

Melhoria do índice de qualidade de duas células de produção de válvulas eletromecânicas

Luís Tiago Faria Queirós

Dissertação de Mestrado

Orientador na FEUP: Engenheiro Paulo Luís Cardoso Osswald



Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica

2020-06-28

À minha família

Resumo

O presente projeto surgiu da necessidade da empresa em fazer um estudo sobre a variabilidade dos processos associados a duas células produtivas. Sendo uma empresa inserida no setor automóvel, onde o mercado é extremamente competitivo, existe uma procura pela melhoria contínua, com vista a uma produção eficiente e com custos reduzidos. O objetivo desta dissertação consiste na análise do sistema produtivo de duas linhas de produção de válvulas eletromecânicas, na identificação das variáveis que afetam o processo e na implementação de melhorias com vista a uma produção mais eficaz. A implementação de melhorias visou a diminuição de produção de peças não conformes (NC) nas duas linhas e ainda a organização de uma das linhas de forma facilitar a troca de referência.

Para tal, foi adotado o método DMAIC da metodologia Seis Sigma com vista à redução de produção de peças defeituosas e redução dos custos de qualidade. A primeira fase deste método consistiu em fazer uma análise da produção dos últimos 6 meses e estudar a sua variação ao longo do tempo, perspetivando a identificação dos processos e/ou referências mais problemáticos em ambas as células produtivas. Para isto, foram desenvolvidos diagramas de Pareto e registo de não-conformidades (em ppm) por referência e por processo.

De seguida, na fase “medir”, foi feita uma revisão das folhas de registo da produção, uma vez que, apesar de quantitativamente ser bastante fidedigno, era pouco descritivo dos problemas obtidos, o que impedia uma análise mais profunda das causas raiz.

A terceira fase do método DMAIC consiste em, com a utilização de ferramentas da qualidade, analisar as possíveis causas raiz dos problemas previamente identificados. Durante o projeto, utilizaram-se como ferramentas para a identificação das causas de um dos problemas identificados: método dos 5 porquês, o diagrama de Ishikawa e ainda o FMEA.

As últimas duas fases consistem em propor ações de melhoria e caso essas ações sejam implementadas, verificar a sua eficácia e definir estratégias para manter estas ações controladas. A eficácia de uma das melhorias implementadas numa das linhas de produção ficou demonstrada com uma redução de produção de peças não conformes (NC) de 18000 ppm e 25000 ppm, no teste de estanquicidade e no processo de soldadura da flap, respetivamente, para cerca de 4000 ppm e 5000 ppm. Este progresso originou uma redução de valor monetário rejeitado de cerca de 2500 euros em apenas um mês. Considerando uma produção semelhante até ao final do ano, após a implementação da melhoria, resultaria numa redução de 26000 euros em valor monetário perdido.

Na outra linha de produção, a melhoria implementada resultou numa redução de 30319 ppm para 5000 ppm, e extrapolando os valores obtidos até ao final do presente ano, levaria a uma redução de 18728 euros relativamente ao valor económico rejeitado.

No decorrer deste projeto, foi ainda possível a organização de uma das linhas de produção, com a criação de estantes para a arrumação de todas as ferramentas das máquinas de soldadura e do teste de estanquicidade, devidamente identificadas e organizadas, de forma a facilitar as trocas de referência.

Relativamente a duas propostas de melhoria não implementadas, estas consistem na compra de dois sistemas novos: o primeiro consiste na renovação do método de medição do ângulo de solenoide, uma vez que o atual é pouco preciso e suscetível a erro. O segundo sistema consiste em criar uma nova máquina de soldadura do *driving collar* ao solenoide devido à quantidade excessiva de peças rejeitadas com ângulo errado e o dinheiro perdido que daí advém. Partindo do pressuposto que o novo sistema anularia a produção deste defeito e que a rejeição obtida no mês de junho é relativamente constante ao longo do tempo, isto resultaria numa diminuição de cerca de 27000 euros em material rejeitado durante um ano.

Improvement of the quality index of two eletromechanical valve production cells

Abstract

This project arose from the company's need to make a study on the variability of the processes associated with two productive cells. By being a company inserted in the automotive sector, where the market is extremely competitive, there is a constant demand for continuous improvement as a way to achieve production efficiency and reduced costs. The objective of this project is to analyze two electromechanical valves production lines, in order to identify the variables that are affecting the process and to implement improvements towards a more efficient production. The aim is to reduce the production of non-conforming parts (NC) as well as organizing the change of reference process.

Taking this into consideration, the DMAIC method of the Six Sigma methodology was adopted with a view to reduce the production of defective parts and reduce quality costs. The first phase of this method consisted in making an analysis of the last 6 months production and studying its variation over time. This allowed the identification of the most problematic processes and/or references in both production cells. For this purpose, Pareto diagrams and register of non-conformities (in ppm) by reference and by process were developed for the referred production lines.

In the next step, called “Measure”, a review of the production record sheets was carried out. Even though the current system was quantitatively quite reliable, which means that it was able to sort out properly which parts were OK or NC, a poor description of the problems was provided, which prevented a deeper analysis of the root causes.

The third stage of the DMAIC method is to Analyze, by means of quality tools, the possible root causes of the identified problems. The tools utilized throughout the project to perform the previously referred root cause analysis were: the 5 whys method, the Ishikawa diagram and also the FMEA.

The last two phases consisted in suggesting improvement actions and, when its implementation was verified, checking their effectiveness and defining strategies to keep them under control. The positive outcome of one of the implemented actions has been demonstrated by a reduction in the production of non-compliant parts (NC) from 18000 ppm and 25000 ppm, in the tightness test and in the flap welding process, respectively, to around 4000 ppm and 5000 ppm, in one of the production lines. The reduction resulted in a decrease of the economic value associated with the NC parts of about 2 500 euros in just one month which represents a reduction of 26000 euros until the end of the year.

Regarding the other production line, the implemented improvement resulted in a reduction from 30319 ppm to 5000 ppm, which leads to a saving of 18728 euros until the end of the year.

During the course of this project, it was also possible to improve the reference exchange process of one of the production lines through the creation of storage racks for all the welding machines and tightness test tools, which are now duly identified and organized.

Regarding two unimplemented improvement proposals, these consist in the purchase of two new systems: the first is the renewal of the method for measuring the solenoid angle, since the current one is imprecise and susceptible to error. The second system consists in creating a new driving collar to solenoid welding machine due to the excessive amount of rejected parts with the wrong angle which results in an excessive amount of money lost associated with these parts. Assuming that the new system would eliminate the production of this defect and that the rejection obtained in June is relatively constant over time, this would result in a decrease of about 27000 euros in rejected material over one year.

Agradecimentos

A conclusão do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica é, sem dúvida, um dos momentos mais marcantes da minha vida por representar o final de um percurso académico cheio de desafios e recordações que vou levar para a vida. Foram várias as pessoas que me ajudaram e que desempenharam um papel importante nesta caminhada.

Antes de mais, um agradecimento à minha família, em especial aos meus pais e irmã, por todo o apoio que me deram nos bons e maus momentos, por me proporcionarem as condições necessárias para o sucesso do meu percurso académico e por demonstrarem sempre um amor incondicional.

Um agradecimento a todos os colaboradores com quem tive a oportunidade de trabalhar e aprender, em especial aos Engenheiros Filipe Maciel, Rui Costa, Martinho Oliveira, Inês Sagres, pelo apoio concedido e pela disponibilidade em transmitir conhecimento. Sem eles, este projeto seria muito mais difícil.

Um agradecimento aos Eng. Gonçalo Pereira e Eng. André Faria por me acompanharem neste percurso e por me darem sempre bons conselhos.

À Eng. Alexandra Alves, orientadora na empresa, que esteve sempre disponível para ajudar.

Ao Engenheiro Paulo Osswald, agradeço por se mostrar sempre disponível para qualquer questão e pela orientação fornecida durante este projeto.

A todos os meus amigos, em especial àqueles com quem partilhei este percurso, um sincero obrigado por me manterem na direção correta e pelo constante apoio e amizade.

Índice de Conteúdos

| | |
|--|----|
| 1. Introdução | 1 |
| 1.1. BorgWarner Portugal | 1 |
| 1.2. Enquadramento do projeto e motivação | 2 |
| 1.3. Objetivos do projeto | 2 |
| 1.4. Método seguido no projeto | 2 |
| 1.5. Estrutura da dissertação | 3 |
| 2. Revisão Bibliográfica | 4 |
| 2.1. Origem do Seis Sigma | 4 |
| 2.2. Definições Seis Sigma | 4 |
| 2.3. Níveis Seis Sigma | 4 |
| 2.4. Modelos Seis Sigma | 7 |
| 2.4.1. DMAIC | 7 |
| 2.5. Ferramentas usadas no DMAIC | 10 |
| 2.5.1. Validação do sistema de medição | 10 |
| 2.5.2. Diagrama de Ishikawa | 11 |
| 2.5.3. Método dos 5 Porquês | 11 |
| 2.5.4. FMEA | 12 |
| 2.6. <i>Lean</i> Seis Sigma | 13 |
| 3. Descrição e análise da situação atual e apresentação do problema | 14 |
| 3.1. Breve descrição do produto | 14 |
| 3.2. Descrição do processo | 15 |
| 3.3. Descrição do Estado Atual e apresentação do problema | 18 |
| 3.3.1. Definição do projeto | 18 |
| 3.3.2. Medir | 28 |
| 4. Apresentação e implementação das propostas de melhoria | 31 |
| 4.1. Teste de estanquidade da referência Y4 | 31 |
| 4.1.1. Analisar | 31 |
| 4.2. Processo de soldadura da <i>flap</i> - linha L2 | 33 |
| 4.2.1. Analisar | 33 |
| 4.2.2. Melhorar | 37 |
| 4.2.3. Controlar | 38 |
| 4.3. Processo de soldadura da <i>flap</i> – linha L1 | 39 |
| 4.3.1. Analisar | 39 |
| 4.3.2. Melhorar | 40 |
| 4.3.3. Controlar | 40 |
| 4.4. Processo de soldadura do <i>driving collar</i> ao solenoide | 41 |
| 4.4.1. Analisar | 41 |
| 4.4.2. Melhorar | 44 |
| 4.4.3. Controlar | 45 |
| 4.5. Troca de referência | 46 |
| 4.5.1. Analisar | 46 |
| 4.5.2. Melhorar | 48 |
| 4.5.3. Controlar | 49 |
| 5. Conclusões e perspetivas de trabalho futuro | 50 |
| Referências Bibliográficas | 52 |
| ANEXO A: Tabela de troca de referências das linhas L1 e L2 | 53 |
| ANEXO B: Apresentação das características das linhas | 54 |
| ANEXO C: Tabela da Quantidade de peças NC produzidas por referência – Linha L1 | 55 |

| | |
|--|----|
| ANEXO D: Tabela da Quantidade de peças NC produzidas por referência – Linha L2..... | 56 |
| ANEXO E: Tabela da Quantidade de peças NC produzidas por motivo e Distribuição de Pareto por tipos de defeitos – linha L1..... | 57 |
| ANEXO F: Tabela da quantidade de peças NC produzidas por motivo e Distribuição de Pareto por tipo de defeitos – linha L2..... | 59 |
| ANEXO G: Folha de registo de produção..... | 61 |
| ANEXO H: Diagrama de Ishikawa do processo de solda da <i>flap</i> | 62 |
| ANEXO I: Tabelas do FMEA das linhas L1 E L2, respetivamente:..... | 63 |
| ANEXO J: Fotografia das ferramentas de fixação do processo de soldadura da <i>flap</i> da linha L2..... | 65 |
| ANEXO K: Fotografia do medidor de ângulos do <i>driving collar</i> | 66 |
| ANEXO L: Produção de solenóides com ângulo errado na linha L1..... | 67 |
| ANEXO M: Produção de solenóides com ângulo errado durante 1 mês na linha L2..... | 68 |

Siglas

DMADV – Define Measure Analyze Design Verify (Definir Medir Analisar Desenhar Verificar)

DMAIC – Define Measure Analyze Improve Control (Definir Medir Analisar Melhorar Controlar)

DPMO – Defeitos por milhão de Oportunidades

EGR – Exhaust Gas Recirculation (Recirculação dos Gases de Escape)

FMEA – Failure and Mode Effect Analysis (Modo de Falha e análise do efeito)

LIE – Limite Inferior de Especificação

LSE - Limite Superior de Especificação

MSA - Measurement System Analysis (Sistema de Análise de Medição)

NC – Não Conformes ou Não Conformidade

PPM – Partes Por Milhão

RPN – Risk Priority Number (Índice de risco)

R&R - Repetibilidade e Reprodutibilidade

Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Logótipo da BorgWarner | 1 |
| Figura 2 - Empresa BorgWarner em Viana do Castelo | 1 |
| Figura 3 - Representação de um processo centrado e normalmente distribuído (Montgomery,2012)..... | 5 |
| Figura 4 - Representação de uma distribuição normal com a média deslocada $1,5 \sigma$ do alvo (Montgomery,2012)..... | 6 |
| Figura 5- Sequência da abordagem DMAIC (Montgomery, 2008)..... | 8 |
| Figura 6- Esquema dos modelos DMAIC e DMADV (George, Maxey et al., 2004) | 9 |
| Figura 7- Critérios de aceitação do estudo R&R (McCarty,2004) | 10 |
| Figura 8 - Exemplo de um diagrama de Ishikawa (Montgomery, 2012) | 11 |
| Figura 9 - Exemplo do Método dos 5 Porquês - (McCarty, Bremer et al., 2004) | 12 |
| Figura 10 - Exemplo de um FMEA (McCarty, 2004) | 13 |
| Figura 11 - Comparação das vantagens da aplicação das metodologias Seis Sigma, Lean Management e Lean Six Sigma (adaptado de Arnheiter & Maleyeff, 2005) | 13 |
| Figura 12 - Exemplo de uma válvula rotativa produzida | 14 |
| Figura 13 - Esquema de componentes de uma válvula EGR | 15 |
| Figura 14 - Layout da linha de produção L1 | 17 |
| Figura 15 – Layout da linha de produção L2..... | 18 |
| Figura 16 - Evolução do número de peças produzidas e peças NC da linha L1 | 19 |
| Figura 17 - Evolução da percentagem de peças NC da linha L1..... | 20 |
| Figura 18 - Evolução do número de peças produzidas e peças NC da linha L2 | 20 |
| Figura 19 - Evolução da percentagem de peças NC da linha L2..... | 20 |
| Figura 20- Produção de peças NC (ppm) por referência da linha L1 | 22 |
| Figura 21 - Produção de peças NC (ppm) por referência da linha L2..... | 22 |
| Figura 22 - Evolução da produção de peças NC (ppm) por motivo na linha L1 | 23 |
| Figura 23 - Evolução da produção de peças NC (ppm) por motivo na linha L2..... | 24 |
| Figura 24 - Exemplo de uma peça NC por apresentar <i>flap</i> descentrada..... | 25 |
| Figura 25 - Exemplo de uma peça NC por má soldadura..... | 25 |
| Figura 26 - Exemplo de uma peça NC por soldadura no local errado..... | 25 |
| Figura 27 – Produção do processo de soldadura da flap (em ppm)..... | 26 |
| Figura 28 - Produção da referência Y4 (em ppm) | 27 |
| Figura 29 - Produção do teste de estanquicidade por referência (em ppm) | 27 |
| Figura 30 - Resultado do processo de soldadura do <i>driving collar</i> ao solenoide..... | 30 |
| Figura 31 - Diagrama de Ishikawa do teste de estanquicidade..... | 31 |
| Figura 32 - Método dos 5 Porquês..... | 33 |
| Figura 33 – Fotografia da ferramenta de fixação danificada..... | 36 |

| | |
|---|----|
| Figura 34 - Fotografia dos pinos desgastados e corroídos..... | 36 |
| Figura 35 - Fotografia da ferramenta de fixação com pinos novos | 37 |
| Figura 36 - Evolução da produção da referência Y4 (em ppm) | 39 |
| Figura 37 - Evolução do processo de soldadura da flap de três referências..... | 40 |
| Figura 38 - Fotografia da máquina de soldadura do driving collar ao solenoide | 42 |
| Figura 39 - Fotografias dos valores obtidos no medidor de ângulo da mesma peça..... | 43 |
| Figura 40 - Fotografias das ferramentas danificadas..... | 43 |
| Figura 41 - Fotografia do novo sistema de soldadura do driving collar ao solenoide..... | 45 |
| Figura 42 - Fotografia da vista inferior do processo de soldadura do driving collar ao solenoide..... | 45 |
| Figura 44 - Fotografias do carrinho da linha usado para troca de referências..... | 47 |
| Figura 43 - Fotografias de ferramentas da máquina do teste de estanquicidade | 47 |
| Figura 45 - Fotografia da estante construída por baixo da máquina de estanquicidade | 48 |
| Figura 46 - Fotografia das ferramentas do teste de estanquicidade devidamente organizadas e identificadas..... | 48 |
| Figura 47 - Fotografia das ferramentas de soldadura da <i>flap</i> devidamente organizadas e identificadas..... | 49 |

Índice de Tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Referências produzidas na linha L1 | 15 |
| Tabela 2 - Referências produzidas na linha L2 | 17 |
| Tabela 3 - Relação de rejeições com postos de trabalho – linha L1..... | 29 |
| Tabela 4 - Relação de rejeições com postos de trabalho – linha L2..... | 30 |
| Tabela 5 - Matriz de priorização da linha L2 | 35 |
| Tabela 6 - Dados da produção da referência Y4 antes e após implementação de melhorias ... | 38 |
| Tabela 7 - Dados de produção de três referências e o seu impacto financeiro na linha | 41 |

1. Introdução

O presente trabalho foi realizado no âmbito do projeto de dissertação, sendo desenvolvido numa das fábricas da companhia BorgWarner, localizada em Viana do Castelo.

Neste capítulo é feita uma breve introdução à empresa, seguindo-se da apresentação do projeto, dos objetivos propostos e quais os métodos adotados. Por fim, é descrita a estrutura da dissertação.

1.1. BorgWarner Portugal

A BorgWarner Inc., cujo logótipo se encontra representado na Figura 1, é um grupo cuja atividade se insere essencialmente na indústria automóvel e o seu objetivo passa por desenvolver e oferecer soluções inovadoras para sistemas de propulsão que visam melhorar a eficiência, as emissões e desempenho de todos os tipos de veículos.



Figura 1 - Logótipo da BorgWarner

No ramo automóvel, a BorgWarner é uma das empresas líder e por isso encontra-se espalhada por todo o mundo. Segundo dados de 2020, o grupo conta com cerca de 30000 colaboradores em todo mundo, distribuídos em 19 países e 67 localizações.

A BorgWarner Portugal foi inaugurada em 2005 em Valença do Minho, mas devido ao rápido crescimento da empresa e à necessidade de satisfazer a procura, surgiu a necessidade de aumentar a área produtiva. Em 2014, foi inaugurada a nova BorgWarner Portugal, em Viana do Castelo. Atualmente, esta unidade conta com cerca de 1000 colaboradores e uma área total de 5600 m². Na Figura 2, está representada o exterior da empresa onde foi desenvolvido o projeto de dissertação:



Figura 2 - Empresa BorgWarner em Viana do Castelo

Os produtos produzidos na empresa estão divididos nas seguintes categorias:

- Recirculação de Gases: Coolers EGR, Tubos EGR, Válvulas EGR;
- Módulos de Controlo para velas incandescentes;
- E-boosters.

Estes produtos são aplicados maioritariamente em veículos ligeiros (de combustão, elétricos e híbridos), uma parte em veículos pesados e por fim em máquinas industriais de grande volume.

1.2. Enquadramento do projeto e motivação

O projeto desenvolvido durante a dissertação surgiu da necessidade de diminuir a quantidade de peças NC produzidas em duas linhas de produção de válvulas EGR (recirculação de gases de escape), que se encontra em valores não aceitáveis para a empresa.

A BorgWarner é uma empresa que ainda está em fase de crescimento e exploração de oportunidades em algumas vertentes da produção de peças automóveis. As duas linhas de produção que foram objeto de estudo, são linhas que foram transferidas do antigo fornecedor de peças na Alemanha para a unidade de Viana há menos de 1 ano e por isso ainda se encontravam numa fase de otimização rumo à estabilidade.

Para além dos custos das não-conformidades na linha, o número de peças NC evidenciava um processo fora de controlo, o que é inaceitável na indústria automóvel e para a política de qualidade da empresa, e que poderia conduzir a um potencial custo muito elevado caso as peças NC não fossem detetadas atempadamente e retidas antes da expedição.

O projeto foi desenvolvido integrado na equipa responsável por estas linhas.

1.3. Objetivos do projeto

O objetivo da dissertação compreende a identificação das variáveis que influenciam a produção de peças não conformes e o estudo das mesmas. Uma vez identificadas as causas, será possível a proposta de melhorias que tornem o processo mais eficiente nas duas linhas.

Como objetivos específicos pretende-se:

- Fazer uma análise profunda dos dados da produção dos últimos 6 meses, nas duas linhas;
- Definir um foco de estudo, depois de identificar os problemas;
- Medir o desempenho atual dos processos e validar os registos observados na definição do problema;
- Analisar o problema, em equipa, de forma a chegar às suas causas raiz;
- Propor ações de melhoria que visem uma diminuição das não-conformidades obtidas;
- Controlar as ações de melhoria e verificar o seu efeito no desempenho das linhas.

Para além destes objetivos iniciais, procedeu-se ao reconhecimento de dois novos objetivos durante o período do projeto:

- Elaboração de um novo sistema de registo de produção juntamente com a equipa;
- Organização dos postos de trabalho na linha L1;

1.4. Método seguido no projeto

A realização deste projeto assentou no modelo DMAIC da metodologia Seis Sigma, que está dividido em 5 fases: definir, medir, analisar, melhorar e controlar.

Antes de seguir para o primeiro passo do modelo, o esforço baseou-se em fazer uma observação exaustiva das duas linhas de produção, de forma a adquirir um conhecimento base dos processos para direcionar o estudo. Durante as primeiras semanas, foi feito um acompanhamento próximo da equipa para se obter uma descrição detalhada dos diferentes processos observados.

Simultaneamente, iniciou-se uma análise dos dados da produção para confirmar quais as tipologias de problemas mais observados e as referências mais problemáticas. O primeiro passo da metodologia foi desenvolvido com recurso a vários documentos de produção disponibilizados pela empresa, com o objetivo de definir o/os problema/as a abordar.

Constatou-se que os registos de produção referentes às peças não conformes, apesar de corretos, eram pouco descritivos do problema e como tal seria necessária uma diferenciação mais fundamentada para poder compreender as razões por detrás da obtenção de peças NC. Assim, como parte da medição do problema, começou-se a analisar diariamente as NC obtidas no dia anterior de produção e a fazer um registo próprio, diferente daquele feito pela produção. Esta observação foi interrompida no decorrer do surto de Covid19, em Portugal, e que motivou a suspensão do trabalho por algumas semanas. Deste modo, grande parte do projeto foi realizado em regime de teletrabalho. Depois de definidos os principais defeitos nas linhas, a equipa realizou um brainstorming para discutir as causas possíveis dos mesmos. Uma vez identificadas, foram propostas ações de melhoria para os diferentes problemas, sendo que algumas foram implementadas e o seu efeito pôde ser controlado, e outras que ainda se encontram a aguardar aprovação por parte do responsável.

1.5. Estrutura da dissertação

A presente dissertação encontra-se estruturada em 5 capítulos:

No presente capítulo é feita uma breve apresentação da empresa onde foi desenvolvido o projeto, definem-se os objetivos pretendidos e o método de trabalho seguido.

No segundo capítulo é feita uma apresentação teórica de todos os conceitos e métodos usados na realização do projeto. Assim, é feita uma revisão da metodologia Seis Sigma, bem como de todas as ferramentas utilizadas.

No terceiro capítulo são apresentadas as peças produzidas e descritas todas as etapas do processo produtivo das duas linhas. De seguida, são apresentados os dados da produção ao longo do tempo e a análise detalhada das NC, conseguindo-se identificar as principais classes de peças defeituosas. Por fim, é revisto o sistema de medição dos dados de produção fornecido pela empresa, de forma a verificar a fiabilidade dos registos.

