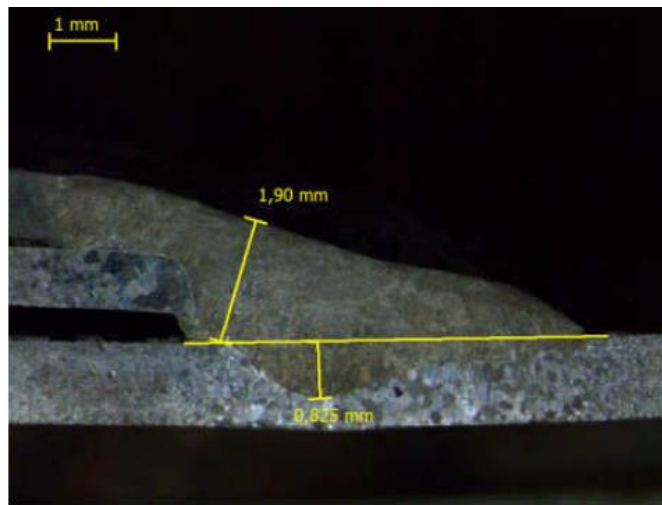


Figura 39: Macrografia do ponto 8 com soldadura circular mais larga (Penetração de 0,825mm)

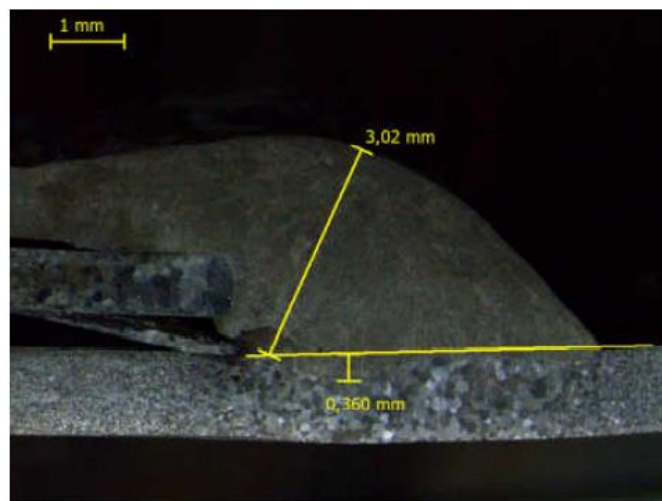


Figura 40: Macrografia do ponto 8 com soldadura circular mais fina (Penetração de 0,360mm)

Para escolher a variável de resposta consoante a terceira etapa do planeamento do estudo, tornou-se necessário a realização deste estudo de penetração de soldadura em que se verificou que a resposta a ser otimizada deverá ser a largura da soldadura (Figura 41), pois para a soldadura linear, quanto menor melhor, e para a soldadura circular, quanto maior melhor. Esta característica é afetada por fatores ou parâmetros de soldadura do processo. Para realizar as medições desta característica em estudo, foi utilizado o equipamento de medição calibrado e analisado no subcapítulo 6.1.



Figura 41: Medição da largura de uma soldadura

Embora o Desenho de Experiências possa ser aplicado por uma só pessoa, para o desenvolvimento deste estudo na Tenneco participaram três intervenientes, um trabalhador da produção que executa funções como soldador e operador de máquina, o técnico de engenharia de produção especializado em soldadura, e um técnico de qualidade.

Como em qualquer processo, existem fatores de ruído nas linhas de produção que não são controláveis, como condições ambientais no interior das células, desgaste de ferramentas, desgaste do arame de soldadura, ou ainda diferenças entre os materiais recebidos dos fornecedores. Todos estes fatores devem ser verificados regularmente de forma a tentar trabalhar com as melhores condições.

6.2.1 Planeamento Fatorial Completo 2³

O Planeamento Fatorial Completo é uma técnica bastante utilizada quando se tem dois ou mais fatores para analisar uma determinada característica, devido a sua vantagem de permitir uma combinação de todos os fatores em todos os níveis, obtendo-se assim uma análise de um fator sujeito a todas as combinações dos demais.

Dentro do grupo da Tenneco existem standards específicos para os parâmetros de soldadura a aplicar no processo produtivo bem como a sua amplitude de valores.

Para proceder ao estudo propriamente dito, na quarta etapa do planeamento experimental foram seleccionados três fatores essenciais na soldadura, sendo eles a intensidade (V), a velocidade do robô de soldadura (cm/min) e ainda a velocidade do arame de soldadura (m/min).

Os níveis alto e baixo a aplicar para cada fator foram selecionados de acordo com a amplitude de valores standard do grupo Tenneco que se pode verificar na Tabela 10 abaixo.

Tabela 10: Matriz ortogonal com os níveis dos fatores em estudo

| Fatores | | Níveis | | |
|----------|--|------------|----|----------|
| | | Baixo (-1) | 0 | Alto (1) |
| A | Intensidade (V) | 17 | 19 | 21 |
| B | Velocidade do robô Soldadura (cm/min) | 40 | 50 | 60 |
| C | Velocidade do arame (m/min) | 6 | 8 | 10 |

Estes fatores e respetivas variações de níveis serão utilizados para a etapa da realização de experiências dos dois estudos. Em cada um deles será desenvolvido um desenho fatorial completo de dois níveis, e com um total de dezasseis observações, uma vez que se utilizaram réplicas, e quinze graus liberdade, o que permitirá estimar três efeitos principais A, B e C e ainda as interações entre si, AB, AC, BC e ABC. Cada uma das oito experiências foi replicada (n=2) e, em cada uma das réplicas foi medida a largura de oito soldaduras, de oito peças diferentes. Na Tabela 11 encontra-se a matriz desenvolvida para o desenho fatorial completo 2^3 .

Tabela 11: Matriz de Desenho Fatorial 2^3 , excel

| Experiência | Combinações | I | A | B | C | AB | AC | BC | ABC |
|-------------|-------------|---|----|----|----|----|----|----|-----|
| 1 | (1) | 1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1 |
| 2 | a | 1 | 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 1 | 1 |
| 3 | b | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 | 1 |
| 4 | ab | 1 | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 | -1 |
| 5 | c | 1 | -1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 |
| 6 | ac | 1 | 1 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1 |
| 7 | bc | 1 | -1 | 1 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1 |
| 8 | abc | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 |

Numa primeira instância foi aplicado o desenho de experiências para a soldadura linear do ponto 5.1. na linha ROB360, identificado na Figura 10 do capítulo 2. Então obteve-se as respostas apresentadas na Tabela 12 e as respetivas somas.

Tabela 12: Respostas do Desenho fatorial completo para a soldadura linear 5.1, *excel*

| Experiência | Ordem dos testes | Variável de Resposta | | Total |
|-------------|------------------|----------------------|-------|-------|
| | | Y1 | Y2 | |
| 1 | 3 | 6,98 | 6,74 | 13,72 |
| 2 | 7 | 7,95 | 7,92 | 15,87 |
| 3 | 2 | 9,15 | 8,88 | 18,03 |
| 4 | 6 | 9,87 | 10,11 | 19,98 |
| 5 | 4 | 9,43 | 9,19 | 18,62 |
| 6 | 8 | 9,19 | 9,33 | 18,52 |
| 7 | 1 | 10,15 | 10,21 | 20,36 |
| 8 | 5 | 10,43 | 10,35 | 20,78 |

Após a recolha das respostas e soma das mesmas no *excel*, aplicou-se o algoritmo de *Yates* (Tabela 13) para o cálculo dos efeitos principais e das combinações mencionadas acima a partir das somas realizadas.

Tabela 13: Algoritmo de *Yates* soldadura linear 5.1, *excel*

| Ordem padrão | Exp. | Resposta | Coluna 1 | Coluna 2 | Contrastes | Efeitos | Sombras Quadráticas (SS) |
|--------------|------|----------|----------|----------|------------|---------|--------------------------|
| | | | | | Coluna 3 | | |
| 3 | 1 | 13,72 | 29,59 | 67,6 | 145,88 | 9,1175 | 1330,061 |
| 7 | 2 | 15,87 | 38,01 | 78,28 | 4,42 | 0,5525 | 1,221 |
| 2 | 3 | 18,03 | 37,14 | 4,1 | 12,42 | 1,5525 | 9,641 |
| 6 | 4 | 19,98 | 41,14 | 0,32 | 0,32 | 0,04 | 0,006 |
| 4 | 5 | 18,62 | 2,15 | 8,42 | 10,68 | 1,335 | 7,129 |
| 8 | 6 | 18,52 | 1,95 | 4 | -3,78 | -0,4725 | 0,893 |
| 1 | 7 | 20,36 | -0,1 | -0,2 | -4,42 | -0,5525 | 1,221 |
| 5 | 8 | 20,78 | 0,42 | 0,52 | 0,72 | 0,09 | 0,032 |

A partir destes dados e com o apoio estatístico do *software Minitab*, versão 20.3 (Minitab, 2022), desenvolveu-se a tabela ANOVA (Tabela 14) deste desenho fatorial.

