



NOVA
NOVA SCHOOL OF
SCIENCE & TECHNOLOGY

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA
MECÂNICA E INDUSTRIAL

PEDRO MIGUEL JESUS RIBEIRO

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA FMEA DE PROCESSO AO FABRICO DE PEÇA ESTAMPADA

MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Universidade NOVA de Lisboa
Setembro, 2022



APLICAÇÃO DA METODOLOGIA FMEA DE PROCESSO AO FABRICO DE PEÇA ESTAMPADA

PEDRO MIGUEL JESUS RIBEIRO

Licenciado em Ciências da Engenharia Mecânica

Orientador: João Manuel Vicente Fradinho
Professor Auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa

Coorientador: António José Freire Mourão
Professor Associado, Universidade NOVA de Lisboa

Aplicação da Metodologia FMEA de Processo ao fabrico de peça estampada

Copyright © Pedro Miguel Jesus Ribeiro, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

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

*A todos os que me apoiaram ao longo da minha educação, sem
a vossa ajuda nada disto seria possível.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente quero expressar toda a minha gratidão para com o meu orientador, Professor Doutor João Fradinho, e o meu coorientador, Professor Doutor António Mourão. Sem eles, a sua disponibilidade, dedicação, paciência e exigência, não seria possível realizar este trabalho. Também aos colaboradores da empresa em que foi desenvolvida a dissertação por todo o conhecimento transmitido, condições providenciadas e disponibilidade.

Quero agradecer aos meus pais, por todo o amor e apoio que me ofereceram a vida toda, por todos os sacrifícios que fizeram para que possa estar onde estou hoje, pelos valores que me transmitiram, pelo orgulho e pela confiança que sempre depositaram em mim. Aos meus avôs, por todo o carinho e apoio que sempre me deram, nunca conseguirei agradecer o suficiente. Ao meu irmão João por me fazer rir todos os dias e ver as coisas pelos olhos de uma criança novamente.

À Micaela, minha namorada, companheira e melhor amiga, por me ter apoiado em tudo o que precisei e mais ainda ao longo destes anos juntos. Tenho um orgulho enorme em ti e uma grande sorte em poder partilhar tudo contigo.

Aos meus amigos, por todo o apoio incondicional e os momentos alegres passados durante todo o caminho até aqui. Aos Alentejanos devo muita gratidão por todo o companheirismo e por terem tornado esta jornada mais fácil através de muitas gargalhadas.

À minha avó Maria de Lurdes e ao Rui, uma eterna saudade e um agradecimento especial por tudo o que fizeram por mim.

A todos estes, fica o meu mais profundo agradecimento.

“A ship in harbor is safe, but that is not what ships are built for.” (John Augustus Shedd)

RESUMO

A rápida evolução da indústria automóvel requer uma atualização regular dos seus requisitos em termos de qualidade. A gestão do risco e a identificação de falhas são campos particularmente importantes para as organizações. As empresas neste ramo regem-se pela norma automóvel International Automotive Task Force – Grupo de Trabalho Automóvel Internacional (IATF) 16949:2016, cujas orientações são dadas através de manuais de referência, que oferecem o conhecimento necessário para desenvolver as ferramentas da qualidade. Uma delas é o Failure Mode and Effects Analysis – Análise de Modos de Falha e Efeitos (FMEA). Em 2019 foi publicada a nova edição conjunta do Manual FMEA, pela Automotive Industry Action Group – Grupo de Acção da Indústria Automóvel (AIAG) & Verband der Automobilindustrie – Associação da Indústria Automóvel (VDA). No contexto da presente dissertação foi desenvolvido um FMEA, executado segundo as diretrizes deste Manual, tendo por base um documento desenvolvido sob o Manual anterior, a edição de 2009 redigida apenas pela AIAG. É apresentado o caso prático do FMEA e é comparado diretamente com o FMEA presente atualmente na empresa.

O novo processo FMEA pela AIAG & VDA é, no geral, uma melhoria em relação ao anterior. A definição clara dos valores de Severidade, Ocorrência e Deteção (SOD), a substituição do índice Risk Priority Number – Número de Prioridade de Risco (RPN) pelo Action Priority – Prioridade de Ação (AP) e a robustez associada à maior informação recolhida são vantagens evidentes. No entanto, existem aspetos negativos relacionados com a complexidade acrescida, exigindo significativamente mais tempo para desenvolver a análise desta forma.

Palavras-chave: FMEA, AIAG & VDA, Manual FMEA, Indústria Automóvel, Análise de Risco, Prioridade de Ação.

ABSTRACT

The rapidly evolving automotive industry requires regular updating of its quality requirements. Risk management and failure identification are particularly important fields for organizations. Companies in this industry are regulated by the automotive standard IATF 16949:2016, whose guidelines are given through reference manuals, that provide the knowledge needed to develop the quality tools. One of these is the Failure Mode and Effects Analysis (FMEA). In 2019 the new joint edition of the FMEA Manual was published by AIAG & VDA. In the context of this dissertation, an FMEA was developed, executed under the guidelines of this Manual, based on a FMEA developed under the previous Manual, the 2009 edition written by AIAG only. This new FMEA is presented and directly compared with the FMEA currently present in the company.

The new FMEA process by AIAG & VDA is, overall, an improvement over the previous one. The clear definition of Severity, Occurrence and Detection (SOD) values, replacement of the Risk Priority Number (RPN) index with Action Priority (AP) and the robustness associated with the greater information collected are clear advantages. However, there are negative aspects related to the increased complexity, requiring significantly more time to develop the FMEA this way.

Keywords: FMEA, AIAG & VDA, FMEA Handbook, Automotive Industry, Risk Analysis, Action Priority.

ÍNDICE

Índice de Figuras	xix
Índice de Tabelas	xxi
Glossário	xxiii
Siglas	xxv
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos	3
1.3 Estrutura	3
2 Caracterização do Processo de Fabrico	5
2.1 Lista de Passos	5
2.1.1 Receção do Material Base	6
2.1.2 Armazenamento do Material Base	6
2.1.3 Preparação de Produção	6
2.1.4 Desenrolar de Chapa	6
2.1.5 Estampagem Progressiva	7
2.1.6 Retificação	9
2.1.7 Embalamento	10
2.1.8 Armazenamento de Peças Acabadas	11
2.1.9 Expedição de Produto Final	11
2.2 Estado Atual da Gestão de Risco	11
2.2.1 Manutenção	11
2.2.2 FMEA no Contexto Atual	13
3 Relação com o Cliente	19
3.1 APQP	19

3.2	Utilização do APQP na Empresa	24
3.3	PPAP	25
4	Metodologia FMEA	29
4.1	FMEA	29
4.2	Nova Edição do Manual FMEA	31
5	Aplicação da Metodologia	39
5.1	Estrutura do FMEA	40
5.2	Exemplo com AP Alto	42
5.3	Exemplo com AP Médio	44
5.4	Exemplo com AP Baixo	46
5.5	Comparação Direta entre Manuais	48
5.5.1	Primeiro Exemplo	48
5.5.2	Segundo Exemplo	51
6	Conclusões e Trabalhos Futuros	55
6.1	Conclusão	55
6.2	Sugestões de Trabalhos Futuros	56
	Bibliografia	57
	Apêndices	
A	Trecho de FMEA concluído	63
	Anexos	
I	Exemplo de PSW	65
II	Tabelas SOD	67

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Capas dos Manuais a ser comparados: a) Capa da 4ª Edição do Manual FMEA, desenvolvido pela AIAG e atualmente utilizado [9]; b) Capa da 1ª Edição Conjunta do Manual FMEA, desenvolvido pela AIAG & VDA [7]	3
2.1	Peça obtida por estampagem progressiva	7
2.2	Esquema de um procedimento de estampagem progressiva	8
2.3	Parte de banda de estampagem da peça estampada progressivamente	9
2.4	Esquema convencional de estampagem de corte fino	10
2.5	Peças produzidas por estampagem progressiva: a) Previamente ao passo de Retificação; b) Após o passo de retificação	10
3.1	Carta de Controlo Temporal	21
3.2	Ciclo Plan-Do-Check-Act – Planear-Fazer-Verificar-Agir (PDCA)	22
3.3	Gráfico de desenvolvimento do Advanced Product Quality Planning – Planeamento Avançado da Qualidade do Produto (APQP)	23
3.4	Ciclo APQP praticado na empresa	26
4.1	Exemplo de Fault Tree Analysis – Análise da Árvore de Falhas (FTA) segundo AIAG & VDA de motor Seat	33
5.1	Cabeçalho do FMEA	40
5.2	Passos do FMEA: a) Passos II a IV; b) Passos V e VI	41
5.3	Peça deformada após a estampagem	42
5.4	Segundo e terceiro passos de exemplo com Prioridade de Ação alta	43
5.5	Quarto e quinto passos de exemplo com Prioridade de Ação alta	43
5.6	Sexto passo de exemplo com Prioridade de Ação alta	44
5.7	Peça Oxidada após Retificação	45
5.8	Segundo e terceiro passos de exemplo com Prioridade de Ação média	45
5.9	Quarto e quinto passos de exemplo com Prioridade de Ação média	46
5.10	Sexto passo de exemplo com Prioridade de Ação média	46
5.11	Segundo e terceiro passos de exemplo com Prioridade de Ação baixa	47

5.12	Quarto e quinto passos de exemplo com Prioridade de Ação baixa	48
5.13	Recorte do desenho de produto da peça	48
5.14	Avaliações acerca do Modo de Falha: a) Segundo a 4ª edição do Manual AIAG, atualmente utilizada na empresa; b) segundo a 1ª edição conjunta do Manual FMEA pela AIAG & VDA	50
5.15	Reanálise do Risco segundo o 4º Manual acerca do Modo de Falha	51
5.16	Otimização do Risco segundo o 1º Manual Conjunto acerca do Modo de Falha	51
5.17	Peça com Rasgo após Estampagem	52
5.18	Avaliações acerca do Modo de Falha de peça com rasgo: a) Segundo a 4ª edição do Manual AIAG, atualmente utilizada na empresa; b) segundo a 1ª edição conjunta do Manual FMEA pela AIAG & VDA	53
I.1	Exemplo de Documento Part Submission Warrant – Mandato de Submissão de Peças (PSW)	65

ÍNDICE DE TABELAS

2.1	Primeiro FMEA desenvolvido na empresa, em 2000	15
2.2	FMEA efetuado segundo as diretrizes da 4ª edição	16
4.1	Trecho de Exemplo de Fluxograma	32
4.2	Exemplo de Análise da Estrutura	33
4.3	Exemplo de Análise da Função	34
4.4	Exemplo de Análise da Falha	35
4.5	Exemplo de Análise do Risco	35
4.6	Exemplo de Passo de Otimização	36
A.1	Trecho de FMEA feito, segundo o Manual FMEA pela AIAG & VDA	63
II.1	Tabela de Severidade	67
II.2	Tabela de Severidade	68
II.3	Tabela de Ocorrência	69
II.4	Tabela de Detecção	70
II.5	Tabela de Detecção	71
II.6	Tabela de Prioridade de Ação	72
II.7	Tabela de Prioridade de Ação	73

GLOSSÁRIO

- Conhecimento Tribal** Informação valiosa que foi acumulada através de canais informais, permanecendo não documentada e isolada do resto da organização (adaptado de [1]) 24
- Core Tools** Também denominadas de *Automotive Core Tools*, são métodos de gestão da qualidade utilizados para assegurar uma elevada qualidade de processo e de produto ao longo de toda a cadeia de abastecimento. As 5 ferramentas são o Plano Avançado de Planeamento e Controlo da Qualidade do Produto (APQP), Processo de Aprovação da Peça de Produção (PPAP), Análise do Modo de Falha e Efeitos (FMEA), Controlo Estatístico do Processo (SPC) e Análise do Sistema de Medição (MSA) (adaptado de What are Automotive Quality Core Tools?) 4, 20, 25
- Factibilidade** A possibilidade do que pode ser alcançado, feito, ou atingido, ou que é razoável (adaptado de Priberam) 23, 25

SIGLAS

4M	Man, Machine, Material, Milieu – Homem, Máquina, Material, Meio 33, 34
5T	InTent, Timing, Team, Tasks, Tools – Intenção, Calendarização, Equipa, Tarefas, Ferramentas 31
AIAG	Automotive Industry Action Group – Grupo de Acção da Indústria Automóvel xiii, xix, 2, 3, 4, 11, 17, 25, 27, 31, 33, 39
AP	Action Priority – Prioridade de Ação xiii, 30, 34, 35, 37, 39, 40, 42, 44, 51, 52, 55, 56
APQP	Advanced Product Quality Planning – Planeamento Avançado da Qualidade do Produto xix, 14, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27
AQP	Advanced Quality Planning – Planeamento Avançado da Qualidade 19
CSR	Customer Specific Requirements – Requisitos Específicos do Cliente 31
DFM/A	Design for Manufacturing / Assembly – Projeto para o Fabrico / Montagem 24
DFMEA	Design Failure Mode Effect Analysis – Análise de Modos de Falha e Efeitos no Projeto 23, 25, 27, 28, 30, 35
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis – Análise de Modos de Falha e Efeitos xiii, xix, xxi, 1, 2, 3, 4, 5, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 19, 20, 21, 29, 30, 31, 33, 34, 37, 39, 40, 41, 49, 52, 55, 56, 63
FMECA	Failure Mode Effects and Criticality Analysis – Análise de Modos de Falha, Efeitos e Criticidade 29
FTA	Fault Tree Analysis – Análise da Árvore de Falhas xix, 31, 33
IATF	International Automotive Task Force – Grupo de Trabalho Automóvel Internacional xiii, 2

SIGLAS

MSA	Measurement Systems Analysis – Análise de Sistemas de Medição 20, 27
NASA	National Aeronautics and Space Administration – Administração Nacional da Aeronáutica e do Espaço 29
OEE	Overall Equipment Effectiveness – Eficácia global do equipamento 12, 56
OEM	Original Equipment Manufacturer – Fabricante Original de Equipamento 19
OPL	Open Point List – Lista de Pontos em Aberto 25
PDCA	Plan-Do-Check-Act – Planear-Fazer-Verificar-Agir xix, 21, 22, 23, 36
PFMEA	Process Failure Mode Effects Analysis – Análise de Modos de Falha e Efeitos no Processo 23, 27, 30, 35, 52, 55, 56
PME	Pequena e Média Empresa 2, 9
PPAP	Production Part Approval Process – Processo de Aprovação da Peça de Produção 19, 20, 21, 24, 25, 27, 28
PSW	Part Submission Warrant – Mandato de Submissão de Peças xx, 27, 28, 65
RPN	Risk Priority Number – Número de Prioridade de Risco xiii, 13, 14, 29, 30, 36, 37, 39, 49, 51, 52, 55
SOD	Severidade, Ocorrência e Detecção xiii, 36, 37, 55
SPC	Statistical Process Control – Controlo Estatístico do Processo 20
VDA	Verband der Automobilindustrie – Associação da Indústria Automóvel xiii, xix, 2, 3, 4, 11, 17, 31, 33, 39

INTRODUÇÃO

Neste capítulo, apresenta-se uma síntese sobre a questão abordada.

Em primeiro lugar, introduz-se a motivação subjacente a este trabalho, referindo a importância do *Failure Mode and Effects Analysis* – FMEA na avaliação do risco e fiabilidade no fabrico em geral e especificamente na estampagem, ferramenta esta que se torna mais sólida com a nova edição do seu manual. Em segundo lugar, declaram-se e apresentam-se os principais objetivos desta dissertação. Por fim, identifica-se a estrutura do documento, composto por 6 capítulos.

Devido à natureza da indústria automóvel, a confidencialidade documental impede que haja uma divulgação integral de informação, razão pela qual os dados referentes a pessoas, identidades, documentos e produtos foram alterados. Estas mudanças não causam, no entanto, qualquer prejuízo sobre a análise e discussão do trabalho desenvolvido.

1.1 Motivação

A rápida evolução do mundo tecnológico que nos rodeia motiva a urgência de as empresas acompanharem as novas tendências para que possam evoluir, caso contrário correm o risco de ficar para trás e perder o comboio da inovação. Aliada com a crescente consciencialização ambiental e maior necessidade de cumprir com normas rigorosas na indústria automobilística, as empresas devem encontrar o equilíbrio certo entre o tempo gasto, os custos associados e a qualidade do produto.

A dualidade entre o tempo e a qualidade põe a questão de que, com mais tempo, é possível obter ter uma melhor qualidade de produto, mas entra em conflito com a necessidade de minimizar o tempo entre a proposta de projeto e entrega de produto [2]. A minimização do custo adiciona uma terceira dimensão a esta matéria. Um aumento de custos, seja ligado a meios financeiros ou recursos humanos, pode levar à diminuição do tempo de desenvolvimento de produto e aumentar a qualidade do mesmo; no entanto, conduz a uma diminuição do lucro sobre o produto transacionado. É possível expandir o número de dimensões a considerar, todavia, a mais relevante para esta dissertação é o risco associado às decisões tomadas.

A norma ISO 31000 define o risco como o "efeito da incerteza sobre os objetivos", sendo o efeito da incerteza, neste caso, um desvio, positivo ou negativo, em relação ao que se espera [3]. Cada passo tomado ou processo produtivo tem um nível de risco associado, sendo úteis ferramentas que permitam quantificá-lo, obtendo uma melhor perspectiva sobre o mesmo, para uma tomada de decisão mais informada.

Uma avaliação do risco que seja competente leva a uma diminuição de desvios no que diz respeito a custos e *timing* durante a execução do processo (neste caso, de fabrico). Um investimento de tempo na avaliação do risco pode, assim, diminuir a necessidade de alterações de última hora em projetos, prevenindo os riscos associados a uma implementação com falhas, considerando cada iteração possível e factível. Relaciona-se similarmente com a dimensão custo, pois, apesar de implicar um investimento por parte da empresa, o mesmo será compensado com as poupanças ligadas à atempada identificação de modos de falha, e consequente ação para os mitigar ou até eliminar. Por fim, as dimensões qualidade e risco quase se confundem, focando-se ambas em possíveis falhas e em como minimizar a sua incidência. Isto na medida em que a qualidade pretende assegurar produtos conformes com o projeto feito, fazendo-o ao procurar formas de diminuir os fatores de risco associados, que provocariam a ocorrência de falhas.

Neste contexto, o método mais utilizado para a avaliação de risco na indústria automóvel (e não só) é o FMEA [4]. Uma metodologia utilizada há pouco mais de 7 décadas, inicialmente desenvolvida pelo exército americano e aprimorada na década de 60 pela indústria aeroespacial, permite a identificação e consequente prevenção de modos de falha em processos, produtos e sistemas. Ao prevenir falhas, aumenta assim a satisfação do cliente e a segurança dos envolvidos. Utilizando informação adquirida em projetos anteriores que apresentem semelhanças, uma equipa multidisciplinar pode alterar o projeto de forma a que seja diminuído o risco associado a certos modos de falha, ou até que deixem de existir, reduzindo assim o tempo de desenvolvimento e custos associados [5].

A empresa em que foi desenvolvido o presente trabalho é considerada uma Pequena e Média Empresa (PME), situada em Portugal. A mesma foca-se maioritariamente na estampagem, sendo praticamente toda a sua produção direcionada para a indústria automóvel. Esta PME tem vindo a utilizar a metodologia nas últimas duas décadas, estando neste momento a aplicar a 4ª edição do Manual AIAG (na figura 1.1a está presente a Capa do Manual). Em Junho de 2019 foi lançada a 1ª edição conjunta do Manual FMEA pela AIAG & VDA (na figura 1.1b está presente a Capa do Manual), as associações automóveis dos EUA e Alemanha, respetivamente, dois dos maiores produtores automóveis a nível mundial [6]. À semelhança de outras empresas no ramo, esta PME está neste momento a transitar para a nova versão do Manual.

Nesta dissertação é utilizada a metodologia, segundo as diretrizes do novo manual, ao processo de produção de um produto obtido por estampagem progressiva. Utiliza-se o conhecimento previamente desenvolvido e registado na sua versão anterior, sendo adaptado e renovado para estar alinhado com as novas diretrizes definidas pelas associações automóveis AIAG e VDA, redigidas de acordo com a norma da IATF 16949:2016 [7]. Esta



(a)



(b)

Figura 1.1: Capas dos Manuais a ser comparados: a) Capa da 4ª Edição do Manual FMEA, desenvolvido pela AIAG e atualmente utilizado [9]; b) Capa da 1ª Edição Conjunta do Manual FMEA, desenvolvido pela AIAG & VDA [7]

norma veio substituir a norma ISO/TS 16949, que, em conjunto com a ISO 9001:2015 (à altura ISO 9001:2008), define os requisitos de gestão da qualidade para o projeto e produção de produtos para a indústria automóvel [8].

