unesp UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

LUIS ANTONIO ARRUDA BATISTA

PROCESSO PARA REDUÇÃO DE INCONSISTÊNCIAS EM ANÁLISE DE FALHAS: ESTUDO DE CASO NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

Guaratinguetá - SP
2016

LUIS ANTONIO ARRUDA BATISTA

PROCESSO PARA REDUÇÃO DE INCONSISTÊNCIAS EM ANÁLISE DE FALHAS: ESTUDO DE CASO NA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Valério Antonio Pamplona Salomon

Guaratinguetá - SP
2016

Batista, Luis Antonio Arruda
B333p Processo para redução de inconsistências em análise de falhas: estudo de caso na indústria automotiva / Luis Antonio Arruda Batista – Guaratinguetá, 2016.
98 f : il.
Bibliografia: f. 89-92

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016.
Orientador: Prof. Dr. Valério Antonio Pamplona Salomon

1. Controle de processo 2. Confiabilidade (Engenharia) 3. Falha de sistema (Engenharia) 4. Indústria automobilística I. Título

CDU 658.511.3

unesp UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

LUIS ANTONIO ARRUDA BATISTA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE **"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"**

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM NOME DO CURSO

Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. VALÉRIO ANTONIO PAMPLONA SALOMON
Orientador - FEG/UNESP

Dr. DIMAS CAMPOS DE AGUIAR
Coordenador de Qualidade - IOCHPE-MAXION

Prof. Dr. OTÁVIO JOSÉ DE OLIVEIRA
Professor - FEG/UNESP

Guaratinguetá, Dezembro de 2016

DADOS CURRICULARES

LUIS ANTONIO ARRUDA BATISTA

NASCIMENTO	25.05.1992 – São Paulo / SP
FILIAÇÃO	Francisco José Ferreira Batista
	Ester de Fátima Arruda Batista
2010/2016	Curso de Graduação
	Engenharia Mecânica - Universidade Estadual Paulista
	"Júlio de Mesquita Filho" - Campus de Guaratinguetá

de modo especial, à minha família, Ester, Ferreira,
Elisa, e meus parentes, pelo apoio dedicado nos
momentos mais difíceis desta caminhada.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, *Prof. Dr. Valério Salomon*, pela atenção e dedicação em guiar-me nesta tarefa, contribuindo substancialmente para a realização deste trabalho.

Ao *Dr. Dimas Campos de Aguiar*, pela orientação profissional e pela amizade desenvolvida em dois anos de trabalho conjunto, quando atenciosamente transmitiu-me seus conhecimentos em FMEA, despertando meu interesse sobre este assunto.

Aos amigos *Thiago Ferraz* e *Victória Ruzzene*, pessoas especiais por quem tenho grande consideração, pelo companheirismo e confiança nestes anos de graduação.

Aos colegas de turma da FEG, em especial à *Rodrigo Verginelli, Renata Magner* e *Bárbara Benatti*, por compartilharem comigo esta difícil caminhada acadêmica.

À minha família da Itália, *Clarissa Fabris, Bruna Ulian, Jéssica Borges, Ananda Rodrigues, Pedro Palmer, Isabela Botelho, Luiz Gabriel, Mariana Pacheco, Marcela Bet, Aline Kraemer e Dario Imbesi*, por dividirem comigo momentos inesquecíveis durante meu intercâmbio, sendo amizades que levarei pela vida.

À aqueles que me lideraram, em especial à *Jeizon Okada, Marcos Lopes, Lucas Patto, Marco Santos, Hilquias Lopes, Marcos Bessa* e *Benedito Valério,* pelos ensinamentos e valores transmitidos, e pela amizade fora do ambiente corporativo.

Ao *Prof. Dr. Marcelo Sampaio*, que foi mais do que um professor, um amigo sempre disposto a dar suporte aos alunos nos momentos de dificuldade.

Ao *Colégio Técnico Industrial de Guaratinguetá*, por fazer a diferença na minha formação, dando-me condições de ingressar em um curso de engenharia, e à todos os bons amigos que fiz nesta instituição.

Finalmente, à todos os amigos, professores, colegas de trabalho e pessoas que participaram direta ou indiretamente desta minha caminhada da graduação, por todo o apoio dedicado para que eu pudesse chegar a este momento.

"A vontade de preparar-se deve ser
maior do que a vontade de vencer."

(Bob Knight)

RESUMO

O FMEA de Processo é um método analítico de análise de falhas amplamente difundido na indústria automotiva. As organizações rotineiramente elaboram FMEAs de seus processos, seja para aumentar a confiabilidade de suas operações através da prevenção de falhas, ou apenas para atender aos requisitos normativos dos sistemas de gestão da qualidade automotiva. No entanto, mesmo existindo esta familiaridade com o método, as organizações frequentemente não são capazes de elaborar FMEAs eficazes. Questões organizacionais contribuem para este cenário, mas sobretudo, dificuldades técnicas e conceituais incorporadas pelo método apresentam-se como principal razão pela qual as equipes desenvolvem FMEAs repletos de inconsistências nos dados, tornando os formulários imprecisos e distantes da realidade do processo. Sendo assim, a proposta deste trabalho é desenvolver um processo para reduzir as inconsistências mais comuns cometidas pelas equipes durante o desenvolvimento do FMEA. Através do uso de pré-formulários, elaborados para serem mais intuitivos que o formulário de FMEA tradicional, e da realização da verificação da consistência dos dados, aplicando-se o modelo conceitual de abordagem por processos combinada ao FMEA, pretende-se reduzir as dificuldades técnicas apresentadas pelas equipes durante a elaboração da análise de falhas, simplificando-se a interpretação da relação existente entre causa e efeito presente no FMEA. Um estudo de caso é conduzido, consistindo-se na aplicação deste processo em uma atividade de revisão de FMEA de Processo em uma organização automotiva *Tier 1* na cadeia de fornecimento automotiva. Verificou-se que a aplicação deste processo de redução de inconsistências do FMEA proporciona ganhos tanto quantitativos, em termos de volume de dados transcritos no formulário, quanto qualitativos, com informações descritas de forma mais precisa e consistente, permitindo a elaboração de um FMEA eficaz para ser utilizado na gestão de riscos do processo.

PALAVRAS-CHAVE: FMEA de Processo. Abordagem por processos. Redução de Inconsistências. Formulário de FMEA. Indústria automotiva.

ABSTRACT

The Process FMEA is an analytical method of failure analysis which is widely diffused in the automotive industry. Organizations often elaborate FMEAs of their process, or by increase reliability of their operations through failure prevention, or just for complying with the normative requirements of the automotive quality management systems. Meantime, even existing this familiarity with the method, the companies often are not be able to perform effective FMEAs. Corporative questions contribute to this background, but mainly, technical and conceptual difficulties are presented as major reason why teams develop FMEAs filled with inconsistent data, becoming the worksheet inaccurate and far from the reality of the process. Therefore, the purpose of this work is to develop a process for reducing the most common inconsistencies carried out by teams during the development of FMEA. Through the use of pre-worksheets, designed to be more intuitive which the traditional FMEA worksheet, is intended to reduce the technical difficulties shown by the teams during the elaboration of the failure analysis, simplifying the understanding of the relationship between cause and effect inside FMEA. A case study is conducted, consisting in the application of this method in a revision work of Process FMEA in a *Tier 1* company in the automotive supply chain. It was observed that the application of this FMEA's inconsistencies reduction process provides quantitative achievements, in terms of data volume transcribed to the FMEA worksheet, and also qualitative achievements, with information described in a accurate and consistent way, allowing the elaboration of an effective FMEA in order to be applied in the risk management of the process.