No capítulo quatro são apresentados os últimos três passos da metodologia DMAIC que consistem na identificação de possíveis causas raiz que estão na base dos defeitos previamente selecionados, na apresentação de propostas de melhoria e por fim, na implementação das mesmas e verificação dos efeitos na linha. Por último, no quinto capítulo, apresentam-se as conclusões do trabalho realizado durante o projeto de dissertação e o impacto que teve na empresa, bem como propostas para trabalhos futuros.

2. Revisão Bibliográfica

Neste capítulo é realizado um enquadramento teórico relativo aos principais conceitos e metodologias que serviram de base na realização da dissertação.

Primeiramente é feito um enquadramento teórico da metodologia Seis Sigma, referindo a sua história, conceito, evolução e ainda os modelos que a constituem. Surge assim a sequência adotada durante o estudo e tentativa da resolução dos problemas denominada DMAIC.

2.1. Origem do Seis Sigma

De uma forma geral, o Seis Sigma, mais do que uma metodologia ou uma ferramenta de qualidade, deve ser visto como uma abordagem que procura atingir um nível de erro muito próximo de zero, através da redução da variabilidade do processo.

Durante a década de 80, a Motorola começa a não conseguir competir com as indústrias de produção de componentes eletrónicas estrangeiras e a receber algumas reclamações de qualidade nos seus produtos. Enquanto os superiores da empresa tentavam encontrar formas de poupar dinheiro e reduzir o desperdício, Bill Smith, um engenheiro da Motorola, estudava a relação entre a vida útil de um produto e a frequência com que foi reparado durante o processo. É então que a empresa se começa a focar neste problema e na implementação de um modelo que visa a redução de defeitos e o aumento da produtividade. Esse modelo é o Seis Sigma (Harry and Schroeder 2000).

A prova da excelência deste modelo fica evidenciada em 1988, quando a Motorola recebe o prémio “Malcolm Baldrige U.S. National Quality Award”, divulgando assim o Seis Sigma no seio empresarial como fator de sucesso (McCarty, Bremer et al. 2004).

2.2. Definições Seis Sigma

Segundo Schroeder, Linderman et al. (2008), não existe uma definição correta do Seis Sigma, uma vez que cada autor define esta metodologia conforme o seu ponto de vista. Mesmo dentro de uma empresa, é possível obter respostas diferentes relativamente a este tópico, dependendo do cargo que se ocupa. Da perspetiva de um executivo, este vê o Seis Sigma como uma abordagem para obter vantagem competitiva em relação às outras empresas, enquanto um Black Belt (agente especialista em Seis Sigma) vê como um exercício para chegar à causa raiz dos problemas de um processo.

Apesar de todas estas definições serem válidas, do ponto de vista do praticante, esta incerteza pode gerar alguma confusão nas pessoas que têm menos conhecimento nesta área.

De acordo com Linderman, Schroeder et al. (2003), “*Seis Sigma é um método organizado e sistemático de melhoria estratégica de processos e desenvolvimento de novos produtos e serviços que se baseia em métodos estatísticos e métodos científicos para conseguir reduções dramáticas dos defeitos, definidos pelos clientes.*”

2.3. Níveis Seis Sigma

Corroborando o estudo referido anteriormente, Kwak and Anbari (2006) defendem que a metodologia Seis Sigma pode ser vista de duas perspetivas fundamentais: do ponto de vista estatístico e do ponto de vista do negócio.

Do ponto de vista estatístico, o sigma (σ) é a sigla utilizada para representar o desvio padrão de uma população. O desvio padrão é uma medida usada para indicar o grau de variação de um conjunto de itens em relação à média. Quanto maior for o desvio padrão (relativamente ao intervalo de especificação), maior é a probabilidade de executar fora dos limites aceitáveis, ou seja, maior a probabilidade de defeito. Por limites aceitáveis entende-se os limites de especificação dentro dos quais os *outputs* do processo devem estar para serem considerados

como conformes. Estes limites podem ser definidos pela própria empresa ou pelo cliente. Por outro lado é fundamental que o processo esteja "centrado", isto é, que a média não se desloque significativamente do centro do intervalo de especificação (Pyzdek and Keller 2003).

Transpondo isto para o âmbito do Seis Sigma, o desempenho de uma empresa é medido pelo nível sigma dos processos, isto é, pela variabilidade dos processos e produtos relativamente a um valor definido como "ideal" para o cliente. No âmbito do Seis Sigma entende-se por nível sigma a relação entre a amplitude do intervalo de especificação e a medida sigma da variabilidade do processo. Tradicionalmente, as empresas aceitavam o nível de desempenho correspondente a 3 e 4 sigma, aceitando com isso que os processos apresentassem entre 6200 e 67000 defeitos por milhão de oportunidades, ou uma taxa de sucesso entre 99,73% e 99,9937% (Pyzdek and Keller 2003), quando centrados.

Assim, o foco desta metodologia consiste na redução da variabilidade nas principais características do produto até um nível de seis sigma, em que a probabilidade de ocorrer um defeito é extremamente baixa (Montgomery 2012). Segundo Coronado and Antony (2002), a metodologia Seis Sigma pode ser definida como a obtenção de menos de 3,4 DPMO (defeitos por milhão de oportunidades), ou seja, uma taxa de sucesso de 99,9997%, contando com uma potencial variação da centragem do processo sem produzir peças fora de especificação, como em seguida demonstrado.

Na Figura 3, está representado um processo centrado e que segue uma distribuição normal com limites de especificação a uma distância de $\pm 6\sigma$ em relação à média. Um produto é considerado defeituoso se se encontrar fora dos limites de especificação superior (LSE) e inferior (LIE). Como se encontra representado na Figura, para estas especificações, a probabilidade de serem obtidos produtos em conformidade ronda os 99,999998%, o que resulta numa probabilidade de obtenção de 0,002 defeitos por milhão (PPM).

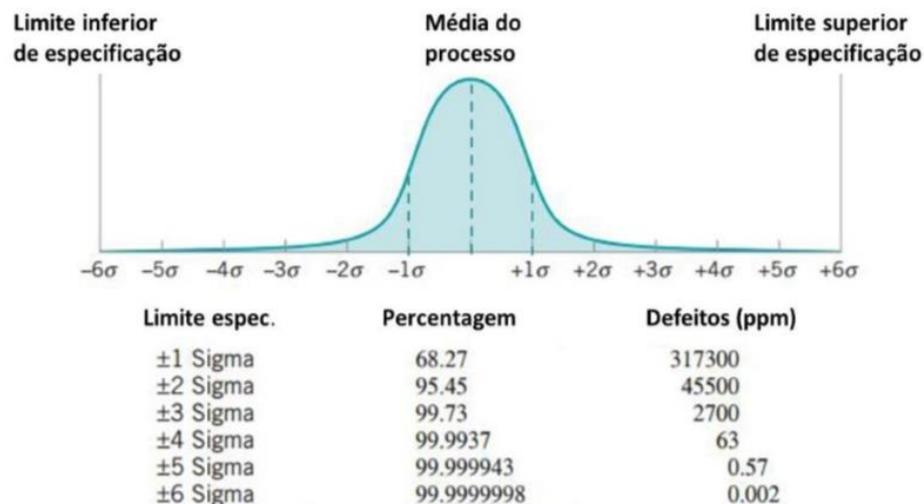


Figura 3 - Representação de um processo centrado e normalmente distribuído (Montgomery,2012)

Como já foi referido anteriormente, esta ferramenta só está realmente a ser seguida quando as especificações do produto se encontram a $\pm 6\sigma$ em relação ao valor alvo. Nestas circunstâncias, a definição oficial desta metodologia indica que este processo produzirá 3,4 partes por milhão de não-conformidades. Porém, consultando a tabela representada na Figura 3, é possível verificar que os defeitos esperados serão de 0,002 partes por milhão. De forma a obter os resultados da Figura 3 é necessário que o processo esteja centrado exactamente no

valor intermédio. Admitindo que essa medida de acerto do processo possa sofrer uma variação de $\pm 1,5$ sigma ao longo do tempo, ficará, nessa situação, a apenas 4,5 sigma de um dos limites, originando com isso 3,4 ppm de peças fora de especificação, como representado na Figura 4 (Pyzdek and Keller 2003).

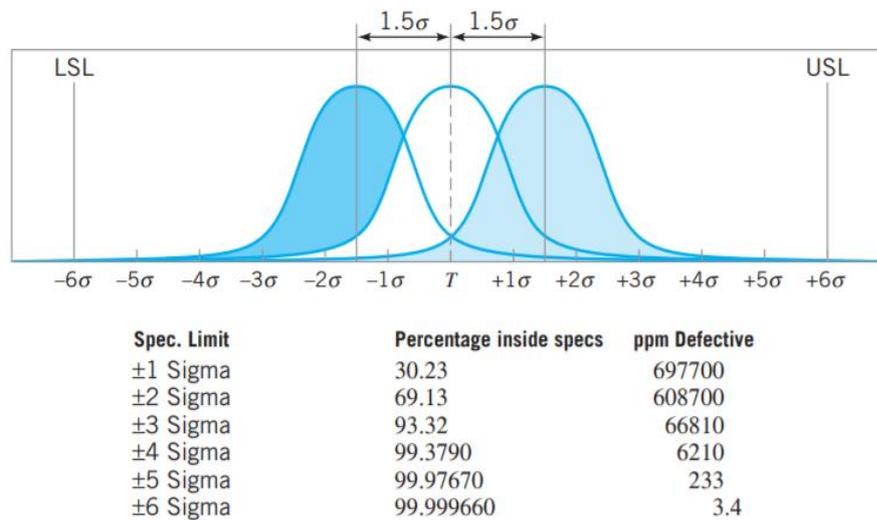


Figura 4 - Representação de uma distribuição normal com a média deslocada $1,5 \sigma$ do alvo (Montgomery, 2012)

Para que tal se verifique é necessário que o processo esteja estável, ou seja, que a distribuição mantenha as características. Nenhum processo, mesmo que sujeito a ótimas condições, é totalmente estável e por isso podem ocorrer alterações que resultem no desvio da média ou do desvio padrão, ou até de ambos. Porém, o modelo do Seis Sigma procura acomodar as variações através da margem de segurança atrás ilustrada, e controlar e modelar esse comportamento pela procura constante da melhoria do processo (Montgomery 2012).

O uso extensivo de métricas e medidas no Seis Sigma ajudam a garantir que os resultados são mensuráveis. Ao serem mensuráveis permitem construir uma estrutura de melhoria de processos para satisfazer as necessidades do cliente (Schroeder, Linderman et al. 2008). Os defeitos por milhão de oportunidades (DPMO) ou não-conformidades por milhões de partes (ppm) são métricas utilizadas para definir a qualidade dos processos. A diferença entre estas duas métricas resulta no facto de ppm se referir a uma característica do processo (número de defeitos por número de operações idênticas), enquanto o DPMO se referir ao número de peças NC, considerando que uma peça pode resultar defeituosa por via de mais do que uma característica (Montgomery 2012).

Ao calcular o DPMO para uma característica do processo, este é calculado diretamente usando a taxa de defeito estimada (número de defeitos por número de peças inspecionadas) e o número de oportunidades de defeito, multiplicando por 10^6 . De acordo com Montgomery (2012), o número de oportunidades é o número de potenciais ocasiões para que um defeito ocorra. E, como já se viu anteriormente, um defeito ocorre sempre que uma determinada característica não está dentro dos limites de especificação.

$$DPMO = \frac{N^{\circ} \text{ de defeitos}}{\text{Número de Oportunidades} * N^{\circ} \text{ de peças}} * 10^6$$

Quanto menor a variabilidade do processo, menor será o DPMO, ou seja, menos defeitos e melhor qualidade do produto. Por outro lado, quando maior for o desvio padrão do processo mais disperso é o processo e por consequência, maior o número de DPMO.

O cálculo de defeitos por milhões de partes (ppm) é feito através da taxa de defeito, multiplicando por 10^6 . É típico usar esta métrica como uma medida da capacidade do processo.

$$PPM = \frac{N^{\circ} \text{ de defeitos}}{N^{\circ} \text{ de peças}} * 10^6$$

Do ponto de vista do negócio, o Seis Sigma não se baseia apenas em ferramentas e técnicas estatísticas, mas também no compromisso da administração em envolver todos os funcionários da empresa nesta metodologia. Coronado and Antony (2002) defendem que Seis Sigma é “*uma melhoria da estratégia do negócio, usada para aumentar a rentabilidade, diminuir as perdas, reduzir custos de qualidade e para melhorar a eficácia e a eficiência de todas as operações, de modo a que seja possível satisfazer ou mesmo exceder as expectativas dos clientes*”. De uma forma mais simples, Schroeder, Linderman et al. (2008) consideram esta metodologia uma estrutura organizada que, com a ajuda de especialistas em melhoria de processos, consegue obter um processo competitivo em relação à concorrência que satisfaça o cliente. Em qualquer uma das definições salienta-se sempre a importância de satisfazer as necessidades do recetor do produto.

2.4. Modelos Seis Sigma

Com vista a conseguir o aumento da eficiência do processo e a redução de desperdício, de forma a satisfazer as necessidades do cliente, podem ser utilizadas duas principais metodologias do Seis Sigma: DMAIC e DMADV. No que toca ao DMAIC, esta é uma metodologia de melhoria contínua, utilizada para melhorar processos existentes através da eliminação de etapas ou métodos que não acrescentem valor ao processo ou produto. Quanto ao DMADV, esta é uma metodologia que utiliza novas ferramentas e medidas para a criação de um novo processo que atendam às expectativas do cliente, podendo produzir com níveis de qualidade Seis Sigma (Pyzdek and Keller 2003).

2.4.1. DMAIC

A abordagem DMAIC é a mais popular e utilizada como suporte à implementação da metodologia Seis Sigma. DMAIC é o acrónimo dos termos em inglês *Define, Measure, Analyze, Improve e Control*. Estes dizem respeito ao conjunto de fases de melhoria que consistem em Definir e Medir o problema, Analisar os dados do problema para perceber a sua causa, definir ações para Melhorar (“*Improve*”) o processo e por fim, Controlar o processo para garantir o seu funcionamento de forma adequada.

O DMAIC é uma abordagem importante que ajuda a empresa a encontrar soluções para problemas bastante complicados ou cuja ocorrência nos processos já é muito antiga. A sua estrutura básica permite uma observação direta do problema e atingir os resultados pretendidos. Contudo, para uma utilização correta e focada, é necessário tempo e investimento, não necessariamente investimento de dinheiro em equipamentos novos ou contratação de especialistas, mas sim na capacidade de garantir condições aos colaboradores para que estes tenham tempo de estudar e priorizar ações para a resolução dos problemas. Torna-se, assim, importante comparar os custos do uso do DMAIC em relação aos benefícios que a sua implementação trará (George, Maxey et al. 2004).

Acontece regularmente encontrar pequenos erros nos processos de uma empresa, que poderiam ser facilmente resolvidos, e que por isso o mais óbvio seria saltar alguma fase do DMAIC para conseguir um processo mais eficiente, o mais rápido possível. Porém, é preciso ter em atenção que o risco de perder alguma informação essencial ao saltar um passo da abordagem é muito elevado. A lógica que liga as diferentes fases é a chave para o sucesso desta metodologia e, como tal, deve ser sempre respeitado (George, Maxey et al. 2004). De

seguida, é apresentado um esquema com a sequência de todos os passos da abordagem DMAIC:

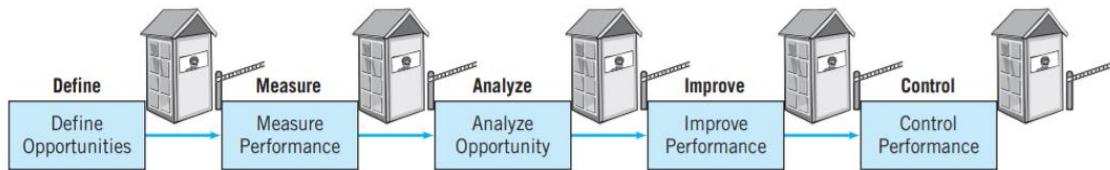


Figura 5- Sequência da abordagem DMAIC (Montgomery, 2008)

Definir

Esta é a primeira fase do processo de melhoria. O propósito desta fase consiste em identificar a oportunidade de executar o projeto, definir os objetivos da melhoria que se pretende obter e verificar se esta representa uma mais-valia tanto para a empresa, como para o/os cliente/s (Montgomery 2012).

De notar que nesta fase é também constituída a equipa pois, o envolvimento e motivação de todos os seus elementos, desde os colaboradores até aos líderes, é essencial para um projeto de sucesso.

Segundo Montgomery (2012), de forma a garantir que o problema é bem definido, a equipa responsável deve recorrer à ferramenta de revisão desta fase, que consiste em conseguir responder com certeza às seguintes perguntas:

1. Qual a razão pela qual se trabalha neste problema em particular e qual o objetivo pretendido?
2. Como é realizado o trabalho atualmente e qual o processo relacionado com o problema?
3. Quem é o cliente e quais são os seus requisitos?
4. Quais são os benefícios que deverão ser obtidos com essa melhoria?

Medir

Esta fase pretende medir o processo existente e identificar as áreas problemáticas.

Para isso, deve-se compreender completamente o estado atual do processo e estabelecer métricas válidas e fidedignas de modo a ajudar a monitorizar o progresso com vista à realização dos objetivos definidos na fase anterior. Antes de se proceder ao levantamento de dados, é necessário garantir que o sistema de medição é fidedigno. Para isso, é possível realizar uma ‘*Measurement System Analysis*’ (MSA) para quantificar quanto da variação do processo advém desse sistema de medição. Esta análise tem como objetivo perceber a confiabilidade do sistema de medição e a qualidade dos dados, o que é crucial para que a equipa se sinta confortável e confiante para tomar decisões nas fases posteriores desta metodologia. Caso isso não aconteça, a empresa poderá estar a enviar peças com defeito para o cliente ou a rejeitar peças boas. De modo a perceber o estado atual do processo, devem ser recolhidos todos os dados sobre as variáveis que podem influenciar o problema (Pyzdek and Keller 2003, George, Maxey et al. 2004).

Existem algumas ferramentas que podem ser usadas nesta fase como, por exemplo, diagrama de pareto, histogramas, gráficos de controlo, diagrama boxplot.

Analisar

Um dos primeiros passos desta fase é verificar se o processo está controlado. Se não estiver, devem ser ajustados os parâmetros fora de controlo de forma a tornar o processo normalizado. Depois de recolhidos os dados, deve ser feita uma reflexão sobre as possíveis causas para o

problema encontrado e conseguir separar o que é realmente importante do “ruído”. Cada problema pode ter mais que uma causa raiz (Pyzdek and Keller 2003, McCarty, Bremer et al. 2004).

O principal objetivo desta fase é procurar origens e relações de causa efeito que influenciam o resultado, para conseguir aproximar o mais possível o processo atual e o processo objetivo (Pyzdek and Keller 2003).

Segundo George, Maxey et al. (2004), existem algumas ferramentas que auxiliam na procura da causa raiz de um problema, como por exemplo: brainstorming, FMEA (Análise dos modos de falhas e efeitos), diagrama de Ishikawa, teste de hipóteses, entre outros.

Melhorar

De um modo geral, esta fase tem como objetivo identificar, implementar e testar uma solução para o problema encontrado anteriormente.

Enquanto que nas fases anteriores, todas as ferramentas consistiam na recolha de dados e na sua análise com o fim de determinar as fontes de variação que mais perturbavam o processo, nesta fase é indispensável haver um pensamento criativo para encontrar novas formas de tornar o processo melhor, mais rápido e barato (Pyzdek and Keller 2003).

Controlar

O objetivo desta fase consiste na implementação das melhorias definidas e em garantir que estas estão a produzir uma melhoria efetiva no processo. Importa estudar a possibilidade de estas melhorias serem implementadas em outros processos semelhantes (Montgomery 2012).

Esta transição não deve ser feita de uma forma brusca sem um plano de trabalho bem definido. O responsável pelo processo deve receber o plano das melhorias a adotar e fazer o seguimento da sua implementação ao longo do tempo, de forma a garantir que este plano não deixe de ser seguido, quer por esquecimento, quer por incompetência (George, Maxey et al. 2004).

Com vista a comparar os dois modelos do Seis Sigma, na Figura 6 encontra-se representado um esquema que aborda as diferenças entre o DMAIC e o DMADV:

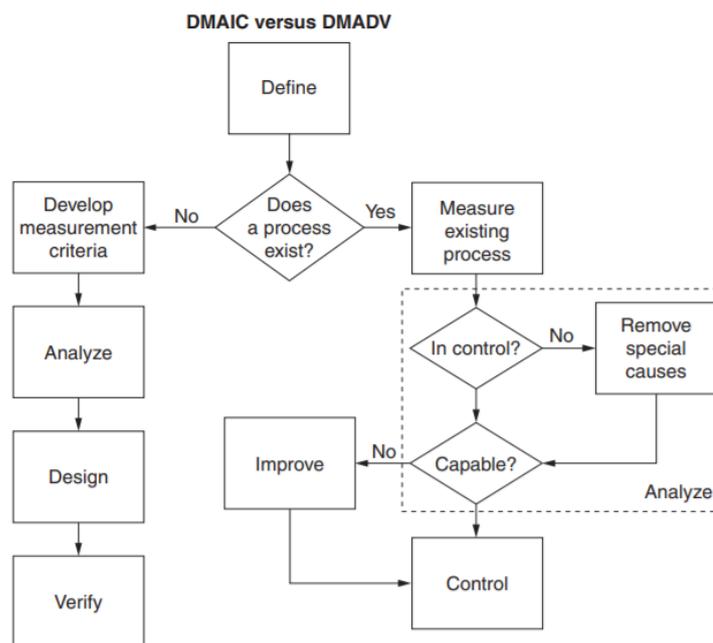


Figura 6- Esquema dos modelos DMAIC e DMADV (George, Maxey et al., 2004)

2.5. Ferramentas usadas no DMAIC

Nesta secção serão apresentadas de uma forma bastante sucinta as ferramentas usadas na dissertação, tanto na identificação do problema como na sua resolução.

2.5.1. Validação do sistema de medição

Esta validação consiste em determinar se um sistema de medição consegue gerar dados precisos e realistas e se esta precisão é suficiente para continuar o estudo (George, Maxey et al. 2004). A avaliação do sistema de medição deve ser sempre realizada na fase Medir do DMAIC antes de estudar qualquer problema, uma vez que um sistema de medição ineficiente pode afetar drasticamente o próprio projeto de melhoria, para além da produção e do negócio. Medições erradas ou pouco precisas conduzem ao levantamento de informações erradas, como por exemplo aceitar componentes maus ou rejeitar componentes bons, que por sua vez orientam a tomada de decisões desinformadas e erradas (Montgomery 2012).

Segundo George, Maxey et al. (2004), para realizar este estudo, é necessário estudar um conjunto de peças, devidamente marcadas, que apresentem a gama completa de variação que pode surgir do processo (peças boas e más) e fazer a medição das mesmas repetidamente, usando diferentes operadores. Depois de ter os dados das medições, pode-se fazer um estudo de repetibilidade e reprodutibilidade (R&R) de forma a identificar a causa da variabilidade obtida:

- Repetibilidade: o estudo da diferença entre medições que é observada quando o mesmo medidor ou operador repetidamente mede a mesma peça;
- Reprodutibilidade: o estudo da diferença que é observada quando operadores diferentes medem a mesma peça.

Segundo McCarty, Bremer et al. (2004), existem três abordagens possíveis para calcular a variabilidade do sistema de medição:

1. % Variabilidade Total (R&R): usada para perceber se a variabilidade do sistema de medição é suficientemente reduzida para não afectar a leitura da medida real;
2. % de Tolerância (%P/T): usada quando existem limites de especificação por parte dos clientes;
3. % de Contribuição: resulta de um rácio entre variância do sistema de medição e variância total observada.