1.2 Objetivos

O principal objetivo desta dissertação consiste em realizar um FMEA segundo as diretrizes definidos na nova versão do Manual FMEA (ver figura 1.1b), redigido em conjunto pela AIAG & VDA, a um processo já estabelecido na empresa em que foi desenvolvido o trabalho. Isto de forma a solidificar a sua transição para as novas diretrizes, ao desenvolver um primeiro exemplar de um FMEA feito segundo as orientações do novo Manual [7]. Como passos para chegar a esse fim, definem-se os seguintes objetivos intermédios:

- Definir e expor os passos inerentes ao processo de produção da peça cujo processo será avaliado no FMEA;
- Contextualizar o aparecimento e a importância do método, tanto na indústria automóvel como na empresa em que é desenvolvido o trabalho;
- Comparar a nova versão do Manual FMEA com a quarta edição do Manual, desenvolvido apenas pela AIAG, utilizada atualmente na companhia.

1.3 Estrutura

A presente dissertação divide-se em seis capítulos.

Neste primeiro capítulo efetua-se uma introdução ao tema do FMEA, declaram-se os objetivos principais e apresenta-se a estrutura do documento.

O capítulo dois foca-se essencialmente no estado atual dos processos na empresa, tanto do processo produtivo da peça, que é posteriormente avaliado no FMEA, como da gestão de risco que neste momento se encontra estabelecida na companhia.

No terceiro capítulo, o ponto central a abordar é o relacionamento da empresa com o cliente. Apresenta-se o processo de concepção de um projeto até à sua implementação e o seu acompanhamento, após essa fase. Expõem-se as ferramentas essenciais (também denominadas por *Core Tools*) para o desenvolvimento de projetos, nas quais se inclui o FMEA.

O capítulo quatro trata de forma semelhante a temática do FMEA em relação às restantes *Core Tools*. Retrata-se um pouco da sua história e origens, fala-se sobre a metodologia em si e como funciona o processo e, finalmente, contrapõe-se a última versão do manual FMEA, realizada exclusivamente pela AIAG (ver figura 1.1a), com a nova versão do manual, editada em conjunto pelas associações AIAG & VDA (ver figura 1.1b).

O capítulo cinco é sobre o FMEA que foi desenvolvido, praticado com um processo de produção de uma peça, sendo apontados e descritos exemplos de aplicação e comparação entre formas de atuar e resultados finais.

O sexto e último capítulo é reservado à apresentação de conclusões feitas sobre o trabalho desenvolvido. Identificam-se também sugestões para trabalhos futuros em que esta metodologia possa ser utilizada com sucesso.

CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO DE FABRICO

Este capítulo foca-se essencialmente no estado de partida do processo, tanto do processo de produção da peça a ser submetido à metodologia Failure Mode and Effects Analysis – Análise de Modos de Falha e Efeitos (FMEA) em si, como à gestão do risco e qualidade, em que se enquadra o FMEA.

É apresentado o método utilizado para produzir peças estampadas na empresa em questão. Estando inserida no setor automóvel, existe uma grande necessidade de a empresa não só obedecer a normas mas também de ter métodos sólidos de desenvolvimento e fabrico de produtos. O foco neste capítulo e nesta dissertação é então no processo de estampagem. O tipo de estampagem mais utilizado na empresa é a estampagem progressiva, sendo abordada em detalhe no ponto 2.1.5.

2.1 Lista de Passos

Lista com os passos no fabrico de uma peça estampada regular, na empresa:

1. Receção do Material Base
2. Armazenamento do Material Base
3. Preparação de Produção
4. Endireitamento da chapa
5. Estampagem Progressiva
6. Retificações (se aplicável)
7. Embalamento
8. Armazenamento de peças acabadas
9. Expedição de produto final para cliente

Estes passos serão abordados mais em detalhe seguidamente.

2.1.1 Receção do Material Base

O primeiro passo no processo de produção é a receção do material base. A matéria-prima utilizada na empresa é definida pela empresa cliente, constando no desenho de produto. Alguns dos aços mais utilizados em peças são o S360 e S420. Isto devido ao facto de oferecerem uma boa soldabilidade com os processos convencionais de soldadura, sendo normalmente utilizados em peças soldadas, projetadas para resistir a esforços. São aços com um módulo de Young e tensão de cedência relativamente elevados, permitindo a produção de peças de baixa espessura mas sem perder a resistência necessária à tensão [10]. Estes aços, tomando o S420 como exemplo, são também especialmente adequados à estampagem a frio, de acordo com a norma EN 10149-2 "*Hot rolled flat products made of high yield strength steels for cold forming*" [11].

2.1.2 Armazenamento do Material Base

Os rolos de matéria-prima são colocados na zona de armazém da empresa, sendo guardados em prateleiras de grande porte, capazes de suportar a massa dos rolos. Numa grande produção de peças quer-se a menor quantidade de paragens para abastecimento de material base possível, por isso são adquiridos os rolos mais pesados, que permitam a produção de um maior número de peças. O diâmetro interior do rolo é definido pelo diâmetro da máquina que os desenrola, sendo 500 mm. O diâmetro exterior pode ser o maior possível, sendo que a máquina que abastece a maior prensa admite diâmetros exteriores até 1800 mm.

2.1.3 Preparação de Produção

A preparação de produção é altamente dependente do componente a produzir, no entanto passa sempre pela mudança de ferramenta de corte, abastecimento de matéria-prima; a definição dos parâmetros de estampagem (como a altura da ferramenta e a força que a prensa deve exercer); a configuração da máquina de inserção de casquilhos (se aplicável); preparação do processo de embalagem; autocontrolo das primeiras peças e afinação de parâmetros, se necessário. Após estes passos é possível passar à produção em série.

2.1.4 Desenrolar de Chapa

Para que a chapa possa ser processada e estampada de forma a dar origem a peças acabadas ou semiacabadas, é necessário desenrolar o rolo de chapa e eliminar tensões residuais presentes no aço. Calandras podem desempenhar esta função, ao desenrolarem a chapa e alimentarem a prensa convenientemente.

2.1.5 Estampagem Progressiva

Na estampagem progressiva, são integrados vários processos que acontecem de uma forma sequencial. Na figura 2.1 é possível observar a peça fabricada na empresa, cujo processo de produção é avaliado no capítulo 5, produzida por estampagem de corte progressivo.



Figura 2.1: Peça obtida por estampagem progressiva

Uma representação do processo encontra-se na figura 2.2. Neste esquema a chapa de metal passa por 5 operações diferentes, desde a pré-formação ao corte de excessos no final, por forma a obter o produto final.

Com o desenvolvimento da tecnologia de estampagem e com o objetivo, tanto de melhorar a eficiência da estampagem, como de reduzir custos de produção, algumas peças estruturais automóveis complexas de pequeno a médio porte usarão mais ferramentas progressivas. Estas peças, para serem produzidas por estampagem tradicional, obrigavam à utilização de várias ferramentas e prensas. Muita pesquisa foi feita sobre o processo de estampagem progressiva e o projeto de ferramentas de peças estruturais para automóveis.

Como referido anteriormente, a exigência da indústria automóvel para que se aumente a segurança e diminua o consumo de combustível faz com que seja muito utilizada chapa de aço de alta resistência. Mas este material base não traz só o baixo peso, implica também um maior esforço no projeto das ferramentas de corte e deformação, devido à sua elevada elasticidade. É particularmente importante ter em atenção o esquema de deformação e a sequência de operações quando se trata de componentes com uma geometria complexa, grande espessura ou que tenham de sofrer deformações consideráveis.

A estampagem progressiva tem vindo a ser cada vez mais utilizada, especialmente na

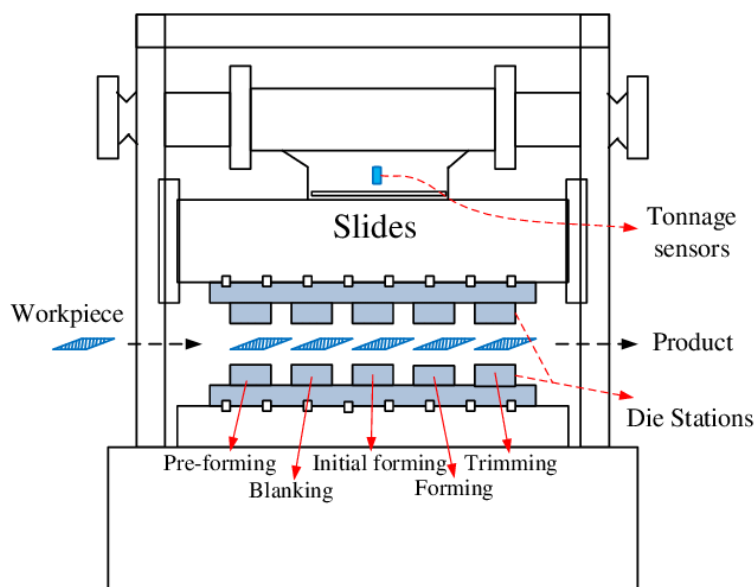


Figura 2.2: Esquema de um procedimento de estampagem progressiva [12]

indústria automóvel. Tal deve-se ao facto de possibilitar a produção em massa de peças complexas, enquanto é mantida uma elevada precisão [13]. Ferramentas progressivas permitem fazer várias operações numa só prensa, encadeando várias estações com cada resultado similar ao que seria alcançado numa ferramenta simples [14]. Numa ferramenta progressiva, os furos base são criados primeiro. Furos com dimensões críticas devem ser feitos na mesma estação e os restantes devem ser processados consoante a sua forma, tamanho e localização relativa na peça final [14].

Uma vez que uma ferramenta progressiva poderá ser mais dispendiosa que as ferramentas simples que seriam necessárias para produzir a mesma peça, a estampagem progressiva é geralmente utilizada para peças com um nível de produção considerável, em termos quantitativos. Isto porque, apesar do maior investimento inicial, o custo de produção de cada peça é relativamente inferior, por serem produzidas peças a uma maior cadência e necessitando de uma menor quantidade de operadores [14]. Na figura 2.3 encontra-se parte da banda de estampagem pela qual a peça cujo processo será alvo da metodologia passa. Estas são apenas 4 das 18 estações pelas quais cada peça passa aquando da sua estampagem. Apresentados estão os passos de *Piercing* (perfuração e criação dos pequenos furos), *Emboss* e *Emboss Calibration* (expansão dos furos e dado relevo aos mesmos) e, por fim, *Cutting* (Corte, são retiradas as partes destacadas).

Neste processo a quantidade de sucata produzida é superior, razão pela qual a empresa pôs em prática soluções para recolher toda essa sucata com o objetivo de a reciclar e reutilizar. Casquilhos são também inseridos em muitas das peças produzidas na empresa, sendo alguns introduzidos manualmente e outros através de máquinas, que o fazem entre estações ou em estações específicas.

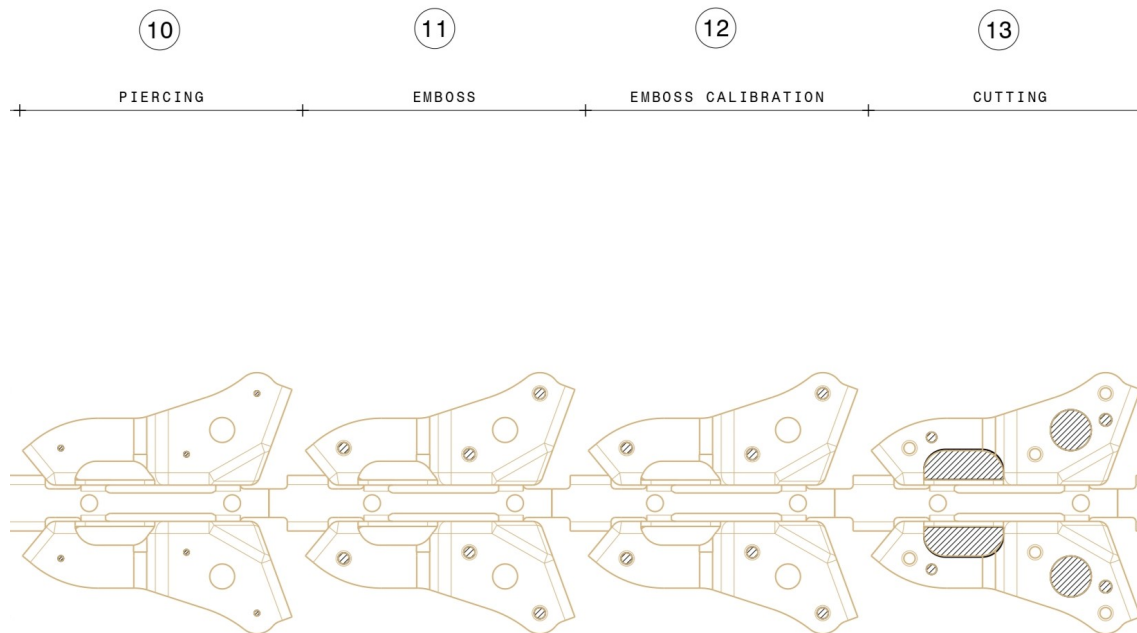


Figura 2.3: Parte de banda de estampagem da peça estampada progressivamente

2.1.6 Retificação

Alguns componentes necessitam de ser retificados de alguma forma. Certas peças podem passar por tratamentos térmicos ou superficiais, para obterem características desejadas pelo cliente. Estes tratamentos são feitos externamente, portanto as peças semiacabadas são enviadas para uma empresa terceira e voltam, posteriormente, para o fornecedor, a Pequena e Média Empresa (PME) em que são fabricadas as peças estampadas.

O processo de produção de estampagem de corte fino – também conhecido como *fine blanking* – é um tipo de estampagem que permite obter peças com um acabamento superficial muito superior ao obtido na estampagem convencional [15]. Isto é possível pois são utilizadas máquinas de precisão elevada. A folga entre o punção e a ferramenta é menor e existe uma aplicação de forças contrárias e no suporte das chapas, além da força exercida pelo punção de corte. Na figura 2.4 encontra-se um esquema da estampagem por corte fino. A presença de componentes de tensão de compressão induz o fecho das fissuras, e isso resulta na elevada percentagem de corte suave observada [16].

Este processo e o de estampagem progressiva convencional podem, no entanto, causar a formação de rebarbas na zona inferior da peça estampada. Cria também quinas vivas que devem ser eliminadas. Por isso, na empresa, alguns componentes passam por uma máquina vibratória em forma côncava. As peças individuais são colocadas num tambor em conjunto com peças abrasivas, poliméricas ou cerâmicas, que eliminam as rebarbas e as quinas vivas.

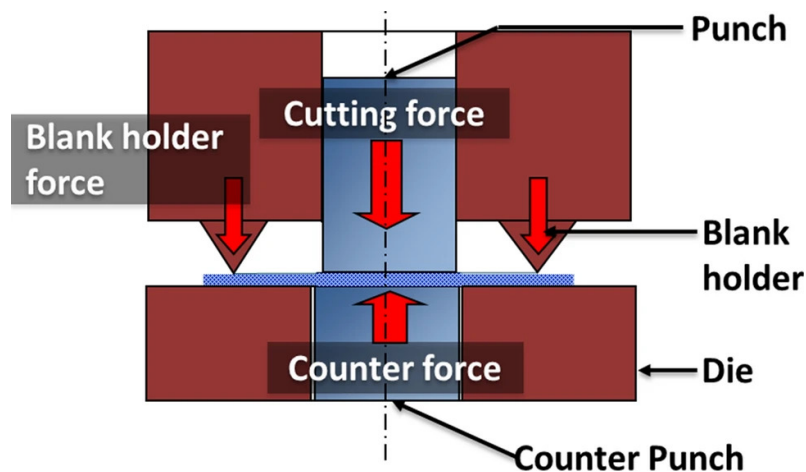


Figura 2.4: Esquema convencional de estampagem de corte fino [15]

São também feitas operações de soldadura a laser em algumas das peças estampadas. Para que esse processo possa ocorrer segundo projetado, as peças devem estar limpas, sendo indesejável a presença do óleo lubrificante que é utilizado aquando da estampagem. Para esse efeito, as peças são colocadas em máquinas similares às referidas no parágrafo anterior, sendo que estas têm a função principal de lavar e posteriormente secar as peças.

Na figura 2.5 é possível encontrar um exemplo de uma peça antes de ser retificada (figura 2.5a) e após a retificação, sem vestígios de óleo lubrificante e com rebarbas eliminadas (figura 2.5b).



Figura 2.5: Peças produzidas por estampagem progressiva: a) Previamente ao passo de Retificação; b) Após o passo de retificação

2.1.7 Embalamento

Após terminado o processos de fabrico, as peças finalizadas são embaladas consoante a ficha de embalagem previamente acordada entre o fornecedor e cliente.

2.1.8 Armazenamento de Peças Acabadas

As peças acabadas são armazenadas em prateleiras preparadas para as receber, aguardando expedição para o cliente final.

2.1.9 Expedição de Produto Final

Finalmente, as peças são expedidas e transportadas para o cliente, maioritariamente por via rodoviária.

2.2 Estado Atual da Gestão de Risco

A presente secção incide sobre o que atualmente é feito, a nível de gestão, para lidar com o risco, sendo que é nesse contexto que surge a necessidade do FMEA. Nesse sentido, foi tida e transcrita uma conversa com uma das pessoas mais diretamente envolvidas no processo, tendo vindo a ser parte integrante da equipa multidisciplinar encarregue de os desenvolver. Foram efetuadas questões acerca do assunto, pretendendo obter informação acerca da posição da empresa em relação à metodologia e o que a mesma envolve, atualmente.

O trabalho desenvolvido, tanto neste capítulo como em toda a dissertação, tem por base os manuais redigidos pela Automotive Industry Action Group – Grupo de Acção da Indústria Automóvel (AIAG) e Verband der Automobilindustrie – Associação da Indústria Automóvel (VDA), manuais esses que são editados e distribuídos em território português pela OPCO. Esta é uma empresa direcionada para a consultoria e formação, fornecendo serviços de formação acerca dos manuais e tópicos como o *Lean Six Sigma*, normas ISO e gestão de recursos humanos, a empresas como aquela em que foi desenvolvida a presente dissertação.

Como referido na secção 1.1, a Gestão do Risco é um aspeto fundamental para qualquer empresa, especialmente para as que se inserem na indústria automóvel. Assim, a empresa em que foi desenvolvida a presente dissertação não difere das restantes.

2.2.1 Manutenção

O *standard* inglês BS EN 13306:2017 "*Maintenance. Maintenance terminology*", cujo equivalente em Portugal é a norma NP EN 13306:2007, define a Manutenção como sendo a "Combinação de todos os aspetos técnicos, administrativos e ações de gestão durante o ciclo de vida de um artigo destinados a mantê-lo, ou a restaurá-lo, num estado em que possa desempenhar a função requerida"[17]. No entanto, é comum ver a manutenção apenas como uma despesa necessária para manter uma empresa ou operação em funcionamento. Assim, é tida como um dos primeiros alvos quando é preciso um corte nos custos, pois não é uma operação que crie valor diretamente [18]. Isto nos tempos que correm, em que as empresas – especialmente as pequenas e médias empresas – tentam

baixar os custos o mais possível para manter a competitividade. Para isso, é preciso um manter equilíbrio entre adquirir novos equipamentos e gerir os pré-existentes, sendo que em muitas das indústrias, os preços de novos equipamentos podem ascender às centenas de milhares de euros, como por exemplo uma prensa de estampagem.

Existem 2 tipos gerais de abordagens à manutenção: do tipo preventivo e corretivo [19]. Uma combinação das duas abordagens é requerida, sendo a implementação de uma delas feita consoante fatores como o risco associado e o custo de implementação [20]. A primeira abordagem a ser tomada era centrada principalmente na manutenção corretiva. A manutenção era, como afirmado anteriormente, vista como um mal necessário, portanto reparações e substituições de equipamentos eram feitas quando necessário e não eram de forma alguma otimizadas [19].

Um planeamento adequado da manutenção numa companhia revela-se como um objetivo que lhes permite melhorar a Overall Equipment Effectiveness – Eficácia global do equipamento (OEE) e a fiabilidade dos seus equipamentos de produção, maximizando a sua disponibilidade, a qualidade dos seus produtos e a segurança, enquanto os custos totais de manutenção são minimizados [21].

A manutenção corretiva, também conhecida como manutenção baseada na falha ou de emergência, baseia-se na reparação após a falha ocorrer. Foi a primeira estratégia a ser utilizada e continua a ser a estratégia convencional em várias indústrias [22]. No entanto, a concorrência do mercado, as questões ambientais e especialmente as de segurança forçam quem gere a manutenção a procurar estratégias mais eficientes para além da manutenção corretiva.

No seguimento desta necessidade, surge a Manutenção Preventiva, ou Sistemática. A manutenção preventiva pretende reduzir a probabilidade de falha ou a degradação da função de um equipamento [22]. Nesta abordagem, as atividades são realizadas com base em intervalos de tempo de operação ou número de ciclos sem ter em conta o estado atual do equipamento. Desta forma, equipamentos ou componentes que poderiam ter uma vida útil mais prolongada podem ser substituídos quando não existe uma necessidade real de isso acontecer.