KEYWORDS: Process FMEA. Process Approach. Inconsistencies reduction. FMEA worksheet. Automotive industry.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Abordagem por Processos 24
Figura 2 - Formulário de FMEA 31
Figura 3 - Modelo de Implementação do FMEA 32
Figura 4 - Formulário de Plano de Controle 35
Figura 5 - Extrato de FMEA de Processo do Estudo de Caso 47
Figura 6 - Cadeia de Eventos de um FMEA 62
Figura 7 - Cadeia de Eventos do FMEA inserida em um processo 63
Figura 8 - Abordagem por Processos combinada ao Método FMEA 64
Figura 9 - Pré-Formulário de Avaliação das Funções, Modos de Falha e Efeitos do FMEA 66
Figura 10 - Pré-Formulário de Análise das Causas, Controles e Pontuações de Risco .. 67
Figura 11 - Pré-Formulário de Verificação da Consistência do FMEA 67
Figura 12 - Exemplo de Verificação da Consistência do FMEA do Estudo de Caso na Operação de Recebimento 70
Figura 13 - FMEA revisado da Operação *Decapagem Mecânica + Oleamento* 75
Figura 14 - Avaliação do FMEA revisado na operação *Decapagem Mecânica + Oleamento* 78
Figura 15 - Evolução do volume de dados do FMEA do estudo de caso 79

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Exemplo de Inconsistência da Pontuação do RPN..... 42
Tabela 2 - Levantamento da quantidade de dados presentes no FMEA de Processo da organização.....80

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Histórico do FMEA..... 23
Quadro 2 - Principais Limitações do uso do RPN no FMEA..... 41
Quadro 3 - Inconsistências mais Comuns na Elaboração do FMEA..... 44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AHP	*Analytic Hierarchy Process*
AIAG	*Automotive Industry Action Group*
APQP	*Advanced Product Quality Planning*
DEA	*Data Envelopment Analysis*
DFMEA	*Design Failure Mode and Effect Analysis*
FMEA	*Failure Mode and Effect Analysis*
FMECA	*Failure Mode and Critically Effect Analysis*
FTA	*Failure Tree Analysis*
IEC	*International Electrotechnical Commission*
ISO	*International Organization for Standardization*
ISO 9001:2008	Sistemas de Gestão da Qualidade - Requisitos
ISO/TS 16949:2009	Sistemas de Gestão da Qualidade Automotiva - Requisitos
PFMEA	*Process Failure Mode and Effect Analysis*
QFD	*Quality Function Deployment*
QS-9000	*Quality System Requirements*
RPN	*Risk Priority Number*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 14

1.1. OBJETIVOS DA PESQUISA 15

1.3. MÉTODO DE PESQUISA 16

1.4. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA 17

2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS SOBRE FMEA 20

2.1. O QUE É FMEA? 20

2.2. HISTÓRICO DO FMEA 21

2.3. CONCEITOS BÁSICOS DA ANÁLISE DE FALHAS 23

2.3.1. Função do Processo 23

2.3.2. Modo Potencial da Falha/Requisitos 24

2.3.3. Efeitos Potenciais da Falha 25

2.3.4. Causa Potencial do Modo de Falha 26

2.3.5. Risco, Severidade, Ocorrência e Detecção 26

2.3.6. Número de Prioridade de Risco (RPN) 28

2.4. PROCESSO DE ELABORAÇÃO DE UM FMEA 29

2.5. A APLICAÇÃO DO FMEA NAS ORGANIZAÇÕES AUTOMOTIVAS 32

2.5.1. O papel do FMEA na Qualidade Automotiva 32

2.5.2. Dificuldades Enfrentadas pelas Organizações para a Implementação do FMEA 34

2.5.3. Dificuldades Técnicas na Aplicação do Método FMEA 39

3. ESTUDO DE CASO: REDUÇÃO DE INCONSISTÊNCIAS EM FMEA DA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA 45

3.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DO ESTUDO DE CASO 45

3.2. LEVANTAMENTO DAS INCONSISTÊNCIAS PRESENTES NO FMEA DO ESTUDO DE CASO 46

3.3. PROCESSO PARA REDUÇÃO DAS INCONSISTÊNCIAS PRESENTES NO FORMULÁRIO DE FMEA 61

3.3.1. Aplicação da Abordagem por Processos no Desenvolvimento do FMEA 62

3.3.2. Estruturação do Procedimento para Redução de Inconsistências do FMEA do Estudo de Caso 64

3.4. APLICAÇÃO DO PROCESSO DE REDUÇÃO DE INCONSISTÊNCIAS DO FMEA AO ESTUDO DE CASO 71

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....83
4.1. VERIFICAÇÃO DOS OBJETIVOS DA PESQUISA.....83
4.2. CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA.....84
4.3. RECOMENDAÇÕES PARA NOVAS PESQUISAS.....87
REFERÊNCIAS 89
APÊNDICE A - PRÉ-FORMULÁRIO DE AVALIAÇÃO DAS FUNÇÕES, MODOS DE FALHA E EFEITOS DO FMEA.....93
APÊNDICE B - PRÉ-FORMULÁRIO DE ANÁLISE DAS CAUSAS, CONTROLES E PONTUAÇÕES DE RISCO 94
APÊNDICE C - PRÉ-FORMULÁRIO DE VERIFICAÇÃO DA CONSISTÊNCIA DO FMEA.....95
ANEXO A - TABELA DE CRITÉRIO PARA AVALIAÇÃO DE SEVERIDADE.....96
ANEXO B - TABELA DE CRITÉRIO PARA AVALIAÇÃO DE OCORRÊNCIA 97
ANEXO C - TABELA DE CRITÉRIO PARA AVALIAÇÃO DE DETECÇÃO 98

1. INTRODUÇÃO

A indústria automotiva tem apresentado, ao longo do tempo, uma forte concorrência entre as organizações presentes neste mercado. Este ambiente agressivo torna a qualidade do produto um elemento fundamental de vantagem competitiva para as empresas obterem sucesso ao comercializarem seus produtos.