Um resumo dos critérios típicos de aceitação é mostrado no gráfico da figura 7:

| | GR&R %Total Variability | GR&R % Tolerance | GR&R %Contribution |
|----------------|-------------------------------|------------------------|-----------------------|
| Acceptable → | < 10% | < 10% | < 2% |
| Marginal → | 10% - 30 % | 10% - 30 % | 2% - 9% |
| Unacceptable → | > 30% | > 30% | > 9% |

Figura 7- Critérios de aceitação do estudo R&R (McCarty,2004)

2.5.2. Diagrama de Ishikawa

O diagrama de Ishikawa ou diagrama de causa-efeito é uma ferramenta frequentemente usada na fase analisar do DMAIC que tem como objetivo chegar à causa raiz de um problema que tenha sido identificado (Montgomery 2012).

Segundo George, Maxey et al. (2004), o primeiro passo para desenhar este diagrama consiste em definir o problema ou efeito a analisar. Posteriormente, numa reunião de equipa deve-se debater este problema e definir as principais categorias que podem estar associadas ao mesmo. Dentro de cada categoria, é necessário identificar todas as possíveis causas que podem conduzir ao defeito estudado e organizá-las como apresentado na Figura 8:

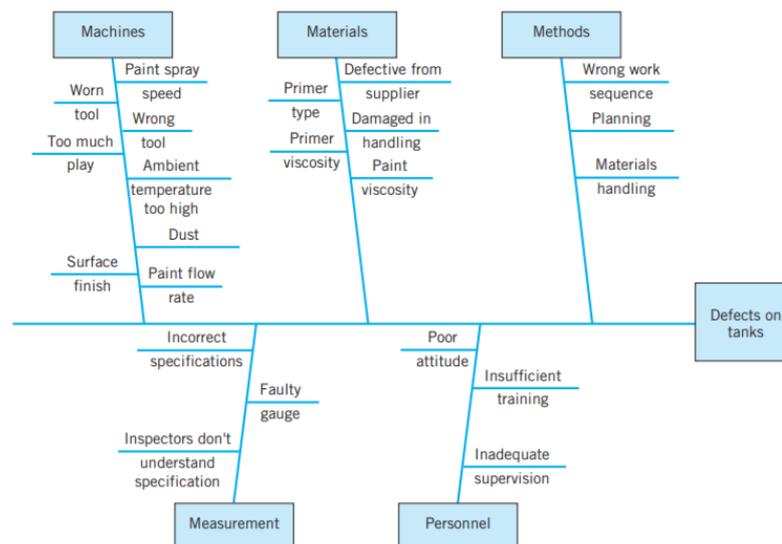


Figura 8 - Exemplo de um diagrama de Ishikawa (Montgomery, 2012)

Depois de estruturadas todas as causas possíveis, importa fazer uma ordenação destas, de forma a definir as que com maior probabilidade podem originar o problema encontrado. Só depois de garantir que as causas definidas são reais é que se devem discutir ações corretivas para as eliminar. Ao longo deste processo pode-se ir atualizando o diagrama para organizar o foco de estudo (Montgomery 2012).

2.5.3. Método dos 5 Porquês

O Método dos 5 porquês consiste num processo iterativo que focaliza as pessoas a pensarem nas causas raiz de um determinado problema, simplesmente pela repetição da pergunta “Porquê?”. Normalmente, assume-se que apenas seja necessário questionar 5 vezes para atingir a causa raiz, mas tal não é uma regra restrita, pois depende do problema em questão, sendo em alguns casos preciso a repetição desta pergunta menos vezes e noutras mais vezes. Deve-se parar assim que o investigador ou a equipa acharem que se chegou à causa raiz do problema onde podem atuar (George, Maxey et al. 2004).

Na Figura 9, está representado um exemplo do uso do método dos 5 porquês em conjunto com um diagrama de Ishikawa, sobre um problema de tempo de espera num laboratório de resultados. Como se consegue perceber, o pensamento consiste em perguntar o porquê e imediatamente responder, sucessivamente, até não se conseguir perguntar mais (McCarty, Bremer et al. 2004).

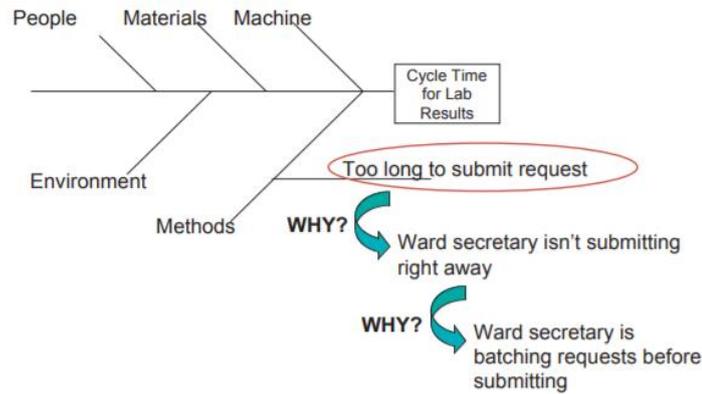


Figura 9 - Exemplo do Método dos 5 Porquês - (McCarty, Bremer et al., 2004)

2.5.4. FMEA

Uma ferramenta muito importante na fase Analisar do DMAIC é o FMEA (*Failure modes and effects analysis*) que consiste em identificar todos os modos de falha e o seu efeito num determinado processo. Aquando da identificação de todas as falhas, deve-se associar o risco que estas representam no processo e priorizar ações que visam eliminá-las.

Segundo Montgomery (2012), esta ferramenta tem como objetivo priorizar os modos de falha encontrados segundo três critérios: severidade, probabilidade de ocorrência e probabilidade de deteção, avaliando-os numa escala de 1 a 10.

A severidade avalia a consequência da causa ao nível da segurança, sendo que 1 representa a existência de nenhum efeito e 10 representa uma falha que afeta os requisitos de segurança e/ou governamentais (Montgomery 2012).

A ocorrência representa a probabilidade do processo falhar, sendo que 1 representa um erro prevenido pelo desenho da ferramenta, máquina ou peça e 10 representa uma probabilidade muito alta de falhar (≥ 1 incidente em cada 10 peças) (Montgomery 2012).

A deteção é a capacidade de se identificar esta causa atempadamente sendo que a classificação 1 diz que não é possível fabricar peças não conformes porque o objecto foi feito à prova de erros através do desenho do produto e/ou processo, enquanto a classificação 10 diz que não há controlo do processo, ou seja, não é possível detetar ou não é inspecionado quer no posto em questão ou em etapas posteriores (Montgomery 2012).

A partir da multiplicação destes três parâmetros consegue-se obter o indicador que permite ordenar as causas por ordem de impacto na linha, que se designa RPN. O RPN representa o valor do risco que cada falha pode fornecer e é a partir deste valor que se definem as principais causas de falha do processo e as primeiras ações a implementar.

Na Figura 10 está representado um exemplo de um FMEA:

| Process Step | Potential Failure Modes | Potential Effects of Failure | Severity | Potential Causes of Failure | Occurrence | Current Controls | Detection | Risk Priority Number |
|-----------------|-------------------------|------------------------------|----------|-----------------------------|------------|-----------------------|-----------|----------------------|
| Stock in stores | Damage Product | Short Product | 8 | Forklift Accident | 4 | Stock checked monthly | 2 | 64 |
| | | | | | ↑ | | | |

Figura 10 - Exemplo de um FMEA (McCarty, 2004)

2.6. Lean Seis Sigma

O *Lean Seis Sigma* foi desenvolvido por volta dos anos 90 e representa a fusão dos sistemas *Lean Manufacturing* e Seis Sigma, aproveitando os pontos fortes de ambas as metodologias. Juntando os princípios do *Lean Manufacturing* com as ferramentas e técnicas do Seis Sigma, obtém-se uma metodologia que facilita a redução de desperdício e a obtenção de uma variação no processo bastante reduzida, identificando todas as atividades com valor acrescentado e sem valor acrescentado (Lande, Shrivastava et al. 2016).

Na Figura 11, é apresentada a comparação entre a aplicação das metodologias Seis Sigma, *Lean Management* e *Lean Seis Sigma*:

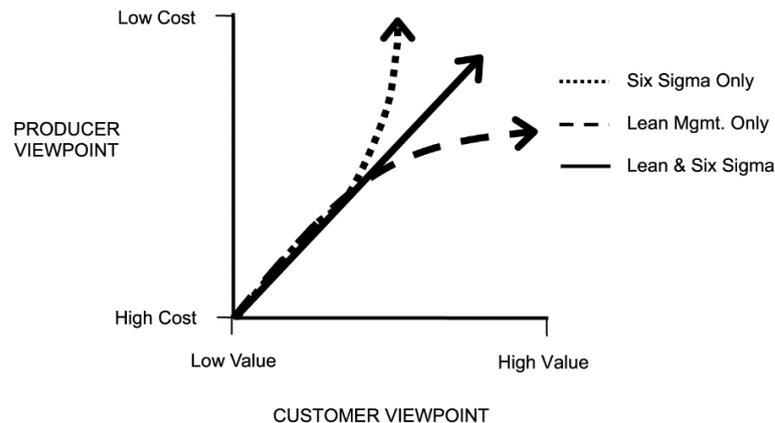


Figura 11 - Comparação das vantagens da aplicação das metodologias Seis Sigma, Lean Management e Lean Six Sigma (adaptado de Arnheiter & Maleyeff, 2005)

A utilização simultânea das duas abordagens como um programa de melhoria contínua é mais eficaz, eliminando as desvantagens do uso isolado. O Seis Sigma é uma abordagem científica, que exige uma maior formação dos colaboradores e que se baseia em questões de eficácia do processo, enquanto a metodologia Lean fundamenta-se em princípios mais simples e conta com o contributo de todos os funcionários, baseando-se essencialmente na questão da eficiência (Arnheiter and Maleyeff 2005, Lande, Shrivastava et al. 2016).

3. Descrição e análise da situação atual e apresentação do problema

3.1. Breve descrição do produto

A BorgWarner é uma empresa que apresenta um elevado conhecimento na produção de soluções completas de recirculação de gases de escape (EGR).

O módulo EGR avançado integra um *cooler* EGR (permutador), uma válvula EGR e tubos EGR dentro de um sistema compacto para otimizar a recirculação dos gases de escape.

O tubo EGR é usado como meio de ligação de todos os componentes do sistema de recirculação do gás, enquanto o cooler tem como função arrefecer os gases de escape provenientes da câmara de combustão. Depois de os gases de combustão serem arrefecidos no cooler, são dirigidos para a válvula que tem a função de regular a passagem dos gases de escape que vêm do cooler de novo para a câmara de combustão. Esta redução e otimização de temperatura dentro da câmara de combustão tem como principal benefício a redução de emissão de óxidos de azoto (NOx).

As válvulas produzidas distinguem-se essencialmente pelo tipo de abertura, podendo considerar-se as seguintes: válvulas lineares e válvulas rotativas. Este estudo foca apenas a produção de válvulas rotativas, como a que se encontra representada na Figura 12:



Figura 12 - Exemplo de uma válvula rotativa produzida

As linhas de produção onde foi desenvolvido o projeto são denominadas L1 e L2, e são linhas orientadas para a produção de válvulas para veículos pesados. Estas linhas são relativamente recentes na BorgWarner em Portugal e por isso ainda se encontram numa fase experimental no que toca ao conhecimento de alguns dos processos de ajuste.

É de notar a complexidade do processo, que será abordado de seguida, e para uma melhor compreensão do mesmo, estão representados na Figura 13 os componentes que constituem uma válvula EGR, podendo variar de aspeto e dimensão de modelo para modelo.

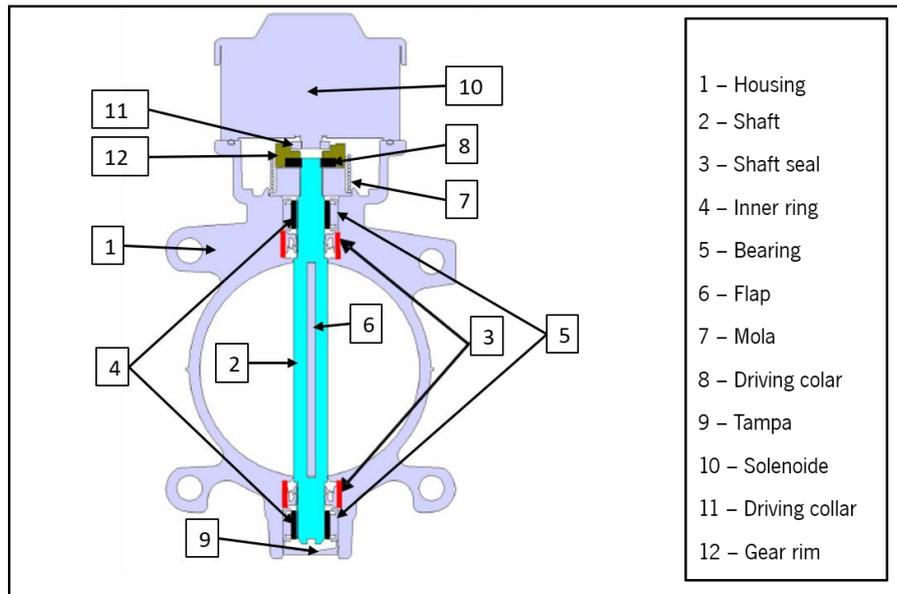


Figura 13 - Esquema de componentes de uma válvula EGR

3.2. Descrição do processo

Linha de Produção Válvulas EGR L1

A linha L1 está instalada na fábrica de Viana desde Dezembro de 2018. Esta é uma linha antiga, que foi transferida de uma fábrica na Alemanha para a fábrica de Viana, sem que houvesse um conhecimento alargado do processo. Foi um processo de transferência muito rápido que não permitiu aos engenheiros da empresa adquirir o *know-how* associado ao *setup* e técnicas de produção e, por essa razão, é uma célula produtiva que apresenta bastantes problemas como será em diante abordado. A linha L1 produz cerca de 10 referências distintas com algumas diferenças entre elas, associadas ao tamanho e geometria das peças. Na tabela 1, conseguem-se identificar as diferentes referências produzidas, com o esquema e o diâmetro associado a cada uma delas:

Tabela 1 - Referências produzidas na linha L1

| Referências linha L1 | | | | |
|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|
| | | | | |
| Ref. X1 - 80 \varnothing | Ref X2 - 55 \varnothing | Ref. X3 - 80 \varnothing | Ref. X4 - 92 \varnothing | Ref. X5 - 80 \varnothing |
| | | | | |
| Ref. X6 - 29 \varnothing | Ref. X7 - 29 \varnothing | Ref. X8 - 55 \varnothing | Ref. X9 - 55 \varnothing | Ref. X10 - 80 \varnothing |

O processo produtivo desta linha consiste na sequência de 9 processos:

1. A primeira operação deste processo inicia-se numa máquina de cravação, e consiste na inserção de componentes na carcaça (o *housing*) da válvula. A máquina começa por introduzir o eixo (*shaft*), componente que vai segurar a borboleta (*flap*) e de seguida a cravação dos vedantes nas juntas da válvula que devem fixar o *shaft*.
2. Após a primeira operação, a peça segue para a máquina de rebitagem onde será inserida e rebitada a anilha (*washer*) no *housing*. Após a inserção deste componente, não existe curso do *shaft*.
3. O terceiro processo decorre na máquina de soldadura laser, onde são feitas duas sub-operações. Na primeira é soldada uma borboleta (*flap*) no eixo imobilizado longitudinalmente na da máquina da rebitagem. Esta *flap* tem como função permitir ou impedir o fluxo de gases. Já na segunda sub-operação, ao componente que sai da primeira sub-operação, é colocada uma mola e soldado um *driving collar* ao *shaft*. O *driving collar* serve para manter a mola na posição correta, evitando que esta exerça movimentos impróprios e a função da mola é exercer pressão sobre a *flap* para conseguir um melhor controlo no momento de regulação do caudal que atravessa a válvula.
4. Após a operação de soldadura, chega-se ao teste de estanquicidade. Nesta máquina são realizados dois testes a dois parâmetros, sendo eles as fugas externas e o fluxo interno. No primeiro teste é feita um controlo da vedação do componente, através de uma medição de fugas para o exterior quando é injetado ar para o interior da válvula, com as secções de entrada e saída da válvula seladas, e é medida a quantidade de ar que escapa. O segundo é o teste à vedação da válvula e consiste em medir o caudal de ar que passa pela mesma na posição fechada. Para cada referência, existe um valor máximo de caudal e pressão que pode passar na válvula, definido pelo cliente. Se o valor medido for inferior ao valor máximo estipulado, a peça passou neste teste, é colocada uma tampa e passa ao processo seguinte. Se a peça não cumprir qualquer um destes testes é segregada. As peças que foram dadas como NC podem ser retrabalhadas e, posteriormente, reaproveitadas.
5. O quinto processo na célula é paralelo aos anteriores, e consiste na preparação do solenoide, que actua a válvula, para a montagem com o conjunto originado do processo 4. Nesta operação, é executada a soldadura do *driving collar* ao solenoide. Este *driving collar* apresenta uma geometria diferente do da 3ª operação, devido à sua função. Enquanto o primeiro serve para montar a uma mola e depois soldar ao *shaft*, este é soldado diretamente ao solenoide e é o elo de ligação do solenoide ao resto da válvula. O solenoide é o atuador elétrico que controla a abertura da *flap*.
6. A sexta operação consiste em recolher os *outputs* das etapas 4 e 5 e aparafusar as duas, obtendo assim o conjunto completo (a válvula).
7. Na estação seguinte a válvula é colocada na “máquina de gravação laser”, onde são gravados no solenoide os códigos numéricos e códigos de barras relativos a cada referência/ cliente.
8. Finalmente, no último processo da linha, antes de seguir para embalamento, cada válvula é submetida a um teste final na máquina de ensaios denominada de “EOL” (*End Of Line*). O propósito desta máquina é de simular o uso normal da válvula, sendo vários parâmetros testados como a resistência a vibrações, tensão elétrica aplicada no motor (para verificar o correto ângulo de abertura da *flap*), e o teste de histerese. Daqui, uma válvula pode seguir para o posto de embalamento (GP12), sendo neste caso gravado o número de série na lateral do *housing* antes de proseguir, ou então, se reprovar nos testes, a válvula é retrabalhada ou segregada para rejeições, dependendo do problema obtido.
9. As peças produzidas que são aprovadas nos testes seguem até ao posto onde é realizada a verificação final visual, onde se detetam visualmente possíveis falhas

estéticas (como sujidade ou algum golpe na peça) que resultariam em reclamação caso chegassem ao cliente. Este posto é referido em toda a fábrica como “GP12” e nele termina o processo de produção em todas as linhas. Após este processo, as válvulas já devidamente embaladas e são recolhidas pelo comboio logístico para seguirem para a expedição.

Na Figura 14 observa-se uma vista de cima da célula produtiva L1:

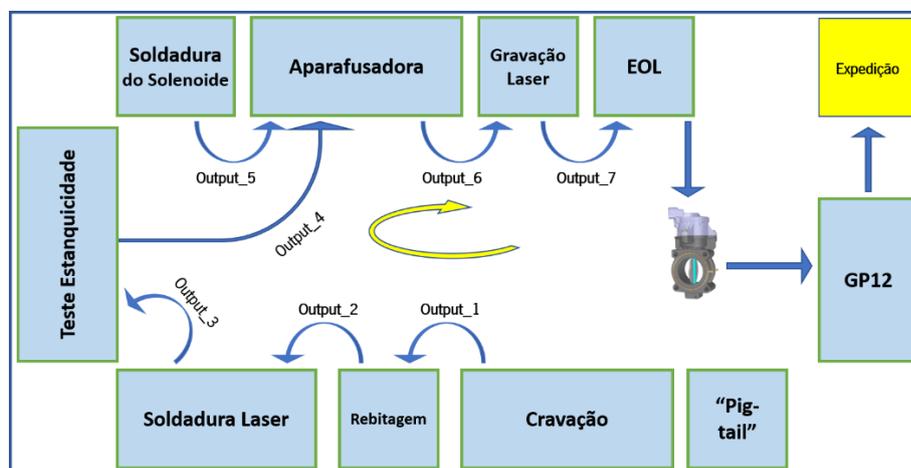


Figura 14 - Layout da linha de produção L1

Linha de Produção Válvulas EGR L2

A linha L2 apresenta muitas semelhanças com a linha L1. Esta é uma linha que se encontra na fábrica de Viana desde julho de 2019, o que ainda resulta em alguma falta de conhecimento sobre o processo, produto e equipamentos. É uma linha com capacidade para produzir 15 referências. Na tabela 2 estão representadas as 10 principais com os respetivos desenhos associados e onde se conseguem evidenciar as diferenças e semelhanças entre as diferentes válvulas EGR.

Tabela 2 - Referências produzidas na linha L2

| Referencias linha L2 | | | | |
|----------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|
| | | | | |
| Ref. Y1 - 47cc | Ref. Y2 - 47cc | Ref. Y3 - 47cc | Ref. Y4 - 39cc | Ref. Y5 - 29cc |
| | | | | |
| Ref. Y6 - 39cc | Ref. Y7 - 33cc | Ref. Y8 - 47cc | Ref. Y9 - 29cc | Ref. Y10 - 39cc |

O processo de produção da linha L2 apresenta algumas diferenças relativamente ao do processo da linha L1. As diferenças encontradas ocorrem em apenas duas operações:

- a primeira diferença encontra-se no terceiro processo da linha, em que as operações de soldadura da *flap* e do solenoide são feitas na mesma máquina em simultâneo, enquanto na linha L1 as operações de soldadura ocorriam em duas máquinas diferentes, nesta são todas na mesma;
- A outra diferença relativamente à linha L1 é a existência de duas máquinas diferentes, a máquina da “Montagem do Solenoide” e a máquina de “Limpeza da peça”. A primeira máquina é apenas utilizada em duas referências específicas de pouco volume de produção. A segunda máquina referida é utilizada para fazer uma limpeza no interior das válvulas para garantir que esta chega ao cliente sem qualquer detrito resultante do processo de produção.

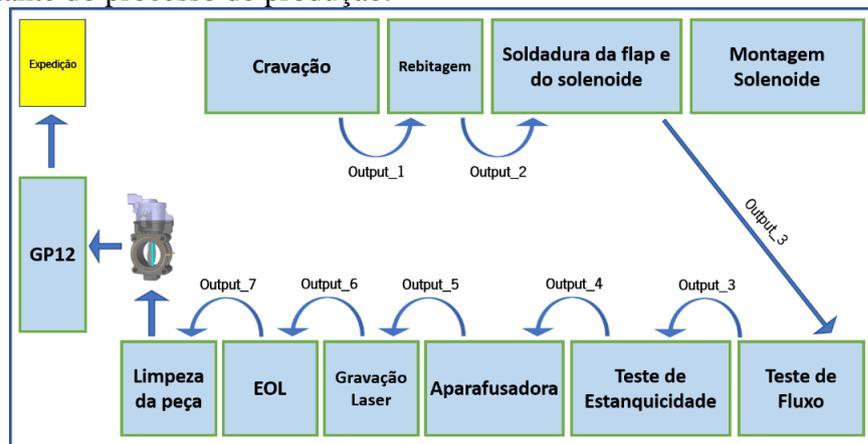


Figura 15 – Layout da linha de produção L2

Pela observação da Figura 15, conseguem-se identificar algumas diferenças no layout e nas máquinas utilizadas nas duas linhas.

O planeamento de produção destas linhas é realizado no início de cada semana e normalmente, abrange os três turnos (manhã, tarde e noite), dependendo sempre das quantidades pedidas pelo cliente.

3.3. Descrição do Estado Atual e apresentação do problema

Como já referida, estas linhas foram implementadas na BorgWarner em Portugal recentemente e devido ao horizonte temporal curto desde essa implementação, a equipa encontra-se numa fase de desenvolvimento de ações de melhoria rumo ao objetivo que consiste em obter uma produção constante e estabilizada.

Nesta secção será feita a descrição do estado atual das linhas de produção onde se realizou este projeto. O âmbito geral do projeto foi definido pela empresa, sendo o objetivo reduzir a quantidade de rejeições, isto porque a produção de peças NC ainda está acima do pretendido. Na realização e elaboração desta dissertação procurou-se seguir as fases do ciclo DMAIC.