Para preencher essa lacuna existe a manutenção preventiva condicionada. Nesta abordagem a intervenção ocorre quando um valor ou medição ultrapassa um nível previamente definido. Se o equipamento não tolerar a operação em condições para além dessas, é intervencionado [23]. Os parâmetros avaliados podem ser obtidos através de parâmetros processuais, tais como monitorização de vibração, temperatura, análise de óleos lubrificantes e de ultrassons, entre outros. No entanto, este tipo de manutenção requer um grande investimento em equipamento de monitorização e em profissionais que possam fazer a gestão e análise dos dados.

Na empresa em questão, a abordagem principal que é tomada é a manutenção preventiva. Os equipamentos são intervencionados de acordo com um plano global, desenvolvido no sentido de garantir a operação segundo os parâmetros de interesse e, assim, impedir paragens não-planeadas. O plano é feito pelo Departamento de Manutenção

em conjunto com os restantes, para que a manutenção ocorra ciclicamente, enquanto os equipamentos não estão a ser utilizados para a produção. As intervenções feitas incluem ações como limpeza e substituição de filtros, revisões de motores e substituição de óleos.

Embora exista a manutenção preventiva e verificações regulares de equipamento anteriormente e durante o processo de produção, as falhas ocorrem. Nesses momentos há uma paragem quase imediata do fabrico e são chamados os técnicos ao local para avaliarem a situação e agirem de acordo, por forma a assegurar a segurança dos operadores e retomar o processo produtivo de forma célere.

2.2.2 FMEA no Contexto Atual

Jomthanachai et al. (2021) resumem e identificam quatro processos primários no que envolve a gestão do risco: identificação do risco, avaliação do risco, tratamento do risco e monitorização do risco [24]. Na identificação do risco, são cuidadosamente definidos os eventos possíveis que ameacem negativamente os objetivos da companhia [25]. A avaliação do risco subdivide-se na sua análise e avaliação: a análise implica a identificação do risco, a probabilidade de afetar o resultado pretendido e as consequências no caso de tal acontecer (é neste contexto que se enquadra o FMEA); a avaliação supõe a decisão sobre a prioridade que deve ser dada ao risco, tendo em conta as ferramentas utilizadas anteriormente e a sua aplicação ao contexto [26]. O tratamento do risco centra-se na elaboração e aplicação de planos, com o intuito de diminuir e/ou evitar os efeitos e elementos que representam maior risco [27]. Finalmente, a monitorização do risco acompanha o processo e escrutina se os elementos que representam o risco continuam ou não a ser igualmente relevantes e se devem ser tomadas novas medidas [28].

Embora análises quantitativas e qualitativas tenham o seu lugar e valor, análises quantitativas são regularmente preferidas pois podem apresentar resultados mais objetivos. No entanto, nem sempre é possível recolher dados suficientes para que se façam estas avaliações [24]. O FMEA é uma ferramenta qualitativa, desenvolvida para a gestão do risco e apoio nas decisões. Neste momento, até à 4ª edição do Manual AIAG, a sua forma de priorizar os modos de falha uns em relação aos restantes é através do Risk Priority Number – Número de Prioridade de Risco (RPN), que multiplica os valores atribuídos aos parâmetros de Severidade (gravidade do efeito da falha, seja em termos de segurança ou de procedimento do processo), Ocorrência (a probabilidade ou a frequência com que o modo de falha acontece) e a Detecção (coeficiente que reflete a probabilidade de o modo de falha ser detetado antes que os seus efeitos se consumam ou espalhem) [7]. Estes parâmetros são atribuídos consoante as tabelas presentes II anexo II, de 1 a 10, sendo que um valor mais perto de 10 refletem e contribuem para um maior fator de risco.

O primeiro FMEA desenvolvido na empresa data de Março de 2000 (presente na tabela 2.1), tendo o método vindo a ser usado em todos os projetos e processos desde então. É afirmado que, no início, era apenas um documento que tinha de ser entregue, uma espécie de formalidade que devia ser cumprida. No entanto, com a passagem do

tempo, a utilização contínua da metodologia permitiu identificar todas as vantagens que poderia ter para a organização.

Apesar de não ser obrigatória a sua entrega, é efetuada na mesma, para efeitos de transparência. Desta forma, o cliente pode consultá-lo sempre que achar importante e averiguar a robustez do processo responsável por produzir o produto que encomenda. A sua entrega enquadra-se no processo de Advanced Product Quality Planning – Planeamento Avançado da Qualidade do Produto (APQP), referido em maior detalhe no ponto 3.2. A metodologia permite maioritariamente identificar e avaliar modos de falha que, de outra forma, poderiam passar despercebidos, e alterações resultantes representassem elevados custos para a empresa.

O FMEA é desenvolvido enquanto evoluem os processos de análise do Desenho de Produto, providenciado pelo cliente, e do fluxograma de processo, entre outros. Desta forma, existe um fluxo constante de informação que flui entre os vários processos e documentação, aumentando e solidificando o conhecimento na organização. Isto faz também com que o seu desenvolvimento seja o mais natural e simples possível, não representando apenas uma tarefa para as equipas. É realizado por equipas multidisciplinares para que o conhecimento presente na documentação seja o mais abrangente possível, permitindo identificar e analisar mais modos de falha de uma forma mais completa. Na tabela 2.2 encontra-se uma secção de um FMEA efetuado na empresa, segundo as diretrizes da 4ª edição do Manual AIAG.

De momento, o critério principal para a priorização de modos de falha uns em relação aos restantes é o RPN – *Risk Priority Number*, ou Número de Prioridade de Risco. Este número oferece uma visão mais clara sobre o risco que cada modo de falha representa e a prioridade com a qual devem ser endereçados, reavaliando os passos do processo e aumentando os índices de ocorrência e deteção, se necessário. No entanto, isto também se pode revelar uma desvantagem. Muitas vezes são impostos pelas empresas clientes tetos máximos em termos de valores de RPN que o fornecedor tenha de cumprir. Um exemplo dado foi referido numa conversa com o responsável pelos processos FMEA na empresa, em que se refere a dificuldade em desenvolver um processo que obedeça a esses valores quando existem modos de falha com uma Severidade elevada, regularmente ligada a falhas que ponham em risco a segurança, seja de operadores ou do cliente final. É apontado que em certos projetos, empresas exigem que o teto máximo do valor de RPN é de 40. Como os valores de Severidade não podem ser alterados, é muito fácil atingir e ultrapassar este limite ao ter um valor de Severidade perto de 10, mesmo que os valores de Ocorrência e Deteção sejam relativamente baixos. Sendo assim, o RPN torna-se num critério de avaliação que pode não refletir perfeitamente o nível de risco, pois é possível ter um processo praticamente perfeito em termos de frequência de falhas e deteção das mesmas quando ocorrem e, mesmo assim, segundo alguns critérios, não cumprir as exigências do cliente.

Devido a isso, as empresas têm dado, nos últimos anos, um ênfase maior ao índice de Severidade que aos restantes – um dos aspetos prioritários abordados na primeira edição

**ANÁLISE MODAL DE FALHAS E EFEITOS
PROCESSO**

PRODUTO 456 Ref. Cliente: 500221/10 AMFE/FMEA N° 1 Rev. 1
 NOME CAIXA DO CINTO Equipe: Pessoa 1 Data: Orig. 06/03/00 Rev. 22/05/01
 DESENHO PM DP456 Plano Controle: 26 Pessoa 2 Pessoa 3 Coordenador Pessoa 1

Processo / Requisitos	Modo Potencial de Falha	Efeito(s) Potencial(is) da Falha	G R A V	C L S S	Causa(s) e Mecanismo(s) Potencial(is) da Falha	D E T E C T A B I L I D A D E	Controlo Actual do Processo	Ações Recomendadas	Responsível Prazo	Resultados das Ações					
										Acções Tomadas	R A	C I	D T		
Recepção da matéria prima	Material fora de Especificação.	Impossível de produzir	6		Problemas no Fornecedor	3	GR032 IC001/DQ								
		Produção de peças não conformes	5			3	GR032 IC001/DQ								
		Danos na ferramenta	5			3	GR032 IC001/DQ								
		Paragem/perda de produção	5			3	GR032 IC001/DQ								
		Impossível de produzir	6			3	GR032 IC001/DQ								
		Produção de peças não conformes	5			3	GR032 IC001/DQ								
Material incorrectamente identificado ou não identificado.	Danos na ferramenta	Danos na ferramenta	5		3	GR032 IC001/DQ									
			5		3	GR032 IC001/DQ									
			5		3	GR032 IC001/DQ									
Prensagem - Colocação da chapa no alimentador	Resguardo e/ou piso do desenrolador não colocados ou mal colocados	Impossível desenrolar a chapa. Perda de Produção	3		Mau aperto ou não colocação do resguardo e/ou piso	3	Visual. Instrução de manuseamento.								
		A chapa desce em relação à calandra provocando prisões mecânicas	3			3	Visual. Instrução de manuseamento.								
Abastecimento correcto da matéria prima	Desalinhamento da chapa em relação à calandra	Prisões ou tensões da chapa nos rolos de entrada	4		Má regulação das guias da calandra	3	Visual. Instrução de Manuseamento								
Desenvolvimento da chapa até a ferramenta / Colocação da chapa em boas condições para produzir.	Ferramenta com vibrações	Matriz, Punções ou porta punções partidos	5		Mau aperto da ferramenta	1	Visual. Instrução de Trabalho								
Montagem adequada da ferramenta na prensa /	Ferramenta danificada	Impossível produzir	6		Transporte deficiente	1	Visual. Instrução de Trabalho								
Montagem adequada da ferramenta	Ferramenta danificada	Falha na revisão da ferramenta	6		Falha na revisão da ferramenta	3	Plano de manutenção preventiva								

Tabela 2.1: Primeiro FMEA desenvolvido na empresa, em 2000

conjunta AIAG & VDA é este –, tendo assim uma visão mais clara sobre o que de facto é mais relevante e constitui um maior risco para o processo.

Outra dificuldade sentida e apontada na elaboração do FMEA é a falta de informação que por vezes existe. Nem sempre o cliente providencia (ou pode providenciar) uma amostra do produto final, ou do conjunto de que uma peça vai fazer parte. Mais recentemente, esta questão tem vindo a ser menos frequente (na nova edição é, inclusive, aconselhada a facilitação da obtenção de informação para o cliente), devido à percepção de benefício por parte do próprio cliente. Esta transparência permite que sejam avaliadas situações e modos de falha que, de outra forma, não poderiam ser equacionados.

RELAÇÃO COM O CLIENTE

O presente capítulo aborda essencialmente a forma como é desenvolvida a relação com o cliente, como é estruturado o desenvolvimento de um novo produto ou processo e de onde surge o FMEA, enquadrado no APQP e Production Part Approval Process – Processo de Aprovação da Peça de Produção (PPAP), ferramentas importantes neste âmbito e especialmente no setor automóvel, requeridas pelo *standard* IATF 16949 [29].

A necessidade de elaborar e concluir projetos progressivamente mais complexos com o avançar do tempo requer uma boa organização e relação entre cliente e fornecedor, há muitos passos que podem falhar e interromper o processo. Para o evitar, são utilizadas ferramentas e metodologias como o APQP, que permitem às empresas abordar as questões mais pertinentes de uma forma organizada e estruturada. Isto é alcançado através da utilização de um processo-base que é posteriormente adaptado consoante as necessidades tanto do cliente como do fornecedor, facilitando a comunicação entre organizações acerca do planeamento da qualidade do produto [30].

3.1 APQP

Originalmente referido como Advanced Quality Planning – Planeamento Avançado da Qualidade (AQP), é utilizado em empresas para que seja elevado o padrão de qualidade e desempenho, através do planeamento da qualidade. O primeiro manual do AQP foi lançado e utilizado pela Ford Motor Company no início dos anos 80 [31]. Com o processo disponibilizado pela empresa, os seus fornecedores desenvolveram métodos para a prevenção e deteção de falhas, beneficiando ambas as partes. Foi aperfeiçoado o processo, culminando no APQP, criado em 1994 pelo North American Automotive Original Equipment Manufacturer – Fabricante Original de Equipamento (OEM) – associação de fornecedores de equipamentos, do setor automóvel, neste caso –, tendo sido reeditado em 2008. O objetivo principal do APQP é compilar e agregar as boas práticas tidas pelas empresas do ramo num só processo, com a finalidade de fomentar a melhor forma possível de expressar requisitos, necessidades e expectativas do cliente [30].

O APQP é composto por várias ferramentas, podendo o próprio processo ser considerado como uma ferramenta. Algumas destas consideradas fundamentais - são referidas como *Core Tools* -, utilizadas para garantir uma conformidade com a norma IATF 16949, amplamente utilizada na indústria automóvel [32]. Há 4 *Core Tools* da qualidade para além do APQP, são elas:

- FMEA
- Measurement Systems Analysis – Análise de Sistemas de Medição (MSA)
- Statistical Process Control – Controlo Estatístico do Processo (SPC)
- PPAP

O MSA, ou Análise de Sistemas de Medição, é um processo experimental no qual são utilizadas ferramentas para medir a capacidade do sistema que retira as medições. É, por exemplo, avaliada e determinada quanta da variabilidade observada se deve ao próprio sistema de medição e não do processo que está a ser monitorizado [33]. O propósito da utilização da ferramenta é equacionar se o sistema de medição sob avaliação é instável, ou apresenta demasiada variabilidade, pois, se assim for, é possível que peças ou produtos fora das especificações exigidas sejam aceites, ou que produtos perfeitamente aceitáveis sejam rejeitados [34, 35].

O SPC, ou Controlo Estatístico do Processo, foca-se na utilização de ferramentas estatísticas para obter uma visão completa e contribuir para que haja um melhor controlo sobre o processo de fabrico [36]. São listadas cerca de 12 a 15 técnicas e ferramentas tidas como essenciais, por vários autores [36–38]. No livro *Statistical Process Control* (2019), são listadas algumas: cartas de processo (o que é feito); folhas de verificação/gráficos de totais (quantas vezes é feito); histogramas (figuras de variação); gráficos (figuras de variação com o tempo); análise de Pareto (priorização); análise de causa e efeito (o que causa os problemas); diagramas de dispersão (exploração de relações entre eles); cartas de controlo (monitorização da variação com o tempo) [39]. Utilizando estas ferramentas, calculando parâmetros como média, mediana, moda e analisando a variação, é avaliado o processo, sendo possível verificar se ocorre numa forma controlada e estável [34]. A Distribuição Normal tem um papel muito relevante no SPC. A localização da curva no eixo horizontal relaciona-se diretamente com a especificação a ser analisada. Assim, por exemplo, numa produção de parafusos M10, a localização do ponto mais alto da curva – o valor médio – seria nos 10 mm, distribuindo-se igualmente nas duas direções. A dispersão da curva é determinada pela adição de 3 desvios padrão (??) em cada lado da tendência central. A percentagem de encaixe do produto sob a curva pode então ser aplicada ao processo a ser analisado. Por exemplo:

- ± 1 ?? da tendência central tem 68.26% dos pontos;
- ± 2 ?? da tendência central tem 95.44%

- $\pm 3\sigma$ da tendência central tem 99.73%

A distribuição normal aplica-se aos resultados de produção num processo que funcione normalmente. Existe uma variação natural, associada a qualquer processo, e essa mesma variação é controlada ao longo do tempo utilizando Cartas de Controlo Temporal, como a presente na figura 3.1.

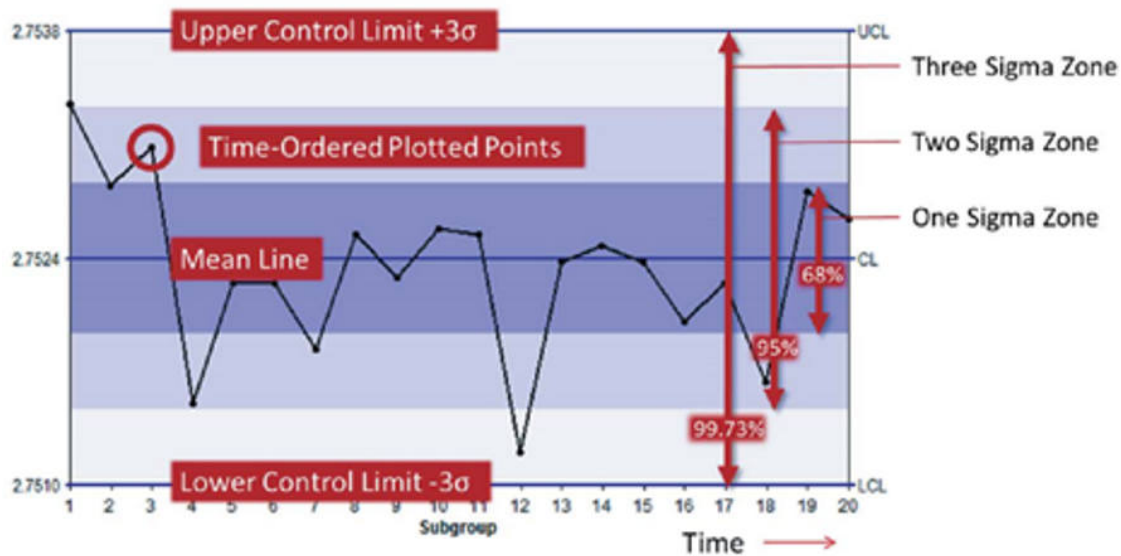


Figura 3.1: Carta de Controlo Temporal [40]

Sendo utilizado maioritariamente quando é desenvolvido um novo produto ou atualizado um produto existente, o APQP destaca-se por proporcionar uma abordagem estruturada ao projeto do produto e processo. Esta abordagem é a de adoção de um conjunto padronizado de requisitos de qualidade que permitem aos fornecedores conceber um produto que satisfaça as necessidades do cliente.

O ciclo presente na figura 3.2 é comumente utilizado para representar graficamente o ciclo do planeamento da qualidade do produto [30]. A ilustração permite visualizar a base para as restantes ferramentas utilizadas, como o APQP, o PPAP e o próprio FMEA. Na verdade, a melhoria contínua só se verifica porque o conhecimento adquirido em projetos anteriores é utilizado para alavancar o sucesso de projetos futuros.

Este ciclo é uma adaptação do ciclo de Deming mas, enquanto que o ciclo de Deming se foca na interação constante entre os passos (investigação, projeto, produção e vendas), segundo o ciclo PDCA é a sequência de operações que aumenta o valor de cada um dos passos [41]. O PDCA é um processo no qual são definidos padrões durante o passo do planeamento que, no próximo ciclo, serão reavaliados e redefinidos, levando à melhoria contínua. O propósito deste gráfico é enfatizar a importância do planeamento: os primeiros três quartos do ciclo são dedicados ao planeamento e preparação de alguma forma,

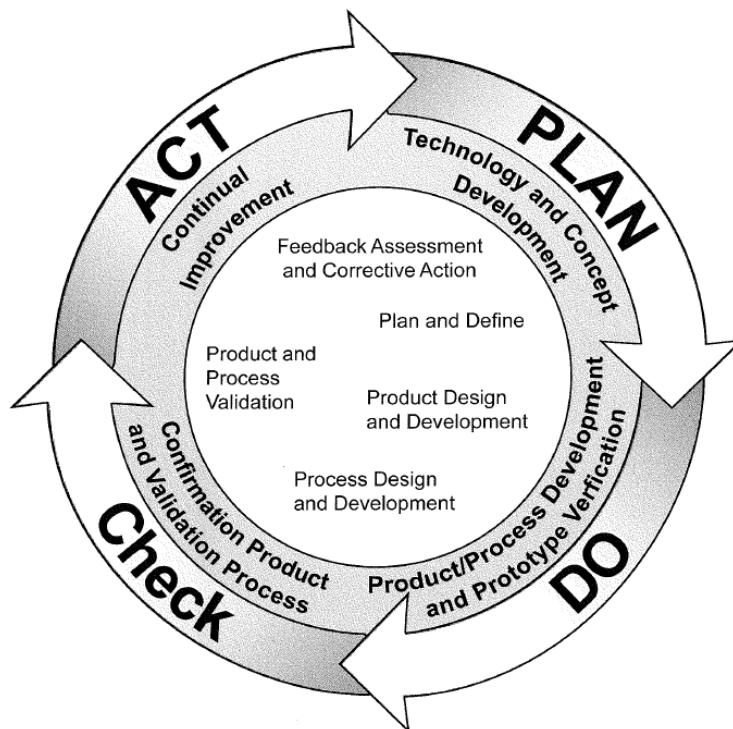


Figura 3.2: Ciclo Plan-Do-Check-Act – Planear-Fazer-Verificar-Agir (PDCA) [30]

normalmente através de validação de processos e de qualidade de produto. Apenas o quarto e último passo do ciclo é que envolve ação propriamente dita: a implementação do que foi anteriormente planejado permite avaliar a satisfação do cliente, continuando assim a busca da melhoria contínua, fundamental para empresas em muitos aspetos, tendo como prioridade a melhoria da qualidade do produto e a otimização dos custos associados [42].