Tabela 14: Tabela ANOVA para o estudo da soldadura linear 5.1, com recurso ao *software Minitab 20.3*

| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|---|----|---------|---------|---------|---------|
| Model | 7 | 20,1438 | 2,87769 | 166,70 | 0,000 |
| Linear | 3 | 17,9910 | 5,99698 | 347,40 | 0,000 |
| Intensidade | 1 | 1,2210 | 1,22103 | 70,73 | 0,000 |
| Velocidade soldadura | 1 | 9,6410 | 9,64103 | 558,50 | 0,000 |
| Velocidade arame | 1 | 7,1289 | 7,12890 | 412,97 | 0,000 |
| 2-Way Interactions | 3 | 2,1204 | 0,70682 | 40,95 | 0,000 |
| Intensidade*Velocidade soldadura | 1 | 0,0064 | 0,00640 | 0,37 | 0,559 |
| Intensidade*Velocidade arame | 1 | 0,8930 | 0,89302 | 51,73 | 0,000 |
| Velocidade soldadura*Velocidade arame | 1 | 1,2210 | 1,22102 | 70,73 | 0,000 |
| 3-Way Interactions | 1 | 0,0324 | 0,03240 | 1,88 | 0,208 |
| Intensidade*Velocidade soldadura*Velocidade arame | 1 | 0,0324 | 0,03240 | 1,88 | 0,208 |
| Error | 8 | 0,1381 | 0,01726 | | |
| Total | 15 | 20,2819 | | | |

Analisando os efeitos principais e as interações, denota-se que os fatores principais A (Intensidade), B (Velocidade do robô de soldadura) e C (Velocidade do arame de soldadura) e as interações AC (Intensidade e velocidade do arame de soldadura) e BC (Velocidade do robô de soldadura e do arame de soldadura) têm influência na variável de resposta. Neste caso em particular são os fatores que afetam a resposta, pois comparando os valores das razões F calculadas com o valor da distribuição F (valor tabulado) a um nível de significância de 5%, tem-se: $F_{0,05;1;8}=5,318 < F_{\text{calculado}}$.

Isto significa que todos os fatores selecionados bem como as interações de dois fatores têm influência na largura do cordão de soldadura. Para interpretar os resultados de forma gráfica, foi desenvolvido o gráfico de probabilidade normal dos efeitos, presente na Figura 42.

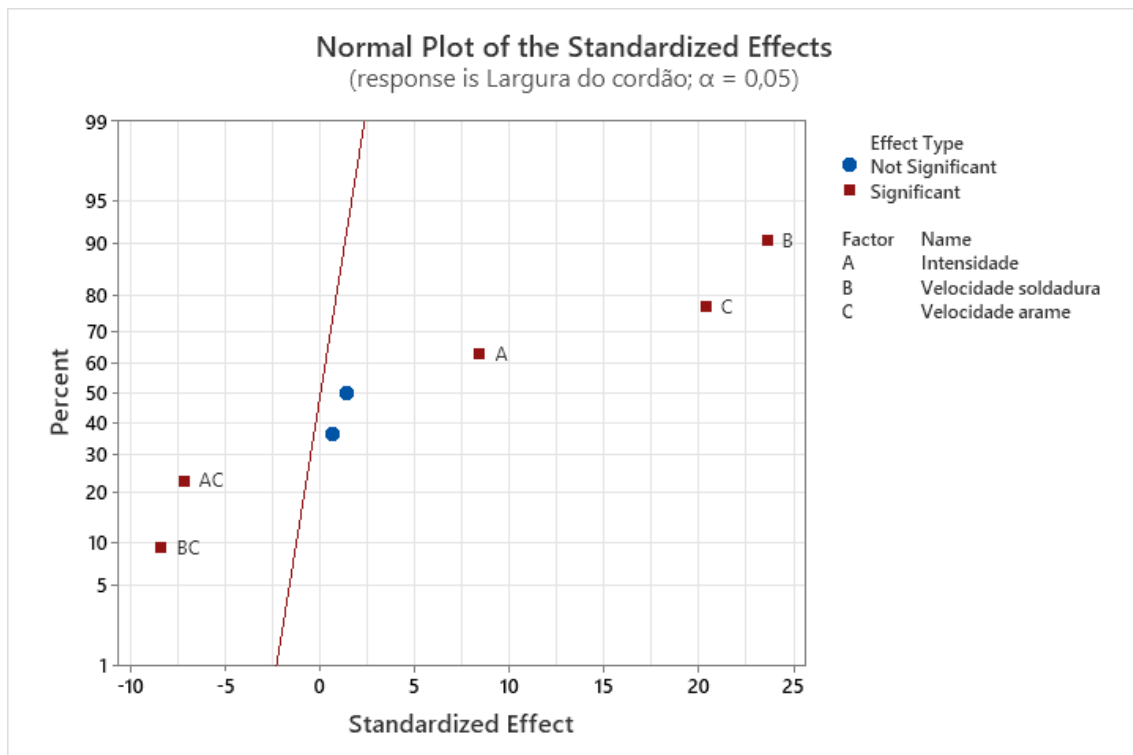


Figura 42: Gráfico de probabilidade normal dos efeitos para a soldadura linear 5.1, realizado com o apoio do *software Minitab 20.3*

Então, a partir do gráfico consegue-se confirmar o que foi concluído no método ANOVA, os fatores principais e as interações de dois fatores representadas a vermelho e que se encontram mais distantes da reta, são as que têm maior efeito na variável de resposta, sendo que, tal como visível na ANOVA esses fatores e respetivas interações são significativos para um nível de significância de 5%.

A partir do estudo foi possível construir um modelo de regressão linear que se encontra na Tabela 15 e que por sua vez permite prever a resposta dentro da região de experimentação, que se apresenta na Tabela 16.

Tabela 15: Modelo de Regressão Linear para largura da soldadura linear 5.1, *software Minitab 20.3*

| | | |
|------------------------------------|---|--|
| Largura do cordão de soldadura 5.1 | = | $9,1175 + 0,2762 \text{ Intensidade} + 0,7762 \text{ Velocidade soldadura}$ $+ 0,6675 \text{ Velocidade arame}$ $+ 0,0200 \text{ Intensidade*Velocidade soldadura}$ $- 0,2362 \text{ Intensidade*Velocidade arame}$ $- 0,2762 \text{ Velocidade soldadura*Velocidade arame}$ $+ 0,0450 \text{ Intensidade*Velocidade soldadura*Velocidade arame}$ |
|------------------------------------|---|--|

Tabela 16: Resposta prevista pelo modelo de regressão (soldadura linear 5.1), *excel*

| Níveis | A | B | C | \hat{Y} |
|-----------------------|----|----|----|-----------|
| A(+) B(+) C(+) | 1 | 1 | 1 | 10,88 |
| A(+) B(+) C(-) | 1 | 1 | -1 | 9,46 |
| A(+) B(-) C(-) | 1 | -1 | -1 | 8,00 |
| A(-) B(+) C(+) | -1 | 1 | 1 | 10,24 |
| A(-) B(+) C(-) | -1 | 1 | -1 | 9,00 |
| A(-) B(-) C(+) | -1 | -1 | 1 | 8,78 |
| A(-) B(-) C(-) | -1 | -1 | -1 | 7,35 |

No Anexo III pode-se consultar os gráficos dos efeitos individuais e de interação entre os fatores em estudo por forma a perceber os melhores níveis para cada um dos mesmos. Uma vez que se pretende que a largura da soldadura para o ponto 5.1 do sistema de escape em análise seja do tipo quanto menor melhor, ou seja, quanto menor for a sua largura, melhor, então pode-se concluir a partir da Tabela 16 que, para se obter uma soldadura com menor largura, os fatores A (Intensidade), B (Velocidade do robô de soldadura) e C (Velocidade do arame de soldadura) devem todos encontrar-se no nível de trabalho mais baixo. Na Tabela 17 pode-se encontrar os melhores níveis a aplicar para se obter uma soldadura mais fina e consequentemente uma melhor penetração de soldadura na junção do material e enviar ao cliente.

Tabela 17: Melhores níveis de trabalho para a resposta da soldadura linear 5.1

| | | |
|----------|--|----|
| A | Intensidade (V) | 17 |
| B | Velocidade do robô Soldadura (cm/min) | 40 |
| C | Velocidade do arame (m/min) | 6 |

Dado que temos identificado o melhor método de trabalho para a soldadura linear do ponto 5.1, será desenvolvido de seguida o desenho experimental para a soldadura circular do ponto 8 para verificar como se pode melhorar o desempenho desta característica na linha de trabalho da Montagem Final 3 que é a mais utilizada.

Identicamente à experimentação realizada para a soldadura 5.1, obteve-se as respostas da variável em estudo presentes na Tabela 18.

Tabela 18: Respostas e soma do Desenho fatorial completo para a soldadura circular 8, *excel*

| Experiência | Combinações | Variável de Resposta | | Total |
|-------------|-------------|----------------------|-------|-------|
| | | Y1 | Y2 | |
| 1 | 3 | 6,77 | 6,58 | 13,35 |
| 2 | 7 | 7,97 | 7,52 | 15,49 |
| 3 | 2 | 9,97 | 9,08 | 19,05 |
| 4 | 6 | 9,51 | 9,72 | 19,23 |
| 5 | 4 | 9,23 | 8,57 | 17,80 |
| 6 | 8 | 8,91 | 9,25 | 18,16 |
| 7 | 1 | 10,57 | 10,78 | 21,35 |
| 8 | 5 | 10,07 | 10,19 | 20,26 |

Para determinar as somas e posteriormente calcularmos os efeitos principais e as interações dos fatores, desenvolveu-se o seguinte algoritmo de *Yates* (Tabela 19).

Tabela 19: Algoritmo de *Yates* soldadura circular 8, *excel*

| Ordem padrão | Exp. | Resposta | Coluna 1 | Coluna 2 | Contrastes | Efeitos | Somas Quadráticas (SS) |
|--------------|------|----------|----------|----------|------------|----------|------------------------|
| | | | | | Coluna 3 | | |
| 3 | 1 | 13,35 | 28,84 | 67,12 | 144,69 | 9,043125 | 1308,450 |
| 7 | 2 | 15,49 | 38,28 | 77,57 | 1,59 | 0,19875 | 0,158 |
| 2 | 3 | 19,05 | 35,96 | 2,32 | 15,09 | 1,88625 | 14,232 |
| 6 | 4 | 19,23 | 41,61 | -0,73 | -3,41 | -0,42625 | 0,727 |
| 4 | 5 | 17,8 | 2,14 | 9,44 | 10,45 | 1,30625 | 6,825 |
| 8 | 6 | 18,16 | 0,18 | 5,65 | -3,05 | -0,38125 | 0,581 |
| 1 | 7 | 21,35 | 0,36 | -1,96 | -3,79 | -0,47375 | 0,898 |
| 5 | 8 | 20,26 | -1,09 | -1,45 | 0,51 | 0,06375 | 0,016 |

Realizou-se a partir do *software Minitab*, versão 20.3 (Minitab, 2022), a Tabela 20 com o resultado da análise ANOVA.