Teng *et al.* (2006) sintetizam que o objetivo final de uma empresa é satisfazer seus clientes, obtendo boa margem de lucro aumentando sua quota de mercado. Para isso, é necessário assegurar a qualidade do produto, a um custo competitivo para sobreviver no mercado global. A acirrada competitividade obriga as companhias a reduzir custos e melhorar a performance de seus processos, para fornecer produtos de alta qualidade para mercados cada vez mais exigentes (SOUZA; CARPINETTI, 2014). Neste panorama, as consequências de um produto que não atende às exigências do consumidor podem ser devastadoras para a empresa. Segundo Biasoli (2003 *apud* ESTORILIO; POSSO, 2010), uma falha detectada em um produto implica em prejuízos financeiros, mas sobretudo, compromete a credibilidade da empresa.

Para se atingir o objetivo mencionado, é fundamental maximizar-se a eficiência e a confiabilidade dos processos de fabricação, eliminando ao máximo a probabilidade de que falhas ocorram durante a manufatura. É impossível conceber um processo livre de falhas, no entanto, é possível realizar-se um trabalho voltado a mapear os riscos presentes no processo, e mantê-los a taxas de ocorrência aceitáveis.

Existem algumas ferramentas desenvolvidas com o propósito de avaliar riscos de um processo. Uma popular ferramenta para este propósito é a *Análise de Modo de Falha e seus Efeitos* (do inglês *Failure Mode and Effect Analysis, ou* FMEA) (TENG; HO, 1996). Aguiar, Salomon e Mello (2015) mencionam que um grande número de organizações têm desenvolvido seus processos utilizando a técnica do FMEA. O seu uso apropriado pode trazer vários benefícios para a organização, como uma maior confiabilidade do produto, menos modificações de projeto, melhor planejamento da qualidade, melhoria continua no produto e no processo e redução nos custos de manufatura (TENG *et al.*, 2006).

No entanto, observa-se que as empresas não são capazes de usufruir dos benefícios oferecidos pela aplicação da ferramenta. Uma série de razões corporativas, aliada à complexidade da interpretação do formulário, bem como da condução das

etapas de investigação, contribuem para que frequentemente o PFMEA (do inglês *Process FMEA*) transforme-se em um formulário repleto de erros conceituais, pobre em informações aplicáveis para melhorar a confiabilidade do processo, em um estudo que acaba se encerrando com a aprovação da documentação por parte do cliente.

Neste contexto, a intenção desta pesquisa é analisar a gama de fatores que contribuem para o insucesso da aplicação deste método nas indústrias automotivas, evidenciando os aspectos corporativos que prejudicam sua utilização e, especialmente, as dificuldades enfrentadas pelas equipes na condução das etapas de elaboração do FMEA, bem como do correto preenchimento do formulário, os quais serão o foco deste estudo, com uma proposta de processo para minimizar erros conceituais cometidos na aplicação da ferramenta.

Esta pesquisa é baseada em um estudo de caso realizado em uma companhia automotiva. Através da análise de um trabalho de revisão de PFMEA, realizado justamente com a intenção de eliminar as diversas inconsistências presentes no formulário, mediante solicitação do cliente, a pesquisa propõe um processo para realização de análise de falhas que torne esta atividade menos complexa. Um ponto fundamental nesta abordagem é a utilização de um modelo que representa a conexão entre os diversos elementos da ferramenta, mais intuitivo do que o complexo formulário de FMEA.

Também serão classificadas as diversas inconsistências encontradas no formulário original. Os resultados da aplicação do processo serão avaliados comparando-se a qualidade e consistência dos dados presentes no formulário após a aplicação do processo, verificando se as inconsistências originais foram eliminadas.

1.1. OBJETIVOS DA PESQUISA

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver uma forma de se reduzir as inconsistências frequentemente encontradas em FMEAs de Processo de organizações automotivas, através de um processo que permita às equipes uma clara interpretação da relação de causa e efeito existente em um FMEA. Para atingir-se tal objetivo, é proposto o uso de um processo de desenvolvimento da análise de falhas baseado no uso de formulários intermediários, mais intuitivos do que o complexo formulário regulamentado pelos manuais de referência. Além disso, é proposta a realização de uma

verificação da consistência dos dados do FMEA, utilizando-se do conceito de Abordagem por Processos aplicada ao FMEA, elaborado por Aguiar (2016).

Dessa forma, a expectativa é que este recurso facilite a interpretação de como os elementos do FMEA estão interligados entre si, evidenciando claramente como ocorre a relação de causa e efeitos nesta análise. Para complementar o estudo, objetivos específicos são propostos:

- Classificar as principais inconsistências cometidas nos PFMEAs de organizações da indústria automotiva, e discutir como tais inconsistências prejudicam a aplicação do FMEA na gestão de riscos do processo;
- Estruturar um processo para redução das inconsistências na análise de falhas, que permita que as equipes possam interpretar claramente a relação de causa e efeito existente no FMEA.
- Estudar a aplicação do processo de redução de inconsistências em uma organização automotiva, através do estudo de caso, e avaliar os resultados obtidos por este processo, evidenciando-se as evoluções quantitativas e qualitativas atingidas.

1.3. MÉTODO DE PESQUISA

De acordo com Nakano (2012), existem sete categorias de métodos de pesquisa presentes nos trabalhos acadêmicos, dentre as quais encontra-se o estudo de caso. Yin (2001) define estudo de caso como uma investigação empírica sobre um fenômeno contemporâneo dentro de seu contexto real, especialmente quando os limites entre o fenômeno e o contexto não são claramente definidos.

Este trabalho tem características próprias de um estudo de caso. Mesmo tratando-se de um evento não contemporâneo, o estudo aqui realizado busca aumentar o entendimento sobre os eventos presentes neste caso apresentado, fazendo uma análise aprofundada da realidade para que seja obtido o seu amplo e detalhado conhecimento (MIGUEL, 2007). A preocupação deste estudo é de realizar uma abordagem qualitativa do caso apresentado, sem procurar estabelecer relações de causa-efeito ou testar hipóteses.

Quanto à seleção da organização para a condução do estudo de caso, definiu-se como critérios a escolha de uma empresa que pertença à indústria automotiva, e que utilize o PFMEA em sua rotina de trabalho. Um ponto fundamental para a realização do

trabalho é que a organização possua ao menos um FMEA com inconsistências presentes no formulário, para que o trabalho de redução de inconsistências possa ser realizado.

Sendo assim, a empresa selecionada trata-se de uma organização automotiva *Tier 1* na cadeia de fornecimento, com certificação ISO/TS 16949. Portanto, é uma organização que rotineiramente desenvolve FMEAs de Processo para seus clientes. Foi escolhido um FMEA de Processo desta organização com um nível de inconsistências elevado para a elaboração deste estudo de caso. Por razões de confidencialidade dos dados, o nome da empresa em questão não será evidenciado neste trabalho, bem como os dados apresentados podem apresentar-se modificados, com o único propósito de preservar qualquer informação específica da empresa, no entanto, sem prejudicar a validade do trabalho.

Quanto à fonte de coleta de dados, estes foram obtidos no formulário de PFMEA apresentado pela organização antes da condução dos trabalhos, e o formulário revisado após a aplicação do processo proposto. A preparação de formulários intermediários para a realização da análise de falhas, a ser utilizado durante as reuniões do time, também foram utilizados como fonte de dados.