A equipa que desenvolve o processo do APQP deve ser multifuncional, envolvendo todos os departamentos desde o de marketing ao da produção. Apenas assim se pode cumprir o objetivo de facilitar a comunicação e fomentar a colaboração entre departamentos. Com a utilização do APQP, as exigências do cliente traduzem-se em requisitos e especificações técnicas. Assim, é permitida a identificação das ferramentas e métodos mais adequados para que se possam mitigar os riscos associados com a implementação ou mudança em produtos ou processos.

De forma semelhante ao ciclo PDCA, as três primeiras secções do APQP centram-se no planeamento e prevenção e constituem 80% do processo, como é possível verificar em 3.3. A quarta e quinta secções apoiam os restantes 20% e concentram-se na validação e na prova [31]. Tendo por base o manual APQP, desenvolvido pela AIAG, são retirados os 5 passos constituintes do APQP [30].

Num primeiro passo, são definidos objetivos, em termos de projeto, listas de materiais, fiabilidade e qualidade. Estes resultados são obtidos tendo como *inputs* os requisitos do cliente, maioritariamente. Daqui para a frente, os *inputs* são maioritariamente os *outputs*

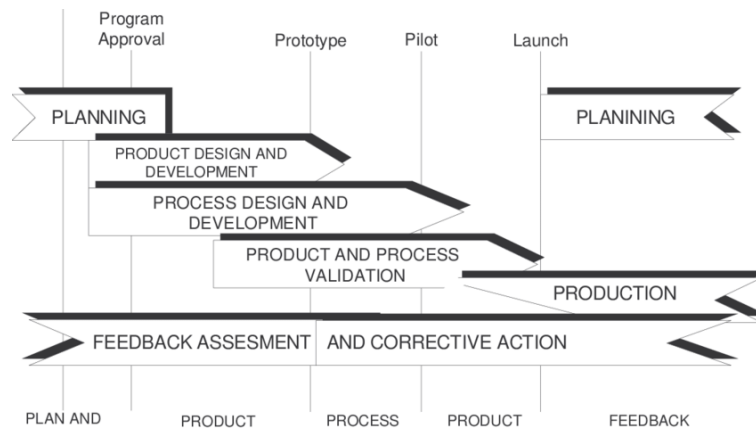


Figura 3.3: Gráfico de desenvolvimento do APQP [43]

dos passos anteriores.

Assim, no segundo passo já são criados documentos como o Design Failure Mode Effect Analysis – Análise de Modos de Falha e Efeitos no Projeto (DFMEA), fazendo uma análise de falhas e efeitos ao projeto do produto; as especificações de material; material de testagem e avaliação da Factibilidade do projeto para o fornecedor, entre outras.

O terceiro passo depende da conclusão bem sucedida dos anteriores e foca-se em delinear especificações como o fluxograma de processo, uma representação esquemática de como o processo deve fluir ao longo da linha de produção, permitindo uma análise total do mesmo ao invés de abordar passos individuais em detalhe. Também no Process Failure Mode Effects Analysis – Análise de Modos de Falha e Efeitos no Processo (PFMEA), abordado em maior detalhe no capítulo 4 mas que é uma revisão e análise sobre um processo – novo ou revisto – com o intuito de antecipar a existência de possíveis problemas com o mesmo. São também definidas e redigidas as instruções de trabalho para o processo: um guia que deve ser claro e detalhado o suficiente para os operadores e pessoal que tenha responsabilidade direta sobre o processo. Este guia deve incluir parâmetros como velocidades de operação e tempos de ciclo.

A quarta fase da ferramenta aborda essencialmente a validação e aprovação, tanto do produto como do processo. É efetuada uma produção em série já em quantidades significativas para que se avalie o processo, avaliados os sistemas de medição e controlo e validada a embalagem em que será expedido o produto final para o cliente.

O quinto passo permite especificamente à organização comunicar as lições aprendidas e fornecer *feedback*, de forma a que se desenvolvam *standards* de trabalho e processo. Absorvendo todos os passos anteriores, é utilizada a documentação anteriormente produzida para analisar a variação presente no processo e são tomadas ações para a diminuir. Devem ser apresentadas propostas para a diminuição de custos, tempo despendido e a melhoria do processo, o que vem na linha do que é proposto no ciclo da qualidade do produto, ou PDCA.

Uma lista de benefícios do APQP inclui:

- Direcionamento de recursos através da identificação dos itens vitais
- Promover a identificação precoce de mudanças requeridas
 - Intencionais (o que está a ser alterado de propósito para trazer valor ao cliente)
 - Incidentais (ambiente, utilização pelo cliente e degradação)
- Evitar alterações tardias (especialmente pós-lançamento), agindo no sentido de antecipar falhas
 - Menos alterações ao nível do projeto e processo mais tarde no decurso do desenvolvimento de produto
- Produtos de qualidade em tempo útil ao mais baixo custo
- Múltiplas opções para mitigar o risco quando encontradas antecipadamente
- Melhoria da colaboração entre o projeto do produto e o processo de fabrico do mesmo
- Desenho melhorado para o fabrico e montagem (Design for Manufacturing / Assembly – Projeto para o Fabrico / Montagem (DFM/A))
- Soluções de menor custo escolhidas e implementadas mais cedo no processo
- Captura e reutilização do conhecimento previamente adquirido, evolução do Conhecimento Tribal e criação e utilização de *standards* de trabalho

3.2 Utilização do APQP na Empresa

A empresa rege-se por uma versão adaptada do APQP à sua realidade e às suas necessidades, processo no qual têm intervenção todos os departamentos da empresa: comercial, compras, engenharia, engenharia e projeto, logística, produção e qualidade, bem como a direção geral de qualidade e a direção geral da organização. Abaixo, na figura 3.4, encontra-se uma representação gráfica do APQP praticado na empresa. Nela é possível encontrar os passos a tomar, ordenada pelo momento em que devem ser considerados, sendo que muitos deles ocorrem simultaneamente. Tal como no processo original, existem 5 secções:

0. Consulta
1. Lançamento
2. Processo de Industrialização
3. PPAP

4. Validação do Processo de Produção

A primeira fase é considerada uma fase 0, em que é proposto pelo cliente um projeto a desenvolver, ainda sem compromissos. É feita uma avaliação de pré-Factibilidade, são avaliadas as características do projeto e equacionadas questões como se é possível fazê-lo nas instalações com os equipamentos existentes e se é rentável tendo em conta a quantidade de peças ou componentes a fabricar e, se não for, se é possível negociar com o cliente para que existam alterações no projeto para que se chegue a um entendimento. É importante, no entanto, referir que neste processo a maior fonte de informação por parte do cliente é transmitida através do desenho de produto. Não é costume ser fornecido o DFMEA. Isto faz com que, mais tarde no processo APQP, tenham de ser identificados pela empresa as características críticas do produto, o que poderá causar mais adversidades, passo esse que se enquadra já na fase 2. Até lá, é feita nova avaliação de Factibilidade, são definidos em concreto os requisitos do produto e da ferramenta que o vai estampar – a empresa projeta e fabrica as ferramentas necessárias para os seus projetos, salvo raras exceções.

Em cada uma das fases a partir da 0 são realizadas validações por parte do Departamento de Qualidade, seguindo os princípios da melhoria contínua. Por exemplo, é utilizada a Open Point List – Lista de Pontos em Aberto (OPL) em várias ocasiões, sendo na empresa utilizada como uma lista de ações que estão em aberto, a serem acompanhadas. Semanalmente é feita uma reunião de acompanhamento de projetos e é atualizada a lista, composta pelo ponto e a responsabilidade da organização sobre ele – por vezes compartilhada com um cliente ou fornecedor. São feitas validações estáticas e dinâmicas, relativas à ferramenta em si e à sua operação, respetivamente.

A quarta secção refere-se ao PPAP, referido acima quando se mencionaram as *Core Tools* e intimamente relacionado com o APQP. As ferramentas não podem ser separadas, já que o PPAP oferece provas de que foi efetuado o APQP e se o PPAP for medíocre então o APQP que serviu como base também deve ser fraco [31]. Os processos têm uma grande quantidade de elementos em comum, como listado no subcapítulo 3.3.

3.3 PPAP

Num mundo cada vez mais global e digital torna-se cada vez mais significativa a necessidade de padronizar formas de atuar, para permitir uma melhor comunicação entre fornecedor e cliente e para que cada um saiba o que pode esperar do outro. Assim, com o objetivo de diminuir as perdas de tempo e outros recursos ao otimizar o procedimento, surge o PPAP. Esta ferramenta dita que conteúdos devem ser entregues ao cliente, assegurando no processo a qualidade previamente estabelecida, na quantidade correta e dentro dos prazos estipulados [44].

O PPAP é uma ferramenta desenvolvida também pela AIAG, como são as 5 *Core Tools*, num esforço conjunto com a Ford, General Motors e Chrysler. Tendo tido o seu início em 1993, recebeu a 4ª edição em Junho de 2006, que até hoje se mantém como a mais recente.



Figura 3.4: Ciclo APQP praticado na empresa

Este processo está também alinhado com a norma norma IATF 16949, à altura ainda ISO/TS 16949:2002. O processo é utilizado maioritariamente na indústria automóvel mas também na aeroespacial, contribuindo grandemente para a standardização de processos [45–47]. Os elementos documentais do PPAP são redigidos enquanto são desenvolvidos processos do APQP. São listados 18 elementos a ser entregues pela organização ao seu cliente no manual da AIAG, presentes abaixo:

1. Registos de Projeto
2. Documentos de Alteração de Engenharia, Autorizados
3. Aprovação de Engenharia do Cliente
4. DFMEA
5. Fluxograma de Processo
6. PFMEA
7. Plano de Controlo
8. Estudos de MSA
9. Resultados Dimensionais
10. Resultados dos Estudos acerca do Material/Desempenho
11. Estudos Iniciais de Processo/ Estudos de Capacidade
12. Documentação acerca da Qualificação do Laboratório
13. Relatório de Aprovação da Aparência
14. Amostras de Peças de Produção
15. Amostra Mestre
16. Auxiliares de Verificação
17. Requisitos Específicos do Cliente
18. Part Submission Warrant – Mandato de Submissão de Peças (PSW)

Esta é a lista oficial definida pela AIAG. Os documentos entregues num determinado processo podem e devem ser acordados entre fornecedor e cliente, seguindo estas diretrizes [48]. Na organização em questão nem todos os documentos são regularmente enviados ao cliente. Neste caso, não são entregues os Documentos de Alteração de Engenharia, em que são descritas mudanças já incorporadas no produto ou no processo que o produz mas que ainda não estão documentadas; o DFMEA pois, como a organização não se encarrega

do desenvolvimento do projeto do produto, não faz sentido que se faça um DFMEA; o Relatório de Aprovação de Aparência e por fim a Amostra Mestre, sendo suficientes as Amostras providenciadas.

Existem 5 níveis nos critérios de submissão de PPAP, consoante a quantidade de informação providenciada ao cliente por parte do fornecedor [49]. São assim definidos:

Nível 1 – PSW submetido ao cliente

Nível 2 – PSW submetido com amostras de produto e dados de apoio limitados

Nível 3 – PSW submetido com amostras de produto e dados de apoio completos

Nível 4 – PSW e outros requisitos, como definidos pelo cliente

Nível 5 – PSW com amostras de produtos e dados de apoio completos, disponíveis para revisão no local de fabrico do fornecedor

O PSW, ou Mandato de Submissão de Peças, é parte integrante do PPAP, como uma síntese de todo o processo. Inclui a necessidade da submissão do processo – novo produto, reavaliação de um produto, etc. –, o nível de PPAP de 1 a 5, uma declaração de conformidade com os requisitos do cliente, observações, assinatura de um trabalhador autorizado pelo fornecedor e um espaço para o cliente indicar a disposição do PPAP. Um exemplo de folha de PSW, utilizada pelas marcas Ford, General Motors e Chrysler, encontra-se presente no apêndice I.

METODOLOGIA FMEA

Neste quarto capítulo é feita uma contextualização acerca da metodologia FMEA, à semelhança da que foi feita no capítulo 3 acerca do APQP e PPAP.

4.1 FMEA

A metodologia FMEA foi descrita pela primeira vez em 9 de Novembro de 1949, no procedimento militar MIL-P-1629 "Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis", seguido do MIL-STD-1629A, editado em 1980 sob o mesmo título, redigidos e utilizados pelo exército norte-americano. Apesar de ter sido cancelado em 1998, teve um impacto significativo na maneira como se desenvolvem projetos. No documento são referidas as análises FMEA e Failure Mode Effects and Criticality Analysis – Análise de Modos de Falha, Efeitos e Criticidade (FMECA). Tendo sido utilizada em missões da National Aeronautics and Space Administration – Administração Nacional da Aeronáutica e do Espaço (NASA), especificamente a missão Apollo, que culminaram com a alunagem, tem sido empregue em assuntos relacionados com segurança no local de trabalho [50], gestão de cadeias de abastecimento e variadas indústrias como a automóvel [51], têxtil [50, 52], eletrónica, militar [53, 54] e dos cuidados de saúde [55–57], pelo facto de possibilitar uma análise extensa aos modos de falha de produtos e processos, permitindo avaliar o risco.

Definido por Ahsen, Petruschke e Frick (2022) como uma "ferramenta de gestão da qualidade particularmente comum, que analisa potenciais falhas de produto ou processo, relativamente à probabilidade de ocorrência para os clientes e quão seriamente devem ser consideradas as consequências da falha"[58], o FMEA permite, através da sua abordagem, não só identificar as fontes que representam um maior risco mas também minimizá-lo através de uma fase de otimização. Foi introduzida à indústria automóvel na década de 70 do século XX pela Ford, após a controvérsia com o seu modelo Pinto, de forma a assegurar a segurança e cumprimento com as normas [59]. A metodologia diferencia-se por ter como base a definição de um valor de RPN, que define a urgência da necessidade de este modo de falha ser reavaliado e otimizado [58]. Este valor é calculado ao serem

multiplicados três fatores, com um índice entre 1 e 10:

A Severidade é o valor que avalia a gravidade do efeito da falha no passo do processo que está a ser avaliado [7]. Valores mais altos são os relacionados com a segurança – se um modo de falha colocar em risco a segurança de um operador ou até do cliente final, o seu valor de severidade será de 10 –, cumprimento com regulamentos internos ou requisitos legais – se um modo de falha levar ao incumprimento de requisitos legais o seu valor de severidade será de 9 – ou perda da função principal do equipamento do qual a peça a ser produzida fará parte – neste caso o seu valor de severidade será de 8. Por outro lado, valores mais baixos estão associados a ligeiros inconvenientes, que não ponham em risco nenhuma função principal do equipamento nem o processo em si. Por exemplo, uma severidade de 2 refere-se a uma peça com o aspeto ligeiramente alterada em relação ao expectável. Num modo de falha com uma severidade de 1 não existe qualquer efeito sobre o processo ou produto final. Na tabela II.1 estão presentes os critérios gerais para a avaliação e atribuição de valores para a Severidade.

A Ocorrência é uma classificação para a frequência segundo a qual a causa de falha ocorre no processo. Esta classificação é determinada por comparação a produtos ou processos similares e por avaliação sobre como é que os sistemas que estão em posição para prevenir que a causa da falha se verifique. A equipa multidisciplinar vai, assim, determinar qual será um valor adequado para a ocorrência da causa da falha. Quanto maior for o coeficiente de Ocorrência, mais vezes irá ocorrer, e menor será o controlo de prevenção para o impedir. Na tabela II.3 estão presentes os critérios gerais para a avaliação e atribuição de valores para a Ocorrência.

A Detecção é o coeficiente associado à possibilidade de um efeito de falha ser detetado. É determinado ao serem avaliados os modos de deteção (por inspeção humana ou equipamento automatizado, por exemplo) e a probabilidade de detetarem o modo de falha quando este acontece. Tal como os outros dois índices, varia entre 1 e 10, sendo que para um valor alto existe uma alta possibilidade de o modo de falha passar despercebido e não existir qualquer forma de o detetar. Quanto mais baixo for o valor, maior é a probabilidade de o modo de falha ser detetado e até que seja impedida a produção de mais peças não conformes. Na tabela II.4 estão presentes os critérios gerais para a avaliação e atribuição de valores para a Detecção.

É importante referir que estes valores são atribuídos qualitativamente, dependendo quase exclusivamente da experiência que a equipa tem com processos e produtos similares, para que possam eficazmente identificar os fatores diferenciadores e agir conforme. Desta forma, não é adequada uma comparação de classificações de FMEA redigidos por equipas diferentes sem ser dado o contexto inerente às decisões que foram tomadas [7]. Isto leva a uma necessidade de conformidade nos resultados obtidos, razão pela qual o RPN foi substituído pelo Action Priority – Prioridade de Ação (AP) na edição mais recente do Manual FMEA (ver secção 4.2).

Existem 2 tipos de FMEA principais: o DFMEA, focado nas funções e características do produto, e o PFMEA, que avalia os passos do processo de produção.

4.2 Nova Edição do Manual FMEA

Previamente ao lançamento da 1ª edição conjunta do Manual FMEA AIAG-VDA, em 2019, não existia concordância entre os métodos descritos por cada organização. Isto gerava alguma confusão, especialmente nas empresas que operavam em ambos os mercados [60]. Assim, após mais de 3 anos de colaboração entre a AIAG e a VDA é lançada esta 1ª edição conjunta, com o propósito não de definir requisitos rigorosos, mas para clarificar os passos, as atividades e as ferramentas a utilizar. Este manual está alinhado com as normas SAE J1739, IATF 16949:2016, ISO 9001 e ISO 26262 [7].

O processo FMEA desenvolvido pela AIAG é aceite como sendo um dos manuais mais notáveis e utilizados nos últimos anos nos EUA, sendo que muitos dos *standards* derivam do Manual FMEA pela AIAG. A sua primeira edição foi lançada em 1993, tendo sido reeditado em 1995, 2001 e em 2008, sendo que a 4ª edição é a que tem vindo a ser utilizada na empresa. A exceção é, no entanto, a abordagem tomada pela VDA, que se destaca por ser baseada na Fault Tree Analysis – Análise da Árvore de Falhas (FTA), em que são analisadas as relações entre vários níveis de falhas e como se correlacionam [60].

Assim, a metodologia abordada pela AIAG e VDA em conjunto toma em conta elementos provenientes de ambas as entidades. É, nesta edição, em contraste com as anteriores [60], tomada uma perspetiva de separar o processo em 7 passos diferentes [7]:

1. Planeamento e Preparação
2. Análise da Estrutura
3. Análise da Função
4. Análise da Falha
5. Análise de risco
6. Otimização
7. Documentação dos Resultados

Num primeiro passo, é feita uma identificação do projeto, dos InTent, Timing, Team, Tasks, Tools – Intenção, Calendarização, Equipa, Tarefas, Ferramentas (5T), dos limites da análise e do FMEA ou FMEAs que serão tidos como base para o FMEA a desenvolver. Os 5T são o plano do projeto, é definida a intenção e os objetivos a alcançar com o FMEA, o cronograma com a janela temporal para o desenvolver, a equipa multifuncional que fará parte da sua execução, as tarefas a concluir e as ferramentas que serão utilizadas para o efeito. Devem ser tidos em conta aspetos como a novidade do processo ou do produto, a sua similaridade com produtos existentes, os Customer Specific Requirements – Requisitos Específicos do Cliente (CSR) e a melhoria contínua. No final deste passo devemos ter estes passos completos e obter um cabeçalho para o FMEA como o presente na figura 5.1.

No segundo passo, nomeado como *Structure Analysis* ou Análise da Estrutura, são utilizados *inputs* tais como o fluxograma e a estrutura em árvore, presentes na tabela 4.1 e figura 4.1, respetivamente, que permitem obter uma visão abrangente sobre o processo e como flui, desde a chegada da matéria-prima à saída do produto final. Estes documentos e figuras são desenvolvidos durante a fase de projeto do que será o processo.