3.3.1 Definição do projeto

A primeira fase da metodologia DMAIC consiste na definição dos problemas ou oportunidades de melhoria, as metas e objetivos reais do projeto com clareza. Para isso, o investigador reuniu-se com a equipa para se integrar na mesma e conhecer as pessoas que poderiam estar relacionados com o problema proposto. Esta equipa é constituída pela *Product Leader*, que é a responsável pela performance das linhas e pela organização da equipa. Esta equipa é constituída ainda por um *Manufacturing Quality Engineer* e dois *Manufacturing Quality Technicians* que foram os responsáveis por trazer as linhas para a BorgWarner de

Viana do Castelo e fazem o acompanhamento diário destas, e pelos líderes de produção dos três turnos.

Por se viver num período de alguma instabilidade nas linhas, o que será justificado pelos dados apresentados nos próximos capítulos, começaram a ser realizadas reuniões diárias, conduzidas pelo team leader, com o intuito de expor os problemas na produção do dia anterior e procurar soluções para eliminá-los. Estas reuniões vieram a ser uma mais-valia, pois permitiram que toda a equipa estivesse coordenada com o que estava a acontecer. Apesar da equipa saber quais eram os processos mais problemáticos das linhas, ninguém sabia em concreto a quantidade absoluta ou percentagem de peças rejeitadas, a evolução destas ao longo dos últimos meses e como associar esses defeitos ao setup ou algum ajuste efectuado ou falta dele. Era então importante fazer uma recolha dos dados dos últimos meses, apresentar a evolução da produção e de peças NC ao longo do tempo e especificar quais as máquinas, processos e referências mais críticas, para ambas as linhas.

Os dados de suporte para a quantificação do problema foram retirados de um ficheiro interno, onde estão disponíveis todos os dados sobre a produção diária, atualizado diariamente.

Em primeiro lugar, optou-se por fazer um estudo sobre a evolução da produção nos últimos 6 meses de forma a ter uma melhor perceção dos valores reais de laboração. Com este estudo pretendeu-se comparar os valores de peças produzidas (soma de peças OK e peças NC) que se encontram representadas na Figura 16 a azul, com a quantidade de peças NC, para se perceber a incidência destas. Na Figura 17 é apresentado um gráfico com a percentagem de peças NC em relação à quantidade produzida ao longo dos meses. A relação entre estes dois valores permite obter uma informação mais real acerca do desempenho das linhas, evitando assim deduções precipitadas.



Figura 16 - Evolução do número de peças produzidas e peças NC da linha L1



Figura 17 - Evolução da percentagem de peças NC da linha L1

Como se pode verificar pela observação dos gráficos, existe um aumento da ocorrência de peças NC para quase o dobro, durante os 6 meses em análise, pelo que se devem analisar as causas desta diminuição da eficiência dos processos.

As Figuras 18 e 19 apresentam os mesmos dados de produção da linha L2:

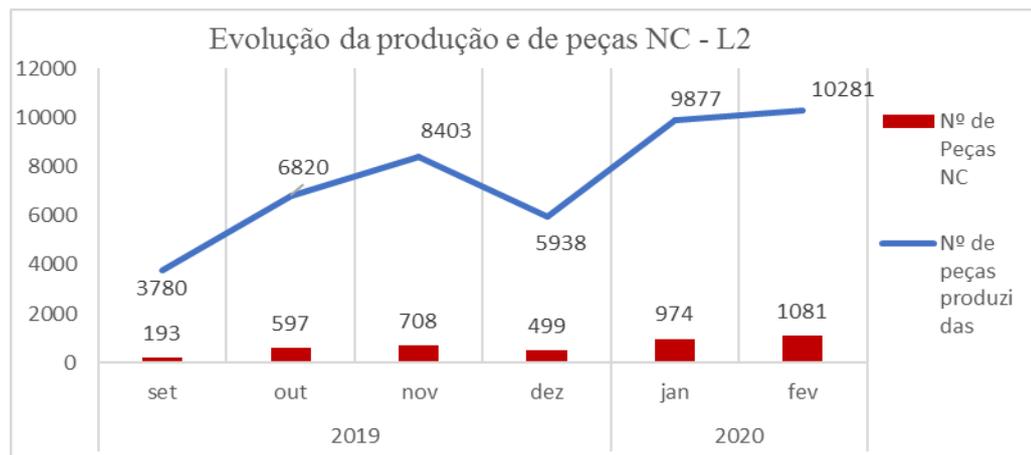


Figura 18 - Evolução do número de peças produzidas e peças NC da linha L2



Figura 19 - Evolução da percentagem de peças NC da linha L2

Como também se pode verificar nos gráficos, o comportamento observado é semelhante ao anterior, mas numa escala ainda mais drástica. Nos 6 meses de análise, a percentagem de peças NC aumentou para o dobro, atingindo os 10,51% de rejeições, o que realça a degradação do processo desta linha.

Antes de tudo, é importante realçar que estes valores de rejeição são relativos a peças que durante qualquer etapa do processo, foram consideradas como inaptas para avançar para a próxima máquina. Isto quer dizer que é contabilizada de igual forma uma peça que não passou da primeira máquina e outra que só falhou na última.

Os valores apresentados são indicadores reais do desempenho dos processos das duas linhas e permitem tirar as seguintes conclusões:

- Nas duas linhas, a produção tem aumentado significativamente (excetuando dezembro, em que, devido a feriados, foram trabalhadas menos horas) o que mostra um aumento de encomendas e eventual diminuição do tempo de ciclo. Deve ser dado uma maior ênfase à linha L2 que em fevereiro produziu o triplo do que tinha produzido em setembro;
- Apesar do aumento de produção, a percentagem de rejeições também aumentou o que permite concluir que, se os lotes forem maiores, os processos são iniciados sem haver um acerto adequado ou uma melhoria implementada e se os lotes forem pequenos, pressupõe-se que houve um aumento de trocas de referências ao longo do mês, identificando que o processo de setup de cada referência é inadequado; Pela observação do anexo A, pode-se concluir que, principalmente na linha L1, o aumento das trocas de referência tem um efeito na produção de peças NC. Basta verificar que os 3 meses com maior número de trocas de referência resulta nos 3 meses com maior percentagem de rejeições. Porém, no mês de dezembro essa fundamentação já não acontece, uma vez que houve uma redução de trocas e a percentagem de rejeição manteve-se muito alta, o que mostra que também os processos são iniciados sem um acerto correto.
- A linha L1 apresenta percentagem de peças NC relativamente mais baixa, aparentando ser uma linha mais estável em termos de processos. Durante a visualização das produções, consegue-se perceber que esta linha apresenta menos avarias, e por consequência menos interrupções para assistências técnicas; os dados do OEE que permitem tirar estas conclusões de que a linha L1 é mais estável que a linha L2 encontram-se representados no anexo B. Como se pode observar, por comparação, todos os parâmetros são mais favoráveis na linha L1.

Relativamente aos dados de retrabalho, também foi feito um levantamento, mas foi verificado que estes valores não eram reais, havendo várias peças retrabalhadas que não eram contabilizadas. Por exemplo, se uma peça precisasse de ser retrabalhada mais do que uma vez, apenas se contabiliza como uma vez na folha de registos (ou até nenhuma). Por observação de como são feitos os registos verificou-se que estes não deveriam ser objeto de estudo.

Depois de ser obtida a relação entre a quantidade de peças rejeitadas e produzidas e perceber como esta tem evoluído ao longo dos meses, procurou-se saber mais sobre as referências produzidas. Uma vez que estas são duas linhas que produzem dezenas de referências, deve-se fazer um estudo sobre a evolução das rejeições para cada uma destas, de forma a descobrir quais as mais problemáticas. Esta análise permite saber se o problema está numa referência, que por alguma razão gera uma quantidade bastante elevada de peças NC, ou se é o processo que não é eficiente.

Primeiramente, fez-se um estudo da evolução das rejeições ao longo do tempo, por referência, para a linha L1. Este estudo consistiu na recolha de dados das quantidades produzidas e quantidades de peças NC de cada referência, desde setembro até janeiro. Estes dados encontram-se representados na tabela no anexo C. De forma a apresentar os dados de uma

forma mais simples e clara, optou-se por selecionar as três referências que mais se destacavam na quantidade de peças NC por milhão de partes (ppm), dentro daquelas que mais se produziram ao longo dos 5 meses em estudo (lotes grandes). A referência X6 apesar de ser a menos problemática em termos de quantidade de peças NC, é a segunda referência mais produzida na linha e por isso, é importante envolvê-la no estudo e analisar a sua evolução ao longo do tempo. A Figura 20 representa a evolução de ppm de NC, por referência, ao longo do tempo:

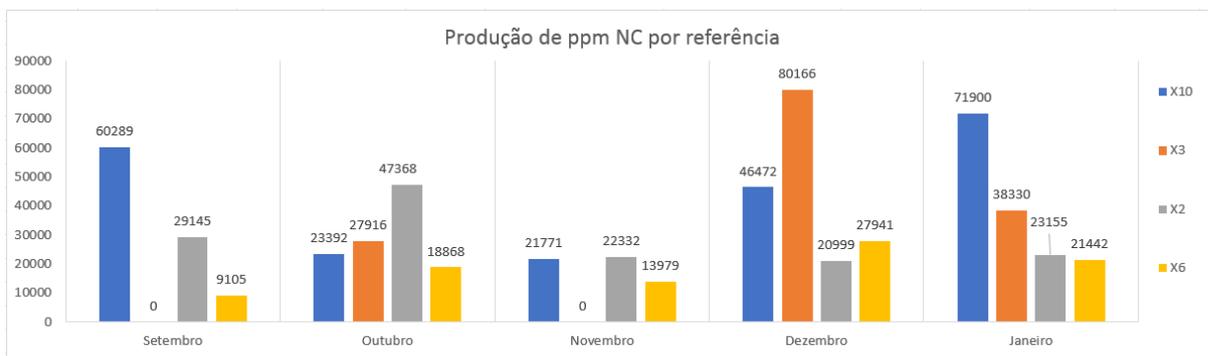


Figura 20- Produção de peças NC (ppm) por referência da linha L1

Pela análise do gráfico consegue-se verificar que não existe uma referência realmente mais crítica que as outras, visto que ao longo do tempo nenhuma se destaca de forma consistente. A título de exemplo podemos observar que no mês de dezembro a referência X3 foi a mais problemática e em janeiro baixou significativamente. Para cada uma das referências representadas, o mês de janeiro foi o mês em que mais se produziu e a quantidade de defeitos por milhão de partes também aumentou, o que dá a indicação que a degradação do processo está relacionada com o tempo ou com o aumento de produção.

Perante estes dados, pode-se concluir que o motivo dos problemas deve estar no processo, uma vez que não existe uma referência mais problemática do que as outras.

Relativamente à linha L2, fez-se o levantamento dos dados de produção de todas as referências dos últimos 5 meses. Depois de organizados e analisados, decidiu-se que o foco de estudo seriam as referências que foram produzidas de uma forma recorrente, isto é, as referências que só foram produzidas em um dos meses do horizonte temporal definido não serão objeto de estudo por não serem parte fundamental nos problemas obtidos. No anexo D, está representada uma tabela com os dados organizados da evolução da quantidade de peças NC das referências estudadas. Na Figura 21, optou-se por não representar a referência Y9 porque representa um lote muito pequeno da produção total e porque em janeiro originou uma quantidade bastante elevada (anormal) de peças NC, o que iria comprometer a observação dos dados das restantes referências.

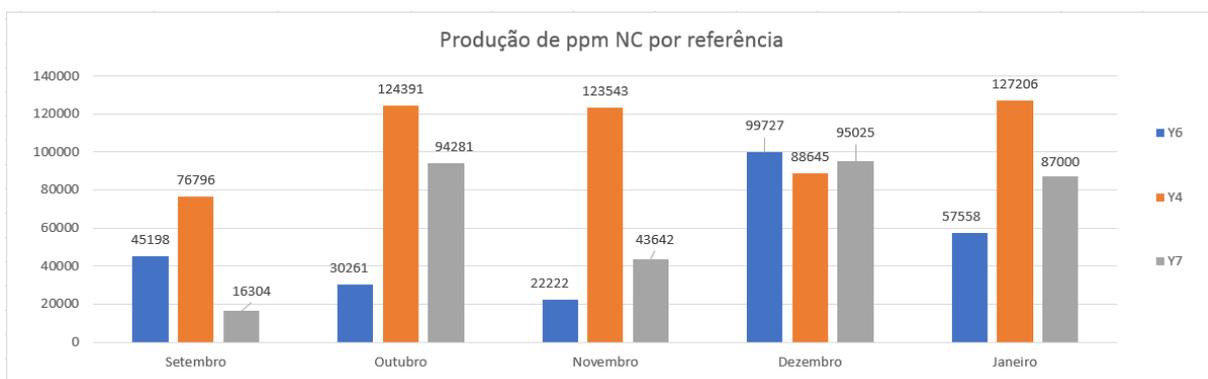


Figura 21 - Produção de peças NC (ppm) por referência da linha L2

Pela análise do gráfico, verifica-se que as três referências conseguem apresentar valores elevados de peças NC por comparação, em alguns dos meses representados. Porém, existe uma referência que se destaca das outras, mantendo em todos os meses uma produção bastante elevada de defeitos. Como se pode verificar na tabela do anexo D, esta é a referência que mais se produz na linha e a que apresenta maior percentagem de rejeições, pelo que haverá oportunidade para fazer um seguimento especial da sua produção. O seguimento consiste em estudar a referência, ver em que fase do processo é que ela falha de forma a concluir se a variabilidade das peças se deve à referência ou ao processo.

A primeira parte da medição do problema consistiu em obter a quantidade de peças rejeitadas e produzidas e perceber como estas têm evoluído ao longo do tempo. Posteriormente, fez-se um estudo das referências mais problemáticas nas duas linhas, de forma a perceber se a variabilidade do processo poderia ser resultado do desenho ou geometria da peça. Depois disto, é importante perceber quais as máquinas ou processos que mais contribuem para números tão elevados de rejeições para se conseguir uma análise mais profunda e focada. É importante descobrir se estes níveis de rejeição estão equilibrados em todas as máquinas ou se haverá alguma máquina que se destaque e se afigure como a principal causadora de problemas nas linhas, e caso isso aconteça, é importante perceber qual o motivo.

No caso da NC ocorrer numa fase inicial, e pensando apenas em termos económicos, é sempre mais vantajoso pois apresenta menos componentes perdidos e por isso menor valor monetário perdido. Em termos de qualidade não deve haver qualquer diferenciação, uma vez que ambas afetam a produção. Se a detecção ocorrer posteriormente existe mais prejuízo do que se ocorrer no início do processo.

Posto isto, foi feito um estudo sobre a evolução das peças rejeitadas ao longo do tempo, no qual se identificaram todos os motivos de defeito dos processos da linha L1. Na tabela que consta no anexo E, estão representados esses motivos e a sua evolução em ppm ao longo dos meses. De forma a simplificar o foco de análise, decidiu-se representar na Figura 22 apenas a evolução de peças NC, em ppm, das 4 características mais problemáticas, uma vez que estas representam 87% dos defeitos obtidos, como pode ser observado no diagrama de pareto representado também no anexo E.

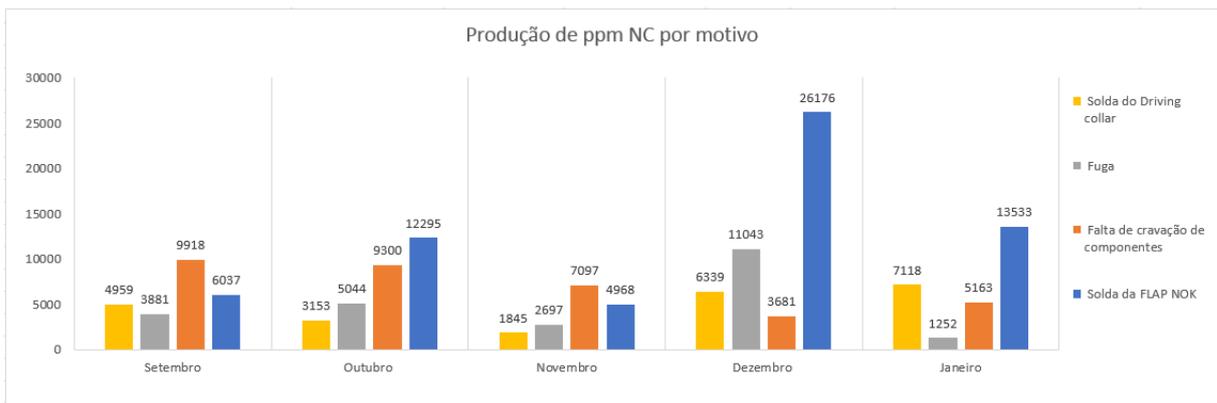


Figura 22 - Evolução da produção de peças NC (ppm) por motivo na linha L1

Pela análise da Figura 22, o defeito que mais se evidencia na linha L1, é a solda da *flap* NOK, que se manteve como um dos dois motivos mais alarmantes, ao longo dos meses. Como se pode ver na última coluna da tabela do anexo E, ao longo dos 5 meses em análise, obteve-se o dobro das peças com solda da *flap* NC por milhão de oportunidades relativamente ao segundo motivo mais problemático – falta de cravação de componentes. É ainda importante referir que a percentagem das peças rejeitadas por este motivo em relação às rejeições totais tem aumentado ao longo dos meses.

Relativamente à linha L2, o estudo dos defeitos foi semelhante, seguindo-se exatamente as mesmas etapas para definir quais os motivos de rejeição que merecem ser estudados. No anexo F, estão representados o diagrama de pareto desta linha e a tabela com todas as quantidades de peças NC produzidas, em ppm. Na Figura 23, encontra-se a evolução dos motivos mais problemáticos desta linha:

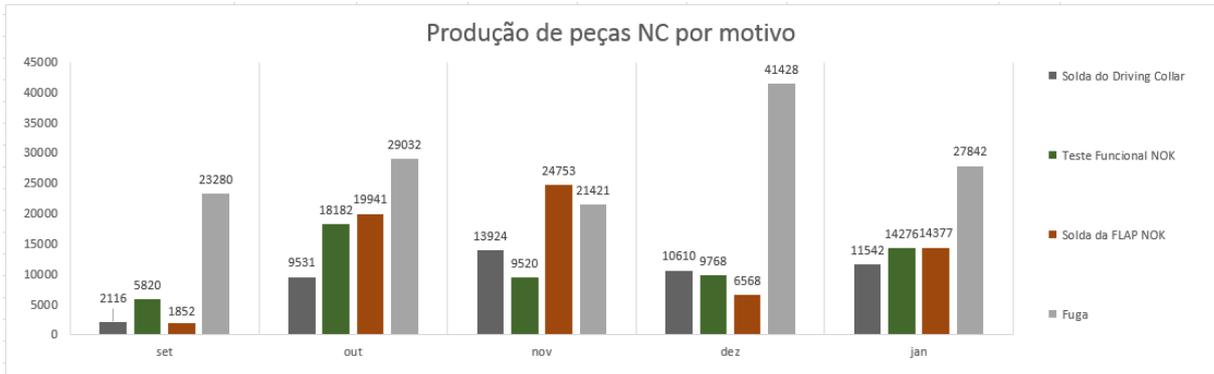


Figura 23 - Evolução da produção de peças NC (ppm) por motivo na linha L2

Como se pode observar, nesta linha o foco dos problemas é diferente da L1. O maior defeito registado é a presença de fugas na realização do teste de estanquidade. Em quase todos os meses, “fugas” foi o principal motivo de material rejeitado, sendo que representa cerca de 34% dos defeitos obtidos nos últimos meses. Este processo deverá ser, portanto, o foco de estudo para a redução de produção de peças NC.

Todos os outros motivos aumentaram ligeiramente no mês de janeiro, o que mostra que nenhuma ação foi implementada de forma a obter uma produção mais eficiente, verificando-se, pelo contrário, uma degradação dos processos.

Descrição dos defeitos

1. Solda da Flap NOK

O processo de soldadura da *flap* já foi explicado anteriormente. Apesar de parecer um processo simples, este exige uma grande precisão para que o laser consiga fazer uma fusão do material no local pretendido, de forma a obter uma junção perfeita da *flap* ao *shaft*. É um processo bastante minucioso, potencialmente sujeito a diferentes falhas, e por isso merece especial atenção.

Uma “solda da *flap* NOK”, como está representado na folha de registos, representada no anexo G, preenchida pelos colaboradores, é uma classificação demasiado genérica face aos diversos defeitos que pode ter. Uma solda da *flap* mal feita pode ser vista como:

- A *flap* ficar descentrada em relação ao *housing*. Este defeito é bastante comum e não pode acontecer porque depois esta peça não vai passar no teste de estanquidade;



Figura 24 - Exemplo de uma peça NC por apresentar *flap* descentrada

- Má soldadura, isto é, por algum motivo o laser não foi suficientemente potente para soldar o material;

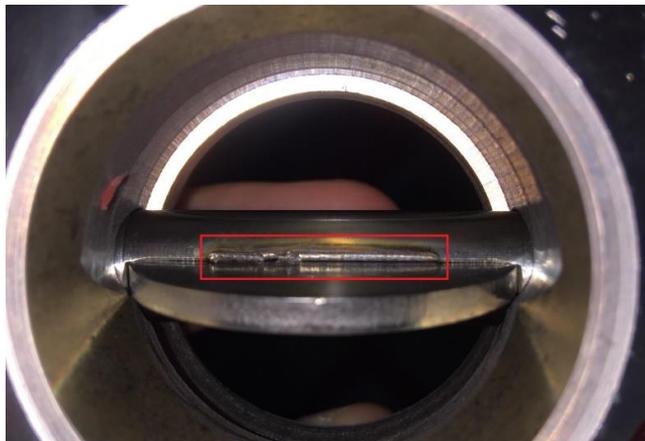


Figura 25 - Exemplo de uma peça NC por má soldadura

- Solda fora de posição, isto é, soldar só na *flap* ou soldar só no *shaft*;



Figura 26 - Exemplo de uma peça NC por soldadura no local errado

Estes defeitos, apesar de originados no mesmo processo são muito diferentes porque as suas causas são também distintas, como será explicado no capítulo seguinte.

2. Fuga

O ensaio de estanquicidade pretende detetar e quantificar uma fuga do produto sujeito ao ensaio. Para cada referência, estão definidos um conjunto de parâmetros, como é o caso do fluxo máximo permitido. O resultado deste ensaio é comparado com os limites de especificação, determinando-se então se a peça é considerada boa para utilização ou não.

Sempre que o valor de fluxo obtido é superior ao requerido, a máquina dá erro e impede o avanço da peça para o processo seguinte. Quando a peça apresenta um resultado não conforme no primeiro ensaio, mas próximo o suficiente da especificação, a peça é recolhida para ser retrabalhada. Este retrabalho consiste no tratamento da peça e, posteriormente, na realização de um novo ensaio. Cada peça pode ser retrabalhada até um máximo de 3 vezes, e caso falhe é rejeitada definitivamente.

Procurou-se relacionar os principais problemas com as referências mais problemáticas para se tentar chegar a uma causa raiz e, futuramente, definir ações de melhoria.

Será importante fazer uma análise da relação da maior causa de peças NC com a referência mais problemática.