É importante salientar que esta pesquisa está limitada à análise de FMEA de Processo. Dessa forma, não está contemplado neste estudo a análise de FMEA de Projeto (DFMEA), bem como de qualquer variação deste método. Apesar da limitação do ambiente em indústria automotiva, os métodos aqui descritos podem ser replicados para aplicações em outros setores industriais.

1.4. JUSTIFICATIVA E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

Existe uma evidente dificuldade das empresas em utilizarem o método FMEA. Aguiar, Salomon e Mello (2015) observam que, mesmo com os diversos manuais de referência disponíveis e treinamento constante, praticamente nenhuma organização é capaz de utilizar plenamente os benefícios que um FMEA pode oferecer.

Por tratar-se de um método complexo, é comum que um FMEA de Processo apresente inconsistências que acabem reduzindo a eficácia da análise. Muitas vezes, os resultados obtidos pela elaboração de um FMEA de Processo são insatisfatórios, devido às inconsistências nas descrições das funções e falhas do processo analisado (ESTORILIO; POSSO, 2010).

Desta forma, existe margem no âmbito acadêmico para pesquisas que busquem formas de aumentar a robustez da análise de falhas executada nas empresas, propondo processos que auxiliem a equipe na elaboração de um FMEA. A importância de se obter uma análise de falhas bem elaborada é justificada pelos ganhos obtidos em confiabilidade do processo e atitude preventiva em relação aos eventos inesperados, além de fornecer uma oportunidade aos envolvidos de ampliarem e disseminarem conhecimentos relativos ao processo à equipe.

A comunidade acadêmica tem apresentado sistematicamente, especialmente a partir da década de 90, pesquisas no âmbito de propor modificações na aplicação do FMEA, combinando sua utilização com outras ferramentas da qualidade e auxílio à tomada de decisão (como, por exemplo, o *FTA - Failure Tree Analysis*, ou o *QFD - Quality Function Deployment*) para aumentar a robustez da análise, ou ainda adaptar a ferramenta para uso em setores específicos, como por exemplo na medicina. Uma evidência deste interesse acadêmico pela ferramenta pode ser encontrada no trabalho de Liu *et al* (2013), no qual foram revisados 75 artigos acadêmicos, do período de 1992 a 2012, que tratam apenas de métodos para determinação do RPN (*Risk Priority Number*), comparando as principais abordagens desenvolvidas.

No entanto, mesmo existindo um grande esforço acadêmico para buscar alternativas que aumentem a robustez da análise de falhas, os métodos propostos, como regra geral, não encontram grande aceitação no ambiente corporativo. A principal barreira para a sua implementação no cotidiano das organizações é a grande complexidade de suas aplicações, exigindo um elevado conhecimento científico no método, ou o suporte de sistemas computadorizados. Dessa forma, o FMEA tradicional, que já possui certa complexidade intrínseca, acaba tornando-se uma ferramenta de difícil aplicação prática quando combinada com estes métodos científicos.

Chang, Chang e Lai (2014) afirmam que são diversos os estudos que combinam o FMEA com métodos de auxílio à decisão, como por exemplo, lógica *fuzzy*, *Grey Analysis*, DEA (*Data Envelopment Analysis)*, AHP *(Analytic Hierarchy Process*), entretanto, estes métodos apresentam-se muito mais complexos que o FMEA tradicional, desestimulando as equipes de FMEA a utilizarem estas abordagens na prática. Neste contexto, existe uma demanda por métodos que, ao mesmo tempo que impliquem uma maior consistência à análise de falhas, sejam de fácil aplicação e entendimento por parte das equipes de FMEA.

Trabalhos têm sido realizados neste aspecto, o que comprova a relevância desta questão. Estorilio e Posso (2010) propõem a utilização de um formulário de FMEA parametrizado, com campos de acesso restrito à equipe, que devem ser preenchidos pelo cliente, reduzindo o nível de informações inconsistentes, apresentando-se um método simples de ser aplicado no cotidiano das empresas.

O trabalho de Aguiar, Salomon e Mello (2015) propõe a utilização da abordagem por processos no desenvolvimento do FMEA. Através de um estudo de caso de aplicação de FMEA em atividade de recebimento de materiais, é possível verificar-se que a interpretação da relação entre causa e efeito pela equipe pode ser facilitada caso tais eventos sejam analisados como entradas e saídas do processo, aumentando a consistência das informações presentes no FMEA através da definição correta das causas, modos de falha e efeitos do processo.

Aguiar (2016) propõe um modelo conceitual para aplicação do FMEA nas organizações automotivas. A principal contribuição deste modelo para a pesquisa acadêmica sobre FMEA é o desenvolvimento de um modelo que demonstra de forma simples a inter-relação entre todos os elementos conceituais presentes na ferramenta, tornando clara a interpretação da relação entre causa, modo de falha e efeito, atuação dos controles sobre o processo, e etapas onde as pontuações de risco são observadas. O modelo desenvolvido auxilia a eliminar uma das principais causas pela qual as equipes elaboram FMEAs inconsistentes e pouco efetivos: a dificuldade técnica existente na interpretação dos conceitos do FMEA.

Esta monografia está organizada da seguinte forma: no Capítulo 2 são apresentados uma visão geral sobre o FMEA, os conceitos fundamentais para a aplicação da ferramenta, e um modelo básico de sua elaboração. Também é realizada uma discussão sobre as questões relacionadas à aplicação da ferramenta nas organizações automotivas, em especial sobre as dificuldades na utilização do FMEA dentro do contexto corporativo. O Capítulo 3 é dedicado à análise das inconsistências presentes no FMEA do estudo de caso, demonstrando como elas contribuem para que o método não atinja plenamente os benefícios descritos na literatura. Neste capítulo, o desenvolvimento de um processo para eliminar as inconsistências detectadas no FMEA do estudo de caso é proposto. O Capítulo 4 é destinado às considerações finais deste trabalho.

2. CONCEITOS FUNDAMENTAIS SOBRE FMEA

2.1. O QUE É FMEA?

De acordo com a definição de Carlson (2012):

> Análise de Modos de Falha e Efeitos (FMEA) é um método concebido para:
> a) Identificar e entender completamente os potenciais modos de falha e suas causas, e os efeitos da falha no sistema ou usuários finais, para um dado produto ou processo.
> b) Avalia o risco associado com a identificação dos modos de falha, efeitos, e causas, e dá prioridade às questões para ação corretiva.
> c) Identifica e inicia ações corretivas endereçadas às preocupações mais graves. (CARLSON, 2012, p. 21)

Ou seja, o FMEA é um método voltado para a análise das falhas que podem acometer um produto ou processo, ao longo de sua vida útil. Mais do que isso, este método possui um caráter preventivo, no sentido de avaliar possíveis riscos envolvidos na execução das funções para as quais um determinado produto/processo foi projetado, desenvolvendo formas para (1) evitar que um produto/processo deixe de executar a sua função projetada, mitigando as causas destas falhas, ou (2) impedir que uma falha provoque um efeito danoso aos usuários deste produto, detectando-a caso ela ocorra.