Tabela 20: Tabela ANOVA para o estudo da soldadura circular 8, com recurso ao *software Minitab 20.3*

| Source | DF | Adj SS | Adj MS | F-Value | P-Value |
|----------------------|----|---------|---------|---------|---------|
| Model | 7 | 23,4371 | 3,3482 | 31,80 | 0,000 |
| Linear | 3 | 21,2149 | 7,0716 | 67,17 | 0,000 |
| Intensidade | 1 | 0,1580 | 0,1580 | 1,50 | 0,255 |
| Velocidade soldadura | 1 | 14,2318 | 14,2318 | 135,18 | 0,000 |
| Velocidade arame | 1 | 6,8252 | 6,8252 | 64,83 | 0,000 |
| 2-Way Interactions | 3 | 2,2059 | 0,7353 | 6,98 | 0,013 |

| | | | | | |
|---|----|---------|--------|------|-------|
| Intensidade*Velocidade soldadura | 1 | 0,7268 | 0,7268 | 6,90 | 0,030 |
| Intensidade*Velocidade arame | 1 | 0,5814 | 0,5814 | 5,52 | 0,047 |
| Velocidade soldadura*Velocidade arame | 1 | 0,8978 | 0,8978 | 8,53 | 0,019 |
| 3-Way Interactions | 1 | 0,0163 | 0,0163 | 0,15 | 0,705 |
| Intensidade*Velocidade soldadura*Velocidade arame | 1 | 0,0163 | 0,0163 | 0,15 | 0,705 |
| Error | 8 | 0,8423 | 0,1053 | | |
| Total | 15 | 24,2793 | | | |

A partir da tabela ANOVA e olhando para os efeitos principais e para as interações, denota-se que os fatores principais B (Velocidade do robô de soldadura) e C (Velocidade do arame de soldadura) e as interações, apesar de mais baixas, AC (Intensidade e velocidade do arame de soldadura), AB (Intensidade e velocidade do robô de soldadura) e BC (Velocidade do robô de soldadura e do arame de soldadura) têm influência na variável de resposta. Neste caso em particular para a soldadura circular, estes fatores são os que parecem afetar a resposta a partir da análise da ANOVA, pois, comparando os valores das razões F calculadas com o valor da distribuição F (valor tabulado) a um nível de significância de 5%, tem-se: $F_{0,05;1;8}=5,318 < F_{\text{calculado}}$.

Para interpretar os resultados graficamente e assegurar que a interpretação da ANOVA se encontra em concordância, realizou-se no *software* do *Minitab*, versão 20.3 (Minitab, 2022), o gráfico de probabilidade normal dos efeitos (Figura 43).

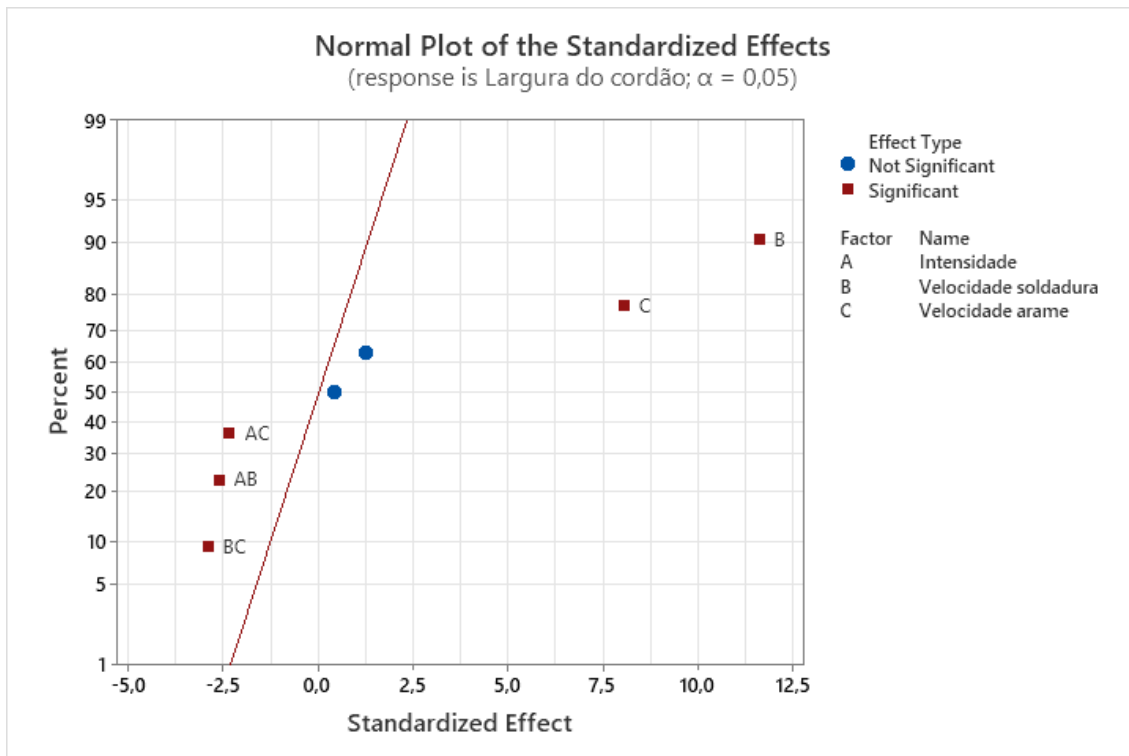


Figura 43: Gráfico de probabilidade normal dos efeitos para a soldadura circular 8, realizado com o apoio do *software* *Minitab* 20.3

De acordo com os resultados fornecidos, conclui-se que o método ANOVA está em concordância com o gráfico de distribuição normal dos efeitos uma vez que os fatores e interações de cor vermelha, que são os significativos para este estudo, também foram considerados como significativos na análise da tabela ANOVA a um nível de significância de 5%.

Com a construção do modelo de regressão linear no *software Minitab*, versão 20.3, que se encontra na Tabela 21, é possível prever a resposta dentro da região de experimentação para a soldadura circular 8 e que se encontra na Tabela 22.

Tabela 21: Modelo de Regressão Linear para largura da soldadura circular 8, *software Minitab 20.3*

| | | |
|----------------------------------|---|---|
| Largura do cordão de soldadura 8 | = | 9,0431 + 0,0994 Intensidade + 0,9431 Velocidade soldadura + 0,6531 Velocidade arame - 0,2131 Intensidade*Velocidade soldadura - 0,1906 Intensidade*Velocidade arame - 0,2369 Velocidade soldadura*Velocidade arame + 0,0319 Intensidade*Velocidade soldadura*Velocidade arame |
|----------------------------------|---|---|

Tabela 22: Resposta prevista pelo modelo de regressão (soldadura circular 8), *excel*

| Níveis | A | B | C | \hat{Y} |
|----------------------|----|----|----|-----------|
| A(+) B(+) C(+) | 1 | 1 | 1 | 10,77 |
| A(+) B(+) C(-) | 1 | 1 | -1 | 9,40 |
| A(+) B(-) C(-) | 1 | -1 | -1 | 7,58 |
| A(-) B(+) C(+) | -1 | 1 | 1 | 10,51 |
| A(-) B(+) C(-) | -1 | 1 | -1 | 9,27 |
| A(-) B(-) C(+) | -1 | -1 | 1 | 8,69 |
| A(-) B(-) C(-) | -1 | -1 | -1 | 7,32 |

No Anexo III pode-se também consultar os gráficos dos efeitos individuais e de interação entre os fatores para a resposta da soldadura circular 8 e assim verificar os melhores níveis de trabalho graficamente. Uma vez que se pretende que a largura da soldadura para o ponto 8 do sistema de escape em análise seja do tipo quanto maior melhor, então pode-se concluir a partir da Tabela 22 que, para se obter uma soldadura com maior largura, os fatores A (Intensidade), B (Velocidade do robô de soldadura) e C (Velocidade do arame de soldadura) devem todos encontrar-se no nível de trabalho mais alto.

Os níveis dos fatores a aplicar na soldadura do ponto 8, na célula montagem final 3 da Tenneco para o sistema em análise podem ser consultados na Tabela 23.

Tabela 23: Melhores níveis de trabalho para a resposta da soldadura circular 8

| | | |
|----------|--|----|
| A | Intensidade (V) | 21 |
| B | Velocidade do robô Soldadura (cm/min) | 60 |
| C | Velocidade do arame (m/min) | 10 |

Capítulo 7 Considerações finais e conclusões

Atualmente, o ramo automóvel assume uma grande importância, tanto a nível internacional como nacional, destacando-se por ser uma indústria muito exigente em todo o seu fluxo. Neste contexto surgiu o presente trabalho em que o principal objetivo foi a aplicação de ferramentas da qualidade numa empresa de sistemas de escapes mais precisamente na empresa Tenneco Portugal. Dado as exigências dos principais clientes desta organização, e sendo esta uma empresa *JIS*, os processos produtivos devem encontrar-se o mais estável possível, pois no caso de paragem de linha a empresa pode mesmo parar o cliente e traduzir-se numa não conformidade de processo. Por outro lado, a exigência de uma resposta rápida de envio de componentes eleva os níveis de stress e pode causar desatenção em situações de qualidade do produto, levando à insatisfação do cliente.