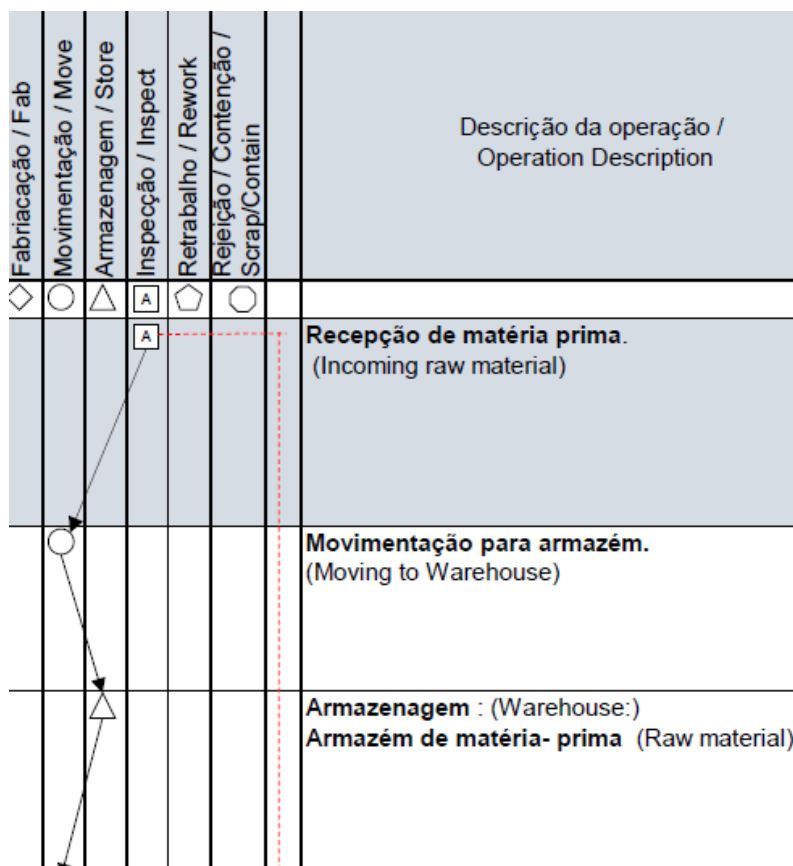


Tabela 4.1: Trecho de Exemplo de Fluxograma

Com o auxílio destes documentos e uma definição dos passos do processo, definem-se os elementos que vão constar no segundo passo. Um exemplo de formatação está presente na tabela 4.2.

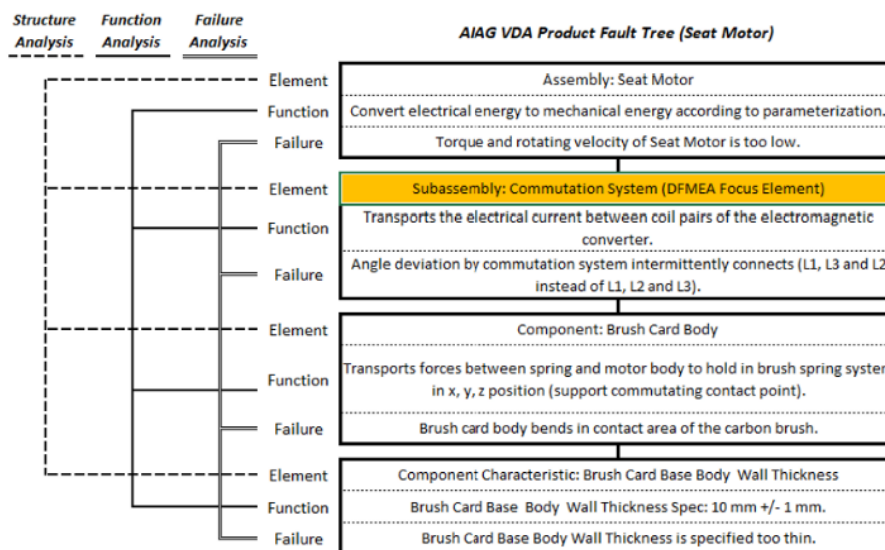


Figura 4.1: Exemplo de FTA segundo AIAG & VDA de motor Seat [61]

ANÁLISE DA ESTRUTURA (PASSO 2)		
1. Item do Processo Sistema, Subsistema, Elemento da Peça ou Nome do Processo	2. Passo do Processo N.º da Estação e Nome do Elemento de Foco	3. Elemento de Trabalho do Processo Tipo 4M
Linha de Montagem do Motor Elétrico	[OP 30] Processo de Cravação do Rolamento Sinterizado	Operador
Linha de Montagem do Motor Elétrico	[OP 30] Processo de Cravação do Rolamento Sinterizado	Prensa

Tabela 4.2: Exemplo de Análise da Estrutura [7]

Aqui, é definido o item do processo, o item agregador e produto final; o passo do processo a avaliar e no qual o modo de falha irá decorrer; o elemento de trabalho do processo. A categoria Man, Machine, Material, Milieu – Homem, Máquina, Material, Meio (4M) refere-se aos elementos que participam diretamente no passo em questão. São eles a Máquina (*Machine*), o Homem (*Man*), o Material e o Ambiente ou Meio (*Millieu*, palavra francesa para o ambiente e os arredores nos quais o operador existe e se move).

O terceiro passo do FMEA consiste na Análise da Função. Aqui, através de colaboração entre os membros da equipa, são definidas as funções a desempenhar no passo do processo e o efeito que o mesmo terá no cliente e no utilizador final. À semelhança do que ocorre nas instruções de trabalho, aqui é definido qual o passo que o operador deve tomar. Esta é mais uma evidência do valor do FMEA: a sua extensão e o facto de ter informação tão completa, permite que possa ser utilizado um pouco como um repositório de informação, assunto abordado na conversa com o atual responsável pelos FMEA na empresa, previamente referida. Um exemplo do passo 3 encontra-se na tabela 4.3.

1. Função do Item do Processo Função do Sistema, Subsistema, Elemento da Peça ou Processo	2. Função do Passo do Processo e Característica do Produto (O valor quantitativo é opcional)	3. Função do Elemento de Trabalho do Processo e Característica do Processo
<u>Instalações de Origem:</u> Montagem do eixo no conjunto do encaixe da haste <u>Instalações de Destino:</u> Montagem do motor na porta do veículo <u>Utilizador Final:</u> O vidro sobe e desce	Crave o rolamento sinterizado para alcançar a posição axial no encaixe da haste até ao espaço máx. de acordo com o desenho	A máquina crava o rolamento sinterizado na base do encaixe da haste até à posição axial definida

Tabela 4.3: Exemplo de Análise da Função [7]

Após serem perfeitamente identificados e descritos estes campos, pode-se proceder a uma análise de falhas e do risco inerente às mesmas. No quarto passo da abordagem, a Análise de Falha (presente na tabela 4.4, são identificados e avaliados as falha em cadeia: o Modo de Falha, causado pela Causa da Falha, dá origem ao Efeito da Falha. A análise feita nos passos anteriores permite fazer uma ligação direta entre os passos do processo e a forma como, neste caso, irão ocorrer as falhas. Após serem avaliadas estes três parâmetros então sim, é determinado o valor de Severidade associado ao Efeito da Falha. Esta abordagem é mais extensa que a tomada na 4ª edição do Manual AIAG, exigindo um maior investimento de tempo por parte das equipas que o vão completar, no entanto oferece uma maior robustez ao FMEA e, neste caso, ao índice de Severidade.

Uma falha ocorre quando um passo ou produto não se encontra sob conformidade com as normas redigidas. O Efeito da Falha pode ser considerado nas instalações em que está a ser produzido o bem, nas instalações do cliente que o vai utilizar no seu próprio processo ou do utilizador final. Estes efeitos podem variar entre peças cujas condições possam colocar algum destes em risco de segurança ou algo mais benigno como o vidro de uma janela de um veículo subir demasiado lentamente. O modo de falha é a maneira como o processo pode impedir que o produto cumpra a função pretendida [7]. Este vai provocar os Efeitos de Falha que mais tarde se vão fazer sentir. A causa da falha é o motivo que levou a que o modo de falha se manifestasse. Podem existir várias causas de falha e devem todas ser tidas em conta e registados. As causas de falha podem dever-se a um elemento dos 4M, seja por falha direta do Homem ou causada indiretamente por variações na Máquina, Material ou o Meio.

O quarto e quinto passos estão intimamente relacionados, razão pelo qual a figura 4.5 os agrupa num só. Entre estes dois passos são atribuídos os índices de Severidade, Ocorrência e Detecção. No passo 5 os objetivos principais são: atribuir controlos de prevenção e deteção para as causas de falha; classificar a Severidade, Ocorrência e Detecção associada; atribuição do valor de AP.

Ações de controlo de prevenção incluem, por exemplo, fazer uma manutenção adequada aos equipamentos, redigir e disponibilizar instruções de trabalho que permitam uma interpretação correta do processo, entre outras. Estes controlos de prevenção são

ANÁLISE DA FALHA (PASSO 4)		
1. Efeitos da Falha (FE) no Elemento de Nível Superior Seguinte e/ou Utilizador Final	2. Modo de Falha (FM) do Elemento de Foco	3. Causa da Falha (FC) do Elemento de Trabalho
<p>Instalações de Origem: Espaço demasiado reduzido para montar o eixo sem potenciais danos</p> <p>Instalações de Destino: Montagem do motor na porta do veículo requer força de inserção adicional com potenciais danos</p> <p>Utilizador Final: Tempo de fecho confortável demasiado longo.</p>	Posição axial do rolamento sinterizado não é alcançada	A máquina para antes de alcançar a posição final

Tabela 4.4: Exemplo de Análise da Falha [7]

identificados e implementados durante o desenvolvimento do próprio processo de produção propriamente dito, especialmente a fase de prototipagem [7]. Já os controlos de Detecção permitem o reconhecimento de quando ocorre uma falha, antes de o produto estar terminado ou ser expedido para cliente. Exemplos de controlos de deteção são a inspeção visual, inspeção aleatório com pelas, monitorização da força exercida numa prensa, inspeção através de sensores de movimento.

ANÁLISE DA FALHA (PASSO 4)			ANÁLISE DO RISCO DO PFMEA (PASSO 5)							
1. Efeitos da Falha (FE) no Elemento de Nível Superior Seguinte e/ou Utilizador Final	Severidade (S) do FE	2. Modo de Falha (FM) do Elemento de Foco	3. Causa da Falha (FC) do Elemento de Trabalho	Atual Controlo de Prevenção (PC) da FC	Ocorrência (O) da FC	Atuais Controlos de Detecção (DC) da FC ou FM	Deteção (D) da FCTM	PFMEA/AP	Consequências Esperadas	Código de Filtro (Opcional)
<p>Instalações de Origem: A montagem do eixo não é possível porque a folga é demasiado reduzida</p> <p>Instalações de Destino: Nenhuma</p> <p>Utilizador Final: Tempo de fecho confortável demasiado longo</p>	8	Posição axial do rolamento sinterizado não é alcançada	A máquina para antes de alcançar a posição final	Força ajustada de acordo com a conector de dados	5	Verificação a 100% da curva de desempenho do motor de acordo com a spec. MRKJ5038	2	M		

Tabela 4.5: Exemplo de Análise do Risco [7]

A escala numérica dos índices é de 1 a 10, sendo 10 o valor que contribui mais para um fator de risco acentuado. Como referido anteriormente, a Severidade é um índice que reflete o efeito mais grave possível para o modo de falha em questão. Os fatores mais tidos em conta são a segurança e a função primária que a peça vai desempenhar. A Ocorrência pode ser avaliada segundo a eficácia que os controlos de prevenção têm para impedir que a falha ocorra, mas também segundo a frequência de falhas que acontecem, seja por mil peças ou por intervalo temporal. As tabelas referentes a estes modos de avaliação encontram-se presentes no Anexo 2. O índice de Detecção depende exclusivamente dos controlos de Detecção aplicados ao processo, e a sua eficácia e consistência em identificar corretamente modos de falha quando os mesmos ocorrem. Após serem definidos os índices de Severidade, Ocorrência e Detecção, devem ser consultadas as tabelas de prioridade de ação para DFMEA ou PFMEA e atribuído o valor de AP.

O sexto passo, exemplificado na tabela 4.6, consiste na Otimização do processo. Aqui, são identificadas as ações que podem ser tomadas, necessárias para reduzir os riscos previamente apontados. Os responsáveis pelas ações e os prazos em que devem ocorrer são nomeados.

Utilizando os princípios da melhoria contínua e o ciclo PDCA, após identificação de aspetos a melhorar, atua-se sobre os mesmos. Contrariamente ao que se verificava anteriormente, com a 4ª edição do Manual AIAG – em que os três indicadores tinham o mesmo peso sobre o resultado final (RPN) – na 1ª edição conjunta do Manual FMEA AIAG-VDA o passo de Otimização (anterior Reanálise do Risco) é mais eficaz se as equipas se focarem primeiro em modificar o processo por forma a reduzir o fator de Ocorrência da causa da falha e, apenas depois, no aumento da capacidade de Detecção da mesma. Isto se não for possível reavaliar o processo por forma a eliminar ou diminuir o efeito da falha [7].

ANÁLISE DE RISCO DO PFMEA (PASSO 5)					OTIMIZAÇÃO DO PFMEA (PASSO 6)													
Atualização de Prevenção (PC) da FC	Ocorrência (O) da FC	Atuais Controlos de Detecção (DC) da FC ou FM	Detecção (D) da FC/FM	PFMEA AP	Ação de Prevenção	Ação de Detecção	Nome do Responsável	Data de Conclusão	Objetivo	Estado	Ação Tomada com Indicador para Destacar	Data de Conclusão	Severidade (S)	Ocorrência (O)	Detecção (D)	Características Especiais	PFMEA AP	Observações
Força ajustada de acordo com a ficha de dados	5	Verificação a 100% da curva de desempenho do motor de acordo com as especificações. MRKJ5038.	2	M		Prensa selecionada com sensor de controlo da posição	Prensa selecionada com monitorização da força	Engenheiro de Processos, Paul Duncan	dd/mm/aaaa	aberto			8	3	2		L	

Tabela 4.6: Exemplo de Passo de Otimização [7]

O sétimo e último passo foi introduzido como uma conclusão para o processo. Nele, são documentados os resultados do mesmo e é feita a análise a tudo o que o precedeu. Num relatório são retomadas as intenções iniciais e comparadas com o que de facto decorreu. Apresentam-se as tabelas de Severidade, Ocorrência e Detecção (SOD) e faz-se um resumo das ações que foram tomadas no âmbito da Otimização de processo.

Com a utilização do RPN, existem 220 resultados possíveis, desde 1 a 1000. Pode colocar-se o seguinte exemplo:

$$S * O * D = RPN \tag{4.1}$$

$$9 * 4 * 2 = 72 \tag{4.2}$$

$$3 * 6 * 4 = 72 \tag{4.3}$$

É obtido o mesmo resultado de RPN, pelo que pode ser complicado decidir qual deles deve ser abordado primeiro. Na equação 4.2 temos uma Severidade elevada, que pode significar perda de função principal do equipamento ou até problemas relacionados com a segurança, no entanto a sua Ocorrência e Detecção são relativamente baixas. Na equação 4.3 temos modo de falha que não é muito grave mas acontece mais regularmente e a sua deteção é mais rara. Por vezes as equipas deparam-se com estas questões. Podem também imaginar-se exemplos em que um modo de falha com um RPN marginalmente superior pode ser na verdade menos prioritário que um inferior, que apresente no entanto uma Severidade maior.

O exemplo abordado nas equações tem uma interpretação diferente – e mais clara – com a utilização do AP. Consultando a tabela podemos descobrir que a prioridade de ação seria **alta** para o exemplo da equação 4.2 e **baixa** para a equação 4.3. Apenas existem 3 resultados possíveis para o índice AP. Apesar de isto levar a que muitos dos modos de falha partilhem resultados, sabe-se qual é a forma de atuação a tomar [7]:

- Se o AP for alto, a equipa **necessita** de identificar ações adequadas
- Se o AP for médio, a equipa **deverá** identificar ações adequadas
- Se o AP for baixo, a equipa **poderia** identificar ações adequadas

É notado por autores que o novo sistema presente na 1ª edição conjunta do Manual FMEA AIAG-VDA pode ser demasiado extenso e até entediante e isso pode desmotivar as equipas [60, 62]. É também apontado que o método é "ineficiente do ponto de vista do uso", e especialmente difícil de utilizar com o Microsoft Excel [60, 61]. O autor da presente dissertação partilha desta impressão. O desenvolvimento do FMEA desta forma, apesar de apresentar mais informação que anteriormente, requer um maior investimento temporal às equipas, para que o façam segundo as diretrizes indicadas no Manual.

No entanto, são apontadas vantagens, nomeadamente os novos critérios para atribuição de valores de SOD, mais objetivos [60]. Também a substituição do critério RPN pelo novo AP, por razões previamente apresentadas. Estas mudanças implicam uma maior consistência nos resultados de processos, mesmo que realizados por equipas diferentes.

APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

No presente capítulo é tratada a utilização dos métodos descritos no capítulo anterior. O método Failure Mode and Effects Analysis – Análise de Modos de Falha e Efeitos (FMEA) foi aplicado numa peça destinada ao ramo automóvel, mais especificamente uma peça que serve como patim, constituído por uma parte esquerda e direita, parte do conjunto dos bancos dianteiros. Este FMEA teve por base o documento já presente na empresa e referente a este mesmo produto, que foi redigido segundo as diretrizes da 4ª edição do Manual de referência publicado pela Automotive Industry Action Group – Grupo de Acção da Indústria Automóvel (AIAG). É apresentado o método de aplicação da metodologia ao contexto e, neste caso, ao processo pelo qual são produzidas as peças.

Apresentam-se exemplos da aplicação em vez da avaliação de todos os modos de falha. Foram identificados e avaliados 76 modos de falha, portanto a apresentação de todos eles neste documento não seria prática. Assim sendo, daqui em diante serão apresentados os casos considerados mais relevantes. Dada a importância dada ao índice de Action Priority – Prioridade de Ação (AP), que veio substituir o de Risk Priority Number – Número de Prioridade de Risco (RPN), dividem-se os exemplos com base no valor de AP atribuído. São abordados exemplos de modos de falha cujo resultado final é o de um índice de AP H (alto), M (médio) e L (baixo). Modos de falha esses que, após o passo VI. Otimização, baixaram os seus resultados de índices de AP de Alto para Médio e Médio para Baixo. É também exposta uma comparação entre um exemplo de um modo de falha avaliado segundo o manual vigente e o novo manual, a ser implementado.

Os índices de Severidade, Ocorrência e Deteção foram atribuídos consoante as diretrizes presentes na nova edição do manual do FMEA, edição conjunta redigida pela AIAG e Verband der Automobilindustrie – Associação da Indústria Automóvel (VDA). Os valores correspondentes de AP foram atribuídos a partir de consulta das tabelas presentes no manual, e também no Anexo 2.

5.1 Estrutura do FMEA

Apesar de já existirem programas que agilizam o processo de desenvolvimento de um FMEA, a forma mais comum de redigir a documentação associada é através de uma folha de cálculo. Assim, foi criada um exemplar no qual todos os parâmetros necessários fossem abordados.

O cabeçalho de identificação encontra-se na figura 5.1. Este é o primeiro dos 7 passos, em que é identificado o projeto, para o seu planeamento e preparação. Este cabeçalho é similar ao que era utilizado até aqui, feito segundo a 4ª edição. São, no entanto, incluídos elementos recomendados no manual mais recente, como o *Model year / Platform* – Ano do Modelo / Plataforma [7].

Process Failure Mode & Effects Analysis (Process FMEA)					
Company Name	Empresa 123, Lda.	Subject	Peça E/D	PFMEA ID Number	123
Manufacturing Location	PORTUGAL	PFMEA Start Date	18/04/2022	Process Responsibility	Pessoa 1
Customer Name	Empresa 456, Lda.	PFMEA Revision Date	08/08/2022	Confidentiality Level	Confidencial
Model year / Platform	M12	Cross - functional Team :	Pedro Ribeiro; Pessoa 1; Pessoa 2; Pessoa 3; Pessoa 4		

Figura 5.1: Cabeçalho do FMEA

Seguidamente, na figura 5.2a, estão presentes os passos *Structure Analysis* (Análise Estrutural), *Function Analysis* (Análise da Função) e *Failure Analysis* (Análise da Falha), o segundo, terceiro e quarto passo, respetivamente. As tonalidades das cores simbolizam a relação que têm entre si: duas células com a mesma coloração estão diretamente relacionadas pois o que é afirmado por exemplo na *Function of the Process Item* (Função do Item do Processo) será diretamente negado no *Failure Effects* (Efeitos da Falha).

Existem também os passos *Risk Analysis* (Análise de Risco) e *Optimization* (Otimização), o quinto e sexto passos, respetivamente. Nestes passos, representados na figura 5.2b, são identificados, da esquerda para a direita: o controlo de prevenção contra o modo de falha; o valor de Ocorrência do mesmo; a forma de deteção da Causa da Falha ou do Modo de Falha; o índice de Deteção do Modo ou Causa de Falha; o índice de Prioridade de Ação (AP) e uma característica especial, se aplicável. Relacionado com o sexto passo, da Otimização, são apresentadas: ações recomendadas, quer seja na área de prevenção ou deteção; quem é o responsável por implementá-las, seja uma pessoa singular ou departamento; a data alvo de implementação; o seu estado atual de implementação; a ação que foi, de facto, implementada; a sua data de conclusão e os novos índices de Severidade, Ocorrência e Deteção associados, que dão origem ao novo índice AP.