A análise pelo método FMEA consiste-se, basicamente, na identificação dos potenciais modos de falha[1] ao qual o produto/processo está sujeito ao longo do seu ciclo de vida, os efeitos potenciais[2] que estes modos de falha podem provocar, e a criticidade destas falhas na funcionalidade do produto (TENG;HO, 1996).

Mas a função principal do FMEA não é de apenas reproduzir como um sistema pode falhar, e quais são as consequências destas falhas. O FMEA consiste-se em uma análise de risco do processo. Através da análise de três fatores de risco, denominados *Severidade, Ocorrência,* e *Detecção*, é possível estabelecer-se um coeficiente denominado Número de Prioridade de Risco (do inglês *RPN - Risk Priority Number*), cuja proposta principal é priorizar os modos de falha mais críticos de um produto ou sistema, com o intuito de atribuir os recursos, quase sempre escassos, aos itens com maior grau de risco (LIU; LIU; LIU, 2013).

[1] Modo de Falha: Forma na qual o processo pode falhar em atingir os requisitos do produto/processo. (AIAG, 2008)
[2] Efeito Potencial da Falha: Efeitos do modo de falha percebidos pelos clientes. (AIAG, 2008)

Segundo Sant'Anna (2012), o RPN também fornece informações básicas relativas à confiabilidade do sistema. Caso algum valor de RPN esteja abaixo de um padrão aceitável, o sistema pode ser considerado não confiável, sendo necessário atribuir ações corretivas para melhorar o processo. Assegurar a confiabilidade dos produtos e processos é essencial na indústria automotiva. Wang e Arcidiacono (2004) concluem que, para que as companhias possam manter suas quotas de mercado, deve-se dar atenção especial à consistência da performance dos seus produtos, com uma operação livre de problemas, o que é garantido por meio da confiabilidade. Dessa forma, o FMEA apresenta-se como uma ferramenta importante para auxiliar as equipes a enfrentarem este desafio.

O FMEA também é uma ferramenta útil para definir e gerenciar ações de melhoria, objetivando minimizar os riscos avaliados pelo cálculo do RPN, aumentando a confiabilidade do sistema. Segundo Carlson (2012), um FMEA deve ser um guia para definir um conjunto de ações voltadas à reduzir os riscos dos sistemas e subsistemas a um nível aceitável. Conhecendo-se a causa-raiz de uma falha, o que é possível a partir de um FMEA consistente, é possível definir-se com precisão ações efetivas para melhorar o processo, tornando-o mais confiável.

Sumarizando, o FMEA de Processo consiste-se em uma ferramenta de análise de possíveis falhas, em que são estudados os modos como um processo não executa as funções especificadas em projeto, as causas destes desvios, e os seus efeitos consequentes. Seu objetivo é definir um valor que prioriza o risco das falhas, o RPN, permitindo assim alocar recursos e ações que proporcionem um aumento da confiabilidade do sistema, nos pontos mais críticos do processo.

2.2. HISTÓRICO DO FMEA

Segundo Carlson (2012), o procedimento para análise de falhas MIL-STD-1629 foi formalizado em 1949 pelas Forças Armadas dos EUA, com o nome de FMECA (*Failure Mode, Effects and Critically Analysis*). É o primeiro manual de referência para análise de falhas que se tem conhecimento na literatura.

Ao longo da década de 60, a aplicação deste método era restrita basicamente à industria aeroespacial, cujos requisitos de confiabilidade são muito elevados. Inicialmente, o foco principal da análise eram as questões de segurança. Assim, em

pouco tempo, o FMEA tornou-se uma ferramenta de auxílio de avaliação de riscos à segurança, sendo aplicada também nas indústrias de processo químico (CHANG; CHANG; LAI, 2014; MIKULAK, MCDERMOTT; BEAUREGARD, 2011). Ainda nesta década, o FMEA foi adotado no programa espacial Apollo para reduzir os riscos provenientes da baixa amostragem dos componentes. O sucesso do programa espacial impulsionou a utilização do FMEA (CARLSON, 2012), expandindo sua aplicação para outras indústrias.

Em 1977, a *Ford Motor Company* trouxe o FMEA para a indústria automotiva, com a publicação de seu manual de referência, fato que popularizou o método. Segundo Carlson (2012), a Ford introduziu o FMEA por razões regulatórias e de segurança, após o escândalo do *Ford Pinto*, um carro que apresentava sérios problemas no projeto do tanque de combustível, falha que foi ignorada pela equipe devido ao custo de implementação desta modificação (BAURA, 2006).

Em 1993, as principais montadoras americanas, a *Ford*, *Chrysler* e a *General Motors* desenvolveram um manual de referência para a aplicação do FMEA, combinando as práticas destas companhias, e sendo integrado aos requisitos da QS-9000[1], norma que regulamentava os sistemas de qualidade no setor automotivo, posteriormente substituída pela ISO/TS 16949. O manual, publicado pela AIAG (*Automotive Industry Action Group*) sofreu algumas revisões, e encontra-se atualmente na 4ª edição (CHANG; CHANG; LAI, 2014), constituindo-se na referência mais importante para desenvolvimento de FMEA na indústria automotiva.

Ainda segundo Chang, Chang e Lai (2014), o FMEA atualmente é aplicado para análise de risco em diversos segmentos industriais, como aeroespacial, nuclear, militar, medicina e de microeletrônica. A comunidade acadêmica tem desenvolvido métodos alternativos para a aplicação do FMEA que atendam às características e peculiaridades de cada uma destas indústrias. Exemplos de aplicações nestas indústrias podem ser encontrados respectivamente em Kumar, Sharma e Kumari (2011), Wu *et al.* (2014), US Department of Defense (1980), Liu *et al.* (2012) e Cassanelli, Fantini e Serra (2003). Um histórico da evolução do FMEA pode ser visto no Quadro 1.

[1] Norma criada pelas montadoras americanas Ford, Chrysler e GM para unificar os requisitos de qualidade na cadeia de fornecedores (AGUIAR; MELLO, 2008)

Quadro 1 - Histórico do FMEA

Ano	Descrição
1963	FMEA foi inicialmente proposto pela indústria aeroespacial
1965	O exército americano iniciou a aplicação da técnica do FMEA
1974	O exército americano publica o procedimento de FMEA MIL-STD-1629
1977	A Ford Motor Company começou a utilizar o FMEA
1980	Revisão do procedimento militar do FMEA: MIL-STD-1629A
1985	A IEC (*International Elecrotechnical Commission*) publica o procedimento de FMEA IEC 812
1993	A Ford, Chrysler e a General Motors estabelecem a 1ª edição do manual de referência do FMEA
1995	A 2ª edição do manual de referência do FMEA é revisado pela AIAG
2001	A 3ª edição do manual de referência do FMEA é revisado pela AIAG
2008	A 4ª edição do manual de referência do FMEA é revisado pela AIAG
2008 - atualmente	O FMEA é considerado um importante item de análise e método analítico pela ISO-9000, ISO/TS 16949, CE e QS-9000, e tem sido amplamente utilizado em avaliação de riscos e melhoria da qualidade em muitas indústrias.