Então, de forma a garantir a qualidade nos processos produtivos e no produto propriamente dito, decidiu-se executar um estudo de suporte à monitorização do desempenho do processo produtivo.

Numa primeira instância caracterizou-se a empresa em que foi desenvolvido todo o trabalho, na qual se descreveu a sua evolução histórica, o seu âmbito, a sua estrutura bem como as preocupações a nível da qualidade, aprofundando e detalhando toda a sua atividade e processo de produção. Por outro lado, foram ainda descritas as características especiais de cliente a ter uma atenção acrescida.

Posteriormente, foi desenvolvida uma revisão da bibliografia, desde a história da qualidade, conceitos e ferramentas, até à norma específica para indústrias automóveis, a IATF 16949:2015.

Do ponto de vista experimental, identificou-se as maiores preocupações a nível desta norma, pelo que de acordo com o referencial mencionado, a realização de alguns estudos estatísticos é imperativa.

Então, dado a necessidade de executar um estudo de sistemas de medição, foi selecionado um sistema de medição por variáveis, o paquímetro, que é o sistema mais utilizado na empresa para medição de diâmetros de tubos e de soldaduras. Para obtenção de melhores resultados e perceber, por exemplo, a resolução mais adequada para executar medições, foi selecionado um tubo de entrada de um sistema de escape para efetuar os estudos a partir do diâmetro externo do mesmo, pois também constitui uma característica especial de cliente.

Para avaliar o sistema de medição por completo, foram realizados os estudos de estabilidade, tendência, linearidade e ainda o estudo R&R. O procedimento utilizado para cada um deles foi descrito na íntegra, pelo que os resultados da recolha dos dados foram concebidos com recurso a folhas de *excel* e ao *software Minitab*, versão 20.3.

Após a interpretação destes resultados, no estudo de estabilidade do equipamento de medição verificou-se a partir das cartas de controlo das médias e de amplitudes realizadas após a recolha de três amostras semanais, durante vinte semanas, o sistema de medição que para o estudo de estabilidade encontra-se estável, pois não existem valores fora dos limites de controlo e não se verifica nenhuma tendência negativa dos pontos. No que diz respeito ao estudo de tendência e linearidade, foram recolhidos dados dentro de uma escala de 50-65mm.

Então a partir do gráfico de linearidade desenvolvido, analisou-se a existência de um desvio significativo para os valores de referência de 50mm e 65mm, pelo que o equipamento não deve medir nessa escala, pois só se encontra capaz de medir entre 55mm e 60mm. Deveríamos realizar um novo estudo com outra gama de valores mais baixos para verificar o comportamento do equipamento neste aspeto, uma vez que é utilizado para medições de comprimento e largura de soldaduras, e estas encontram-se numa gama de valores baixa. Deve ainda utilizar-se cinco peças como valores de referência invés de quatro.

No que diz respeito ainda à linearidade, a linha de tendência “zero” encontra-se completamente contida dentro do intervalo de confiança construído, o que significa que o sistema de medição é considerado bom para a linearidade.

Por último, desenvolveu-se um estudo R&R com recurso à análise de variâncias e concluiu-se que não existem variações de repetibilidade ou reprodutibilidade significativas, contudo existe algum efeito entre as peças (repetibilidade) mas é residual.

Denota-se com este resultado que, a análise dos avaliadores é consistente, o que indica que estes apresentam a formação adequada para a metodologia de medição.

Segundo o principal cliente da Tenneco Portugal, tanto a Volkswagen como a norma IATF 16949:2015 exigem a realização de auditorias de produto pela VDA 6.5, em que o objetivo se prende na verificação de que o produto se encontra dentro das especificações dimensionais especificadas no desenho técnico e ainda, no caso da empresa de escapes em análise que incorpora atividades de soldadura, permite verificar a existência de penetração de soldadura (macrografia). Então, com o objetivo de prever atempadamente

se as condições de soldadura proporcionam estabilidade nos processos e não colocam em causa os requisitos do cliente, pretendeu-se melhorar a sua capacidade de penetração de material através da realização de um Desenho de Experiências, que ajuda também na redução de variações no processo. O resultado esperado dessa pesquisa é identificar o parâmetro ideal para o processo de soldadura existente para união de peças na Tenneco em Portugal, de forma a contribuir para o aumento de produtividade operacional, evitar anomalias no processo de soldadura e mitigar os riscos de segurança ao longo da linha de fabricação.

O Planeamento de Experiências assume uma metodologia estatística crucial para a melhoria contínua do desempenho de produtos, pois é a única forma objetiva de avaliar os erros experimentais que afetam os resultados.

Partindo do pressuposto que a aplicação adequada do Desenho de Experiências contribui para o “Fazer-bem-à-primeira vez”, o controlo deve começar com a identificação das necessidades do cliente ou consumidor final.

Então, dado que se pretende trabalhar com soldaduras dentro das especificações de cliente, devem ser selecionados os melhores parâmetros e fatores para obtenção de penetração de material suficiente e fiável.

Para definir a característica da qualidade a abordar e selecionar os fatores a analisar, foram realizados previamente alguns estudos de penetração de soldadura em dois pontos de soldadura de um sistema de escape, uma soldadura direita e uma soldadura circular, com recurso de um microscópio existente no laboratório da qualidade qualificado para observações de macrografia de soldadura. Percebeu-se que a resposta a ser otimizada deverá ser a largura da soldadura, pois concluiu-se que quanto uma soldadura mais larga para soldaduras circulares, mais penetração e material irá existir, e para as soldaduras direitas ou lineares é o inverso. Após este estudo, foram definidos três fatores essenciais na soldadura, sendo eles a intensidade (V), a velocidade do robô de soldadura (cm/min) e ainda a velocidade do arame de soldadura (m/min). Estes fatores foram sujeitos a um planeamento fatorial completo a dois níveis.

A determinação dos resultados do desenho de experiências, tanto para as soldaduras circulares como para as soldaduras lineares, foram realizadas com o apoio do *excel* e do *software Minitab*, versão 20.3.

Então, no estudo das soldaduras lineares concluiu-se que os fatores em estudo têm um efeito significativo na resposta e a partir do modelo de regressão linear, os melhores níveis

a adotar para todos os fatores de soldadura é o nível baixo. No caso do estudo para o ponto de soldadura circular, concluiu-se também que os fatores A, B e C têm um efeito significativo na resposta e a partir do modelo de regressão linear, os melhores níveis a adotar para todos os fatores de soldadura é o nível alto.

Por isto, conclui-se que o método DOE tem potencial para ser aplicado no futuro em novos processos.

Com o trabalho realizado, a empresa tem agora um conjunto de ferramentas da qualidade que lhe permite poder atuar de uma forma preventiva antes dos problemas ocorrerem tanto a nível de equipamentos de medição como no processo de soldadura, e está mais desperta para a utilização das várias ferramentas de estudos de medições e de desenhos experimentais.

7.1 Perspetivas Futuras

A aplicação do estudo de Análise de Sistemas de Medição na Tenneco foi um desafio que permitiu desenvolver novos conhecimentos acerca desta ferramenta. Ao analisar todas as informações que o estudo MSA propiciou sobre o sistema de medição em análise, o paquímetro, percebeu-se que o MSA constitui uma ferramenta indispensável para a qualidade, pois além de identificar minuciosamente os erros do sistema e fornecer toda uma metodologia para a realização dos estudos necessário, garante que um sistema de medição dentro de seus parâmetros é um sistema que gera dados confiáveis para a tomada de decisão. Contudo, no caso em particular do estudo de análise da tendência e da linearidade, sugere-se a repetição do mesmo uma vez que se verificou que o sistema de medição contém desvios para alguns valores de referência. Num novo estudo futuro sugere-se ainda a utilização de um conjunto de cinco ou mais peças de referência e com outros intervalo de medição para validar a utilização do paquímetro.

No caso da aplicação do DOE, este estudo permitiu realizar uma interligação entre os parâmetros de soldadura e a penetração de soldadura no material, que contribuiu para alinhar os pontos de soldadura com maiores problemas nos melhores parâmetros de soldadura, revelando-se numa melhoria para redução de tempo gasto em realização de testes de soldadura e em desperdício de material. O modelo de regressão demonstrou ser um método muito útil no que diz respeito à previsão da resposta em qualquer ponto da experimentação, permitindo ajustar fatores e melhorar a qualidade numa empresa.

Uma vez que o DOE foi realizado apenas para uma célula de trabalho, ou seja, o estudo da soldadura linear foi realizado apenas para o ROB 360, e o estudo da soldadura circular foi realizado apenas para a Montagem Final 3. Dado que existe outro robô onde é soldada a mesma referência estudada para a soldadura linear, e existe também outra montagem final onde é soldado o sistema final com o mesmo tipo de soldadura circular, recomenda-se à empresa utilizar o DOE nestas máquinas de forma a reduzir a variabilidade e trabalhar com os melhores parâmetros de soldadura possíveis, pois dado que são máquinas diferentes pode haver discrepâncias nos níveis dos fatores a utilizar. Sugere-se ainda a realização deste estudo para todas as referências existentes na empresa, pois existem variações de material e quantidade de material a soldar.