Na linha L1, concluiu-se que não existia nenhuma referência que realmente se destacasse e por isso, o problema deveria estar nos processos, no qual se destacou a solda da *flap* NOK. É necessário fazer um estudo mais profundo deste processo para verificar se existe alguma referência que contribua mais para a sua instabilidade. Para isso, procedeu-se à recolha de dados para relacionar o defeito da soldadura com as referências produzidas, de forma a descobrir qual a que mais contribui para as rejeições. No gráfico da figura 27, está representada a produção de peças NC no processo de solda da *flap* por referência, em ppm:

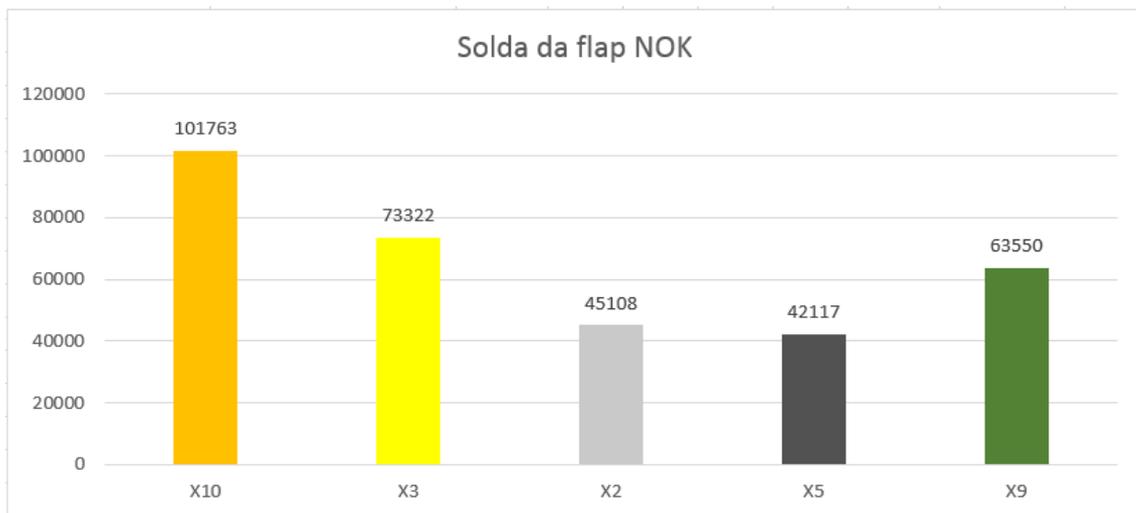


Figura 27 – Produção do processo de soldadura da flap (em ppm)

Pela análise dos dados, é possível verificar que, de todas as referências representadas, destaca-se a referência X10. Nesta linha, pode-se concluir que num ponto de vista geral, deve-se investigar o processo da soldadura da *flap* e perceber quais as variáveis que influenciam os defeitos obtidos e ainda relacionar estas variáveis com a referência X10, para perceber o porquê desta se destacar das demais.

Na linha L2, destacou-se uma referência e um processo que produziam mais peças NC por oportunidade e, portanto, deve-se fazer um estudo mais pormenorizado destes dois para perceber como estes variam. Na Figura 28, está representada a totalidade dos principais problemas obtidos na produção da referência Y4 nos últimos 5 meses, em ppm:

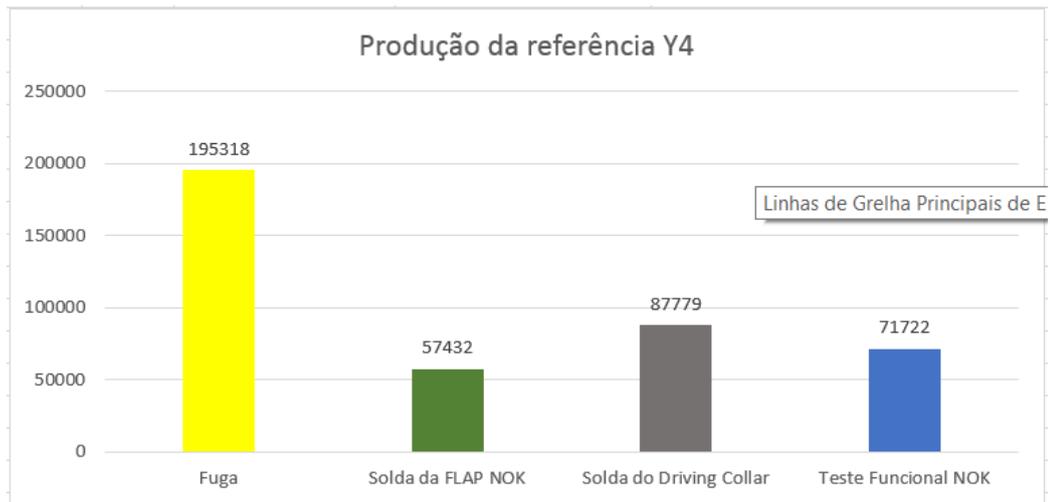


Figura 28 - Produção da referência Y4 (em ppm)

Como se pode observar, na produção desta referência existe um problema que se destaca muito dos outros que é a fuga. Como já tinha sido visto anteriormente, este era o processo mais problemático da linha e por isso, convém ver se este processo é igualmente problemático em todas as referências ou se é apenas uma relação direta do teste de estanquicidade com a referência Y4.

Para isso, procedeu-se ao estudo do teste de estanquicidade para perceber como se comportam as diferentes referências neste processo, como se encontra representado na Figura 29:

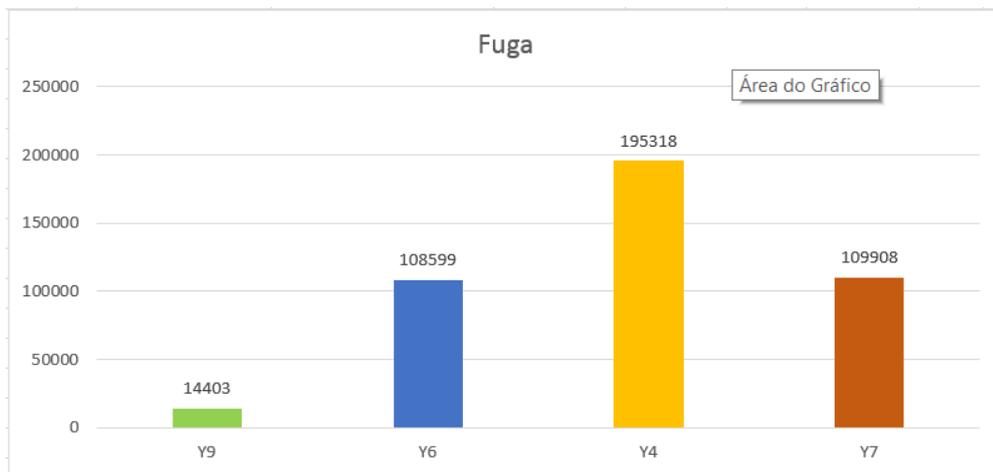


Figura 29 - Produção do teste de estanquicidade por referência (em ppm)

Como se pode observar, a referência que se tinha estudado antes é a que tem mais importância neste defeito, o que confirma a relação negativa entre o teste de estanquicidade e esta referência. É importante rever este processo de uma forma isolada, pela quantidade de rejeições que produz em todas as referências, porém, o foco deverá incidir sobre a referência representada a laranja.

É relevante ainda referir que como o teste de estanquicidade é realizado logo a seguir à soldadura da *flap*, tendo como objetivo medir a quantidade de fluxo que passa com ela aberta e fechada, estes dois problemas podem estar relacionados. A conclusão a retirar desta relação seria que não existe um problema no teste de estanquicidade, mas que é neste processo que é detetada a não conformidade da peça em relação às especificações pré-definidas.

Posteriormente, este tema foi abordado numa das reuniões de equipa, a partir de qual se discutiu o problema e possíveis causas.

Assim, depois de recolhidos os dados fornecidos pela empresa (focados apenas na quantidade de componentes e não no valor monetário), o estudo deve ser focado na máquina de soldadura na linha L1 e no teste de estanquicidade para a referência Y4 na linha L2.

De seguida vai ser revisto o método de medição dos problemas.

3.3.2. Medir

Durante a produção, as peças que não passaram em algum controlo são separadas por caixas e guardadas em compartimentos debaixo das máquinas para, no final da produção dos três turnos, serem contabilizadas e registadas. No final de cada turno, as caixas com o material NC são depositadas numa caixa maior, na qual se vão juntar todas as peças com defeito dos três turnos. As peças são marcadas pelo colaborador com o número da mesma e a causa da rejeição de modo a tornarem a análise mais simples e mais rápida. Assim, de hora em hora, um colaborador preenche a folha de registo que está apresentada no anexo G. Posteriormente, o team leader das linhas deve fazer uma revisão das peças rejeitadas durante os três turnos enquanto verifica as folhas de registo para depois disponibilizar as informações nos ficheiros internos da empresa.

Em termos quantitativos, todos os valores apresentados anteriormente são fidedignos, estando subjacente a confiança na capacidade de decisão dos *team leaders* em definir se uma peça está aceitável ou não. Há processos em que a própria máquina fornece essa informação (teste de estanquicidade ou teste funcional) mas noutros processos, a decisão compete ao próprio operador (como é o caso da solda da *flap* ou do driving colar).

Como já foi referido anteriormente, podem existir várias razões para uma “soldadura da *flap* NOK” o que torna este sistema de registo insuficiente para estudar os defeitos nas linhas, isto é, o registo atual não fornece uma descrição clara/detalhada da razão de a peça ter sido dada como NC, apenas é dado o processo em que falhou. Para além disto, este registo não permite obter os prejuízos incorridos em cada peça, isto é, não é possível obter informação sobre os custos das peças de diferentes referências, ou a diferença de custos entre uma peça rejeitada na máquina de cravação (primeira do processo) ou no teste funcional (última do processo). Em termos de qualidade, esta diferenciação não tem qualquer importância, mas em termos económicos podem ser verificados pesos bastante diferentes.

Foi então criado um sistema de registo no qual se faz um estudo mais descritivo no que toca às causas de obtenção de peças NC e que incluiu o custo de cada componente de cada referência, de forma a perceber as NC associadas a um maior custo.

Nos dados obtidos anteriormente, os problemas estão descritos por máquina, com designações muito gerais, o que para ter uma ideia geral é bastante satisfatório, no entanto, para encontrar causas raiz do problema revela-se insuficiente. Então, de forma a esclarecer esta situação, foi realizada uma reunião com o *team leader*, responsável por declarar as peças rejeitadas e em seguida descarregar a caixa, e foi pedido para que ele realizasse esta tarefa apenas após uma análise diária das rejeições por parte de um dos elementos da equipa. Com isto, pretende-se analisar diariamente todas as peças NC das duas linhas, apontar o problema e a sua causa raiz. Só assim é possível relacionar alguma repetibilidade de um defeito com possíveis ações que tenham conduzido a isso.

O novo sistema de informação permite então:

- Quantificar o custo por referência, ou por motivo, ou por máquina;
- Fazer um estudo mais pormenorizado das causas raiz para os problemas obtidos;

- Indiretamente (como o investigador vai rever todas as peças) permite verificar se alguma peça tenha sido rejeitada por engano, ou possa ser retrabalhada;

Este processo de análise de rejeições e recolha dos dados obtidos estava previsto ser elaborado durante o período integral do estágio, porém tal não foi possível. A empresa, de modo a diminuir o risco de contágio por COVID-19 e promover um ambiente de trabalho seguro, determinou a suspensão do trabalho presencial. Assim, esta análise foi feita apenas durante uma semana.

Nas tabelas 3 e 4 são apresentados os dados, resultantes dessa inspeção, sobre a relação dos postos com a quantidade rejeitada e com o respetivo valor monetário para as linhas L1 e L2, de forma a ser possível observar o impacto de cada um. É importante referir que durante o período de observação foram produzidas 1489 peças na linha L1 e 1224 peças na linha L2.

Apesar do curto período de tempo, foi possível recolher informações que posteriormente se relevaram bastante importantes na definição do foco do estudo. Até então a equipa estava focada nos processos da soldadura e teste de estanquicidade, por serem os processos mais problemáticos em termos de quantidades rejeitadas, por uma larga margem, mas não se prestava tanta atenção à quantidade de solenóides rejeitados após a operação da solda do *driving collar* ao solenoide e a perda de valor que disso resultava. O custo de um solenoide representa, de uma forma geral, cerca de 70% do custo de uma peça com todos os componentes, existindo uma pequena variabilidade, dependendo da referência. Por ser um componente elétrico, tem um custo muito elevado quando comparado com os restantes e por isso deve ser alvo de uma atenção redobrada.

Tabela 3 - Relação de rejeições com postos de trabalho – linha L1

| Posto | Quantidade | % quantidade | Valor (euros) | % dinheiro |
|--|------------|--------------|----------------|--------------|
| Soldadura da Flap | 97 | 48,0% | 1511,52 | 48,0% |
| Soldadura Driving collar do solenoide | 21 | 10,4% | 682,39 | 21,7% |
| Tesde de estanquicidade | 17 | 8,4% | 293,17 | 9,3% |
| Aparafusadora | 6 | 3,0% | 214,48 | 6,8% |
| Testes e Golpes | 32 | 15,8% | 122,71 | 3,9% |
| Soldadura do <i>Driving collar</i> | 7 | 3,5% | 117,31 | 3,7% |
| Máquina de Cravação | 13 | 6,4% | 111,67 | 3,5% |
| Máquina de Rebitagem | 8 | 4,0% | 90,61 | 2,9% |
| Teste EOL | 1 | 0,5% | 6,79 | 0,2% |

Tabela 4 - Relação de rejeições com postos de trabalho – linha L2

| Posto | Quantidade | % Quantidade | Valor (euros) | % Dinheiro |
|---|------------|--------------|---------------|--------------|
| Soldadura <i>Driving collar</i> do solenoide | 15 | 10,7% | 546,15 | 22,7% |
| Soldadura da <i>Flap</i> | 28 | 20,0% | 470,89 | 19,6% |
| Teste EOL | 16 | 11,4% | 398,15 | 16,6% |
| Teste de Fuga | 20 | 14,3% | 351,54 | 14,6% |
| Soldadura <i>Driving collar</i> | 20 | 14,3% | 327,11 | 13,6% |
| Testes e Golpes | 37 | 26,4% | 259,18 | 10,8% |
| Rebitagem | 3 | 2,1% | 41,37 | 1,7% |
| Cravação de componentes | 1 | 0,7% | 10,33 | 0,4% |

Verificou-se que o processo de soldadura do *driving collar* do solenoide, apesar de quantitativamente apresentar valores muito inferiores de rejeição quando comparado com os restantes processos, em termos económicos representa uma parte considerável do valor monetário perdido.

O erro no processo de soldadura do *driving collar* ao solenoide consiste na solda do magneto com um ângulo errado. Cada referência apresenta um ângulo definido para o magneto, com uma tolerância de mais ou menos 1°, o que obriga este processo seja bastante preciso. Na eventualidade do ângulo não estar dentro das especificidades, a peça é considerada NC por não corresponder às condições do cliente.

Na Figura 30 está representado o output do processo em questão:



Figura 30 - Resultado do processo de soldadura do *driving collar* ao solenoide

Os dados encontrados referem-se a uma amostra reduzida e poderiam ter resultado de um comportamento anormal do processo ou das referências produzidas. Contudo, uma recolha de dados dos meses de janeiro e fevereiro possibilitou confirmar que metade do valor perdido estava relacionado com este processo.

4. Apresentação e implementação das propostas de melhoria

A fase analisar do ciclo DMAIC consiste em analisar os dados obtidos de modo a identificar as possíveis causas raiz dos problemas em estudo e como erradicar essa raiz. Esta fase permitiu analisar os processos definidos como mais problemáticos para ser possível compreender as suas variáveis mais instáveis e que, por consequência, potenciam a ocorrência de falhas ou avarias no processo.

Na fase anterior do ciclo DMAIC, pela análise dos dados, foi definido um foco de estudo para cada uma das linhas, relativamente à quantidade de peças NC produzidas, e ainda um problema comum às duas linhas, relacionado com o impacto financeiro das não-conformidades. Assim, os três processos a serem analisados são:

- O teste de estanquicidade da referência Y4, na linha L2;
- O processo de soldadura da *flap*, na linha L1;
- O processo de soldadura do magneto ao solenoide, nas duas linhas.

Apesar do foco e a escolha do trabalho se centrarem na análise às rejeições, através do ciclo DMAIC, encontrou-se mais um problema: falta de organização no posto de trabalho. As razões que levaram à deteção deste problema encontram-se detalhadas mais à frente neste capítulo.

4.1. Teste de estanquicidade da referência Y4

4.1.1. Analisar

Numa das reuniões de equipa, foram apresentados os dados relativos à produção desta referência na linha L2, aprofundados anteriormente, onde ficou claro que esta operação seria a principal causa de ineficácia da linha, ou pelo menos era nesta fase em que essa ineficácia era detetada. Tendo em conta que estas linhas foram transferidas e ainda não havia um conhecimento significativo da máquina, não se conseguia definir uma causa específica. Esta realidade aliada ao elevado número de peças que não passam no teste de estanquicidade motivou a discussão de algumas possíveis causas que pudessem influenciar o teste, organizando-as num diagrama de Ishikawa.

O diagrama de Ishikawa do teste de estanquicidade encontra-se na Figura 31:

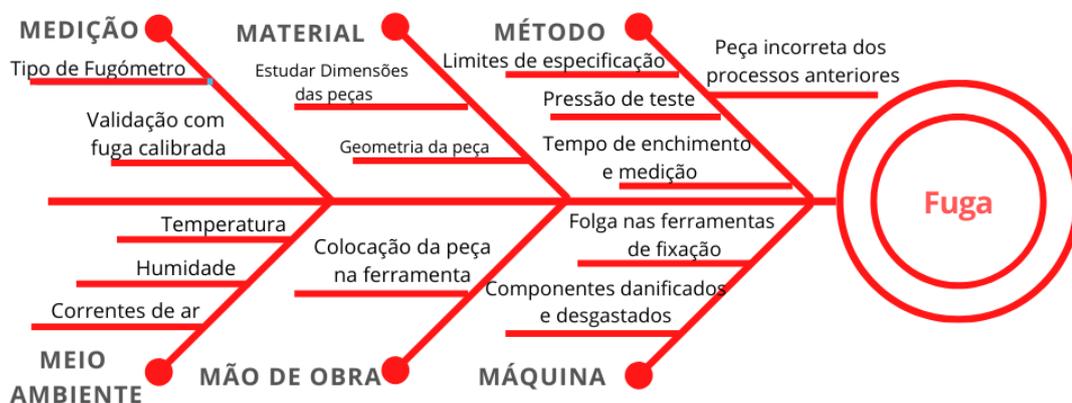


Figura 31 - Diagrama de Ishikawa do teste de estanquicidade

Depois de organizadas as possíveis causas de ocorrência de fuga, foram-se implementando algumas ações para confirmar a influência destas na variabilidade do processo.

Do ponto de vista do meio ambiente e do sistema de medição, não se estudou nenhuma das hipóteses uma vez que a equipa definiu como prioridade estudar o material, a máquina e o método. O objetivo é tornar este processo mais estável para, posteriormente, proceder a uma investigação mais aprofundada dos outros tópicos.

Primeiramente, procedeu-se ao estudo das dimensões e concentricidade de um *housing* desta referência, de forma a perceber se esta componente, que vem de um fornecedor externo, está dentro das especificações. Verificou-se que o componente estava dentro dos limites e que esta não é a causa dos problemas identificados.

De seguida, foi colocada a hipótese de o problema estar relacionado com danos ou com golpes no material, e por isso procedeu-se à análise de duas peças, uma OK e outra NC. De forma a completar o estudo, fez-se um corte seccional para entender se havia alguma deformação que não se conseguisse detetar com uma inspeção visual. Depois de cortadas e analisadas, concluiu-se que não há diferença significativa.

Depois de verificar que o material não apresentava qualquer variação significativa no teste de estanquicidade, optou-se por mudar o foco do estudo para a máquina. Nesta fase decidiu-se verificar as ferramentas desta referência. Como os tamanhos e geometria das peças variam entre referências, estas têm uma ferramenta própria ajustada para que o processo seja rigoroso. Foram feitas algumas operações de ajuste da ferramenta para melhorar a vedação da peça, reduzindo a folga de modo a evitar fugas de ar no equipamento durante o ensaio, importante para o teste de fluxo. Porém, esta ação não evidenciou grandes melhorias no processo.

Depois de implementadas todas estas ações e não haver uma conclusão ou identificação da causa raiz, foi feita, numa das reuniões da equipa, uma análise ao método deste processo recorrendo à metodologia dos 5 Porquês. Esta metodologia tem como objetivo chegar à causa raiz de um problema. O diagrama que a representa encontra-se na Figura 32.

A partir desta metodologia, facilmente se percebeu que a estratégia adotada não tinha sido eficaz, uma vez que apesar do problema ser detetado no teste de estanquicidade, a peça já pode vir com defeito do processo anterior. Assim sendo, centrou-se a atenção no processo de soldadura da *flap* para verificar se o mesmo funcionaria de forma eficiente. Se não fosse esse o caso, a equipa continuava a estudar as causas definidas e procurar mais algumas que não tivessem sido mencionadas no *brainstorming* de forma a conseguir reduzir a produção de peças que reprovam no teste de fuga. Se o processo de soldadura da *flap* não for eficaz, deve-se então definir ações para o corrigir, e assim perceber a sua influência no teste de estanquicidade.

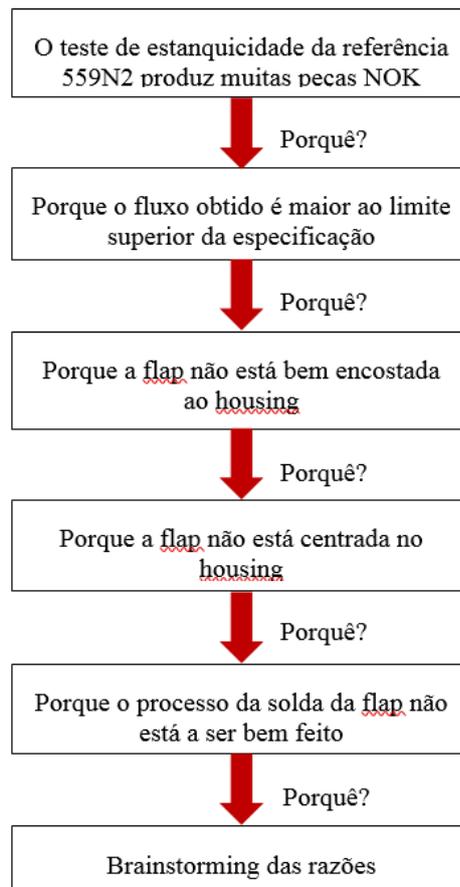


Figura 32 - Método dos 5 Porquês

4.2. Processo de soldadura da *flap* - linha L2

4.2.1. Analisar

O método do processo de soldadura da *flap* é igual em todas as referências, isto é, as instruções de controlo para os colaboradores e as ordens de trabalho são exatamente iguais. O que muda é a geometria e o tamanho das componentes por referência. Esta diferença de tamanhos vai influenciar o objetivo deste processo, que consiste em soldar a *flap* de forma a que esta fique bem centrada no *housing*. Devido às exigências do cliente, a referência Y4 apresenta um limite superior de fluxo mais baixo e o teste é feito a uma pressão mais alta. Estes requisitos tornam o teste de estanquicidade mais exigente. Por isso, é ainda mais relevante reduzir a descentragem da *flap* para eliminar a folga entre a *flap* e o *housing*. O objetivo de melhoria passa por tornar a soldadura da *flap* desta referência mais precisa, de forma a evitar a folga causadora de peças NC.

Assim, optou-se por analisar o processo de soldadura da *flap* em geral. Para tal, foi realizada uma sessão de *brainstorming* na qual se definiram todos os *inputs* do processo, identificando todas as causas possíveis de variabilidade do sistema das duas linhas. De seguida, construiu-se um diagrama de Ishikawa do processo de soldadura da *flap* (igual para as duas linhas de produção), representado na Figura do anexo H. Estas ideias foram divididas em seis categorias:

- Meio ambiente – como os fatores relativos aos aspetos ambientais podem influenciar;
- Material – como a matéria prima (geometria e dimensões) podem influenciar;
- Método – como a forma de iniciar o processo pode influenciar;

- Mão de obra - como as ações dos colaboradores para iniciar o processo podem influenciar;
- Máquina – como as ferramentas e características da máquina podem influenciar;
- Medição – como os métodos para definir se uma peça está boa podem influenciar;

O diagrama de Ishikawa referente a uma Solda da *flap* NOK encontra-se representado no anexo H, estando marcadas com um “visto” todas as causas que foram analisadas durante o período de dissertação. A análise das causas foi definida pelo FMEA como vai ser explicado posteriormente.

Impacto e Ordenação das causas raiz

Depois de identificadas todas as potenciais causas de obtenção de defeitos no processo de soldadura, foi necessário proceder à organização das mesmas, consoante a sua importância e o seu impacto na produção.