Fonte: Adaptado de Chang, Chang e Lai (2014)

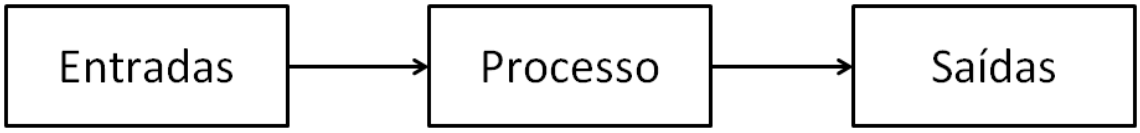
2.3. CONCEITOS BÁSICOS DA ANÁLISE DE FALHAS

Na análise de falhas pelo método FMEA, alguns conceitos básicos são necessários para entendê-lo completamente, e permitir sua correta aplicação. Os termos frequentemente utilizados durante a elaboração de um FMEA devem ser elucidados para uma melhor interpretação da ferramenta.

2.3.1. Função do Processo

Inicialmente, é necessário compreender-se a definição de *Função do Processo*. As empresas, como regra geral, adotam a *abordagem por processos* para administrarem seu processo produtivo, conforme definido pela ISO 9001. O método de fabricação de um produto é segmentado em diversas atividades interligadas entre si, na qual cada uma delas representa a transformação de algum tipo de entrada em uma saída, agregando valor ao produto, mediante o consumo de recursos que alimentam esta operação. Esta atividade (ou conjunto de atividades) pode ser definida como *processo* (ABNT, 2008). Um diagrama da abordagem por processos é apresentado na Figura 1. Normalmente, as saídas de um processo são as entradas do processo subsequente dentro da cadeia de produção.

Figura 1 - Abordagem por Processos



Fonte: Adaptado de Aguiar, Salomon e Mello (2015)

Visto que um processo é um conjunto de atividades de transformação de entradas em saídas, cada uma destas atividades de transformação realizadas dentro de um processo são definidas como *funções do processo*. Segundo AIAG (2008), "a Função do Processo descreve a proposta ou a intenção da operação". Como regra geral, a função sempre é descrita em termos verbais, para que expresse a ação executada dentro do processo (FORD DESIGN INSTITUTE, 2004)

2.3.2. Modo Potencial da Falha/Requisitos

Para fins de aplicação em FMEA, a definição da Ford Design Institute (2004) para *modo potencial de falha* é adequada para conceituar este termo:

> Modo de Falha Potencial é definido como a maneira na qual o processo pode potencialmente falhar em atingir seus requisitos de processo e/ou a intenção do projeto, conforme descrito na coluna de Funções do Processo/Requerimentos. É a descrição da não conformidade em uma operação específica (FORD DESIGN INSTITUTE, 2004, Seção 4, p. 16).

Um outro conceito é abordado na definição de Modo de Falha Potencial: são os *Requisitos*. Segundo AIAG (2008), "Requisitos são as entradas do processo especificadas para atender os requisitos projetados e outras exigências do cliente". Ou seja, para que seja possível definir-se quais são os modos de falha de uma operação, deve-se conhecer quais são os requisitos especificados para a função em questão.

Esta definição de falha é bastante abrangente, pois inclui tanto operações que envolvam modificação do produto como operações que não alteram suas características (como, por exemplo, movimentação de peças ou estoque). Aguiar, Salomon e Mello (2015) enfatizam a importância de diferenciar-se os conceitos de *falha* e *defeito*, afirmando que "defeito ocorre quando um componente ou sistema não atinge uma especificação técnica mensurável". Processos que não envolvem operações de fabricação não provocam defeitos no produto, entretanto, eles podem gerar falhas

devido à não execução da sua função, cujos impactos poderão ser percebidos pelo cliente. De acordo com Ford Design Institute (2004), uma função do processo pode falhar de quatro formas distintas:

- *Não-Execução da Função:* Modo de falha em que o processo não executa a função que foi projetada, ou processo inoperante. Palady (1997) recomenda que a função seja descrita dessa forma, como uma expressão negativa da função, para auxiliar a equipe a iniciar a identificação dos modos de falha, e evitar definições que não estejam relacionadas à função.
- *Função Realizada Parcialmente/Além do Especificado/Degradada ao longo do tempo:* A função executada atende algumas das especificações, ou uma combinação delas, porém não preenche totalmente os requisitos projetados. Em geral, caracteriza-se por função realizada *acima* ou *abaixo do especificado*.
- *Função Intermitente*: Atende os requisitos, porém perde alguma funcionalidade ou torna-se inoperante devido a fatores externos (como por exemplo temperatura ou umidade). É verificada quando o processo opera normalmente e, subitamente, apresenta perda da sua funcionalidade, recuperando-a posteriormente sem alteração aparente das condições de funcionamento.
- *Função involuntária*: Ocorre no caso de elementos que operam normalmente quando estão isolados, porém apresentam não conformidades quando operam em conjunto no produto ou processo, gerando uma função involuntária. Esta falha é mais comum na elaboração de um DFMEA.

2.3.3. Efeitos Potenciais da Falha

Quando uma falha ocorre em um sistema, consequências poderão ser observadas nos processos subsequentes, ou ainda, ser percebido somente no produto finalizado, quando este estiver sendo utilizado pelo cliente. Em ambos os casos, estas consequências devem ser avaliadas pelo FMEA, e são denominadas *Efeitos Potenciais da Falha*. É muito provável que existam sempre vários efeitos para um único modo de falha. No entanto, durante a análise, sempre o efeito mais grave deve ser considerado (CARLSON, 2012).

2.3.4. Causa Potencial do Modo de Falha

A cadeia de acontecimentos estabelecida em um FMEA somente pode ocorrer caso um evento em específico provoque a ocorrência do modo de falha. Neste contexto, é possível conceituar o que é uma *Causa Potencial do Modo de Falha*: é uma provável razão pela qual um modo de falha pode acontecer. A causa potencial pode ser encontrada perguntando-se *por quê* uma falha ocorre, até que encontre-se a causa-raiz[1] da falha. Assim como os efeitos, um mesmo modo de falha pode ter várias causas associadas a ele. Em FMEA, a causa sempre deve ser definida em termos que possam ser corrigidos ou controlados. (AIAG, 2008; CARLSON, 2012).

2.3.5. Risco, Severidade, Ocorrência e Detecção

O estudo destes três fatores em um processo tem um objetivo claro: avaliar e mensurar o *risco* presente na operação. Kmenta e Ishii (2000) afirmam que existem diversas definições para risco, no entanto, na grande maioria delas, dois elementos podem ser observados: (1) a probabilidade de um evento indesejado ocorrer, e (2) a gravidade das consequências, perdas e danos provocados pelo evento indesejado. Dessa forma, o risco é um fator que combina probabilidade com gravidade da ocorrência de um evento indesejado.