O sétimo e último passo, como referido no capítulo anterior, consiste na *Results Documentation* (Documentação dos Resultados), que não está presente neste documento pois faz uma comunicação dos resultados alcançados aqui e é um documento interno e confidencial.

II. STRUCTURE ANALYSIS				III. FUNCTION ANALYSIS			IV. FAILURE ANALYSIS			
Process Item (System, Subsystem, part of element or Name of Process)	Process Step (station No. and name of Focus Element)	Process Work Element (4 Ms: Man, Machine, Material, Environment, etc.)	Function of the Process Item Function of System, Subsystem, Part Element or Process	Function or Outcome of the Process step & Product Characteristics description (Quantitative value is optional)	Function of the Work Process Element and Process Characteristic	Failure Effects (FE)	Severity (S) of FE	Failure Mode (FM) of the process step	Failure Cause (FC) of the work element or Process Characteristic	

(a)

V. RISK ANALYSIS						VI. OPTIMIZATION									
Current Prevention Control (PC) of FC	Occurrence (O) of FC	Current Detection control (DC) of FC or FM	Detection (D) of FC/FM	Action Priority (AP)	Special Characteristic	Recommended Action	Responsible Department or Person	Target completion date	Status (Untrouced, under consideration, in progress, completed, discarded)	Action taken with Pointer to Evidence	Completion Date	Severity (S)	Occurrence (O)	Detection (D)	Action Priority (AP)

(b)

Figura 5.2: Passos do FMEA: a) Passos II a IV; b) Passos V e VI

5.2 Exemplo com AP Alto

Nesta secção será abordado um modo de falha que tem como resultado um índice de Prioridade de Ação (AP) elevado, pois tem um efeito elevado no produto.

Na figura 5.4 estão presentes o segundo e terceiro passos na linha correspondente à análise do modo de falha. Este, referente ao processo de produção da peça em questão, acontece durante o passo da estampagem. O modo de falha, a existência de empenos e/o deformações, tem como efeito o mau funcionamento do conjunto ou até da impossibilidade de montagem do mesmo, fazendo com que as peças produzidas assim tenham de ser destinadas à sucata. Na figura 5.3 encontra-se uma peça que sofreu uma deformação deste género.



Figura 5.3: Peça deformada após a estampagem

Existem três causas principais para esta falha, como é possível observar na figura 5.5: pode existir uma obstrução aquando da saída da peça; a matriz pode não fixar os rombos de sucata corretamente e estes podem subir em conjunto com o punção; uma quebra dos parafusos das régua também o pode originar, os parafusos que estejam subdimensionados não suportam as vibrações e falham.

Assim, o seu índice de Severidade é de 7, quando comparados os efeitos com os Critérios Gerais de Avaliação da Severidade do Processo, presentes no Manual (pp. 108-109), pois pode ser necessária uma triagem do produto e ser eliminada uma grande parte das peças produzidas, ou obrigar a linha a trabalhar numa cadência mais baixa [7]. No entanto, a sua Ocorrência é moderada, razão pela qual tem um índice de 5, porque os controlos de prevenção são eficazes na prevenção da causa da falha. Tanto no início e fim de lotes como em curso fabríco são verificadas as peças produzidas. Por fim, pelo facto de o seu modo de deteção ser visual, o seu índice de deteção é baixo, de 8. Como consequência, é complicada a sua identificação quando acontece e falhas podem passar despercebidas.

Porém, aquando da fase de otimização, presente na figura 5.6, são fixados os rombos

II. STRUCTURE ANALYSIS			III. FUNCTION ANALYSIS		
Process Item (System, Subsystem, part of element or Name of Process)	Process Step (station No. and name of Focus Element)	Process Work Element (4 Ms: Man, Machine, Material, Environment, etc.)	Function of the Process Item Function of System, Subsystem, Part Element or Process	Function or Outcome of the Process step & Product Characteristics description (Quantitative value is optional)	Function of the Process Work Element and Process Characteristic
Peça 123	Estampagem	Operadores Alimentador Prensa Ferramenta Periféricos Meios de controlo Lubrificador	Peça estampada segundo os padrões definidos no desenho de produto DP123	Ausência de empenos e deformações	O operador coloca a prensa em funcionamento (ciclo contínuo), para realizar corte, dobragem e conformação de forma a obter conforme especificação.

Figura 5.4: Segundo e terceiro passos de exemplo com Prioridade de Ação alta

IV. FAILURE ANALYSIS				V. RISK ANALYSIS					
Failure Effects (FE)	Severity (S) of FE	Failure Mode (FM) of the process step	Failure Cause (FC) of the work element or Process Characteristic	Current Prevention Control (PC) of FC	Occurrence (O) of FC	Current Detection control (DC) of FC or FM	Detection (D) of FC/FM	Action Priority (AP)	Special Characteristic
Impossibilidade de montagem Mau funcionamento do conjunto	7	Existência de empenos e deformações	Obstrução na saída da peça Subida dos rombos de sucata (matriz não fixa os rombos e estes sobem colados no punção) Quebra de parafusos das réguas	1 - Início / Fim de lote 2 - Em curso fabrico	5	Visualmente	8	H	

Figura 5.5: Quarto e quinto passos de exemplo com Prioridade de Ação alta

de sucata após o corte. Isto faz com que o valor de Ocorrência baixe significativamente, para 2. Neste caso o controlo de prevenção é altamente eficaz na prevenção da causa da falha, referida anteriormente [7]. Desta forma, é possível diminuir o índice de Prioridade de Ação de Alto para Médio.

VI. OPTIMIZATION									
Recommended Action	Responsible Department or Person	Target completion date	Status [Untouched, under consideration, in progress, completed, discarded]	Action taken with Pointer to Evidence	Completion Date	Severity (S)	Occurrence (O)	Detection (D)	Action Priority (AP)
Aumentar a "vida" das matrizes no sentido de fixar os rombos de sucata após o corte (geral)	Pessoa 1	Semana 9 2015	Concluído	Colocação de matrizes na ferramenta já corrigidas ("vida" maior)	Semana 9 2015	7	2	8	M

Figura 5.6: Sexto passo de exemplo com Prioridade de Ação alta

5.3 Exemplo com AP Médio

Em seguida, na figura 5.8, encontra-se um caso em que a Prioridade de Ação tem um índice Médio. A operação que este modo de falha afeta diretamente é a de retificação, neste caso o resultado do processo. Como abordado no secção 2.1.6, referente à Retificação das peças, existe um processo que elimina as quinas vivas e outro que seca as peças produzidas. Uma representação de uma peça oxidada encontra-se na figura 5.7. Este fenómeno ocorre quando não existe um arrefecimento das peças antes de as caixas em que são embalados serem fechadas. Isto leva a que se acumule humidade no interior da caixa que se traduzirá numa acumulação de gotas de água na superfície das peças, originando a oxidação nas mesmas.

Na figura 5.9 é representada a análise de falha e risco. Se os produtos não tiverem uma arrefecimento completo previamente a serem embalados, pode ocorrer uma oxidação das peças, o que, apesar de não impossibilitar a montagem, leva a perturbações no funcionamento do conjunto. Assim, o valor de Severidade atribuído é de 5. Este valor deve-se a um efeito moderadamente baixo, o seu impacto nas instalações de destino é de ter menos de 100% do produto afetado, já que nem todas as peças se encontrarão oxidadas. Este modo de falha tem um valor de ocorrência de 6, pois, sem ser assegurada uma humidade e temperatura definida na sala em que é feita o arrefecimento ao natural e sem ser definido um tempo certo para o fecho das caixas então a sua ocorrência é moderadamente elevada. Por fim, como o modo de deteção da falha é visual, o seu coeficiente é de 8. Como resultado, após consulta da Tabela de Prioridade de Ação (pp. 117-118), o valor de AP é Médio, sendo que a equipa deve encontrar ações adequadas para melhorar os modos de prevenção e deteção [7].

Esse passo é tomado na fase de otimização de processo, presente na figura 5.10. Como solução para a relativamente alta ocorrência de oxidação nas peças, foi definido um tempo



Figura 5.7: Peça Oxidada após Retificação

II. STRUCTURE ANALYSIS			III. FUNCTION ANALYSIS		
Process Item (System, Subsystem, part of element or Name of Process)	Process Step (station No. and name of Focus Element)	Process Work Element (4 Ms: Man, Machine, Material, Environment, etc.)	Function of the Process Item Function of System, Subsystem, Part Element or Process	Function or Outcome of the Process step & Product Characteristics description (Quantitative value is optional)	Function of the Process Work Element and Process Characteristic
Peça 123	Retificação	Operadores Alimentador Ferramenta Retificadora Máquina de Secagem Periféricos Meios de controlo Lubrificador	Eliminação de rebarbas Secagem para a eliminação de lubrificação em excesso	Ausência de oxidação	O operador abastece a máquina, inicia os dois ciclos de retificação e posteriormente é feito o ciclo de secagem

Figura 5.8: Segundo e terceiro passos de exemplo com Prioridade de Ação média

IV. FAILURE ANALYSIS				V. RISK ANALYSIS					
Failure Effects (FE)	Severity (S) of FE	Failure Mode (FM) of the process step	Failure Cause (FC) of the work element or Process Characteristic	Current Prevention Control (PC) of FC	Occurrence (O) of FC	Current Detection control (DC) of FC or FM	Detection (D) of FC/FM	Action Priority (AP)	Special Characteristic
Montagem possível com perturbação no funcionamento	5	Existência de oxidação	Fecho de caixas/sacos com peças ainda quentes	Caixa a caixa	6	Visualmente	8	M	

Figura 5.9: Quarto e quinto passos de exemplo com Prioridade de Ação média

de arrefecimento mínimo correspondente a quatro horas. Esta instrução foi introduzida no programa de gestão da empresa por forma a que seja cumprido. Desta forma, o valor de ocorrência do modo de falha baixou para 2, sendo muito menos frequente.

VI. OPTIMIZATION									
Recommended Action	Responsible Department or Person	Target completion date	Status [Untouched, under consideration, in progress, completed, discarded]	Action taken with Pointer to Evidence	Completion Date	Severity (S)	Occurrence (O)	Detection (D)	Action Priority (AP)
Definir tempo de arrefecimento das peças e introduzir item no Programa de Gestão	Pessoa 1	Semana 9 2015	Concluído	Definição do tempo de arrefecimento (Mín. 4 horas) e introdução de verificação no Programa de Gestão	Semana 9 2015	5	2	8	L

Figura 5.10: Sexto passo de exemplo com Prioridade de Ação média

5.4 Exemplo com AP Baixo

Um exemplo de um modo de falha que não se apresenta como sendo uma questão premente é apresentado abaixo, na figura 5.11. Este modo de falha ocorre aquando da

preparação da ferramenta para a estampagem. Neste passo é feita a preparação e montagem necessária da ferramenta para a operação ao colocá-la na posição correta e fazer o seu acondicionamento.

II. STRUCTURE ANALYSIS			III. FUNCTION ANALYSIS		
Process Item (System, Subsystem, part of element or Name of Process)	Process Step (station No. and name of Focus Element)	Process Work Element (4 Ms: Man, Machine, Material, Environment, etc.)	Function of the Process Item Function of System, Subsystem, Part Element or Process	Function or Outcome of the Process step & Product Characteristics description (Quantitative value is optional)	Function of the Process Work Element and Process Characteristic
Peça 123	Montagem da Ferramenta na prensa	Operadores Prensa Ferramenta Equipamento de Movimentação Periféricos	Fazer toda a preparação e montagem necessária para a estampagem e produção das peças	Assegurar a montagem da ferramenta na prensa na localização correta, devidamente apertada e com altura de fecho correto.	Operadores movimentam com o empilhador a ferramenta, colocando-a na prensa de acordo com a localização pré-definida, apertando e assegurando a altura de fecho

Figura 5.11: Segundo e terceiro passos de exemplo com Prioridade de Ação baixa

Um mau acondicionamento pode levar a uma falha. Este aspeto é abordado na figura 5.12. Quando a ferramenta não fica perfeitamente encostada aos seus posicionadores não existe um paralelismo entre a chapa e a ferramenta. Isto tem como efeito impedir que haja um alinhamento da banda de estampagem e portanto não seja possível prosseguir com o processo. Este modo de falha tem uma Severidade relativamente baixa, com um índice de 4 pois, apesar de não ser possível operar nessas condições, é rápida a paragem para solucionar a questão. Para além disso, a sua Ocorrência é muito baixa pois os mecanismos de prevenção – a existência dos posicionadores – impedem que isto aconteça regularmente. Mais uma vez, o coeficiente de Detecção é de 8 pois a deteção do modo de falha é efetuada visualmente. Isto leva-nos a uma Prioridade de Ação baixa, significando que a equipa multidisciplinar *poderia* encontrar ações que permitissem melhorar os controlos de deteção e prevenção mas que tal não é prioritário. No entanto, foi implementada uma *Checklist* de verificação no livro de ferramenta (a ser consultado sempre que é instalada a ferramenta na prensa) e, portanto, a ocorrência do modo de falha será ainda mais rara.

IV. FAILURE ANALYSIS				V. RISK ANALYSIS					
Failure Effects (FE)	Severity (S) of FE	Failure Mode (FM) of the process step	Failure Cause (FC) of the work element or Process Characteristic	Current Prevention Control (PC) of FC	Occurrence (O) of FC	Current Detection control (DC) of FC or FM	Detection (D) of FC/FM	Action Priority (AP)	Special Characteristic
Impossível correto alinhamento da banda	4	Falta de paralelismo entre a parte superior e inferior da ferramenta	Ferramenta não foi correctamente alinhada (fora do encosto dos posicionadores)	IT123	2	Visualmente	8	L	

Figura 5.12: Quarto e quinto passos de exemplo com Prioridade de Ação baixa

5.5 Comparação Direta entre Manuais

5.5.1 Primeiro Exemplo

É também relevante para o presente documento fazer uma comparação direta da avaliação de um modo de falha segundo as diretrizes do manual anterior e o novo. Nesta circunstância, o modo de falha a abordar é a cota da distância da caixa, presente na figura 5.13, medindo 32 mm e com uma tolerância de 0,05 mm. Dada a reduzida tolerância, esta medida pode ser difícil de cumprir e não pode ser alterada pois é uma medida significativa para o produto.

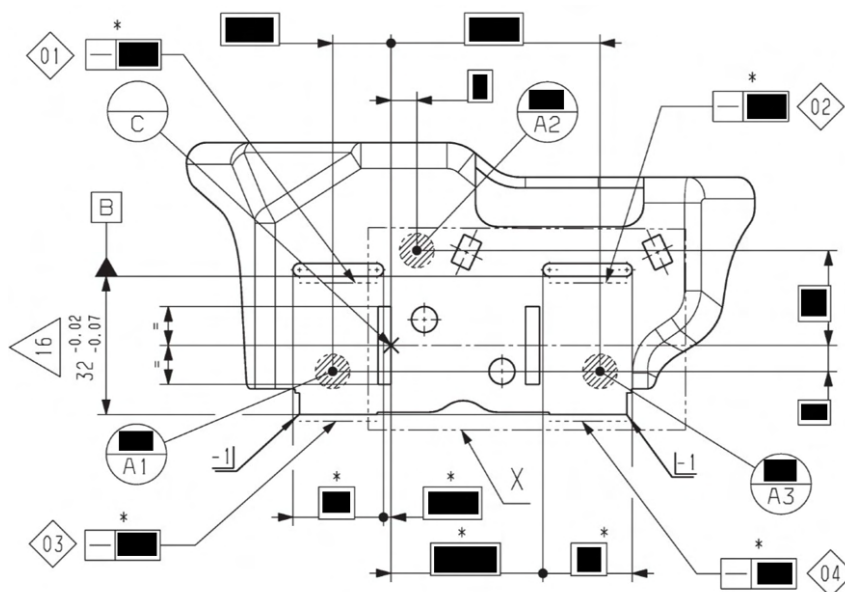


Figura 5.13: Recorte do desenho de produto da peça

São avaliados individualmente os dois casos possíveis para uma cota fora de especificação: a cota ser superior ou inferior à cota nominal. São avaliados individualmente pelo motivo de que é mais provável ser estampada uma peça com uma cota inferior que superior, sendo o seu índice de Ocorrência maior (figuras 5.14a e 5.14b). Esta diferença entre valores, originada por um desequilíbrio inicial, faz com que, no FMEA desenvolvido segundo as diretrizes da 4ª edição do Manual, o RPN correspondente ao modo de falha em que a cota se encontra abaixo de especificação seja o dobro que é para uma cota acima de especificação. Crucialmente também ultrapassa o teto de RPN de 100, muitas vezes tido como um critério de aceitação da parte dos clientes. Esta é uma grande diferença e reflete a dificuldade de priorizar modos de falha na 4ª edição do Manual AIAG, aquela pela qual a empresa atualmente se rege. Na figura 5.14b, é possível verificar que ambos os modos de falha têm um índice de Prioridade de Ação baixa (L). Assim, sob esta nova forma de avaliar os modos de falha, ambos têm a mesma prioridade, enquanto que anteriormente a equipa seria levada a dar o **dobro** da prioridade a uma cota abaixo da especificação.

Já na fase de Reanálise de Risco (figura 5.15) ou Otimização (figura 5.16) também se verificam algumas diferenças embora o resultado seja em tudo similar. Devido ao facto de que o FMEA novo foi feito com base no anterior, foram também incorporadas as *Recommended Actions* (Ações Recomendadas) do FMEA preexistente. Neste caso, as ações são de corrigir a largura dos punções de corte e uma alteração dos pontos de medição. Esta correção levou a um equilíbrio, fazendo com que o valor médio fosse a cota desejada. Para além disso, na nova edição do FMEA são separadas as ações recomendadas que vão atuar como preventivas ou como atos que permitam melhorar a deteção de falhas ocorridas (apesar de não se encontrarem na imagem).

Processo	Op. Seq.	Cota Nº	Requisitos	Modo Potencial de Falha	Efeito(s) Potencial(ais) da Falha	GRAVAV	CLASS	Causa(s) e Mecanismo(s) Potencial(ais) da Falha	OCORR	Controlo do Processo		DETEC	NPR
										Prevenção	Deteção		
Arranque / fim produção Curso fabrico Máq 123	123	22	Distância da caixa 21x3/Aresta (2x) 32 -0,02/-0,07	Cota acima de especificação	Montagem possível com perturbação no funcionamento	5	16	Falha na maquinação elementos corte	2	1-Início / Fim de lote	3D	6	60
				Cota abaixo da especificação	Montagem possível com perturbação no funcionamento	5		Falha na maquinação elementos corte		4	2-Em curso fabrico		

(a)

II. STRUCTURE ANALYSIS			III. FUNCTION ANALYSIS			IV. FAILURE ANALYSIS			V. RISK ANALYSIS						
Process Item (System, Subsystem, part of element or Name of Process)	Process Step (Station No. and name of Focus Element)	Process Work Element (4 Ms: Man, Machine, Material, Environment, etc.)	Function of the Process Item (Function of System, Subsystem, Part Element or Process)	Function or Outcome of the Process step & Product Characteristics description (Quantitative value is optional)	Function of the Process Work Element and Process Characteristic	Failure Effects (FE)	Severity (S) of FE	Failure Mode (FM) of the process step	Failure Cause (FC) of the work element or Process Characteristic	Current Prevention Control (PC) of FC	Occurrence (O) of FC	Current Detection control (DC) of FC or FM	Detection (D) of FC/FM	Action Priority (AP)	Special Characteristic
Peça 123	Estampagem	Operadores Alimentador Prensa Ferramenta Periféricos Meios de controlo Lubrificador	Peça estampada segundo os padrões definidos no desenho de produto DP123	Distância da caixa 21x3/Aresta (2x) 32 -0,02/-0,07	O operador coloca a prensa em funcionamento (ciclo contínuo), para realizar corte, dobragem e conformação de forma a obter conforme especificação.	Montagem possível com perturbação no funcionamento	5	Cota acima da especificação	Falha na maquinação elementos corte	1 - Início / Fim de lote 2 - Em curso fabrico 3 - Arranque de turno	2	3D Paquímetro Calibre P/NP nº123	8	L	
								Cota abaixo da especificação		4			8	L	▲ 16

(b)

Figura 5.14: Avaliações acerca do Modo de Falha: a) Segundo a 4ª edição do Manual AIAG, atualmente utilizada na empresa; b) segundo a 1ª edição conjunta do Manual FMEA pela AIAG & VDA

Reanálise de risco							
Acções Preventivas			Resultados das Acções				
Acções previstas	Resp.	Prazo	Acções Realizadas	GRA	OCOR	DET	NPR
Não há acções							
Corrigir largura dos punções de corte. Corrigir/alterar pontos de medição	Pessoa 1	Sem. 15/2015 Sem. 16/2015	Correção da largura dos punções de corte. Correção/ alteração dos pontos de medição	5	2	7	70

Figura 5.15: Reanálise do Risco segundo o 4º Manual acerca do Modo de Falha

VI. OPTIMIZATION									
Recommended Action	Responsible Department or Person	Target completion date	Status [Untouched, under consideration, in progress, completed, discarded]	Action taken with Pointer to Evidence	Completion Date	Severity (S)	Occurrence (O)	Detection (D)	Action Priority (AP)
Não há acções previstas	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A				
Corrigir largura dos punções de corte Corrigir/alterar pontos de medição	Pessoa 1 Pessoa 2	Semana 9 2015	Concluído	Correção da largura dos punções de corte Correção/alteração dos pontos de medição	Semana 9 2015	5	2	7	L

Figura 5.16: Otimização do Risco segundo o 1º Manual Conjunto acerca do Modo de Falha

5.5.2 Segundo Exemplo

De forma similar ao segundo exemplo apresentado no final da secção Nova Edição do Manual FMEA 4.2, existem casos em que um modo de falha com um RPN superior têm índice de AP inferior a um outro modo de falha com um RPN inicialmente semelhante. Aqui, comparamos o modo de falha apresentado anteriormente, na figura 5.13. O RPN resultante – anteriormente à fase de Otimização – é de 120 (ver figura 5.18a). Este caso é, agora, comparado com o modo de falha associado à existência de um rasgo na peça após a mesma ser estampada. Na figura 5.17 é possível encontrar um exemplo.