Atendendo à quantidade de causas identificadas, e não sendo possível verificar todas, tornou-se fundamental selecionar aquelas que apresentam um maior impacto no processo e que podem garantir uma melhoria significativa após a sua resolução.

Para isso, aquando do estudo deste processo foi realizada, juntamente com a equipa, uma atualização do FMEA, isto é, da análise dos modos de falha e efeitos do processo de soldadura. A partir desta reunião, tornou-se possível identificar as causas que mais recorrentemente conduzem a defeitos de soldadura, pela utilização de uma matriz causa-efeito.

Na realização da matriz causa-efeito foram utilizadas como variáveis de entrada as causas que se definiram como mais relevantes e de que já se tinha conhecimento da ocorrência nas linhas. Por exemplo, numa fase inicial do projeto não seria pertinente estudar como as condições do meio ambiente podem afetar o processo porque concordou-se que isso seria objeto de estudo numa fase mais estável da linha. Procurou-se ao máximo afunilar as causas a analisar, de forma a concentrar a análise.

De todas as causas possíveis de erro identificadas, estas apresentam impactos diferentes na produção, isto é, apresentam diferentes consequências. Em alguns casos a consequência de um erro é a interrupção do fluxo normal da linha (podendo ou não ter outras consequências), isto é, a perda de algum tempo no funcionamento normal da linha, em outros consegue-se identificar imediatamente que a soldadura não foi feita de forma correta, originando rejeição no processo de soldadura e por último, os defeitos podem ser apenas detetados no teste de estanquicidade (a peça só é dada como NC quando apresenta fuga).

Como já foi referido anteriormente, o impacto e ordenação dos problemas das linhas é feito através do RPN, que resulta da multiplicação de três parâmetros que são avaliados individualmente: severidade, probabilidade de ocorrência e probabilidade de deteção. A classificação de cada um dos parâmetros foi feita pela equipa com base na sua experiência do processo tecnológico (identificando as causas), da utilização do produto (severidade), do conhecimento dos diferentes processos (ocorrência) e análise da linha de produção (deteção).

Optou-se por fazer uma matriz causa efeito para cada uma das linhas porque apesar das falhas serem semelhantes, a sua avaliação de risco pode ser bastante diferente, uma vez que a linha 11 é mais instável. Este estudo foi feito para as duas linhas, e na tabela 5 está representada a matriz de priorização da linha L2, em estudo.

Tabela 5 - Matriz de priorização da linha L2

| Causa da Falha | Severidade | Ocorrência | Deteção | RPN | Efeito da Falha |
|--|------------|------------|---------|-----|--|
| Ferramenta de fixação da <i>flap</i> danificada | 6 | 4 | 8 | 192 | Solda da <i>Flap</i> NC/ leakage NC |
| Cordão de soldadura insuficiente | 8 | 4 | 6 | 192 | Solda da <i>Flap</i> NC |
| Ferramenta de fixação do <i>housing</i> danificada | 5 | 4 | 8 | 160 | Solda da <i>Flap</i> NC/ leakage NC |
| Resíduos de fumo | 8 | 2 | 8 | 128 | Solda da <i>Flap</i> NC |
| Mau funcionamento da fonte de laser | 8 | 6 | 2 | 96 | Solda da <i>Flap</i> NC |

Seguidamente faz-se uma análise de todas as principais causas identificadas no FMEA, à exceção dos resíduos de fumo, que a equipa não considerou oportuno no momento.

Ferramentas de fixação danificadas:

Na linha L2, após o processo de rebtagem, coloca-se o componente obtido juntamente com a *flap* numa ferramenta de fixação. Depois de concluído este processo, a mesa giratória roda e a soldadura ocorre dentro de um compartimento fechado. Aí, a peça é marcada com um feixe de laser, depois o braço onde a ferramenta está presa roda para permitir a soldadura do outro lado, e volta a rodar para a primeira posição para completar a soldadura desse lado. De seguida, a porta do compartimento abre e peça retorna o percurso na linha. Esta ferramenta de fixação é importante, desenhada para cada referência, para que durante o processo de soldadura a peça fique bem posicionada e que os pinos que a compõe façam pressão sobre a *flap* de forma a que esta fique centrada e encostada ao batente do *housing*.

Para se ter uma melhor perceção do processo e de como as ferramentas de fixação seguram a peça ou podem influenciar o resultado, encontra-se representada no anexo J a máquina de soldadura da *flap* da linha L2.

Assim, os pinos que seguram a peça devem estar numa posição correta para que a peça fique bem presa, sem possibilidade de qualquer folga. Isto é fundamental, uma vez que o feixe de laser vai atuar na posição programada e a existência de alguma folga faz com que a máquina não consiga soldar no local certo e que, por conseguinte, não haja uma fusão completa da *flap* com o *shaft*.

É ainda fundamental que os pinos que encostam na *flap* estejam a fazer pressão sobre esta contra o *housing* porque é isso que vai definir o posicionamento da *flap*, possibilitando o encosto desta no *housing*. Quando isto não acontece, resulta numa peça com a *flap* ligeiramente descentrada e este problema pode não ser detetado quando analisada a peça visualmente, mas acaba por resultar em fuga no teste de estanquicidade.

Como a referência Y4 é uma das referências mais produzidas na linha, é normal que esta ferramenta esteja mais sujeita a uma elevada pressão e temperatura, provocando um elevado desgaste e corrosão dos pinos que a compõe. Esse desgaste é visível nas Figuras 33 e 34.



Figura 34 - Fotografia dos pinos desgastados e corroídos



Figura 33 – Fotografia da ferramenta de fixação danificada

Cordão de soldadura insuficiente:

Durante o período de análise dos problemas desta linha foram feitos vários testes na variação dos parâmetros de soldadura, de forma a tentar encontrar uma resposta para os defeitos obtidos. No início pensava-se que um comprimento do cordão de soldadura maior conduzia a uma melhor solda da *flap* porque ao visualizar a peça obtida, a solda dos dois componentes era mais visível. Porém, com a experiência e com a visualização dos erros, o conhecimento dos processos e das máquinas vai aumentando e começou-se a perceber que a definição de um cordão de soldadura maior se tornava ineficaz quando testada no processo seguinte. No teste de estanquicidade, notou-se que a rejeição de peças no teste de fluxo era maior em peças com um cordão de soldadura mais largo. O mais indicado nesta situação seria fazer um desenho de experiências na qual se faz variar o parâmetro em estudo (neste caso o cordão de soldadura) numa amostra com dimensão adequada e verificar como os resultados divergiam. Porém, devido à situação de instabilidade que se vive na linha, optou-se por uma resolução mais prática e que levasse a resultados mais rápidos. Assim, foi levado a cabo a definição de um valor de comprimento do cordão de soldadura menor, mas ainda dentro das especificações do cliente, pois conduzia a melhores resultados.

Mau funcionamento da fonte de laser:

As duas linhas partilham a mesma fonte de energia, ou seja, todos os processos de soldadura nas duas linhas estão ligados à mesma fonte, por isso é necessário rever as suas condições e verificar se esta está em bom estado.

Depois de analisada a fonte de laser, percebeu-se que esta já é bastante antiga e que já não se encontra no estado necessário para funcionar de forma capaz, o que faz com que muitas peças sejam consideradas NC porque o laser não foi capaz de soldar o material com a potência devida. Durante um período de observação das linhas, notou-se que durante a produção havia algumas peças que saíam esporadicamente com uma solda fraca, isto é, o cordão e a posição de soldadura estavam bem, simplesmente a potência do laser não era suficiente para soldar o material. Esta defeito ocorria de forma irregular, sem afetar o funcionamento normal. Posteriormente descobriu-se que isto acontecia por falhas na fonte de alimentação.

4.2.2. Melhorar

Esta fase da metodologia DMAIC consiste em definir propostas de melhoria para os problemas identificados anteriormente. Estas melhorias têm como objetivo eliminar as causas dos defeitos, levando à redução da quantidade de rejeições produzida nas duas linhas.

Como foi visto anteriormente, descobriu-se que parte dos defeitos obtidos neste processo se deviam às ferramentas desta referência que apresentavam alguns sinais de desgaste, o que resultava na obtenção de peças defeituosas que iriam ser detetadas no teste de estanquicidade.

De forma a corrigir isto, procedeu-se ao aperto dos pinos da ferramenta que segura a peça e que deve forçar a *flap* a manter uma posição centrada. Observou-se que com o uso e desgaste, estes pinos tinham-se soltado e que por isso já não estavam a desempenhar a função devida. Procedeu-se ao seu aperto e centragem, e observou-se instantaneamente uma melhoria nos resultados obtidos, porque agora a *flap* já não era soldada fora de posição.

Aquando disto, também se observou os pinos desgastados e corroídos, como se verifica na Figura 33, e procedeu-se ao pedido de compra de pinos novos. Perante esta situação, a manutenção preventiva deve ser reavaliada de modo a que estes componentes sejam substituídos atempadamente.

Depois de recebidos os pinos, procedeu-se à substituição dos antigos pelos novos, obtendo-se a ferramenta representada na Figura 35:



Figura 35 - Fotografia da ferramenta de fixação com pinos novos

Cordão de soldadura insuficiente:

Relativamente a este parâmetro, depois de verificar que o comprimento do cordão de soldadura apresenta uma relação com a probabilidade de as peças não passarem no teste de fuga, procedeu-se a uma parametrização deste comprimento para valores mais baixos, de forma a obter um processo mais eficiente.

Mau funcionamento da fonte de laser:

Relativamente à fonte de laser, entrou-se em contacto com o fornecedor para pedir o orçamento de uma fonte de laser nova e posteriormente, procedeu-se ao preenchimento de uma requisição de compra. Este pedido de compra encontra-se em análise.

Após estas ações, espera-se que os resultados melhorem significativamente, apesar de não anular completamente a produção de peças NC. Para isso, torna-se necessário fazer um estudo mais profundo da máquina e contactar os fornecedores da mesma e os colegas da Alemanha, de onde a linha foi retirada.

4.2.3. Controlar

Esta fase da metodologia DMAIC tem como objetivo avaliar as ações que foram feitas para melhorar os processos e verificar se estes estão a ser implementados continuamente e de forma correta.

Neste caso, esta fase passa por verificar como evoluiu a produção da referência Y4 ao longo dos meses, após a implementação das melhorias nas ferramentas de fixação desta referência.

A primeira melhoria que consistiu no aperto das ferramentas foi executada nos finais de março e a segunda que consistiu na compra e troca dos pinos ocorreu em maio. Para se perceber o seu impacto na linha, decidiu-se apresentar a evolução da quantidade de rejeições ao longo dos meses no processo de soldadura da *flap* e no teste de estanquicidade.

Na tabela 6 representam-se os dados de produção desta referência nos dois processos estudados durante este ano de produção. Assim, é possível observar a realidade produtiva vivida antes da implementação das melhorias, mais concretamente em janeiro, fevereiro e março e após as suas implementações. Pode-se observar uma redução de rejeições em abril, após o aperto da ferramenta, e uma redução ainda mais evidenciada em maio, após a substituição dos pinos.

Tabela 6 - Dados da produção da referência Y4 antes e após implementação de melhorias

| Produção da referência Y4 | | | | | | |
|----------------------------------|------|--------------------------|----------|----------|--------------------------|-------------------------|
| | Fuga | Solda da <i>Flap</i> NOK | Produção | PPM fuga | PPM solda da <i>Flap</i> | Valor económico perdido |
| Janeiro | 184 | 43 | 4363 | 42173 | 9856 | 4047,41€ |
| Fevereiro | 84 | 108 | 4953 | 16959 | 21805 | 3423,36€ |
| Março | 78 | 109 | 4198 | 18580 | 25965 | 3334,21€ |
| Abril | 15 | 55 | 4804 | 3122 | 11449 | 1248,10€ |
| Maio | 25 | 20 | 5215 | 4794 | 3835 | 802,35€ |

De forma a obter uma ideia mais clara da evolução das rejeições ao longo do tempo, encontram-se representados na Figura 36, a evolução da obtenção de peças NC, em ppm, durante três períodos divididos pelas melhorias implementadas. Um primeiro período, composto pelos três primeiros meses do ano, onde se verificam as rejeições obtidas em ppm, antes da implementação das melhorias. De seguida, o segundo período onde estão representados os valores da produção após a primeira melhoria e por fim o terceiro período, que representa a produção depois de apertada a ferramenta e trocados os pinos.

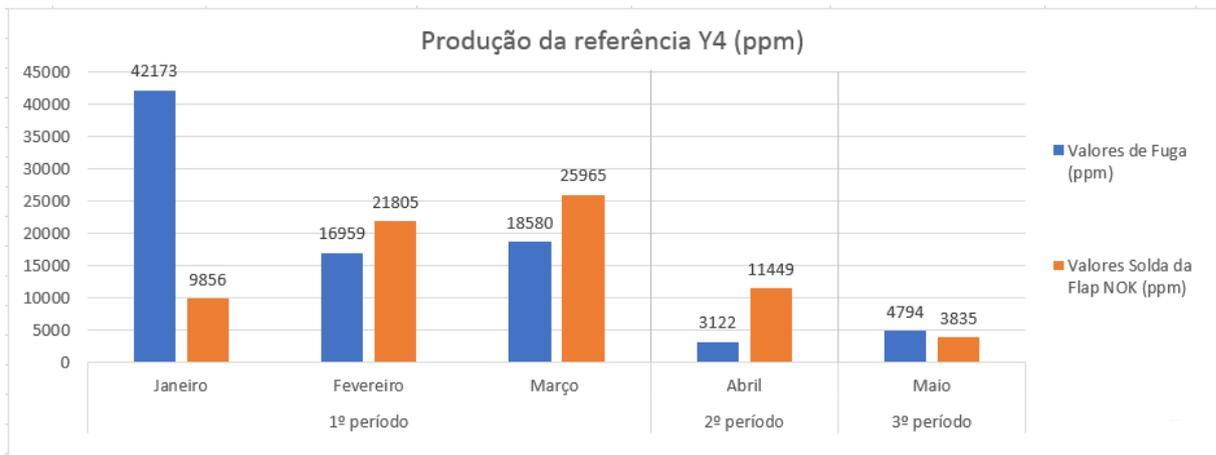


Figura 36 - Evolução da produção da referência Y4 (em ppm)

Após a análise da tabela e do gráfico, é fácil perceber que houve uma melhoria significativa na produção da referência mais problemática da linha. Após a primeira ação de melhoria, obteve-se uma redução significativa na produção de peças que chumbavam no teste de estanquicidade de uma média de 25600 ppm (obtida nos três primeiros meses) para 3122 ppm em abril, o que veio comprovar o estudo feito pela equipa de que as peças apresentavam fuga pela falta de centragem da *flap* em relação ao *housing*.

Em relação ao processo de soldadura, o número de peças mal soldadas diminuiu de 19240 ppm (obtida nos três primeiros meses) para 11449 ppm em abril. A segunda melhoria, que foi adotada em maio, veio reforçar a ideia de que a verificação das ferramentas de fixação e dos pinos deve ser feita de uma forma periódica (algo que não acontecia), uma vez que número de peças NC obtidas no teste de estanquicidade e na solda da *flap* reduziu, para 4794 ppm e 3835 ppm em maio, respetivamente. O aperto das ferramentas aliada à substituição dos pinos, trouxe uma recuperação de mais de 25000€ em maio, em relação a março.

Sendo que esta é a referência mais produzida na linha, é uma grande recuperação que se irá verificar todos os meses e que ao fim do ano representará uma descida grande no valor rejeitado. Fazendo uma média do valor económico perdido nos três primeiros meses e fazendo uma estimativa de que estes valores se mantinham até ao final do ano, resultava uma obtenção de um valor económico perdido de 43216€ ao fim do ano. Considerando agora que com as melhorias implementadas nas ferramentas da máquina, o processo se mantém constante ao longo do ano (de junho até dezembro) e com valores de produção semelhantes aos obtidos em maio, resulta numa obtenção de 17652€ de material perdido em peças NC. Estes resultados mostram uma redução de quase 26000€ de valor económico perdido nos restantes 7 meses do ano.

Para além deste ganho em termos económicos e de qualidade, estas ações de melhoria permitiram uma observação das ferramentas de todas as referências nas duas linhas e justificaram a compra de novos pinos para todas aquelas que apresentavam mais sinais de desgaste, o que, tomando esta referência como base de comparação, poderá trazer ganhos significativos.

4.3. Processo de soldadura da *flap* - linha L1

4.3.1. Analisar

A análise ao processo de soldadura da *flap* na linha L1 é muito semelhante à análise feita anteriormente.

Apesar de as duas linhas apresentarem algumas diferenças nesta máquina, especificamente no processo de soldadura da *flap*, as causas representadas no diagrama Ishikawa são as mesmas e por isso este é exatamente igual.

Para esta linha, também se realizou um FMEA com as causas dos problemas ordenadas pela urgência das mesmas em serem tratadas. A tabela do FMEA encontra-se representada no anexo I, onde se verifica que também se destacam que as ferramentas de fixação dos componentes se encontram danificadas, tal como se sucedia na linha L2.

4.3.2. Melhorar

Tal como foi explicado anteriormente, das melhorias observadas na referência mais problemática da linha L2, ressaltou a necessidade de reparar os apertos das peças de fixação das ferramentas e de observar se os pinos se encontravam desgastados.

Perante este cenário, procedeu-se à alteração dos pinos de fixação das ferramentas de algumas referências, bem como ao seu aperto com diferentes alturas, de forma a garantir que o *housing* encostava bem na ferramenta, o que garantiria a centragem da *flap*.

No estudo deste processo identificou-se a referência mais problemática e por isso esta foi uma das referências em que se depositou maior atenção. Para além desta, estas melhorias foram implementadas em mais duas referências que mostravam sinais de desgaste e folgas.

4.3.3. Controlar

Na Figura 37, pode-se observar a evolução da produção, em ppm, das três referências nas quais se implementaram as propostas de melhorias e o impacto que estas tiveram na linha. Na tabela 7 encontram-se os mesmos valores de produção tabelados, associados ao impacto financeiro que destes advêm:

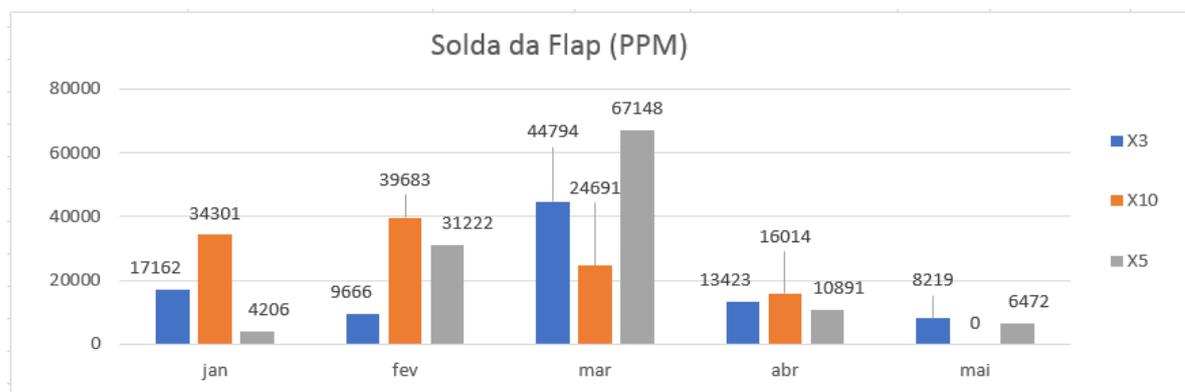


Figura 37 - Evolução do processo de soldadura da flap de três referências

Tabela 7 - Dados de produção de três referências e o seu impacto financeiro na linha

| Solda da Flap (ppm) | | | | |
|----------------------------|-------|-------|-------|-------------------------|
| | X3 | X10 | X5 | Valor Económico Perdido |
| janeiro | 17162 | 34301 | 4206 | 1 347,78 € |
| fevereiro | 9666 | 39683 | 31222 | 1 903,41 € |
| março | 44794 | 24691 | 67148 | 2 806,61 € |
| abril | 13423 | 16014 | 10891 | 716,36 € |
| maio | 8219 | 0 | 6472 | 206,22 € |

Após a análise do gráfico da figura 37, verifica-se que houve uma melhoria significativa na produção das três referências onde foram renovadas as ferramentas de fixação. Após as ações de melhoria, obteve-se uma redução significativa na produção de peças NC no processo de soldadura da *flap* de uma média de 21013 ppm, 31750 ppm e 36516 ppm (obtida nos três primeiros meses) para 8219 ppm, 0 ppm (houve apenas produção de 150 peças desta referência sem a obtenção de qualquer peça NC no processo de soldadura da *flap*) e 6472 ppm, para as referências X3, X10, X5, respetivamente. Relativamente ao valor económico perdido, pela observação da tabela 7, na produção destas três referências houve uma redução de 2600 euros de março para maio.

Seguindo o mesmo raciocínio que se apresentou anteriormente, e fazendo uma extrapolação dos valores obtidos em abril e maio até ao final do presente ano, verifica-se uma redução do valor rejeitado em peças NC de cerca de 18728 euros.

4.4. Processo de soldadura do *driving collar* ao solenoide

4.4.1. Analisar

A constante troca de referências verificada nos dados do anexo A e a quantidade de ajustes nas máquinas que são necessários poderão estar relacionados com os solenoides rejeitados no processo de soldadura do *driving collar* ao solenoide. O defeito que mais motiva esta rejeição é a obtenção de solenoides com ângulo errado, fora das especificações do cliente. O sistema observado nas duas linhas é bastante diferente pelo que estes devem ser analisados separadamente.

Os ajustes são pequenas intervenções de um colaborador para correções de algum problema, sendo necessário parar a produção, mas sem ser contabilizado como manutenção. Os ajustes têm como objetivo corrigir problemas na máquina que comprometam a qualidade do produto final como por exemplo: contactos de fixação, instabilidade na fixação da peça, bloqueamento de componentes e ferramentas.

Na linha L1, o processo de soldadura do *driving collar* ao solenoide é bastante mais eficaz uma vez que esta máquina apresenta um sistema mais preciso, como vai ser explicado, levando a um número de peças rejeitadas mais reduzido quando comparada com a outra linha. Nesta máquina coloca-se o solenoide e o *driving collar* por cima dele. Posteriormente, a mesa roda segundo os parâmetros definidos para a referência a produzir e durante o processo, um pequeno braço estica, bate na superfície lateral do *driving collar* e segura-o para que este seja soldado na posição correta, tal como representado na Figura 38:



Figura 38 - Fotografia da máquina de soldadura do driving collar ao solenoide

A máquina em questão é constituída por duas mesas giratórias, tal como a representada na Figura. O facto de os batentes serem todos fixos e de apenas a mesa apresentar movimentos de rotação, faz com que o seu movimento é que dite o ângulo a que o *driving collar* vai soldar. Quando se troca de referência, a mesa assume logo a posição base e roda segundo um ângulo de acordo com os parâmetros pré-estabelecidos da máquina, e a partir daí nunca mais roda e solda sempre na mesma posição.

Posto isto, estas mesas devem ser bem precisas ao retomar a posição base na troca de referência, para que se consiga produzir dentro das especificações do cliente. Devido à constante produção, às trocas de referência e provavelmente a algum uso mais brusco por parte dos colaboradores, é normal que as mesas se desgastem com o tempo. Este desgaste leva a que as mesas se soltem e comecem a ganhar alguma folga que é suficiente para que na troca de referência, as mesas não consigam atingir a posição base ideal para a produção da nova referência, o que vai conduzir à necessidade de ajustes nos parâmetros.

A primeira peça produzida serve como base para se perceber quanto é que se tem de aumentar ou diminuir nos parâmetros de ajuste da máquina. O que acontece muitas vezes é que os colaboradores, depois de alterarem as ferramentas para fazer o *setup*, em vez de produzirem uma peça e em caso de defeito, chamar um técnico ou alguém com conhecimento da máquina para verificar os parâmetros, procedem à produção de três ou quatro peças NC. Isto conduz a uma rejeição de quase 100 euros apenas no *setup* da máquina. Outro problema é a medição incorreta do ângulo por parte dos colaboradores. O medidor de ângulos, partilhado nas duas linhas, é manual e a peça tem de estar numa posição centrada para se fazer a sua leitura corretamente, o que nem sempre acontece. Para além disso, este medidor apresenta alguma folga e que pode levar à interpretação errada da leitura do ângulo. O medidor utilizado encontra-se representado no anexo K.