Referências Bibliográficas

- A *Quick History of the Design of Experiments (DOE) | STAT 503*. (2022). PennState. <https://online.stat.psu.edu/stat503/lesson/1/1.1>
- AIAG. (2006). *Production Part Approval Process*.
- AIAG. (2008). *Advanced Product Quality Planning (APQP) and Control Plan Reference Manual*.
- AIAG. (2010). *Measurement Systems Analysis MSA. 4th ed.* Detroit: Chrysler Corporation; Ford Motor Company and General Motors Corporation, 2010.
- AIAG. (2019). *Failure Mode and Effects Analysis - FMEA Handbook*. AIAG - Automotive Industry Action Group, Estados Unidos.
- APQ - Associação Portuguesa para a Qualidade. (2022). *Modelo - EFQM*. <https://apq.pt/reconhecimentos-efqm/modelo/>
- Best, M., & Neuhauser, D. (2006). Walter A Shewhart, 1924, and the Hawthorne factory. *Quality & Safety in Health Care*, 15(2), 142. <https://doi.org/10.1136/QSHC.2006.018093>
- Bobrek, M.; Sokovic, M. (2005). “Implementation of APQP-Concept in Design of QMS.” In *Journal of Materials Processing Technology* (pp. 162-163 (SPEC. ISS.): 718–24). <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.02.225>.
- Box, G. E. P.; Hunter, W. G.; Hunter, J. S. (1978). *Statistics for Experiments – An Introduction to Design, Data Analysis and Model Building*. John Wiley & Sons, New York, 1978.
- Bramwell, D. (2013). “An Introduction to Statistical Process Control in Research Proteomics.” *Journal of Proteomics* 95: 3–21.
- Campos, W. (2010). *ISO 9001:2008 - Interpretando e Implementando*. Clube de Autores.
- Carvalho, D. (2000). Just In Time - Capítulo VIII. *Universidade Do Minho*.
- Chapman, K. L. (1994). *Statistical Process Control Systems: Training Manual*. Fourth Edition.
- Chiarin, A., & Cherrafi, A. (2017). How ISO/TS 16949 certification can improve performance results through lean six sigma tools and principles: A case study from Italy. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, 782–782.
- Conceição, N. (2018). *Tenneco anuncia aquisição da Federal-Mogul este ano*. Pós-Venda. <https://posvenda.pt/tenneco-federal-mogul/>

- Crosby, P. (1979). *Quality is free*. New York: McGraw-Hill.
- Customers, T. (2022). *Customers | Tenneco*. <https://www.tenneco.com/who-we-are/customers>
- Deming, E. (2000). *Out of the crisis: for industry, government, education*. London: MIT Press.
- Environmental, C. (2021). *2021 SUSTAINABILITY REPORT Covering Environmental , Social and Governance (ESG) Progress*. 1–54.
- Feigenbaum, A. V. (1983). *The Quality of Products and Services and Total Quality Control* (J. R. & T. L. Worth (Ed.)). Total Quality Control (pp. 3–26). McGraw-Hill, Inc.
- Fisher, R. A; Yates, F. (1971). *Statistical tables for biological, agricultural, and medical research* (4Ed.). Edinburgh: Oliver and Boyd.
- Fisher, R. . (1942). *The design of experiments* (3rd ed). Edinburgh: Oliver and Boyd.
- Forbes, L. H. & A. S. M. (2011). *Modern construction: lean project delivery and integrated practices*. Boca Raton, Fly: Taylor and Francis Group.
- Foster, S. T. (2001). *Managing Quality an Integrative Approach*. New Jersey: United States of America: Prentice Hall.
- Garvin, D. A. (1987). *Competing on the Eight Dimensions of Quality*. Harvard Business Review, Nov. 1987.
- Garvin, D. A. (1988). *Managing Quality the Strategic and Competitive Edge* (Performanc). New York: The Free Press.
- Hamid, S. R., Isa, S., Chew, B. C., & Altun, A. (2019). Quality Management Evolution from the Past to Present: Challenges for Tomorrow. *Organizacija*, 52(3), 157–186. <https://doi.org/10.2478/orga-2019-0011>
- Hardcover, W. E. (1958). *Statistical Quality Control Handbook*. January 1, 1958.
- Hirano, H. (2009). *JIT Implementation Manual: Book JIT Implementation Manual The Complete Guide to Just-in-Time Manufacturing* (Second Edi). Productivity Press. <https://doi.org/https://doi.org/10.4324/9780429271328>
- Homem, P. (2016). *Caravana dos 100 anos Monroe passou pela Tenneco Palmela*. Pós Venda. <https://posvenda.pt/caravana-dos-100-anos-monroe-passou-pela-tenneco-palmela/>
- IATF. (2016). *IATF 16949:2016 –Sistema de Gestão da Qualidade Automóvel*. 1st Ed.
- Institution, B. S. (2014). *ISO/TS 16949 Automotive Quality Management Product Guide*.

- In *British Standards Institution*. London: BSI, 2014.
- IPQ. (2015a). *NP EN ISO 14001:2015 - Sistemas de Gestão Ambiental. Requisitos e linhas de orientação para a sua utilização* (4a Edição).
- IPQ. (2015b). *NP EN ISO 9000:2015 - Sistemas de gestão da qualidade. Fundamentos e Vocabulário* (3a Edição).
- IPQ. (2015c). *NP EN ISO 9001:2015 - Sistemas de gestão da qualidade. Requisitos* (4a Edição).
- IPQ. (2022). *Prémio de Excelência – Sistema Português da Qualidade*.
<http://www1.ipq.pt/pt/spq/pex/Pages/PEX.aspx>
- Ishikawa, K. (1971). *Guide to Quality Control*. 226.
- Juran, Joseph M.; Godfrey, A. B. (1998). *Juran's Quality Handbook (5th Edition)*. McGraw-Hill Professional Publishing, New York, USA, 1998.
- Juran, J. (1974). *Quality Control Handbook*. New York: McGraw-Hill.
- Kartha, C. P. (2004). *A comparison of ISO 9000:2000 quality system standards, QS9000, ISO/TS 16949 and Baldrige criteria*. The TQM Magazine, 16(5), 331– 340.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1108/09544780410551269>
- Lisboa, J., Coelho, A., Coelho, F., & Almeida, F. (2011). *Introdução à Gestão de Organizações - 3ª Edição*. 720.
https://books.google.com/books/about/Introdução_à_Gestão_de_Organizaçõe.html?id=trMcAwAAQBAJ
- Lopes, A.;Capricho, L. (2007). *Manual de gestão da qualidade*.
- Lucinda, M. A. (2010). *Qualidade - Fundamentos e Práticas*. Brasport.
- Maria, I. (2004). *Aplicação do Desenho de Experiências à Melhoria Contínua de Produtos e Processos*.
- Minitab. (2022). *Minitab Statistical Software* (Versão 20.3 (64-bit)). 2021 Minitab, LLC.
<https://support.minitab.com/pt-br/minitab/20/>
- Montgomery, D. C. (2009). *Introduction to Statistical Quality Control*. 6th Editio. John Wiley & Sons, Inc.
- Nelson, L. S. (2018). *The Shewhart Control Chart — Tests for Special Causes* (4065th ed.). <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/00224065.1984.11978921>
- Neyestani, B. (2017a). *Principles and Contributions of Total Quality Management (TQM)*. Gurus on Business Quality Improvement.
- Neyestani, B. (2017b). *Seven Basic Tools of Quality Control: The Appropriate Quality*

- Techniques for Solving Quality Problems in the Organizations.*
<https://doi.org/10.5281/ZENODO.400832>
- Ohno, T. (1989). *L'espirt Toyota*. Paris Masson.
- Omachonu, V., e Ross, J. (2004). *Principles of Total Quality*. Boca Raton (FL): Taylor & Francis.
- OPCO. (2022). *Formação em Análise dos Sistemas de Medição*. Rev 1901 – Desenvolvido por OPCO | RH OPCO Academia.
- Pacheco, D.A.d.J. and Librelato, T. P. (2022). *Optimising process and product performance in complex systems: a study in the automotive industry*. International Journal of Quality & Reliability Management, Vol. ahead-of-print No. ahead-of-print. <https://doi.org/>. <https://doi.org/10.1108/IJQRM-04-2020-0097>
- Pauliková, A. (2022). *Visualization Concept of Automotive Quality Management System Standard*. Standards 2022, 2, 226–245. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/standards2020017>
- Pereira, Z. L; Requeijo, J. G. (2008). *QUALIDADE: Planeamento e Controlo Estatístico de Processos*. Coedição de FCT e UNL. Lisboa.
- Pires, A. (2007). *Qualidade: Sistemas de Gestão da Qualidade*. Lisboa: Sílabo.
- Read, S. L., e Kume, H. (1989). *Statistical Methods for Quality Improvement*. In Technometrics (Vol. 31). <https://doi.org/https://doi.org/10.2307/3556152>
- Redeinnov. (2016). *TENNECO fornece 6,8 milhões de amortecedores a carros japoneses*. <https://redeinnov.pt/pt/tenneco-fornece-68-milhoes-de-amortecedores/>
- Richardson, T. L. (1997). *Total Quality Management*. New York: United States of America: Delmar Publishers.
- Riesenberger, C. A., e Sousa, S. D. (2010). *The 8D methodology: an effective way to reduce recurrence of customer complaints*. Proceedings of the world congress on engineering, 3, London.
- Rinehart, G. (1993). *Quality Education*. Quality Education. Wisconsin, ASQ Quality Press.
- Sabbagha, Omar, Mohd Nizam Ab Rahman, Wan Rosmanira Ismail, e W. M. H., & Hussain, W. (2016). *“Impact of Quality Management Systems and After-Sales Key Performance Indicators on Automotive Industry: A Literature Review.”* Procedia - Social and Behavioral Sciences 224 (August 2015): 68–75. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2016.05.401>.