Este modo de falha ocorre quando existe um desalinhamento da banda e a sua Ocorrência é relativamente baixa, razão pela qual tem o índice de 2. No entanto, devido ao facto de, se o modo de falha ocorrer, serem produzidas peças que o cliente não pode montar no seu conjunto, o seu índice de Severidade é de 7. O valor da Deteção é de 8 pois, como já foi apontado, o seu controlo de deteção é visual. Isto faz com que o seu valor final de RPN seja de 108, presente na figura 5.18a.



Figura 5.17: Peça com Rasgo após Estampagem

Todavia, segundo as diretrizes do Manual FMEA pela AIAG & VDA, podemos averiguar que existe uma diferença nos resultados. Após consulta das tabelas de prioridade de ação, o valor de AP é médio para o modo de falha em que ocorrem rasgos na peça, por oposição ao valor baixo de AP para o modo de falha em que a cota da distância da caixa é inferior a 32 mm.

Isto deve-se, maioritariamente, ao valor de Severidade superior no modo de falha ilustrado em 5.17. Apesar de, segundo a 4ª edição do Manual AIAG, atualmente utilizada na empresa, a impressão inicial nos dizer que o modo de falha relacionado com a cota da caixa deve ser alvo de maior prioridade, pois apresenta maior RPN, averiguamos que o modo de falha para o qual a equipa **deverá** encontrar soluções é o relacionado com a ocorrência de rasgos na peça.

Exemplos deste género demonstram a importância da utilização do fator AP para a decisão sobre a que modos de falha deve ser dada prioridade. No FMEA de processo feito segundo a 4ª edição do Manual AIAG, todos os 78 modos de falha têm um RPN resultante acima de 40, e 30 deles tinham um RPN acima de 100, número utilizado normalmente como limite máximo para um índice aceitável.

Já no Process Failure Mode Effects Analysis – Análise de Modos de Falha e Efeitos no Processo (PFMEA) realizado segundo as diretrizes presentes na 1ª edição conjunta do Manual FMEA pela AIAG & VDA, para o mesmo número de modos de falha, 61% dos mesmos tiveram uma prioridade de ação associada baixa, 33% uma prioridade de ação média e apenas 6% um valor de AP alto.

Estes valores dão à equipa multidisciplinar uma tarefa mais simples quando abordam os passos que têm de ser otimizados, a ação de priorização é desta forma agilizada.

5.5. COMPARAÇÃO DIRETA ENTRE MANUAIS

Processo	Op. Seq.	Cota N°	Requisitos	Modo Potencial de Falha	Efeito(s) Potencial(is) da Falha	GRAU	Causa(s) e Mecanismo(s) Potencial(is) da	OCORR	Controlo do Processo		DETEC	NPR
									Prevenção	Deteção		
Arranque / fim produção Curso fabrico Máq 123	123	22	Distância da caixa 21x3/Aresta (2x) 32 -0,02/-0,07	Cota abaixo da especificação	Montagem possível com perfuração no funcionamento	5	Falha na maquinação elementos corte	4	1-Início / Fim de lote 2-Em curso fabrico 3-Arranque de turno	3D Paquímetro Calibre P/NP nº 123	6	120
Arranque / fim produção Curso fabrico Máq 123	-	-	Ausência de peças cortadas	Existência de peças cortadas	Montagem não é possível	7	Desalinhamto ao iniciar a banda (início dos rolos)	2	PM234 (Desenvolvimen to de banda)	Visual (a cada início de banda)	8	112

(a)

II. STRUCTURE ANALYSIS			III. FUNCTION ANALYSIS			IV. FAILURE ANALYSIS			V. RISK ANALYSIS			
Process Item (System, Subsystem, part of element or Name of Process)	Process Step (station No. and name of Focus Element)	Process Work (Element, Machine, Material, Environment, etc.)	Function of the Process Item (Function, Subsystem, Part Element or Process)	Function or Outcome of the Process Step & Product Characteristics (Quantitative value is optional)	Failure or the Process Process Characteristic	Failure Effect (FE)	Severity (S) of FE	Failure Mode (FM) of the process step	Failure Cause (FC) of Process Characteristic	Current Prevention Control (PC) of FC	Current Detection Control (DC) of FC or FM	Action Priority (AP)
Peça 123	Estampagem	Operadores Alimentador Prensa Ferramentas Periféricos Meios de controlo Lubrificador	Peça estampada seguida de operações definidas no desenho de produto DP-123	Distância da caixa 21x3/Aresta (2x) 32 -0,02/-0,07	O operador coloca a prensa em funcionamento (ciclo contínuo) para utilizar a prensa e obter conformação de forma e obter especificação.	Montagem possível com perfuração no funcionamento	5	Cota abaixo da especificação	Falha na maquinação elementos corte	1 - Início / Fim de lote 2 - Em curso fabrico 3 - Arranque de turno	3D Paquímetro Calibre P/NP nº 123	L
Peça 123	Estampagem	Operadores Alimentador Prensa Ferramentas Periféricos Meios de controlo Lubrificador	Peça estampada seguida de operações definidas no desenho de produto DP-123	Análise de peças cortadas	O operador coloca a prensa em funcionamento (ciclo contínuo) para utilizar a prensa e obter conformação de forma e obter especificação.	Montagem não é possível	7	Desalinhamto ao iniciar a banda (início dos rolos)	PM234 (Desenvolvimento de banda)	Visualmente (a cada início de banda)	8	M

(b)

Figura 5.18: Avaliações acerca do Modo de Falha de peça com rasgo: a) Segundo a 4ª edição do Manual AIAG, atualmente utilizada na empresa; b) segundo a 1ª edição conjunta do Manual FMEA pela AIAG & VDA

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste último capítulo são apresentadas conclusões sobre o trabalho elaborado, destacando a importância da metodologia e os benefícios que uma evolução da mesma traz. Em seguida, identificam-se limitações ao trabalho concebido e, por fim, propõem-se trabalhos futuros que possam ser desenvolvidos no mesmo âmbito, da gestão do risco.

6.1 Conclusão

O Failure Mode and Effects Analysis – Análise de Modos de Falha e Efeitos (FMEA) é uma metodologia fundamental para as empresas de manufatura, especialmente as do setor automóvel. Perto de 100% dos produtos fabricados pela empresa destinam-se a este setor portanto a empresa guia-se, atualmente, pela 4ª edição do Manual AIAG, publicada em 2008.

Dada a importância crescente que tem vindo a ser dada por parte da empresa à metodologia ao longo dos últimos 22 anos, é premente a sua transição para a nova forma de encarar o processo e a falha.

Com a realização do presente trabalho, fez-se na empresa em que o trabalho foi desenvolvido, um primeiro FMEA segundo as diretrizes do 1º Manual conjunto FMEA pela AIAG & VDA, publicado em 2019. As vantagens associadas ao mesmo são: a definição mais clara sobre que valores devem ser atribuídos aos parâmetros de Severidade, Ocorrência e Detecção (SOD); a adoção do critério Action Priority – Prioridade de Ação (AP), substituto do Risk Priority Number – Número de Prioridade de Risco (RPN); a abordagem dos 7 passos leva à recolha de uma grande quantidade de informação, permitindo às equipas consultarem um Process Failure Mode Effects Analysis – Análise de Modos de Falha e Efeitos no Processo (PFMEA) e obter toda a informação necessária sobre o processo em questão.

Numa comparação direta entre formas de encarar os modos de falha e o risco, é possível afirmar que dos 78 modos de falha avaliados, 30 deles tinham um valor de RPN calculado superior a 100, podendo ser considerados como inaceitáveis. No entanto, segundo as novas diretrizes e utilizando o AP, constata-se que 61% dos modos de falha têm

uma prioridade de ação baixa, 33% média e apenas 5% alta. Dos modos de falha com uma prioridade de ação superior a baixa, mais de 50% baixou o seu nível de AP após o passo de Otimização.

Esta dissertação apresentou uma perspectiva sobre a metodologia FMEA, a nova abordagem de 7 passos apresentada no 1º Manual conjunto FMEA pela AIAG & VDA e as suas valias. Com o trabalho desenvolvido é feita na empresa um primeiro FMEA segundo esta nova visão. Espera-se que o documento produzido possa ser útil na transição da empresa da forma das diretrizes da 4ª edição do Manual AIAG para uma nova abordagem. Isto pois os PFMEA assumem um papel fundamental no registo de informação sobre o processo e tudo o que o mesmo envolve. Assim, informação recolhida nesta análise poderá ser utilizada no futuro em novos FMEA que sejam feitos segundo as normas que constam no 1º Manual conjunto FMEA pela AIAG & VDA. No Apêndice 1 encontra-se um trecho do FMEA desenvolvido.

6.2 Sugestões de Trabalhos Futuros

A introdução da nova edição do Manual FMEA pela AIAG & VDA [7], como já foi referido, permite identificar mais facilmente os modos de falha que devem ser alvo de ação mais cedo. Como primeira sugestão recomenda-se a utilização desta vantagem que pode, conseqüentemente, ser aliada às tecnologias de Monitorização de Condição. A identificação dos modos de falha com uma prioridade de ação mais alta leva a uma reavaliação da situação, de forma a encontrar soluções para os mesmos, quer seja para prevenir que aconteçam com essa frequência ou para que sejam mais prontamente detetados. Uma ferramenta para o fazer é a Monitorização de Condição: ao ter informação sobre a condição em que está o equipamento em qualquer momento podem evitar-se falhas, tais como a quebra de um punção devido ao uso. Apesar de o mesmo resultado poder ser alcançado com Manutenção Preventiva, desta forma é possível utilizar o equipamento durante mais tempo, retirando uma maior Overall Equipment Effectiveness – Eficácia global do equipamento (OEE) do mesmo e, se o equipamento tiver uma vida útil menor que a esperada pela manutenção preventiva, também é possível detetá-lo atempadamente com recurso à Manutenção Condicionada.

Assim, considera-se proveitosa uma identificação dos modos de falha que possam beneficiar da Monitorização de Condição. No caso de existirem vários exemplos, aconselha-se a utilização do índice AP para priorizar uns relativamente aos restantes. Aqueles que apresentarem um valor superior devem ser endereçados primeiro.

Como segunda opção, também é interessante abordar a possibilidade de ser desenvolvido um FMEA de raiz, para um novo processo na empresa. Este FMEA poderá utilizar aquele que foi desenvolvido e apresentado no âmbito desta dissertação (e está disponível em pleno na empresa em questão) como FMEA de base.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Corey Brown. *What is tribal knowledge?* URL: <https://www.dozuki.com/blog/what-is-tribal-knowledge> (acedido em 16/05/2022) (ver p. xxiii).
- [2] Viswanathan Krishnan, Steven D Eppinger e Daniel E Whitney. “A model-based framework to overlap product development activities”. Em: *Management science* 43.4 (1997), pp. 437–451 (ver p. 1).
- [3] *ISO 31000:2018*. URL: <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:31000:ed-2:v1:en> (acedido em 16/05/2022) (ver p. 2).
- [4] Christian Spreafico, Davide Russo e Caterina Rizzi. “A state-of-the-art review of FMEA/FMECA including patents”. Em: *computer science review* 25 (2017), pp. 19–28 (ver p. 2).
- [5] Kapil Dev Sharma e Shobhit Srivastava. “Failure mode and effect analysis (FMEA) implementation: a literature review”. Em: *J Adv Res Aeronaut Space Sci* 5 (2018), pp. 1–17 (ver p. 2).
- [6] *Production Statistics*. URL: <https://www.oica.net/category/production-statistics/2021-statistics/> (acedido em 16/05/2022) (ver p. 2).
- [7] *The FMEA Handbook: Failure Mode and effects analysis*. 1ª ed. Automotive Industry Action Group, 2019 (ver pp. 2, 3, 13, 30, 31, 33–37, 40, 42–44, 56, 67–73).
- [8] *ISO/TS 16949:2009*. Dez. de 2016. URL: <https://www.iso.org/standard/52844.html> (acedido em 16/05/2022) (ver p. 3).
- [9] *Potential failure mode and effects analysis (FMEA): Reference manual*. Chrysler LLC, Ford Motor Co., General Motors Corp., 2008 (ver p. 3).
- [10] Michael P Pereira, Matthias Weiss, Bernard F Rolfe e Tim B Hilditch. “The effect of the die radius profile accuracy on wear in sheet metal stamping”. Em: *International journal of machine tools and manufacture* 66 (2013), pp. 44–53 (ver p. 6).
- [11] British Standards. *BS EN 10149-2:2013 hot rolled flat products made of high yield strength steels for cold forming technical delivery conditions for thermomechanically rolled steels*. Set. de 2013 (ver p. 6).

- [12] Cheng Zhou, Kaibo Liu, Xi Zhang, Weidong Zhang e Jianjun Shi. “An automatic process monitoring method using recurrence plot in progressive stamping processes”. Em: *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* 13.2 (2015), pp. 1102–1111 (ver p. 8).
- [13] Jionghua Jin e Jianjun Shi. “Press tonnage signal decomposition and validation analysis for transfer or progressive die processes”. Em: *J. Manuf. Sci. Eng.* 127.1 (2005), pp. 231–235 (ver p. 8).
- [14] S.L. Semiatin. *Metalworking: Sheet Forming*. ASM International, jan. de 2006. ISBN: 978-1-62708-186-3. DOI: 10.31399/asm.hb.v14b.9781627081863. URL: <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v14b.9781627081863> (acedido em 16/05/2022) (ver p. 8).
- [15] U Aravind, Uday Chakkingal e P Venugopal. “A review of fine blanking: Influence of die design and process parameters on edge quality”. Em: *Journal of Materials Engineering and Performance* 30.1 (2021), pp. 1–32 (ver pp. 9, 10).
- [16] M. Krobath, T. Klünsner, W. Ecker, M. Deller, N. Leitner e S. Marsoner. “Tensile stresses in fine blanking tools and their relevance to tool fracture behavior”. Em: *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 126 (2018), pp. 44–50. ISSN: 0890-6955. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmactools.2017.12.005>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695517301888> (acedido em 16/05/2022) (ver p. 9).
- [17] EN 13306:2017: *Maintenance: Maintenance terminology*. 2017 (ver p. 11).
- [18] Albert HC Tsang. “Strategic dimensions of maintenance management”. Em: *Journal of Quality in maintenance Engineering* (2002) (ver p. 11).
- [19] Sherif Mostafa, Jantanee Dumrak e Hassan Soltan. “Lean maintenance roadmap”. Em: *Procedia Manufacturing* 2 (2015), pp. 434–444 (ver p. 12).
- [20] Johannes L Jooste, Louis Louw, Konrad von Leipzig, Pieter DF Conradie, Olabanji O Asekun, Dominik Lucke e Devon Hagedorn-Hansen. “Teaching maintenance plan development in a learning factory environment”. Em: *Procedia manufacturing* 45 (2020), pp. 379–385 (ver p. 12).
- [21] M Faccio, A Persona, F Sgarbossa e G Zanin. “Industrial maintenance policy development: A quantitative framework”. Em: *International Journal of Production Economics* 147 (2014), pp. 85–93 (ver p. 12).
- [22] Adolfo Crespo Márquez. *The maintenance management framework: models and methods for complex systems maintenance*. Springer Science & Business Media, 2007 (ver p. 12).
- [23] Amik Garg e SG Deshmukh. “Maintenance management: literature review and directions”. Em: *Journal of quality in maintenance engineering* 12.3 (2006), pp. 205–238 (ver p. 12).

- [24] Suriyan Jomthanachai, Wai-Peng Wong e Chee-Peng Lim. “An application of data envelopment analysis and machine learning approach to risk management”. Em: *IEEE Access* 9 (2021), pp. 85978–85994 (ver p. 13).
- [25] Nasir B Siraj e Aminah Robinson Fayek. “Risk identification and common risks in construction: Literature review and content analysis”. Em: *Journal of construction engineering and management* 145.9 (2019), p. 03119004 (ver p. 13).
- [26] Grant Purdy. “ISO 31000: 2009—setting a new standard for risk management”. Em: *Risk Analysis: An International Journal* 30.6 (2010), pp. 881–886 (ver p. 13).
- [27] Nsikan Ekwere. “Framework of effective risk management in small and medium enterprises (SMEs): a literature review”. Em: *Bina Ekonomi* 20.1 (2016), pp. 23–46 (ver p. 13).
- [28] Dornberger Kerstin, Oberlehner Simone, Zadrazil Nicole e Othmar M Lehner. “Challenges in implementing enterprise risk management”. Em: *ACRN Journal of Finance and Risk Perspectives* 3.3 (2014), pp. 1–14 (ver p. 13).
- [29] Nadia Belu, Abdel-Rahim Al Ali e Nancy Khassawneh. “Application of Control Plan-a PPAP Tool in Automotive Industry Production”. Em: *Calitatea* 14.136 (2013), p. 68 (ver p. 19).
- [30] *Advanced product quality planning (APQP) and control plan: Reference manual*. 2ª ed. Chrysler Corporation, Ford Motor Company e General Motors Corporation, 2008 (ver pp. 19, 21, 22).
- [31] *APQP: Advanced Product Quality Planning: Quality-one*. Abr. de 2022. URL: <https://quality-one.com/apqp/> (acedido em 16/05/2022) (ver pp. 19, 22, 25).
- [32] Liviu Dorin Pop e Nagy Elod. “Improving product quality by implementing ISO/TS 16949”. Em: *Procedia Technology* 19 (2015), pp. 1004–1011 (ver p. 20).
- [33] Sarah Anne Murphy, Sherry Engle Moeller, Jessica R Page, Judith Cerqua e Mark Boarman. “Leveraging measurement system analysis (msa) to improve library assessment: the attribute gage r&r”. Em: *College & Research Libraries* 70.6 (2009), pp. 568–577 (ver p. 20).
- [34] *Quality Core Tools*. Abr. de 2021. URL: <https://quality-one.com/quality-core-tools/> (acedido em 16/05/2022) (ver p. 20).
- [35] Greg A Larsen. “Measurement system analysis in a production environment with multiple test parameters”. Em: *Quality Engineering* 16.2 (2003), pp. 297–306 (ver p. 20).
- [36] Roland Caulcutt. “Statistical process control (SPC)”. Em: *Assembly Automation* (1996) (ver p. 20).
- [37] Kaoru Ishikawa. *What is total quality control? The Japanese way*. Prentice Hall, 1985 (ver p. 20).