Na Figura 39, encontra-se representado o medidor de ângulos a obter valores algo diferentes, devido à folga inerente, para a mesma peça. Na primeira medição está marcado 44° e na segunda, a mesma peça está marcada com 47°.



Figura 39 - Fotografias dos valores obtidos no medidor de ângulo da mesma peça

Nesta linha apenas se medem os ângulos das primeiras peças produzidas no arranque da referência, sendo que caso a máquina descalibre novamente a meio da produção, estes defeitos apenas vão ser detetados no teste final. Quando isto acontece, é chamado um técnico para fazer uma intervenção na máquina.

Na linha L2, o processo de soldadura do *driving collar* ao solenoide não é feito numa máquina própria, mas sim na mesma máquina que a soldadura da *flap* e a soldadura do *driving collar* ao *housing*. O processo nesta linha é bastante diferente e o seu mecanismo é menos preciso, o que leva à produção de mais solenoides NC. O batente que tem como objetivo segurar o *driving collar* e definir a produção com o ângulo correto, encontra-se desgastado e numa posição incorreta, sendo necessária uma revisão deste processo.

O sistema atual apresenta dois pontos de ajuste, o que torna o processo mais suscetível à falha pelo aparecimento de mais folgas numa máquina que deve operar com uma precisão máxima. Como já foi referido, cada referência apresenta um ângulo diferente especificado pelo cliente e neste sistema, este ângulo é definido pelas ferramentas do *driving collar*. Como se pode verificar na Figura 40, as ferramentas responsáveis pela produção dentro das especificações encontram-se bastantes desgastadas:



Figura 40 - Fotografias das ferramentas danificadas

As rejeições na L1 linha são maioritariamente obtidas no *setup* das referências, enquanto que na linha L2, as rejeições resultam de problemas que vão surgindo na linha devido à falta de precisão deste processo. Isto leva à necessidade de medição do ângulo de todos os produtos que saem deste processo.

4.4.2. Melhorar

Como forma de minimizar os solenoides NC, optou-se por separar as duas linhas uma vez que as causas de defeitos eram diferentes.

Na linha L1, o processo de soldadura de *driving collar* ao solenoide, como já foi explicado, é de maior confiança e mais seguro, daí a obtenção de menos solenoides rejeitados. Como a maior parte dos defeitos obtidos aconteciam no *setup* de uma referência, definiram-se duas estratégias distintas para se conseguir contornar o problema:

- O *setup* da referência nesta máquina deveria ser realizado por alguém responsável e com conhecimentos para mudar os parâmetros da máquina. Isto porque, caso a máquina descalibre, é necessário a sua alteração para que não se produza com ângulo fora das especificações;
- Caso não seja possível, os colaboradores estão encarregues de iniciar a produção da nova referência, e podem produzir duas peças. Se ambas saírem com ângulo errado, deve-se parar imediatamente a produção e chamar um técnico para fazer os ajustes necessários. Este tipo de formação foi passado aos *team leaders* que por sua vez fizeram chegar aos colaboradores de forma a evitar a produção de 4 ou 5 peças NC no arranque de cada referência.

De forma a corrigir os erros dos colaboradores na medição dos ângulos, foi feita uma instrução de controlo na qual se explica como se deve medir o ângulo do *driving collar*. Isto tem como objetivo diminuir o encaminhamento de peças conformes para rejeições, evitando assim um desperdício monetário e material desnecessário.

Esta foi uma solução temporária porque a longo termo pretende-se mudar o medidor de ângulos. Depois de debatido esse assunto em equipa, falou-se com o fornecedor para se conhecerem novos medidores de ângulos mais precisos e de mais fácil manuseamento, chegando-se a uma solução. Posteriormente, fez-se um *purchase request* ao responsável máximo das linhas, que se encontra em análise.

Na linha L2, a situação encontrada é mais problemática, como já foi explicado. Com vista à melhoria do processo, contactou-se novamente o fornecedor da máquina para que fizesse uma visita à linha para se discutirem soluções para o problema encontrado. Depois de explicados os defeitos observados e a quantidade de peças NC produzidas, optou-se pela alteração do sistema de soldadura do *driving collar* ao solenoide.

O objetivo do novo sistema seria que a peça ficasse bem presa e que a definição do ângulo a produzir fosse feita diretamente na máquina, ou seja, um sistema que permitisse produzir qualquer ângulo (já a pensar em possíveis novas referências que se possam vir a produzir). Como se pode observar na Figura 41 e 42, o novo sistema iria apresentar apenas um ponto de ajuste com uma base melhor fixada, de forma a evitar pequenas descalibrações que possam afetar o processo. Como referido, a seleção do ângulo seria feita através do parafuso na base, sendo possível selecionar qualquer ângulo que se queira produzir. Este sistema deve ser mais flexível e em vez de necessitar de várias ferramentas de *driving collar*, uma para cada referência, deve contar apenas com um mecanismo de ajuste que sirva para todas as referências.

A peça representada tem como objetivo fixar a posição de soldadura de forma a garantir que esta não ganhe folga ou saia da posição durante a produção.

Este esquema é apenas ilustrativo da ideia, sendo que o sistema final deverá ser devidamente desenvolvido e dimensionado.

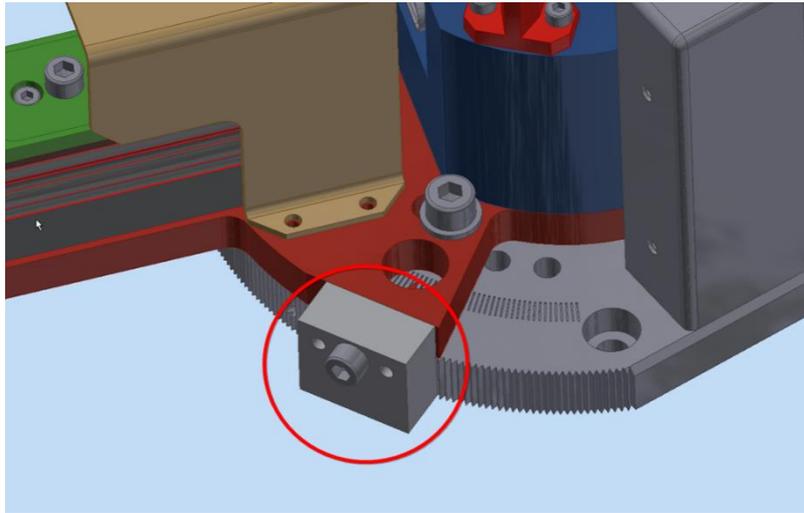


Figura 41 - Fotografia do novo sistema de soldadura do driving collar ao solenoide

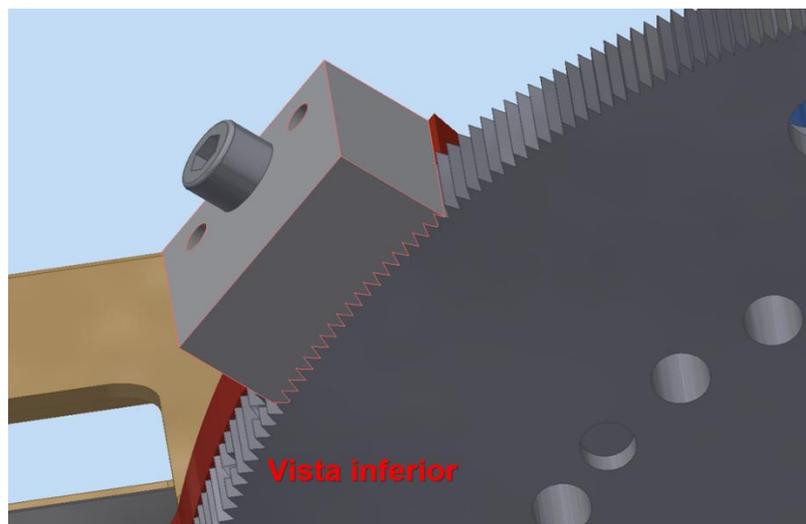


Figura 42 - Fotografia da vista inferior do processo de soldadura do driving collar ao solenoide

4.4.3. Controlar

As melhorias impostas na linha L1 foram verificadas quase instantaneamente pois as peças NC obtidas no arranque das referências reduziram bastante. Como já foi referido anteriormente na secção 3.3.2, durante a análise de uma semana, verificou-se que 21 peças foram rejeitadas devido a um ângulo errado no processo de soldadura do driving collar ao solenóide, praticamente todas no arranque de referências. Após o retorno ao trabalho presencial, executou-se a mesma análise durante um mês (desde dia 10 de maio a 10 de junho) e neste período foram rejeitadas 45 peças. Pela análise do anexo L podemos observar que, extrapolando os valores de uma semana para 1 mês, existe uma diferença de 1029,5 euros de peças rejeitadas entre as duas análises. Este valor é passível de ser melhorado, pois ainda existe espaço para formar os colaboradores. Porém, com os acontecimentos já verificados, e fazendo uma extrapolação de um ano, é possível verificar uma diminuição de aproximadamente 12000 euros em material rejeitado.

Relativamente à linha L2, já foi feita uma requisição de compra do novo sistema, estando esta ainda em análise. Para se compreender a necessidade de um investimento desta magnitude, durante a análise às peças rejeitadas no período de tempo anteriormente descrito (10 de maio a 10 de junho) foi possível contabilizar quantas peças falharam neste processo com o defeito de “ângulo errado”. Estes valores encontram-se representados no anexo M. Em apenas um mês foi rejeitado neste processo 2281 euros em solenóides. Partindo do princípio que o novo sistema conseguirá anular praticamente na totalidade a obtenção deste erro, isto resultará numa diminuição de material rejeitado de 27000 euros ao fim de um ano, pelo que compensará o investimento necessário. De ressaltar que esta é uma estimativa que assenta na premissa de que o número de NC neste processo é relativamente constante ao longo do tempo. De facto, não foi possível comprovar esta premissa e, por conseguinte, obter uma estimativa mais robusta considerando um horizonte temporal mais alargado pois o atual sistema de medição não permite a obtenção desta informação tão específica, como foi anteriormente referido.

Durante a análise diária das rejeições separaram-se os solenóides que foram considerados rejeições pelos colaboradores por apresentarem um ângulo errado para a referência que se estava a produzir. Com vista a haver um reaproveitamento destes solenóides, fez-se um estudo de todos os ângulos possíveis de produzir nas duas linhas (estes são especificações do cliente e variam de referência para referência). Após a separação dos solenóides que apresentaram o ângulo errado aquando da produção, estes devem ser medidos pelo elemento da equipa que estiver a fazer a análise das peças NC para depois se comparar o valor do ângulo obtido com todos os ângulos possíveis de produzir nas duas linhas. Caso haja alguma referência que apresente aquele ângulo, os solenóides (iguais para todas as referências) são separados e são posteriormente colocados em produção quando produzida a tal referência. Durante o mês de maio, procedeu-se à recuperação de 15 solenóides (sensivelmente 600 euros) nestas condições.

Após a compra do novo medidor de ângulo e da implementação do novo sistema, espera-se que o valor de rejeições seja reduzido drasticamente, uma vez que este é o processo que leva a maior perda de dinheiro e que representa quase metade do valor de rejeições todos os meses, em termos monetários.

4.5. Troca de referência

4.5.1. Analisar

Um dos problemas mais evidentes nas linhas, e que pode estar na base de grande parte dos defeitos obtidos, é a constante troca de referência que se faz (muitas vezes para produzir quantidades reduzidas de peças) e os ajustes que daí advêm para que as máquinas fiquem aptas a funcionar.

Foram levantados dados sobre a quantidade de trocas de referência que ocorrem durante cada mês para se perceber a importância que estas podem ter na linha. Feito o estudo, obteve-se uma média de cerca 30 trocas de referência por mês na linha L1 e por volta de 17 trocas de referência por mês na linha L2, durante o presente ano de produção. Com o passar do tempo, foi sendo feita a implementação de algumas referências da linha L2 na linha L1 por ser uma linha mais estável e com a qual a equipa se sentia mais confortável por ter um maior conhecimento das máquinas desta linha, daí o número de trocas de referência nesta linha ser bastante superior.

O procedimento de troca de referência é bastante simples e consiste na desmontagem e montagem das ferramentas específicas de cada referência no local de fixação e alteração da referência no comando numérico de cada máquina. Posteriormente deve-se selecionar a posição base para se iniciar o processo.

Apesar de não ser um problema fulcral nem o objetivo desta dissertação, observou-se que o procedimento de troca de referência na linha L1 não era realizado de uma forma rápida e eficaz. Este procedimento, pelas características das máquinas, deve ser feito de uma forma bastante intuitiva sendo apenas necessário trocar algumas ferramentas das máquinas, desenhadas para cada referência especificamente, e de que os colaboradores já têm o conhecimento adequado. Porém, a realidade não era essa e muitas vezes observou-se trocas de referência superiores a 1 hora, não só pelos ajustes necessários, mas também pela desorganização das ferramentas.

As ferramentas de todas as referências estavam guardadas em sítios dispersos, sendo que algumas encontram-se debaixo das próprias máquinas, em gavetas, e outras encontravam-se num carrinho estacionado atrás da linha. Estas encontravam-se desorganizadas, marcadas de uma forma pouco visível o que dificultava bastante a procura das mesmas por parte dos colaboradores. Isto resultava num tempo de troca maior que o esperado bem como o aparecimento de dúvidas sobre quais as ferramentas corretas a usar. Nas Figuras 43 e 44 encontram-se representadas as ferramentas guardadas:



Figura 44 - Fotografias do carrinho da linha usado para troca de referências



Figura 43 - Fotografias de ferramentas da máquina do teste de estanquidade

Para além de atrasar a produção, esta desorganização leva também à montagem de ferramentas erradas que depois durante a produção, com os parâmetros incorretos, podem levar à criação de problemas na máquina, como o aparecimento de folgas e desgaste de vários

componentes da máquina, bem como das próprias ferramentas. Estes defeitos acabam por ter efeitos negativos que se traduzem na produção de peças NC.

Depois de trocadas as ferramentas e definidos os parâmetros nas máquinas, é produzida uma peça para leitura dimensional para confirmação da eficácia da troca. Caso não esteja dentro das especificações, o dispositivo será reajustado (reposicionado) e outra peça deverá ser produzida. Isto é algo recorrente, principalmente na máquina de soldadura do *driving collar* ao solenoide e daí surge uma maior necessidade de ajustes para que esta funcione de forma eficaz.

Com um elevado número de *setups* advém um maior tempo gasto nos ajustes dos parâmetros da máquina. Isto resulta num aumento da exposição das ferramentas e componentes a esforços mecânicos nos ajustes das fixações, causando desgastes, e posteriormente comprometendo desempenho. Estas trocas aumentam a probabilidade de as máquinas produzirem com defeito porque diminui a precisão dos ajustes nos dispositivos, uma vez que o posicionamento das superfícies ou das ferramentas do processo devem estar suficientemente rígidas para produzir com a precisão necessária que algumas máquinas devem produzir.

4.5.2. Melhorar

A organização das ferramentas tornou-se bastante importante não só pela recuperação de algum espaço na linha, mas fundamentalmente pela facilidade na identificação dos componentes necessários. Esta melhoria pretende reduzir o tempo de troca de referência, mas acima de tudo evitar erros dos colaboradores na troca de referência. Com isto pretende-se reduzir a possibilidade de trocar as ferramentas e fazer o *setup* de uma referência com as ferramentas erradas o que leva a um aumento dos ajustes necessários, ao desgaste dos componentes e rejeições.



Figura 45 - Fotografia da estante construída por baixo da máquina de estanquicidade



Figura 46 - Fotografia das ferramentas do teste de estanquicidade devidamente organizadas e identificadas



Figura 47 - Fotografia das ferramentas de soldadura da *flap* devidamente organizadas e identificadas

Comparando as fotografias das ferramentas guardadas anteriormente, com as fotografias apresentadas aqui, consegue-se observar uma diferença clara. A construção desta estante debaixo da máquina de fuga permite guardar todas as ferramentas necessárias para o teste de estanquicidade, de forma organizada e devidamente identificadas. Depois de construída esta estante e do feedback positivo recebido por parte dos colaboradores, foi construída uma nova estante debaixo da máquina da solda com o mesmo propósito da primeira.

Estas estantes permitem que durante a troca da referência, deixe de ser necessário ir buscar o carrinho e procurar o material de cada máquina e referência, pois todas as componentes necessárias estarão na própria linha, guardadas debaixo das máquinas. Deste modo, o tempo perdido numa operação de valor não acrescentado, como é a procura de ferramentas, deixa de ser uma realidade devido a esta nova organização, o que terá certamente um impacto positivo no funcionamento da linha.

4.5.3. Controlar

Estas melhorias não conseguem ser contabilizadas em termos monetários, porém consegue-se ter uma noção da sua importância pelas imagens apresentadas. Os próprios colaboradores mostraram-se bastante agradecidos com esta mudança, pelo que se pode identificar um efeito positivo na linha L1. Quanto à sua contabilização em tempos de setup, procurar peças não é problema mais crítico neste momento pelo que se torna difícil medir a sua melhoria. Porém, quando o processo estiver estabilizado, e tendo em conta um projeto de melhoria contínua, a construção destas estantes terão um peso mais evidenciado na troca de referência.

Ainda se deve realçar que esta nova organização deu independência e proatividade aos colaboradores da linha, uma vez que no arranque de uma nova referência, estes conseguiram fazer a troca das ferramentas sem uma constante intervenção de um técnico ou de um dos responsáveis da linha. Compete aos responsáveis da linha verificarem, de uma forma regular, se todas as ferramentas estão nos locais corretos para evitar uma troca errada.

5. Conclusões e perspectivas de trabalho futuro

A realização do projeto de dissertação numa empresa de relevo no setor automóvel permitiu perceber que existe uma procura constante pela melhoria contínua em todos os projetos desenvolvidos, com vista a atingir uma produção de elevada eficiência. O panorama encontrado nas linhas de produção onde foi desenvolvido o projeto, aliado à utilização da metodologia Seis Sigma, insere-se precisamente na procura pela excelência dos processos, levando a uma produção mais eficaz e acima de tudo, mais estabilizada.

Devido ao facto de, como foi referido anteriormente, o projeto de dissertação ter sido desenvolvido nas linhas de produção, foi possível estabelecer um contacto direto com todos os colaboradores e com todos os seus processos, tendo o investigador conseguido, acima de tudo, adquirir experiência de “chão de fábrica”, conseguindo compreender os diferentes cenários que podem ocorrer durante um dia de produção e os procedimentos a tomar (produção normal, avarias, trocas de turno, arranque de referências).

De um modo geral, pode-se concluir que os objetivos definidos no início do projeto foram cumpridos. Após a análise aprofundada dos últimos 6 meses de produção das duas linhas, foram apresentadas propostas de melhoria de onde advieram ganhos significativos.

Através da execução da proposta definida para a referência mais problemática da linha L2 (elevada quantidade de produção de peças NC no teste de estanquicidade e solda da *flap*), observou-se uma redução de produção de peças NC de 18000 ppm e 25000 ppm (nos dois processos) para cerca de 4000 ppm e 5000 ppm, respetivamente. Em termos de impacto financeiro, e fazendo uma extrapolação até ao final do presente ano, verifica-se uma redução de quase 26000 euros relativamente ao valor económico perdido que asseguram uma recuperação quase imediata dos investimentos efetuados, visto que o investimento era bastante reduzido relativamente à grandeza da poupança.

Relativamente à proposta para a linha L1, seguindo o mesmo raciocínio, para as três referências em que se implementaram as propostas de melhoria, obteve-se uma redução de 29000 ppm para 5000 ppm, levando a uma redução de 18728 euros relativamente ao valor económico perdido.

No que toca às propostas de melhoria não implementadas, estas consistem na compra de dois sistemas novos. O primeiro sistema com o intuito de se obter uma medição do ângulo do *driving collar* no solenoide, de forma a verificar se este está dentro das especificações, pois o atual é pouco preciso e pode afetar a capacidade de decisão dos colaboradores. A segunda consiste no desenvolvimento de um novo sistema de soldadura do *driving collar* no solenoide, para que este processo se torne mais estável. Ambas as melhorias estão associadas ao mesmo processo, e por isso com a sua implementação esperam-se resultados extremamente positivos na redução de produção de peças NC, mas também no impacto financeiro que daí advém. Como já foi referido, este processo engloba os componentes mais caros, representando mais de 70% do valor monetário de uma válvula EGR, pelo que as implementações destas melhorias terão certamente um impacto bastante relevante nos prejuízos em peças NC. O sistema atual utilizado rejeita mensalmente cerca de 65 solenóides, devido ao *driving collar* ser soldado com um ângulo fora das especificações do cliente, o que corresponde a 2300 euros. Com o novo sistema pretende-se erradicar quase na totalidade este defeito, o que iria resultar numa diminuição de cerca 27000 euros em material rejeitado ao fim de um ano de produção, o que compensará o investimento necessário.

Adicionalmente, com o intuito de facilitar a troca de referência, procedeu-se à limpeza e construção de duas estantes debaixo das máquinas de soldadura e do teste de estanquicidade. O resultado foi bastante positivo, não só pelo ganho de espaço e pelo impacto visual que teve, mas por facilitar o trabalho dos colaboradores na troca de referência. A criação das novas

estantes, devidamente identificadas e organizadas, diminui o tempo perdido numa operação de valor não acrescentado, como é a procura de ferramentas. Para além disso, esta medida diminui o risco de falha na troca de ferramentas, anula a necessidade de deslocação para recolher o carrinho das ferramentas na troca de referência, e deixa de ser necessária a presença dos responsáveis ou técnicos para certificar que está tudo correto (que nem sempre é possível). Por todas estas razões, esta nova organização terá um impacto positivo na linha.

No que diz respeito a trabalhos futuros, devido ao facto de algumas propostas de melhoria só virem a ser implementadas após a aceitação da compra de novos sistemas, deve-se garantir um controlo destes e analisar o seu impacto na produção.

Na sequência das medidas adotadas relativamente à substituição dos pinos e tratamento das ferramentas de fixação, todos os colaboradores devem estar atentos à realização de uma manutenção apropriada. Assim, o trabalho realizado no projeto deve ser acompanhado de forma a evitar que as ferramentas de fixação fiquem danificadas e desgastadas, pois isso tem repercussões bastante negativas no funcionamento da linha.

Apesar de se verificarem melhorias significativas nas linhas de produção, estas devem continuar a ser acompanhadas, sempre com um pensamento de melhoria contínua para se conseguir atingir o objetivo do 6 Sigma de 3,4 ppm. Para a obtenção deste marco, ainda existe um longo caminho a percorrer nas duas linhas, pelo que se deve continuar a estudar os processos mais problemáticos, definir as causas raiz dos problemas e eliminar as mesmas, uma por uma, até atingir um nível de produção aceitável para a empresa. Pela análise do diagrama de Ishikawa, relativamente ao processo de soldadura da *flap*, deve-se continuar a resolver as principais causas raiz relativas ao método e máquina para, numa fase posterior de maior estabilidade, começar a estudar de que forma é que as condições do meio ambiente podem influenciar a rejeição de peças.

Referências Bibliográficas

- Arnheiter, Edward D, and John Maleyeff. *The Integration of Lean Management and Six Sigma. The TQM magazine*, (2005).
- Coronado, Ricardo Banuelas, and Jiju Antony. *Critical Success Factors for the Successful Implementation of Six Sigma Projects in Organisations. The TQM magazine*, (2002).
- George, Michael L, John Maxey, David T Rowlands, and Malcolm Upton. *Lean Six Sigma Pocket Toolbook*. McGraw-Hill Professional Publishing, (2004).
- Harry, MJ, and Richard Schroeder. *The Breakthrough Management Strategy Revolutionizing the World's Top Corporations*. HarperCollins New York, (2000).
- Kwak, Young Hoon, and Frank T Anbari. *Benefits, Obstacles, and Future of Six Sigma Approach. Technovation* 26, no. 5-6, (2006): 708-15.
- Lande, Manisha, RL Shrivastava, and Dinesh Seth. *Critical Success Factors for Lean Six Sigma in Smes (Small and Medium Enterprises). The TQM Journal* , (2016).
- Linderman, Kevin, Roger G Schroeder, Srilata Zaheer, and Adrian S Choo. *Six Sigma: A Goal-Theoretic Perspective. Journal of Operations management* 21, no. 2, (2003): 193-203.
- McCarty, Thomas, Michael Bremer, Lorraine Daniels, and Praveen Gupta. *The Six Sigma Black Belt Handbook*. Motorola University, (2004).
- Montgomery, Douglas C. *Statistical Quality Control*. Wiley Global Education, (2012).
- Pyzdek, Thomas, and Paul A Keller. *A Complete Guide for Green Belts, Black Belts, and Managers at All Levels*. New York: McGraw-Hill, (2003).
- Schroeder, Roger G, Kevin Linderman, Charles Liedtke, and Adrian S Choo. *Six Sigma: Definition and Underlying Theory. Journal of operations Management* 26, no. 4, (2008): 536-54.