- Shinohara, I. (1988). *New Production System: JIT Crossing Industry Boundaries*. P. Press.
- Simões, D. C. T. (2020). Adaptação de um Sistema de Gestão da Qualidade à Norma IATF 16949 numa empresa de injeção de plásticos. *Faculdade de Engenharia Da Universidade Do Porto*, 81.
- Street, D. J. (1990). Fisher's Contributions to Agricultural Statistics. *Biometrics*, 46(4), 937. <https://doi.org/10.2307/2532439>
- Taguchi, G. (2004). *Taguchi's Quality Engineering Handbook*. (1st ed.; Wiley-Interscience, Ed.).
- Taylor, F. W. (2014). *The principles of scientific management*. 76.
- Tenneco. (2021). *Code of Conduct | Tenneco*. <https://www.tenneco.com/governance/code-of-conduct>
- Tenneco. (2022a). *About | Tenneco*. <https://www.tenneco.com/who-we-are>
- Tenneco. (2022b). *Our History | Tenneco*. <https://www.tenneco.com/who-we-are/our-history>
- Tenneco. (2022c). *Tenneco's Global Presence | Tenneco*. <https://www.tenneco.com/who-we-are/global-presence>
- Tunes, R. R. A. (2018). Desenvolvimento de um Manual de Requisitos para Fornecedores: Um Caso de Estudo na Indústria. *Universidade de Coimbra*.
- V. Raja Sreedharan, R. R. & S. S. S. (2017). *A review of the quality evolution in various organisations*. *Total Quality Management & Business Excellence*, 28:3-4, 351-365. <https://doi.org/DOI: 10.1080/14783363.2015.1082421>
- VDA. (2018). *Verband Der Automobilindustrie – VDA Quality Management in the Automotive Industry – Product Integrity (1th Ed.)*.

Anexos

I. Fatores para construção das cartas de controlo por variáveis

Tabela 24: Fatores para a construção de cartas de controlo (Adaptado de Montgomery, 2009)

| Observations in Sample, n | Chart for Averages | | | | | Chart for Standard Deviations | | | | Chart for Ranges | | | | | | | |
|-----------------------------------|-------------------------------|-------|-------|----------------------------|---------|-------------------------------|-------|-------|-------|----------------------------|---------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|--|
| | Factors for Control Limits | | | Factors for Center Line | | Factors for Control Limits | | | | Factors for Center Line | | Factors for Control Limits | | | | | |
| | A | A_2 | A_3 | c_4 | $1/c_4$ | B_3 | B_4 | B_5 | B_6 | d_2 | $1/d_2$ | d_3 | D_1 | D_2 | D_3 | D_4 | |
| 2 | 2.121 | 1.880 | 2.659 | 0.7979 | 1.2533 | 0 | 3.267 | 0 | 2.606 | 1.128 | 0.8865 | 0.853 | 0 | 3.686 | 0 | 3.267 | |
| 3 | 1.732 | 1.023 | 1.954 | 0.8862 | 1.1284 | 0 | 2.568 | 0 | 2.276 | 1.693 | 0.5907 | 0.888 | 0 | 4.358 | 0 | 2.574 | |
| 4 | 1.500 | 0.729 | 1.628 | 0.9213 | 1.0854 | 0 | 2.266 | 0 | 2.088 | 2.059 | 0.4857 | 0.880 | 0 | 4.698 | 0 | 2.282 | |
| 5 | 1.342 | 0.577 | 1.427 | 0.9400 | 1.0638 | 0 | 2.089 | 0 | 1.964 | 2.326 | 0.4299 | 0.864 | 0 | 4.918 | 0 | 2.114 | |
| 6 | 1.225 | 0.483 | 1.287 | 0.9515 | 1.0510 | 0.030 | 1.970 | 0.029 | 1.874 | 2.534 | 0.3946 | 0.848 | 0 | 5.078 | 0 | 2.004 | |
| 7 | 1.134 | 0.419 | 1.182 | 0.9594 | 1.0423 | 0.118 | 1.882 | 0.113 | 1.806 | 2.704 | 0.3698 | 0.833 | 0.204 | 5.204 | 0.076 | 1.924 | |
| 8 | 1.061 | 0.373 | 1.099 | 0.9650 | 1.0363 | 0.185 | 1.815 | 0.179 | 1.751 | 2.847 | 0.3512 | 0.820 | 0.388 | 5.306 | 0.136 | 1.864 | |
| 9 | 1.000 | 0.337 | 1.032 | 0.9693 | 1.0317 | 0.239 | 1.761 | 0.232 | 1.707 | 2.970 | 0.3367 | 0.808 | 0.547 | 5.393 | 0.184 | 1.816 | |
| 10 | 0.949 | 0.308 | 0.975 | 0.9727 | 1.0281 | 0.284 | 1.716 | 0.276 | 1.669 | 3.078 | 0.3249 | 0.797 | 0.687 | 5.469 | 0.223 | 1.777 | |
| 11 | 0.905 | 0.285 | 0.927 | 0.9754 | 1.0252 | 0.321 | 1.679 | 0.313 | 1.637 | 3.173 | 0.3152 | 0.787 | 0.811 | 5.535 | 0.256 | 1.744 | |
| 12 | 0.866 | 0.266 | 0.886 | 0.9776 | 1.0229 | 0.354 | 1.646 | 0.346 | 1.610 | 3.258 | 0.3069 | 0.778 | 0.922 | 5.594 | 0.283 | 1.717 | |
| 13 | 0.832 | 0.249 | 0.850 | 0.9794 | 1.0210 | 0.382 | 1.618 | 0.374 | 1.585 | 3.336 | 0.2998 | 0.770 | 1.025 | 5.647 | 0.307 | 1.693 | |
| 14 | 0.802 | 0.235 | 0.817 | 0.9810 | 1.0194 | 0.406 | 1.594 | 0.399 | 1.563 | 3.407 | 0.2935 | 0.763 | 1.118 | 5.696 | 0.328 | 1.672 | |
| 15 | 0.775 | 0.223 | 0.789 | 0.9823 | 1.0180 | 0.428 | 1.572 | 0.421 | 1.544 | 3.472 | 0.2880 | 0.756 | 1.203 | 5.741 | 0.347 | 1.653 | |
| 16 | 0.750 | 0.212 | 0.763 | 0.9835 | 1.0168 | 0.448 | 1.552 | 0.440 | 1.526 | 3.532 | 0.2831 | 0.750 | 1.282 | 5.782 | 0.363 | 1.637 | |
| 17 | 0.728 | 0.203 | 0.739 | 0.9845 | 1.0157 | 0.466 | 1.534 | 0.458 | 1.511 | 3.588 | 0.2787 | 0.744 | 1.356 | 5.820 | 0.378 | 1.622 | |
| 18 | 0.707 | 0.194 | 0.718 | 0.9854 | 1.0148 | 0.482 | 1.518 | 0.475 | 1.496 | 3.640 | 0.2747 | 0.739 | 1.424 | 5.856 | 0.391 | 1.608 | |
| 19 | 0.688 | 0.187 | 0.698 | 0.9862 | 1.0140 | 0.497 | 1.503 | 0.490 | 1.483 | 3.689 | 0.2711 | 0.734 | 1.487 | 5.891 | 0.403 | 1.597 | |
| 20 | 0.671 | 0.180 | 0.680 | 0.9869 | 1.0133 | 0.510 | 1.490 | 0.504 | 1.470 | 3.735 | 0.2677 | 0.729 | 1.549 | 5.921 | 0.415 | 1.585 | |
| 21 | 0.655 | 0.173 | 0.663 | 0.9876 | 1.0126 | 0.523 | 1.477 | 0.516 | 1.459 | 3.778 | 0.2647 | 0.724 | 1.605 | 5.951 | 0.425 | 1.575 | |
| 22 | 0.640 | 0.167 | 0.647 | 0.9882 | 1.0119 | 0.534 | 1.466 | 0.528 | 1.448 | 3.819 | 0.2618 | 0.720 | 1.659 | 5.979 | 0.434 | 1.566 | |
| 23 | 0.626 | 0.162 | 0.633 | 0.9887 | 1.0114 | 0.545 | 1.455 | 0.539 | 1.438 | 3.858 | 0.2592 | 0.716 | 1.710 | 6.006 | 0.443 | 1.557 | |
| 24 | 0.612 | 0.157 | 0.619 | 0.9892 | 1.0109 | 0.555 | 1.445 | 0.549 | 1.429 | 3.895 | 0.2567 | 0.712 | 1.759 | 6.031 | 0.451 | 1.548 | |
| 25 | 0.600 | 0.153 | 0.606 | 0.9896 | 1.0105 | 0.565 | 1.435 | 0.559 | 1.420 | 3.931 | 0.2544 | 0.708 | 1.806 | 6.056 | 0.459 | 1.541 | |

II. Procedimento estudos MSA - Parte do documento

1.OBJETIVO

Este procedimento tem como objetivo descrever os métodos de realização dos estudos de sistemas de medição. Estes estudos têm como função verificar se um determinado sistema de medição é adequado e apresenta capacidade suficiente para avaliar se um produto está em conformidade.

2.ÂMBITO

Aplica-se aos dispositivos de inspeção, medição e ensaio em que seja requerido o estudo de modo a identificarmos e estimarmos a variabilidade, nas avaliações de precisão e exatidão, associada ao sistema de medição.

3.DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA

Automotive Industry Action Group (AIAG) (2010). *Manual de Referência de Análise de Sistemas de Medição, 4ª edição*. Força Tarefa de Requisitos da Qualidade de Fornecedores da Chrysler, Ford e General Motors.

IATF 16949:2016 – 7.1.5.1.1, 7.1.5.2.1, 7.1.5.3, 9.1.1.1, 9.1.1.2, 9.1.1.3

4.DEFINIÇÕES

EQ – Engenharia da Qualidade.

DMM – Dispositivo de Medição e Monitorização.

Manual MSA – Manual “Measurement Systems Analysis” da Ford/ General Motors/Chrysler - 4ª edição, Junho 2010.

Estudo R&R – Estudo de Repetibilidade e Reprodutibilidade.