- [38] John S. Oakland e Robert James Oakland. *Statistical process control*. 6^a ed. Routledge, 2007 (ver p. 20).
- [39] John S. Oakland e Robert James Oakland. *Statistical process control*. 7^a ed. Routledge, 2019 (ver p. 20).
- [40] Darryl Seland. *A brief history of statistical process control*. Jan. de 2021. URL: <https://www.qualitymag.com/articles/96349-a-brief-history-of-statistical-process-control> (acedido em 16/05/2022) (ver p. 21).
- [41] Masski Imai. *Kaizen: The key to Japan's competitive success*. Random House Business Division, 1986 (ver p. 21).
- [42] Naceur Jabnoun. "Values underlying continuous improvement". Em: *The TQM Magazine* (2001) (ver p. 22).
- [43] Miroslav Bobrek e M Sokovic. "Implementation of APQP-concept in design of QMS". Em: *Journal of Materials Processing Technology* 162 (2005), pp. 718–724 (ver p. 23).
- [44] *Securing the quality of supplies production process and product approval (PPA)*. 6^a ed. VDA, QMC, Qualitäts Management Center im Verband der Automobilindustrie, 2020 (ver p. 25).
- [45] Francisco C Robles Hernandez, Jose Martin Herrera Ramirez e Robert Mackay. "Applications in the automotive and aerospace industries". Em: *Al-Si Alloys*. Springer, 2017, pp. 163–171 (ver p. 27).
- [46] Alina Bianca Pop, Mihail Aurel Țițu, Constantin Oprean, Costel Ceocea, Andrei Victor Sandu e Ștefan Țițu. "Contributions concerning the possibility of implementing the APQP concept in the aerospace industry". Em: *MATEC Web of Conferences*. Vol. 178. EDP Sciences. 2018, p. 08013 (ver p. 27).
- [47] Alina Bianca Pop e Aurel Mihail Țițu. "Implementation of advanced product quality planning in the aerospace industry a way to improve the quality management". Em: *Calitatea* 21.177 (2020), pp. 56–61 (ver p. 27).
- [48] *Production Part Approval Process (PPAP)*. 4^a ed. Automotive Industry Action Group, 2009 (ver pp. 27, 65).
- [49] *PPAP: Production part approval process: Quality-one*. Abr. de 2021. URL: <https://quality-one.com/ppap/> (acedido em 16/05/2022) (ver p. 28).
- [50] Nazlı Gülüm Mutlu e Serkan Altuntas. "Risk analysis for occupational safety and health in the textile industry: Integration of FMEA, FTA, and BIFPET methods". Em: *International journal of industrial ergonomics* 72 (2019), pp. 222–240 (ver p. 29).
- [51] Andre Segismundo e Paulo Augusto Cauchick Miguel. "Failure mode and effects analysis (FMEA) in the context of risk management in new product development: A case study in an automotive company". Em: *International Journal of Quality & Reliability Management* (2008) (ver p. 29).

- [52] Tsehaye Dedimas Beyene e Sisay Geremew Gebeyehu. “Application of failure mode effect analysis (FMEA) for efficient and cost-effective manufacturing: A case study at Bahir Dar textile share company, Ethiopia”. Em: *Journal of Optimization in Industrial Engineering* 12.1 (2019), pp. 23–29 (ver p. 29).
- [53] Yanliang Li, Rui Kang, Lin Ma e Lei Li. “Application and improvement study on FMEA in the process of military equipment maintenance”. Em: *The Proceedings of 2011 9th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety*. IEEE. 2011, pp. 803–810 (ver p. 29).
- [54] Ilie Nicolin e Bogdan Adrian Nicolin. “Failure Mode and Effect Analysis for a military nose landing gear project”. Em: *INCAS Bulletin* 13.4 (2021), pp. 205–212 (ver p. 29).
- [55] JA Lakshika Anjalee, Victoria Rutter e NR Samaranyake. “Application of failure mode and effects analysis (FMEA) to improve medication safety in the dispensing process—a study at a teaching hospital, Sri Lanka”. Em: *BMC Public Health* 21.1 (2021), pp. 1–13 (ver p. 29).
- [56] Hui Chen, Zhao Tao, Chen Zhou, Su Zhao, Yanan Xing e Min Lu. “The Effect of Comprehensive Use of PDCA and FMEA Management Tools on the Work Efficiency, Teamwork, and Self-Identity of Medical Staff: A Cohort Study with Zhongda Hospital in China as an Example”. Em: *Contrast Media & Molecular Imaging* 2022 (2022) (ver p. 29).
- [57] I Romero-Zayas, F Campos Añón, M Santos Virosta, J Cerdón Del Pozo, C Santos Montero, A Niñerola Baizán e D Fuster. “Implementation of the failure modes and effects analysis in a Hospital Radiopharmacy Unit”. Em: *Revista Española de Medicina Nuclear e Imagen Molecular (English Edition)* (2022) (ver p. 29).
- [58] Anette von Ahsen, Lars Petruschke e Nicholas Frick. “Sustainability Failure Mode and Effects Analysis—A systematic literature review”. Em: *Journal of Cleaner Production* (2022), p. 132413 (ver p. 29).
- [59] DR Prajapati. “Implementation of failure mode and effect analysis: a literature review”. Em: *International journal of management, IT and Engineering* 2.7 (2012), pp. 264–292 (ver p. 29).
- [60] Christopher Kluse. “A critical analysis of the AIAG - VDA FMEA; Does the newly released AIAG - VDA method offer improvements over the former AIAG method?” Em: *Journal of Management & Engineering Integration* 13.1 (2020), pp. 71–85 (ver pp. 31, 37).
- [61] Richard A Harpster. “AIAG VDA and SAE J1739 DFMEA Methods, Similarities, Differences and Impact on the Auto Industry”. Em: *2022 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*. IEEE. 2022, pp. 1–6 (ver pp. 33, 37).



- [62] Dariusz Plinta, Ewa Golinska e L'uboslav Dulina. "Practical Application of the New Approach To FMEA Method according to AIAG and VDA Reference Manual". Em: *Communications-Scientific letters of the University of Zilina* 23.4 (2021), B325–B335 (ver p. 37).

TRECHO DE FMEA CONCLUÍDO

Process Name Nome do Processo	Process Step Passo do Processo	Function of the Process Step Função do Passo do Processo	Failure Modes Modos de Falha	Effects of Failure Modes Efeitos dos Modos de Falha	Severity of Failure Modes Gravidade dos Modos de Falha	Failure Causes Causas de Falha	Current Controls Controles Atuais	Recommended Actions Ações Recomendadas	Responsible Responsável	Target Completion Date Data de Conclusão Alvo	Status Status	Risk Risco	Priority Prioridade	V. OPORTUNIDADES			
														Current Atual	Desired Desejada	Delta Delta	Score Pontuação
Process Name Nome do Processo	Process Step Passo do Processo	Function of the Process Step Função do Passo do Processo	Failure Modes Modos de Falha	Effects of Failure Modes Efeitos dos Modos de Falha	Severity of Failure Modes Gravidade dos Modos de Falha	Failure Causes Causas de Falha	Current Controls Controles Atuais	Recommended Actions Ações Recomendadas	Responsible Responsável	Target Completion Date Data de Conclusão Alvo	Status Status	Risk Risco	Priority Prioridade	1	1	0	1
														2	2	0	2
														3	3	0	3
														4	4	0	4
														5	5	0	5
														6	6	0	6
														7	7	0	7
														8	8	0	8
														9	9	0	9
														10	10	0	10

Tabela A.1: Trecho de FMEA feito, segundo o Manual FMEA pela AIAG & VDA

EXEMPLO DE PSW

DAIMLERCHRYSLER  

Part Submission Warrant

Part Name _____ Cust. Part Number _____
 Shown on Drawing No. _____ Org. Part Number _____
 Engineering Change Level _____ Dated _____
 Additional Engineering Changes _____ Dated _____
 Safety and/or Government Regulation Yes No Purchase Order No. _____ Weight (kg) _____
 Checking Aid No. _____ Checking Aid Engineering Change Level _____ Dated _____

ORGANIZATION MANUFACTURING INFORMATION	CUSTOMER SUBMITTAL INFORMATION
Organization Name & Supplier/Vendor Code _____	Customer Name/Division _____
Street Address _____	Buyer/Buyer Code _____
City _____ Region _____ Postal Code _____ Country _____	Application _____

MATERIALS REPORTING
 Has customer-required Substances of Concern information been reported? Yes No n/a
 Submitted by IMDS or other customer format: _____
 Are polymeric parts identified with appropriate ISO marking codes? Yes No n/a

REASON FOR SUBMISSION (Check at least one)

<input type="checkbox"/> Initial Submission <input type="checkbox"/> Engineering Change(s) <input type="checkbox"/> Tooling: Transfer, Replacement, Refurbishment, or additional <input type="checkbox"/> Correction of Discrepancy <input type="checkbox"/> Tooling Inactive > than 1 year	<input type="checkbox"/> Change to Optional Construction or Material <input type="checkbox"/> Supplier or Material Source Change <input type="checkbox"/> Change in Part Processing <input type="checkbox"/> Parts Produced at Additional Location <input type="checkbox"/> Other – please specify below
---	--

REQUESTED SUBMISSION LEVEL (Check one)

Level 1 – Warrant only (and for designated appearance items, an Appearance Approval Report) submitted to customer.
 Level 2 – Warrant with product samples and limited supporting data submitted to customer.
 Level 3 – Warrant with product samples and complete supporting data submitted to customer.
 Level 4 – Warrant and other requirements as defined by customer.
 Level 5 – Warrant with product samples and complete supporting data reviewed at organization's manufacturing location.

SUBMISSION RESULTS
 The results for dimensional measurements material and functional tests appearance criteria statistical process package
 These results meet all design record requirements: Yes NO (if "NO" – Explanation Required)
 Mold / Cavity / Production Process _____

DECLARATION
 I affirm that the samples represented by this warrant are representative of our parts which were made by a process that meets all Production Part Approval Process Manual 4th Edition Requirements. I further affirm that these samples were produced at the production rate of ____ / ____ hours. I also certify that documented evidence of such compliance is on file and available for review. I have noted any deviations from this declaration below.
 EXPLANATION/COMMENTS: _____

Is each Customer Tool properly tagged and numbered? Yes No n/a

Organization Authorized Signature _____ Date _____
 Print Name _____ Phone No. _____ FAX No. _____
 Title _____ E-mail _____

FOR CUSTOMER USE ONLY (IF APPLICABLE)

PPAP Warrant Disposition: Approved Rejected Other _____
 Customer Signature _____ Date _____
 Print Name _____ Customer Tracking Number (optional) _____

March 2006 CFG-1001

Figura I.1: Exemplo de Documento Part Submission Warrant – Mandato de Submissão de Peças (PSW) [48]

TABELAS SOD

Critérios Gerais de Avaliação de Severidade (S) do Processo				
Potenciais Efeitos da Falha classificados de acordo com os critérios abaixo apresentados				
S	Efeito	Impacto nas Instalações de Origem	Impacto nas Instalações de Destino (quando conhecido)	Impacto no Utilizador Final (quando conhecido)
10	Elevado	A falha pode resultar num sério risco para a integridade física e/ou risco de segurança dos trabalhadores das secções de produção ou montagem	A falha pode resultar num sério risco para a integridade física e/ou risco de segurança dos trabalhadores das secções de produção ou montagem	Afeta o funcionamento seguro do veículo e/ou de outros veículos, a integridade física do condutor ou dos passageiros ou utilizadores da estrada ou peões
9		A falha pode resultar em incumprimento de regulamentos internos nas instalações	A falha pode resultar em incumprimento de regulamentos internos nas instalações	Incumprimento de requisitos legais
8	Moderadamente Elevado	Pode ser necessário eliminar 100% da produção afetada	Paragem da linha com duração superior à totalidade do turno de produção; possibilidade de interrupção da expedição; necessidade de substituição ou reparação no terreno (da Montagem ao Utilizador Final) por motivos que não o incumprimento dos regulamentos	Perda da função principal do veículo necessária para condução durante a vida útil esperada
7		Pode ser necessário fazer a triagem e eliminar uma parte (inferior a 100%); desvio em relação ao processo principal; menor cadência da linha ou mão de obra adicional	Paragem da linha com duração entre 1 hora e a totalidade do turno de produção; possibilidade de interrupção da expedição; necessidade de substituição ou reparação no terreno (Montagem para Utilizador Final) por motivos que não o incumprimento de regulamentos	Degradação da função principal do veículo necessária para condução normal durante a vida útil esperada

Tabela II.1: Tabela de Severidade (adaptado de [7])

6	Moderadamente Baixo	Pode ser necessário retrabalhar fora da linha e aceitar uma parte do turno de produção	Paragem da linha com duração inferior a 1 hora	Perda da função secundária do veículo
5		Pode ser necessário retrabalhar na estação 100% do turno de produção antes de processar	Menos de 100% do produto afetado; forte possibilidade de produtos adicionais com defeito; triagem necessária; sem paragem da linha	Degradação da função secundária do veículo
4		Pode ser necessário retrabalhar fora da linha e aceitar 100% do turno de produção	Produto com defeito desencadeiam um plano de reação significativo; produtos defeituosos adicionais não são prováveis; seleção não é requerida.	Aspeto, som, vibração, dureza ou háptica muito repreensíveis
3	Baixo	Pode ser necessário retrabalhar na estação uma parte do turno de produção antes de processar	Produto com defeito desencadeiam um plano de reação pouco significativo; produtos defeituosos adicionais não são prováveis; seleção não é requerida.	Aspeto, som, vibração, dureza ou háptica moderadamente repreensíveis
2		Ligeiro inconveniente para o processo, operação ou operador	Produto com defeito não desencadeiam um plano de reação; produtos defeituosos adicionais não são prováveis; seleção não é requerida; requer feedback para o fornecedor	Aspeto, som, vibração, dureza ou háptica ligeiramente repreensíveis
1	Muito Baixo	Sem efeito discernível	Sem efeito discernível ou sem defeito	Sem efeito discernível

Tabela II.2: Tabela de Severidade (adaptado de [7])

Potencial de Ocorrência (O) do Processo			
Potenciais Efeitos da Falha classificados de acordo com os critérios abaixo apresentados			
O	Previsão de Ocorrência da Causa da Falha	Tipo de Controle	Controles de Prevenção
10	Extremamente Elevada	Nenhum	Sem controles de prevenção
9	Muito Elevado	Comportamental	Controles de prevenção terão pouco efeito na prevenção da causa da falha.
8			
7	Elevada	Comportamental ou Técnico	Os controles de prevenção são ligeiramente eficazes na prevenção da causa da falha
6			
5	Moderada		Os controles de prevenção são eficazes na prevenção da causa da falha
4			
3	Baixo	Melhores Práticas; Comportamental ou Técnico	Os controles de prevenção são altamente eficazes na prevenção da causa da falha
2	Muito Baixa		
1	Extremamente Baixa	Técnico	Os controles de prevenção são extremamente eficazes para evitar a ocorrência da causa da falha devido ao produto ou processo. Não é possível produzir fisicamente o Modo de Falha devido à Causa da Falha

Tabela II.3: Tabela de Ocorrência (adaptado de [7])

Potencial de Detecção (D) para Validação da Conceção do Processo			
Controlos de Detecção classificados de acordo com a Maturidade do Método de Detecção e a Oportunidade de Detecção			
D	Capacidade de Detecção	Maturidade do Método de Detecção	Oportunidade de Detecção
10	Muito Baixa	Não foi definido nem é conhecido qualquer método de inspeção ou teste	O modo de falha não será ou não pode ser detetado
9		É pouco provável que o método de inspeção ou teste detete o modo de falha	O modo de falha não é facilmente detetado através de inspeções esporádicas ou aleatórias
8	Baixa	O método de inspeção não foi comprovado como eficaz e fiável	Inspeção humana (visual, tátil, audível) ou utilização de controlo manual que deverá detetar o modo de falha ou a causa da falha
7			Detecção baseada em máquina (automática ou semiautomática com notificação através de lâmpadas, alarme sonoro, etc.) ou uso de equipamento de inspeção tal como máquina de medição por coordenada que deveria detectar o modo de falha ou a causa da falha.

Tabela II.4: Tabela de Detecção (adaptado de [7])

6	Moderada	O método de inspeção foi comprovado como eficaz e fiável	Inspeção humana (visual, tátil, audível) ou uso de dispositivo manual (atributo ou variável) que irá detectar o modo de falha ou a causa da falha (incluindo inspeções de produto por amostragem)
5			Deteção baseada em máquina (semiautomática com notificação através de lâmpadas, alarme sonoro, etc.) ou uso de equipamento de inspeção tal como máquina de medição por coordenada que irá detectar o modo de falha ou a causa da falha. (incluindo inspeções de produto por amostragem)
4	Elevada	O método de inspeção foi comprovado como eficaz e fiável; resultados aceitáveis em estudos R&R, etc.	Método de deteção automático baseado em máquina que irá detectar o modo de falha nas operações seguintes, prevenir o processamento posterior ou o sistema identificará o produto como discrepante e permitirá que automaticamente avance no processo até a área designada de rejeição para ser descarregado. Produtos discrepantes serão controlados por um sistema robusto que irá prevenir a saída do produto das instalações
3			Método de deteção automático baseado em máquina que irá detetar o modo de falha na estação, prevenir o processamento posterior ou o sistema identificará o produto como discrepante e permitirá que automaticamente avance no processo até à área designada de rejeição para ser descarregado. Produtos discrepantes serão controlados por um sistema robusto que irá prevenir a saída do produto das instalações
2			Modo de deteção baseado em máquina que irá detetar a causa e prevenir o modo de falha de ser produzido
1	Muito Elevada	O modo de falha não pode ser produzido fisicamente conforme pretendido ou processado, ou foi comprovado que os métodos de deteção detetam sempre o modo de falha ou a causa de falha	

Tabela II.5: Tabela de Deteção (adaptado de [7])

Prioridade de Ação (AP) para PFMEA							
Prioridade de Ação é baseada nas combinações de pontuações de Severidade, Ocorrência, e Detecção, para priorizar ações para redução de risco.							
Efeito	S	Previsão de Ocorrência da Causa da Falha	O	Capacidade de Detecção	D	PRIORIDADE DE AÇÃO (AP)	
Efeito nas Instalações ou no Produto Muito Elevado	9-10	Muito Elevada	8-10	Baixa - Muito baixa	7-10	H	
				Moderada	5-6	H	
				Elevada	2-4	H	
				Muito Elevada	1	H	
		Elevada	6-7	Baixa - Muito baixa	7-10	H	
				Moderada	5-6	H	
				Elevada	2-4	H	
				Muito Elevada	1	H	
		Moderada	4-5	Baixa - Muito baixa	7-10	H	
				Moderada	5-6	H	
				Elevada	2-4	H	
				Muito Elevada	1	M	
	Baixa	2-3	Baixa - Muito baixa	7-10	H		
			Moderada	5-6	M		
			Elevada	2-4	L		
			Muito Elevada	1	L		
	Muito baixa - Muito Elevada	1	Muito Elevada - Muito baixa	1-10	L		
	Efeito nas Instalações ou no Produto Elevado	7-8	Muito Elevada	8-10	Baixa - Muito baixa	7-10	H
					Moderada	5-6	H
					Elevada	2-4	H
Muito Elevada					1	H	
Elevada			6-7	Baixa - Muito baixa	7-10	H	
				Moderada	5-6	H	
				Elevada	2-4	H	
				Muito Elevada	1	M	
Moderada			4-5	Baixa - Muito baixa	7-10	H	
				Moderada	5-6	M	
				Elevada	2-4	M	
				Muito Elevada	1	M	
Baixa		2-3	Baixa - Muito baixa	7-10	M		
			Moderada	5-6	M		
			Elevada	2-4	L		
			Muito Elevada	1	L		
Muito baixa - Muito Elevada		1	Muito Elevada - Muito baixa	1-10	L		

Tabela II.6: Tabela de Prioridade de Ação (adaptado de [7])

Prioridade de Ação (AP) para PFMEA						
Prioridade de Ação é baseada nas combinações de pontuações de Severidade, Ocorrência, e Detecção, para priorizar ações para redução de risco.						
Efeito	S	Previsão de Ocorrência da Causa da Falha	O	Capacidade de Detecção	D	PRIORIDADE DE AÇÃO (AP)
Efeito nas Instalações ou no Produto Moderado	4-6	Muito Elevada	8-10	Baixa - Muito baixa	7-10	H
				Moderada	5-6	H
				Elevada	2-4	M
				Muito Elevada	1	M
		Elevada	6-7	Baixa - Muito baixa	7-10	M
				Moderada	5-6	M
				Elevada	2-4	M
				Muito Elevada	1	L
		Moderada	4-5	Baixa - Muito baixa	7-10	M
				Moderada	5-6	L
				Elevada	2-4	L
				Muito Elevada	1	L
		Baixa	2-3	Baixa - Muito baixa	7-10	L
				Moderada	5-6	L
				Elevada	2-4	L
				Muito Elevada	1	L
Muito baixa - Muito Elevada	1	Muito Elevada - Muito baixa	1-10	L		
Efeito nas Instalações ou no Produto Baixo	2-3	Muito Elevada	8-10	Baixa - Muito baixa	7-10	M
				Moderada	5-6	M
				Elevada	2-4	L
				Muito Elevada	1	L
		Elevada	6-7	Baixa - Muito baixa	7-10	L
				Moderada	5-6	L
				Elevada	2-4	L
				Muito Elevada	1	L
		Moderada	4-5	Baixa - Muito baixa	7-10	L
				Moderada	5-6	L
				Elevada	2-4	L
				Muito Elevada	1	L
		Baixa	2-3	Baixa - Muito baixa	7-10	L
				Moderada	5-6	L
				Elevada	2-4	L
				Muito Elevada	1	L
Muito baixa - Muito Elevada	1	Muito Elevada - Muito baixa	1-10	L		
Sem efeito discernível	1	Muito baixa - Muito Elevada	1	Muito Elevada - Muito baixa	1-10	L

Tabela II.7: Tabela de Prioridade de Ação (adaptado de [7])