Estes dois elementos combinados são fundamentais para mensurar o risco do modo de falha potencial no processo, e no caso de FMEA, definir se ela requer alguma tratativa. Esta tarefa é relativamente simples quando se está lidando com uma falha que tem alta probabilidade de ocorrência, e cujos efeitos são graves, sendo facilmente percebido que ela demanda uma atenção maior no momento de definir-se recursos e ações corretivas. Da mesma forma, também é consenso que uma falha com pouca probabilidade de ocorrência, cujos efeitos não apresentam uma gravidade relevante, possui baixa prioridade na alocação de recursos.

Contudo, a tarefa ganha complexidade quando é necessário definir-se a prioridade para atuar em elementos que possuem um grau intermediário de gravidade e ocorrência, ou quando possuem alta gravidade e baixa ocorrência, e vice-versa. Dessa forma, é necessário estabelecer-se um padrão mensurável para se avaliar e comparar o risco entre dois modos de falha.

[1] Causa-Raiz: É a razão básica que provoca uma não conformidade. É o item que exige modificações para alcançar-se uma ação preventiva/corretiva efetiva (FORD DESIGN INSTITUTE, 2004).

Na análise de FMEA, dois fatores numéricos são empregados para representar estes elementos que compõem a definição de risco: a *Severidade* (S) e a *Ocorrência* (O). De acordo com o Manual de FMEA da AIAG, "Severidade é o valor associado ao efeito mais grave para um dado modo de falha" (AIAG, 2008, p. 87), e "Ocorrência é a probabilidade que uma causa específica da falha ocorra" (AIAG, 2008, p. 92).

Vale ressaltar que, de acordo com a definição do manual, a pontuação do fator de Severidade é sempre atribuída ao efeito mais grave. Como registrado anteriormente, um modo de falha pode ter diversos efeitos associados a ele, no entanto, o efeito que mais contribui para elevar o risco de um modo de falha sempre será o efeito mais severo. Quanto à pontuação de Ocorrência, Ford Design Institute (2004) recomenda que a mesma seja definida baseado em dados estatísticos e no histórico de produção, para torná-la o mais coerente possível com os dados estatísticos do processo.

Um terceiro fator é também utilizado na composição do risco no FMEA: a *detecção* (D). Entende-se que como existe uma possibilidade de detectar-se que o modo de falha ocorreu no processo através de controles (por exemplo, inspeção dimensional), e impedir que o produto siga o fluxo de produção, evitando que os efeitos da falha sejam percebidos pelos clientes, um fator atenuante do risco pode ser definido. Carlson (2012) afirma que o valor do fator de detecção está relacionado à probabilidade do controle de detecção apontar que houve uma falha no processo, e que este fator é independente dos valores de Ocorrência ou Severidade.

Uma observação importante sobre o valor de Detecção, que pode causar confusão, é que ele possui uma escala *inversa*. Ou seja, quanto menor o valor, mais eficaz é o controle. Essa peculiaridade pode ser facilmente entendida observando-se como este valor compõe o risco: um controle com alta probabilidade de detecção da falha irá contribuir para reduzir o risco, logo sua pontuação deverá ser menor. Já a falta de um controle, ou um controle pouco eficaz, contribui pouco para reduzir o risco de que o modo de falha deixe o processo. Logo, a sua pontuação deverá ser maior.

Estes três fatores, como mencionado anteriormente, recebem pontuações numéricas, definidas pela equipe de FMEA. Os critérios e escalas podem ter variações, de acordo com o escopo da aplicação, adaptando-se para o contexto analisado, embora a escala mais utilizada seja aquela que varia de 1 a 10 para os três fatores. Os critérios são estabelecidos em tabelas de referência. Diversos autores elaboraram tabelas para

determinação de Severidade, Ocorrência e Detecção, contudo, as mais comuns no setor automotivo são as fornecidas por AIAG (2008), e podem ser analisadas nos Anexos A, B e C, respectivamente. Exemplos de outras tabelas de referência podem ser encontradas no trabalho de Aguiar, Souza e Salomon (2010).

2.3.6. Número de Prioridade de Risco (RPN)

Uma vez quantificados estes fatores, o risco de um modo de falha pode ser calculado. Mandal e Maiti (2014) afirmam que o risco, em FMEA, é determinado pelo RPN, que é o valor obtido pelo produto dos três elementos que compõe o risco: Severidade, Ocorrência, e Detecção, sendo que quanto maior for o valor, maior o risco associado ao modo de falha. Liu *et al.* (2015) observam que os RPN's com valores mais altos são os mais importantes do processo, e necessitam de maior prioridade ao definir-se ações corretivas. Normalmente, o RPN possui uma pontuação que varia de 1 a 1000, caso a escala de 1 a 10 seja adotada para os três fatores de risco.

Entretanto, ao avaliar-se o risco, considerar apenas os maiores valores de RPN pode não ser suficiente. Palady (1997), Ford Design Institute (2004), AIAG (2008) e Carlson (2014) alertam que adotar-se unicamente o valor de RPN, bem como notas de corte, como único critério para se determinar a necessidade de ações pode desestimular a melhoria contínua, ou não priorizar os modos de falha que de fato representam um grau de risco sob a ótica do cliente ou do processo. Uma análise profunda das deficiências do uso do RPN para priorizar a tomada de ações é feita no Capítulo 2.3.

Algumas das propostas destes autores para que tal fato possa ser contornado é a avaliação combinada do RPN com os valores do produto de S x O (que está de acordo com a definição original de risco descrita anteriormente), ou a avaliação do RPN priorizando os valores que possuem alto grau de severidade, por estes serem mais críticos sob a ótica do cliente.

A partir desta análise de risco, a equipe pode definir as ações necessárias para eliminar as principais causas do modo de falha, dessa forma aumentando a confiabilidade do produto ou do processo (SANT'ANNA, 2012). Uma ação recomendada sempre tem o objetivo de reduzir a pontuação de ocorrência (eliminando ou mitigando a causa do modo de falha) ou a pontuação de detecção (desenvolvendo um controle mais eficaz para detectar a falha, prevenindo-a de chegar ao cliente).

A pontuação de severidade somente pode ser reduzida mediante revisão do projeto ou do processo (FORD DESIGN INSTITUTE, 2004). A redução da pontuação consequentemente reduz o valor do RPN, indicando que houve uma mitigação do risco associado ao modo de falha.

2.4. PROCESSO DE ELABORAÇÃO DE UM FMEA

A primeira questão que deve ser considerada ao iniciar-se a elaboração de um FMEA é a de que esta é uma atividade de equipe. O trabalho em equipe durante a análise de falhas é fundamental para o sucesso da elaboração de um FMEA. A equipe deve ser multidisciplinar, contendo representantes dos diversos setores envolvidos no processo, e com conhecimentos do produto e do know-how do processo. Além disso, é importante que a equipe de FMEA trabalhe em conjunto com os seus clientes, de forma a levantar as informações relevantes do seu processo e do produto, sob a ótica do cliente (TENG; HO, 1996; PACIAROTTI; MAZZUTO; D'ETTORRE, 2014).