5.PROCEDIMENTO E RESPONSABILIDADES

a) Elaboração do plano de estudos de sistemas de medição

- Responsável da EQ possui uma lista de todos os dispositivos que constam nos Planos de Controlo e para os quais são requeridos estudos de sistemas de medição, por variáveis ou atributos. Esta lista é definida no impresso XXXXXXXX.
- Sempre que se adquira um novo Dispositivo o responsável da EQ decide sobre a inclusão deste na lista tendo em conta este procedimento. Elabora um plano de

estudos anual de acordo com as necessidades, pelo que deve ser sempre realizado um estudo de estabilidade, tendência, linearidade e um estudo R&R. Este plano é aprovado pelo Diretor da Qualidade.

- Dado que existem inúmeros sistemas de medição, torna-se desnecessário a realização de estudos a todos os DMM. Como tal, e tendo em conta as necessidades do cliente (criticidade da peça, variação total do processo...) dividiu-se a lista do plano de controlo e agrupou-se os equipamentos por famílias.
- Tendo em conta que ao longo dos anos apenas se torna necessário incidir propriamente nos estudos R&R uma vez que os restantes estudos devem ser realizados, mas quando existe a necessidade de investigação, então consideram-se duas frequências diferentes:

Tabela 1: Tabela da frequência de estudos

| Frequência | Período | Tipo de equipamento a que normalmente se aplica |
|------------|---------|--|
| Elevada | 1 Ano | Equipamento novo ou sujeito a utilização intensa, condições ambientais agressivas e que no período transato, necessitou de manutenção. |
| Normal | 3 Anos | Periodicidade normal para todos os equipamentos. |

- O responsável de EQ atribui as frequências de periodicidade para os estudos R&R às diferentes famílias de DMM. Deve ter em consideração as condições e intensidade de utilização do equipamento (área fabril, laboratório, etc.), o respetivo historial (relatórios de acidentes e/ou danos sofridos) e os resultados de estudos R&R anteriores.
- Salvo razões que justifiquem uma outra decisão, todos os DMM são classificados com frequência “Elevada”, quando se inicia a sua utilização.

b) Elaboração dos estudos R&R

- Todos os Dispositivos que sejam incluídos na lista de Sistemas de Medição devem ser sujeitos a estudos R&R segundo a metodologia definida no Manual MSA. Os estudos são elaborados pelos Operadores e em condições normais de trabalho.
- Para avaliar a adequabilidade e a capacidade do sistema de medição, efetua-se uma estimativa da variação combinada dos erros de medição.

c) Elaboração de estudos por Variáveis

- Todos os DMM por variáveis que se encontrem no plano de estudos de sistemas de medição devem ser sujeitos aos estudos R&R.
- Para determinar a Reprodutibilidade e a Repetibilidade por variáveis, o responsável da EQ deve preencher o impresso XX XX XX e a decisão de aceitação do sistema de medição deve ter em consideração os critérios ilustrados na tabela seguinte:

Tabela 2: Valores de critérios de aceitação do estudo R&R por variáveis (AIAG, 2010)

| <i>Crítérios de aceitação</i> | Decisão |
|--------------------------------------|----------------|
| $\%R\&R > 30\%$ | Inaceitável |
| $10\% < \%R\&R < 30\%$ | Marginal |
| $\%R\&R < 10\%$ | Aceitável |

- Portanto, sempre que se obtiver como resultado deste estudo, um valor de R&R igual ou inferior a 10%, o DMM é considerado capaz, e é definida a respetiva frequência de calibração.
- Caso o valor obtido seja superior a 10%, deve-se proceder à implementação de ações corretivas de acordo com o ponto d) deste procedimento. As medições dos resultados bem como considerações adicionais devem ser registados na folha XX XX XX pelo responsável da EQ.

d) Elaboração de estudos por Atributos

- Todos os DMM por atributos que constem na lista dos estudos de sistema de medição, devem ser sujeitos a estudos R&R. Sempre que em resultado deste estudo não se obtiverem todas as decisões em concordância deve-se proceder à implementação de ações corretivas de acordo com o ponto d). Os registos por atributos devem ser feitos pelo responsável da EQ no impresso XX XX XX.

e) Ações Corretivas e seguimento

- Para resultados não aceitáveis o responsável da EQ deve definir as ações corretivas a implementar, respetivos prazos e responsáveis para as aplicar. Estes elementos devem constar no impresso Plano de Ações. O responsável da EQ deve efetuar um seguimento de forma a assegurar a implementação das ações corretivas. Depois disso, deve-se efetuar um novo estudo ao(s) equipamento(s) em questão.

6.CIRCUNSTÂNCIAS ESPECIAIS

S/ Objeto.

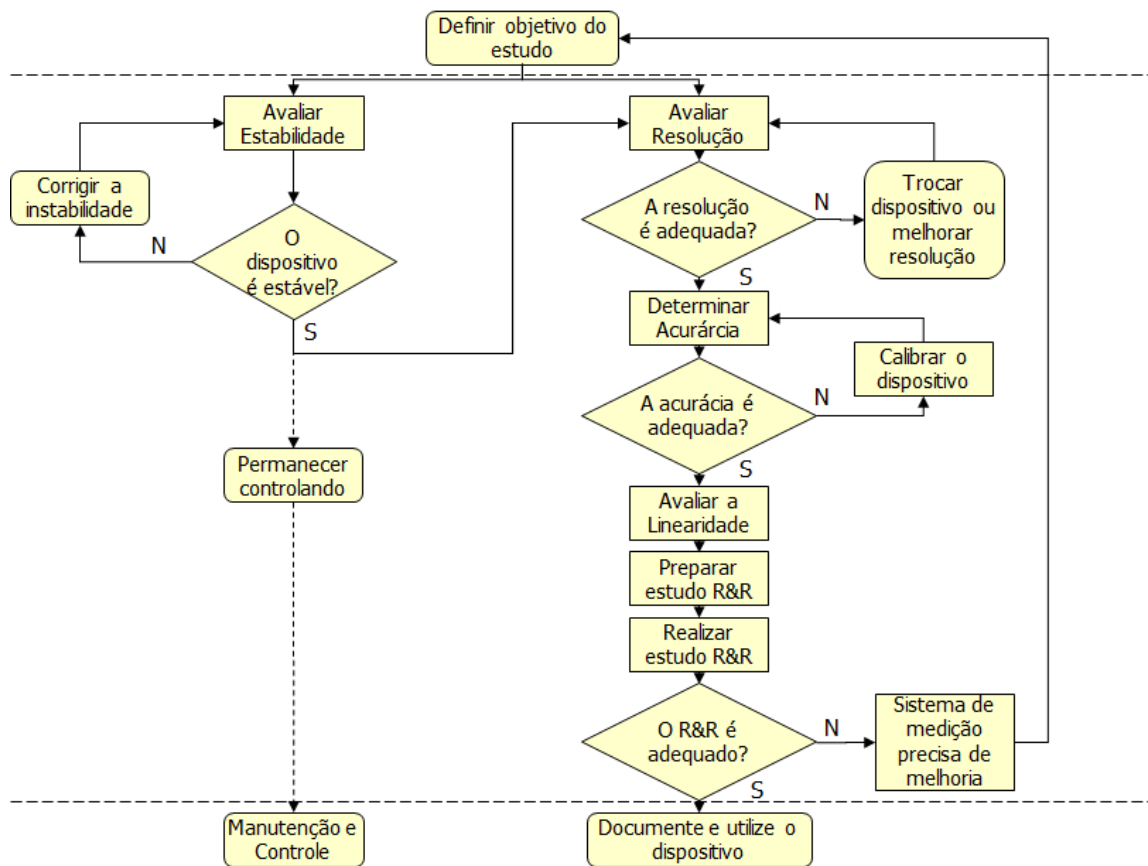
7.ANEXOS

Confidencial

8.MODIFICAÇÕES

Confidencial

9. DIAGRAMA DE RESPONSABILIDADES



III. Interações entre fatores

III.I. Efeitos dos fatores para a soldadura linear 5.1

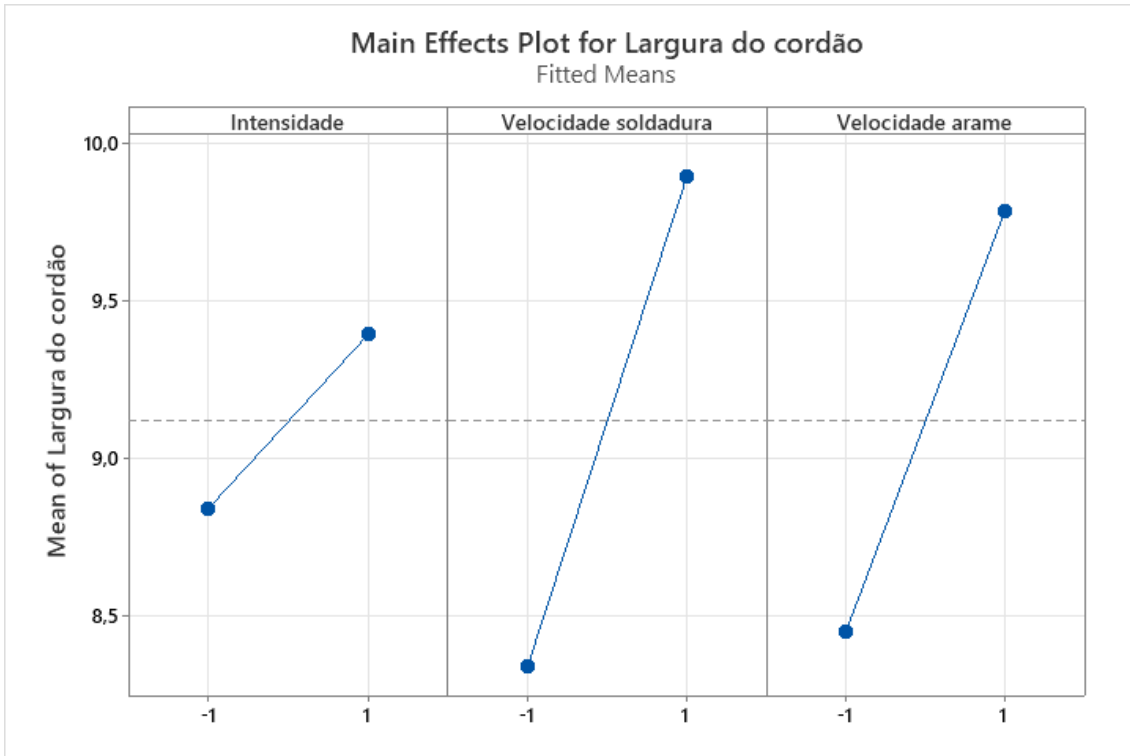


Figura 44: Gráfico dos efeitos dos fatores principais da soldadura linear 5.1, software Minitab 20.3