ANEXO A: Tabela de troca de referências das linhas L1 e L2

| Troca de referência - L1 | |
|---------------------------------|----|
| setembro | 17 |
| outubro | 25 |
| novembro | 16 |
| dezembro | 13 |
| janeiro | 31 |
| fevereiro | 35 |
| março | 32 |
| abril | 27 |

| Troca de referência - L2 | |
|---------------------------------|----|
| setembro | 5 |
| outubro | 12 |
| novembro | 11 |
| dezembro | 8 |
| janeiro | 15 |
| fevereiro | 17 |
| março | 28 |
| abril | 11 |

ANEXO B: Apresentação das características das linhas

| Linha L1 | | | | | | | |
|--|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|------------------|--------------|
| | setembro | outubro | novembro | dezembro | janeiro | fevereiro | Média |
| OEE (%) | 48,23 | 54,92 | 67,44 | 46,40 | 60,30 | 51,77 | 54,84 |
| Avaria (%) | 20,51 | 18,59 | 4,99 | 10,66 | 13,22 | 19,88 | 14,64 |
| Qualidade (%) | 1,65 | 2,30 | 1,32 | 1,88 | 1,78 | 3,16 | 2,01 |
| Micro Paragens não registadas (%) | 4,21 | 3,17 | 6,47 | 15,30 | 10,13 | 3,76 | 7,17 |

| Linha L2 | | | | | | | |
|--|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|------------------|--------------|
| | setembro | outubro | novembro | dezembro | janeiro | fevereiro | Média |
| OEE (%) | 28,70 | 27,81 | 37,73 | 45,58 | 37,73 | 43,21 | 36,79 |
| Avaria (%) | 26,65 | 28,62 | 17,64 | 12,87 | 20,63 | 27,88 | 22,38 |
| Qualidade (%) | 2,02 | 4,75 | 8,70 | 12,55 | 11,63 | 6,65 | 7,72 |
| Micro Paragens não registadas (%) | 1,30 | 15,42 | 11,53 | 7,25 | 10,40 | 4,15 | 8,34 |

ANEXO C: Tabela da Quantidade de peças NC produzidas por referência - Linha L1

| Quantidade de peças NC produzidas por referência | | | | | | | |
|---|---------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|--|---|
| | Setembro (ppm) | Outubro (ppm) | Novembro (ppm) | Dezembro (ppm) | Janeiro (ppm) | Quantidade produzida (unidades) | Média Ponderada de defeitos por referência (ppm) |
| X10 | 60289 | 23392 | 21771 | 46472 | 71900 | 4543 | 52388 |
| X3 | 0 | 27916 | 0 | 80166 | 38330 | 5285 | 45222 |
| X2 | 29145 | 47368 | 22332 | 20999 | 23155 | 9995 | 24912 |
| X6 | 9105 | 18868 | 13979 | 27941 | 21442 | 8458 | 19508 |
| X5 | 20513 | 46154 | 32941 | 21739 | 14085 | 2396 | 25459 |
| X9 | 8982 | 16520 | 6838 | 49351 | 24641 | 3367 | 17523 |
| X4 | 0 | 280952 | 0 | 287234 | 258065 | 490 | 273469 |

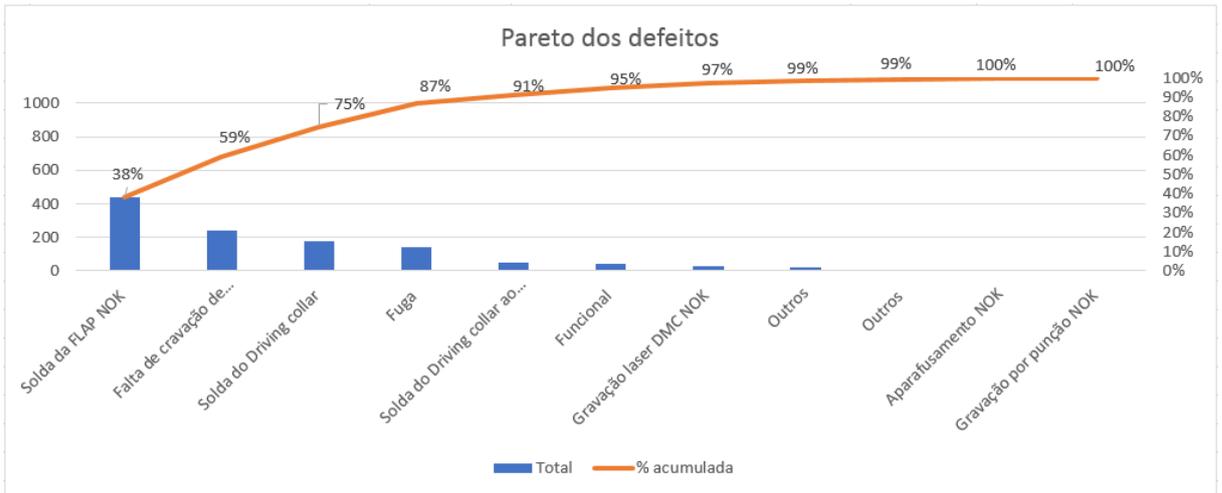
ANEXO D: Tabela da Quantidade de peças NC produzidas por referência - Linha L2

| Quantidade de peças NC produzidas por referência (ppm) | | | | | | | |
|--|----------|---------|----------|----------|---------|---------------------------------|--|
| | setembro | outubro | novembro | dezembro | janeiro | Quantidade produzida (unidades) | Média ponderada de defeitos por referência (ppm) |
| Y6 | 45198 | 30261 | 22222 | 99727 | 57558 | 6738 | 52835 |
| Y4 | 76796 | 124391 | 123543 | 88645 | 127206 | 15355 | 116119 |
| Y7 | 16304 | 94281 | 43642 | 95025 | 87000 | 9299 | 77105 |
| Y9 | 0 | 0 | 19231 | 54383 | 343949 | 1857 | 70005 |

ANEXO E: Tabela da Quantidade de peças NC produzidas por motivo e Distribuição de Pareto por tipos de defeitos - linha L1

| Quantidade de peças NC produzidas por motivo (ppm) | | | | | | |
|---|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|
| | Setembro | Outubro | Novembro | Dezembro | Janeiro | Média Ponderada de defeitos por motivo |
| Solda da <i>FLAP</i> NC | 6037 | 12295 | 4968 | 26176 | 13533 | 12381 |
| Falta de cravação de componentes | 9918 | 9300 | 7097 | 3681 | 5163 | 6694 |
| Fuga | 3881 | 5044 | 2697 | 11043 | 1252 | 3893 |
| Solda do <i>Driving collar</i> | 4959 | 3153 | 1845 | 6339 | 7118 | 4986 |
| Funcional | 3665 | 1734 | 710 | 409 | 626 | 1204 |
| Solda do <i>Driving collar</i> ao Solenoide | 647 | 788 | 426 | 204 | 2972 | 1401 |
| Outros | 0 | 315 | 1278 | 2045 | 313 | 700 |
| Aparafusamento NOK | 647 | 473 | 142 | 0 | 0 | 196 |
| Gravação por punção NC | 216 | 0 | 0 | 0 | 0 | 28 |
| Média ponderada de defeitos por mês (ppm) | 25873 | 30265 | 17317 | 43558 | 25422 | - |

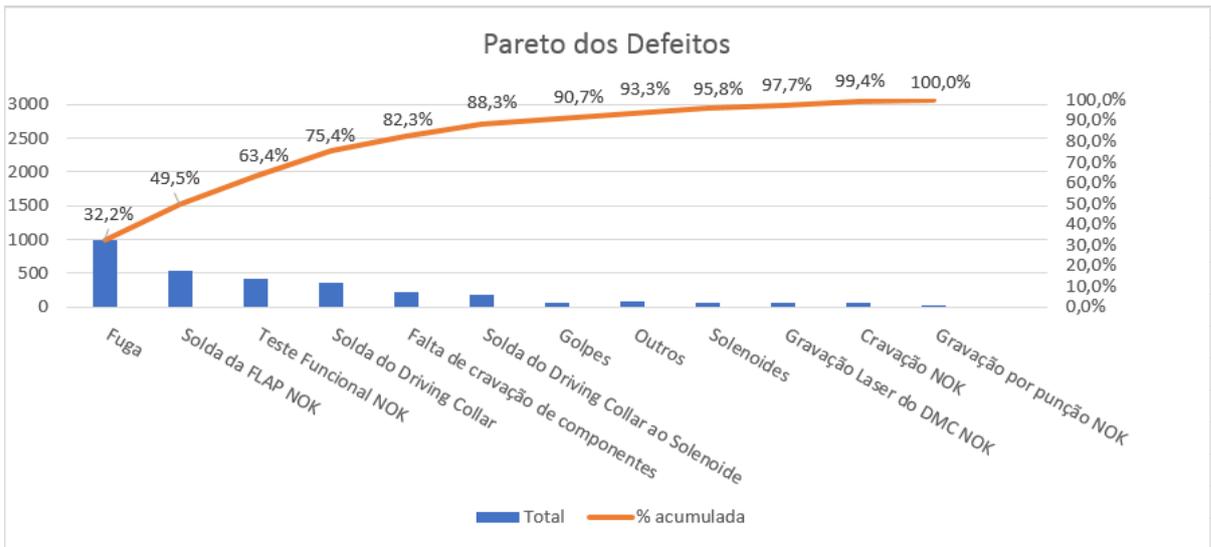
Melhoria do índice de qualidade de duas células de produção de válvulas eletromecânicas



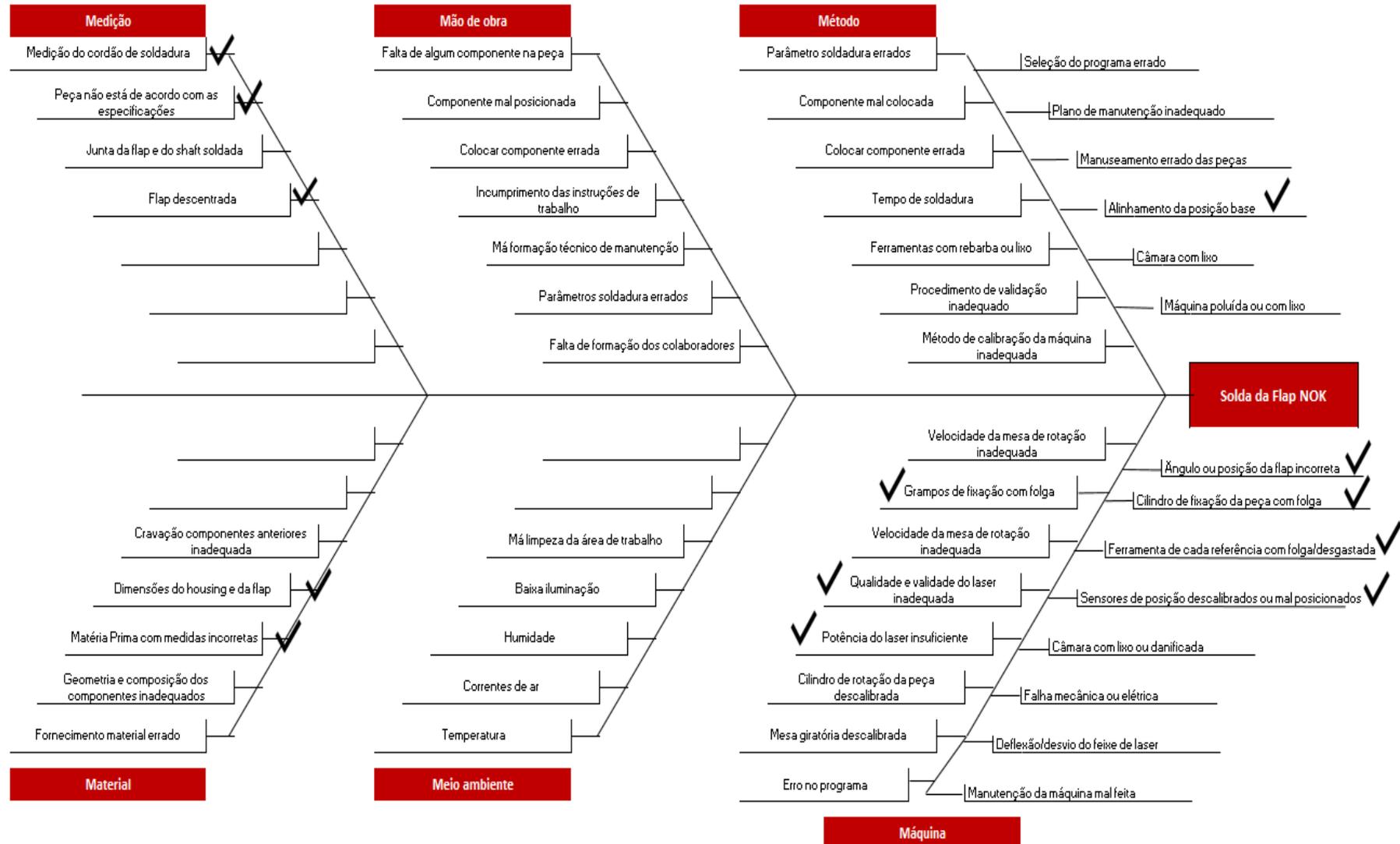
ANEXO F: Tabela da quantidade de peças NC produzidas por motivo e Distribuição de Pareto por tipo de defeitos - linha L2

| Quantidade de peças NC produzidas por motivo (ppm) | | | | | | |
|---|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|
| | Setembro | Outubro | Novembro | Dezembro | Janeiro | Média Ponderada de defeitos por motivo |
| Fuga | 23280 | 29032 | 21421 | 41428 | 27842 | 28347 |
| Solda da FLAP NC | 1852 | 19941 | 24753 | 6568 | 14377 | 15279 |
| Teste Funcional NC | 5820 | 18182 | 9520 | 9768 | 14276 | 12206 |
| Solda do Driving collar | 2116 | 9531 | 13924 | 10610 | 11542 | 10541 |
| Falta de cravação de componentes | 4233 | 4252 | 5355 | 4210 | 9922 | 6118 |
| Solda do Driving collar ao Solenoide | 5820 | 2493 | 5593 | 4042 | 7391 | 5256 |
| Outros | 2116 | 0 | 357 | 1179 | 6480 | 2355 |
| Gravação Laser do DMC NC | 2910 | 2786 | 1428 | 1179 | 911 | 1666 |
| Solenoides | 0 | 0 | 0 | 4210 | 4961 | 2125 |
| Cravação NC | 2910 | 2199 | 952 | 1010 | 1519 | 1580 |
| Golpes | 0 | 293 | 2975 | 1010 | 4151 | 2125 |
| Gravação por punção NC | 265 | 293 | 595 | 0 | 911 | 488 |
| Média ponderada de defeitos por mês (ppm) | 51323 | 89003 | 86874 | 85214 | 104283 | - |

Melhoria do índice de qualidade de duas células de produção de válvulas eletromecânicas



ANEXO H: Diagrama de Ishikawa do processo de solda da *flap*

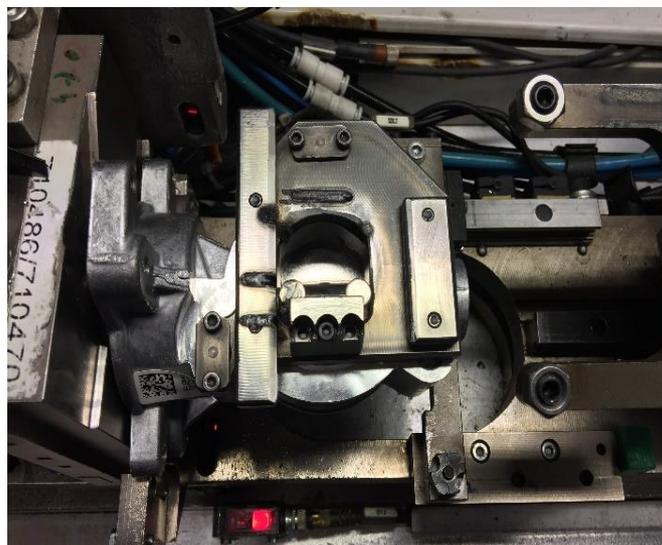
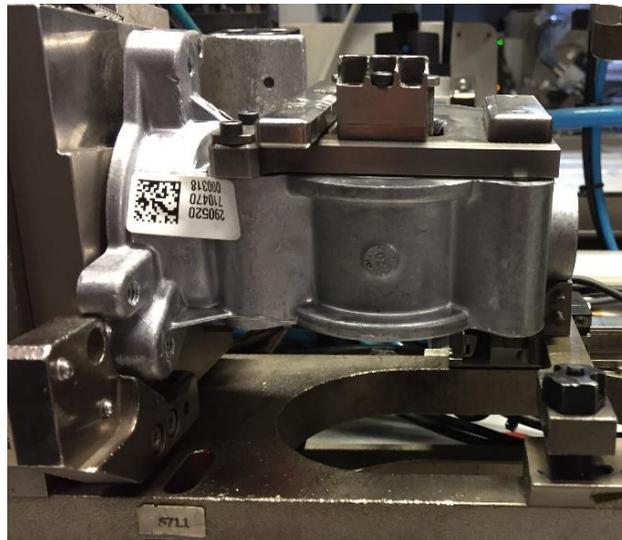
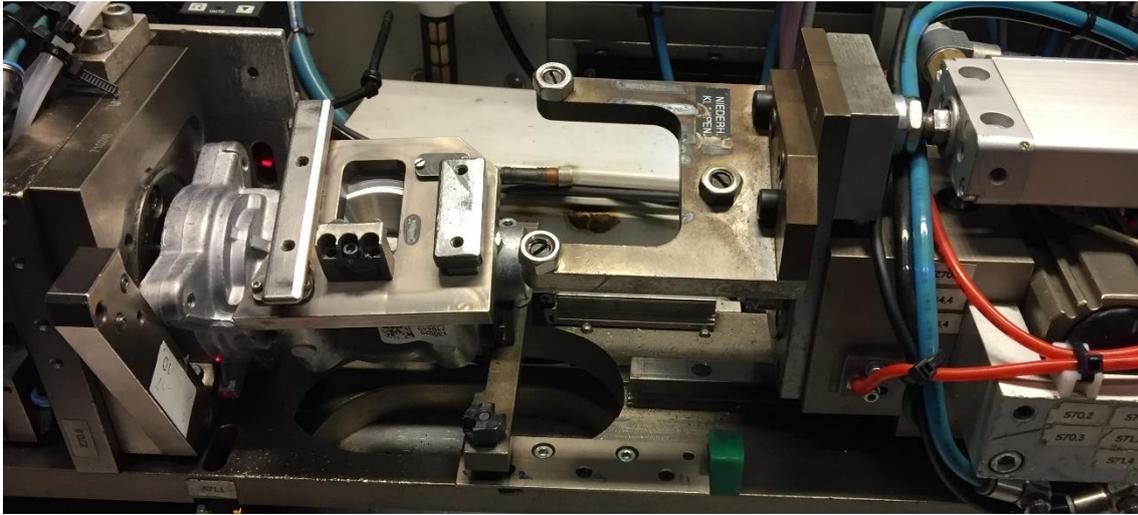


ANEXO I: Tabelas do FMEA das linhas L1 E L2, respetivamente:

| Causa da Falha | Severidade | Ocorrência | Deteção | RPN | Efeito da Falha |
|--|-------------------|-------------------|----------------|------------|---|
| Ferramenta de fixação da <i>flap</i> danificada | 5 | 4 | 8 | 160 | Solda da <i>Flap</i> NOK/Leackage NOK |
| Ferramenta de fixação do <i>housing</i> danificada | 5 | 4 | 8 | 160 | Solda da <i>Flap</i> NOK/Leackage NOK |
| Sem refrigeração por soldadura | 6 | 5 | 5 | 150 | Solda da <i>Flap</i> NOK |
| Resíduos de fumo | 2 | 8 | 6 | 96 | Solda da <i>Flap</i> NOK |
| Operador coloca o <i>housing</i> de forma errada | 5 | 8 | 2 | 80 | Solda da <i>Flap</i> NOK/Leackage NOK |
| Mau funcionamento da fonte de laser | 8 | 5 | 2 | 80 | Solda da <i>Flap</i> NOK/Leackage NOK |
| Operador não coloca corretamente a <i>flap</i> | 5 | 6 | 2 | 60 | Leackage NOK |
| Falha mecânica ou elétrica do equipamento | 6 | 2 | 5 | 60 | Solda da <i>flap</i> NOK/Leackage NOK |
| Parâmetro de soldadura errado | 6 | 5 | 2 | 60 | Solda da <i>Flap</i> NOK |
| Colocar ferramenta errada | 2 | 5 | 2 | 20 | Interrupção do fluxo normal de produção |
| Colocar <i>Flap</i> errada - Erro do operador | 2 | 5 | 1 | 10 | Interrupção do fluxo normal de produção |
| Falta de <i>Flap</i> - Erro do operador | 2 | 2 | 2 | 8 | Interrupção do fluxo normal de produção |

| Causa da Falha | Severidade | Ocorrência | Deteção | RPN | Efeito da Falha |
|--|-------------------|-------------------|----------------|------------|--|
| Ferramenta de fixação da <i>flap</i> danificada | 6 | 4 | 8 | 192 | Solda da <i>Flap</i> NC/ leakage NC |
| Cordão de soldadura insuficiente | 8 | 4 | 6 | 192 | Solda da <i>Flap</i> NC |
| Ferramenta de fixação do <i>housing</i> danificada | 5 | 4 | 8 | 160 | Solda da <i>Flap</i> NC/ leakage NC |
| Resíduos de fumo | 8 | 2 | 8 | 128 | Solda da <i>Flap</i> NC |
| Operador coloca a <i>flap</i> de forma incorreta | 6 | 8 | 2 | 96 | Solda da <i>Flap</i> NC/ leakage NC |
| Mau funcionamento da fonte de laser | 8 | 6 | 2 | 96 | Solda da <i>Flap</i> NC |
| Erro no programa | 8 | 2 | 6 | 96 | Solda da <i>Flap</i> NC |
| Ótica suja | 8 | 4 | 2 | 64 | Solda da <i>Flap</i> NOK |

ANEXO J: Fotografia das ferramentas de fixação do processo de soldadura da *flap* da linha L2



ANEXO K: Fotografia do medidor de ângulos do *driving collar*



ANEXO L: Produção de solenóides com ângulo errado na linha L1

| Produção de solenoides com ângulo errado | | |
|---|-----------------------|-----------------------|
| | 1º período de análise | 2º período de análise |
| Tempo de análise | 1 semana | 1 mês (4 semanas) |
| Quantidade rejeitada | 21 peças | 45 peças |
| Valor rejeitado | 682,39 € | 1 700 € |
| Extrapolção durante 1 ano | 32 754,72 € | 20 400 € |
| Diferença entre os períodos | 12 354,72 € | |

ANEXO M: Produção de solenóides com ângulo errado durante 1 mês na linha L2

| Produção de solenóides com ângulo errado | | |
|---|-------------------|----------------------------------|
| Referência | Quantidade | Valor monetário rejeitado |
| Y4 | 38 | 1298,46 |
| Y6 | 13 | 473,33 |
| Y9 | 14 | 509,74 |
| Total | 65 | 2281,53 |