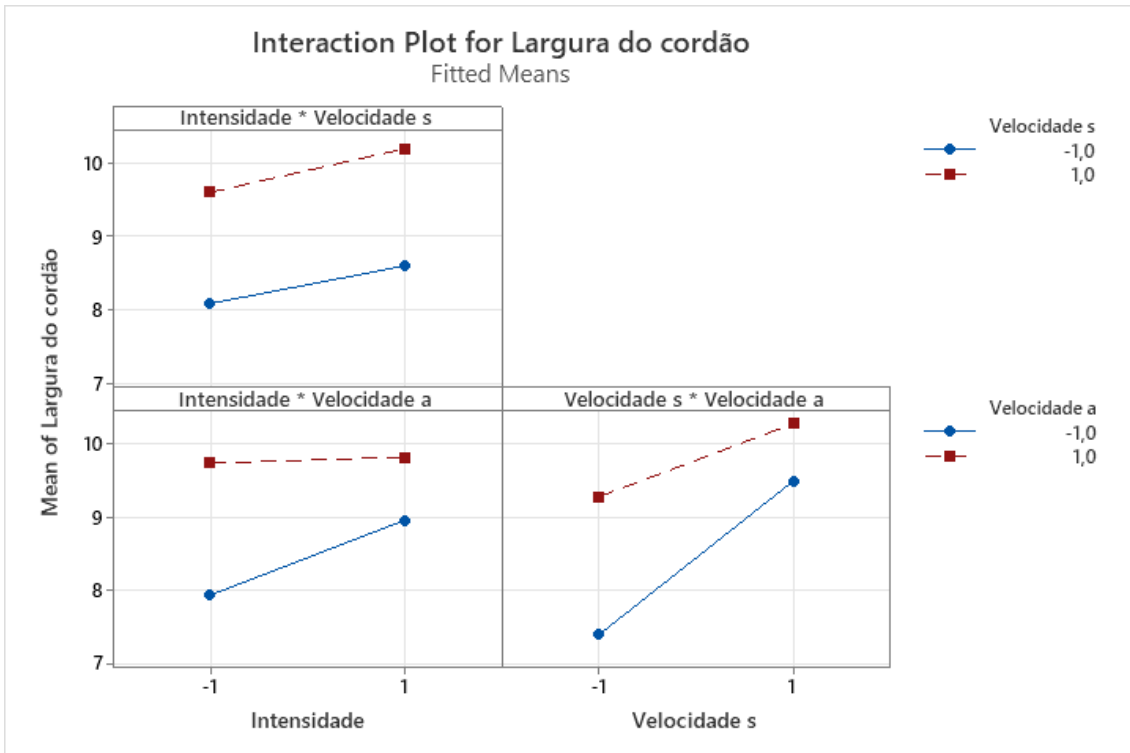


Figura 45: Gráfico dos efeitos das interações dos fatores da soldadura linear 5.1, software Minitab 20.3

II.II. Efeitos dos fatores para a soldadura circular 8

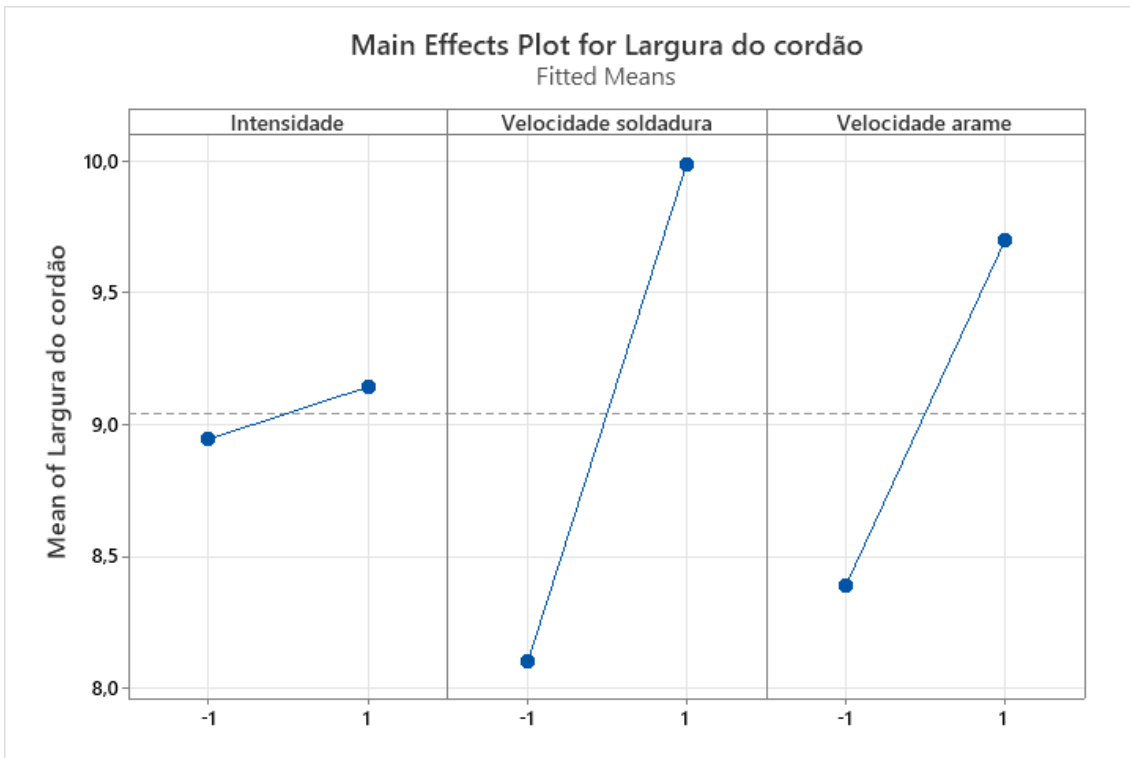


Figura 46: Gráfico dos efeitos dos fatores principais da soldadura circular 8, *software Minitab 20.3*

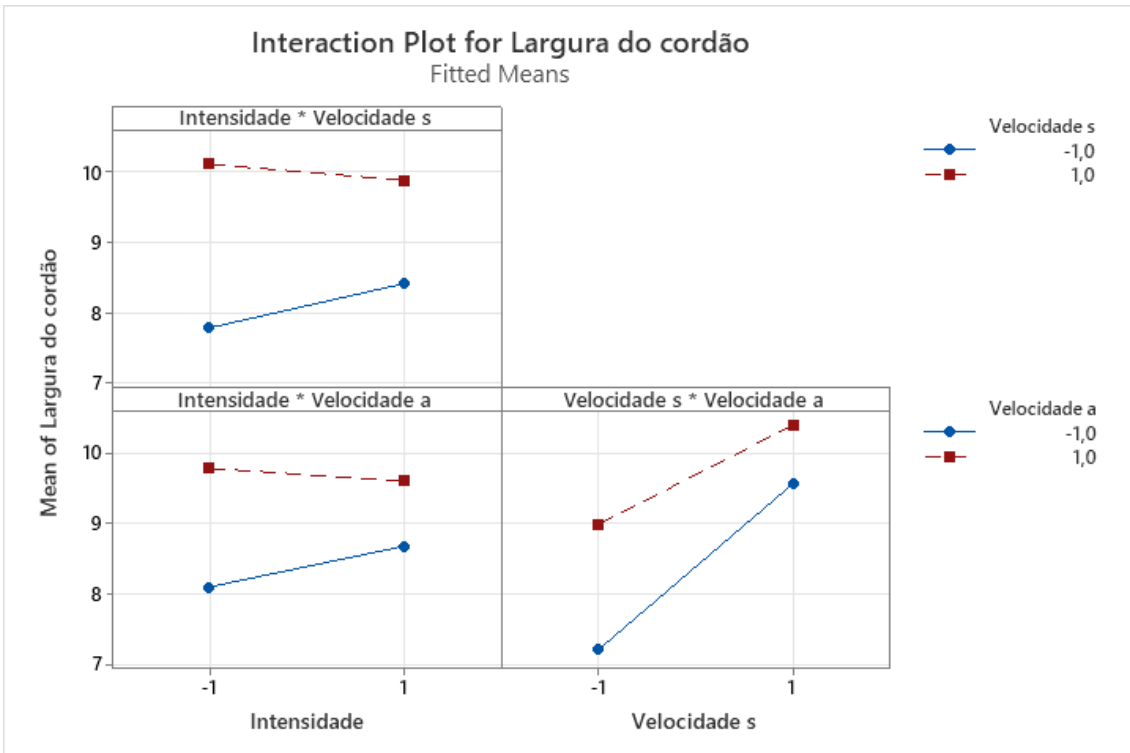


Figura 47: Gráfico dos efeitos das interações dos fatores da soldadura circular 8, *software Minitab 20.3*