A importância da equipe na elaboração do FMEA pode ser verificada na afirmação de Krasich (2007), observando que o nível de detalhe da análise e a precisão das informações depende do nível de *expertise* dos membros da equipe. Além de conhecimento acerca do processo e do produto, os membros de uma equipe de FMEA devem ter um conhecimento mínimo sobre a dinâmica da ferramenta, para que ela possa ser empregada corretamente. Aguiar, Salomon e Mello (2015) afirmam que "a aplicação do FMEA de processo é uma atividade muito complexa e, como a maioria das outras ferramentas de qualidade, antes de ser aplicado, o FMEA deve ser claramente entendido pelo time".

Ford Design Institute (2004) recomenda que um FMEA de processo sempre deve ser iniciado ou modificado para qualquer peça/processo novo na companhia, e peças/processos com modificações de engenharia ou que estejam sendo aplicados em um contexto diferente do seu projeto original. Sharin (2004) ainda recorda que o FMEA é uma ferramenta que necessita de atualização sempre que houver novas informações sobre o processo, ou quando modificações são realizadas, rendendo a alcunha de *documento vivo* ao FMEA.

A análise de falhas é registrada em um formulário de FMEA, que reúne o conjunto de modos de falha de um processo, associado com suas respectivas causas,

efeitos, pontuações de risco e ações recomendadas (AGUIAR; SALOMON; MELLO, 2015). Existem vários modelos de formulário desenvolvidos para a realização do FMEA, geralmente disponibilizados pelos manuais de referência. Como exemplo, o manual da AIAG (2008) disponibiliza oito tipos diferentes de formato de formulário. No entanto, independente do formulário selecionado, todos os elementos do FMEA devem estar contidos naquele escolhido pela equipe, sejam de forma individual ou combinados entre as colunas do modelo.

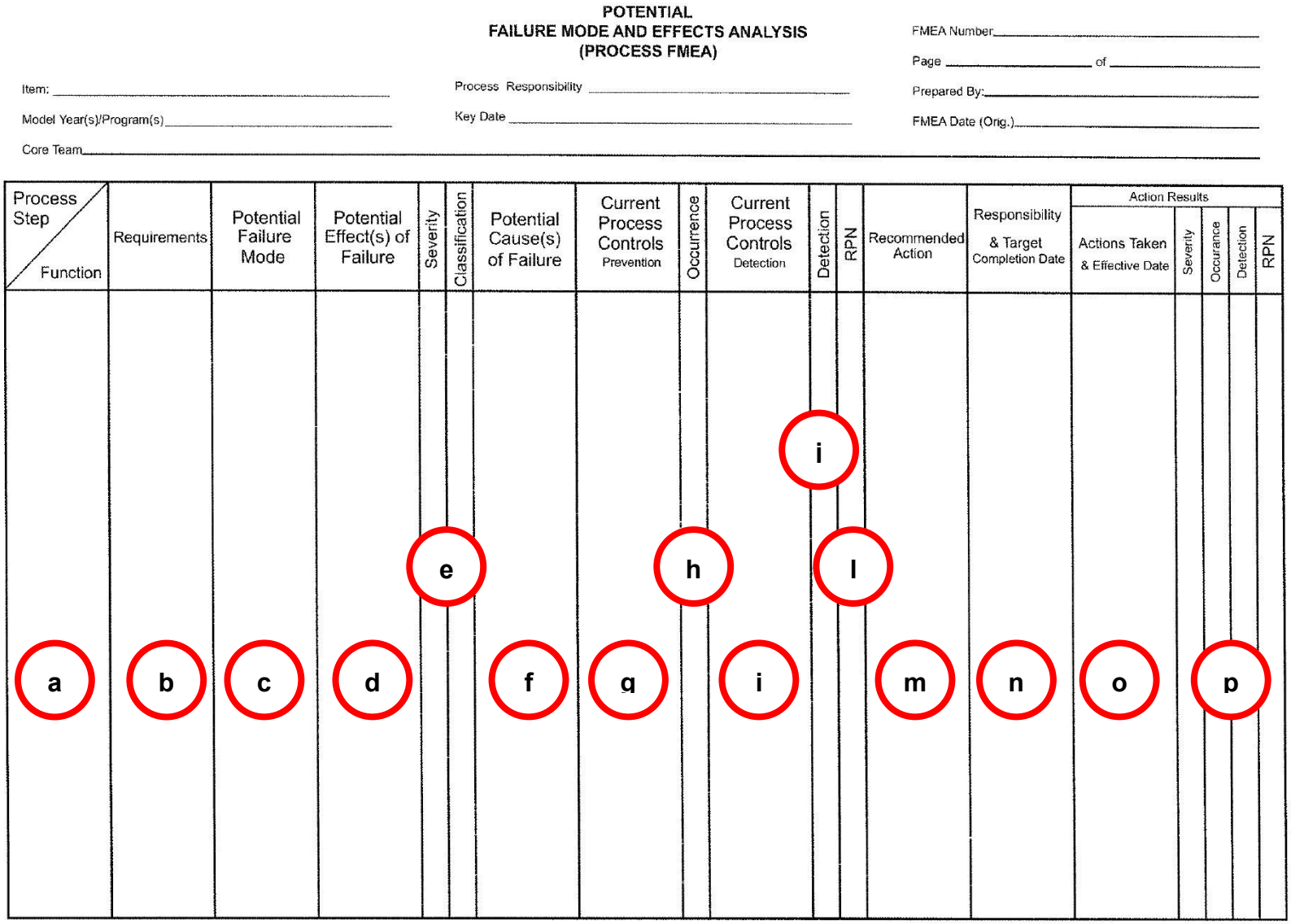
Na Figura 2 é apresentada a versão mais completa do formulário, em que cada elemento da análise de falhas está presente individualmente em cada coluna do modelo. As colunas são as seguintes:

a) Etapa do Processo/Função
b) Requisitos
c) Modo de Falha Potencial
d) Efeitos Potencial da Falha
e) Severidade/Classificação
f) Causas Potenciais da Falha
g) Controles de Processo Atuais (Prevenção)
h) Ocorrência
i) Controles de Processo Atuais (Detecção)
j) Detecção
l) RPN
m) Ações Recomendadas
n) Responsabilidade e Prazo das Ações
o) Ações Executadas e Data de Execução
p) Pontuações e RPN recalculados

Considerando a aplicação do FMEA de processo original, sem combiná-lo com outras ferramentas, será adotado neste estudo o modelo conceitual proposto por Teng e Ho (1996), que pode ser visualizado na Figura 3. Outros exemplos de modelos de implementação do FMEA também podem ser encontrados em Aguiar e Salomon (2007) e Carlson (2012). Estes modelos vão ao encontro da recomendação de Palady (1997), que sugere o desenvolvimento de cada coluna do formulário individualmente, para atribuir um dinamismo maior ao processo de preenchimento dos dados.

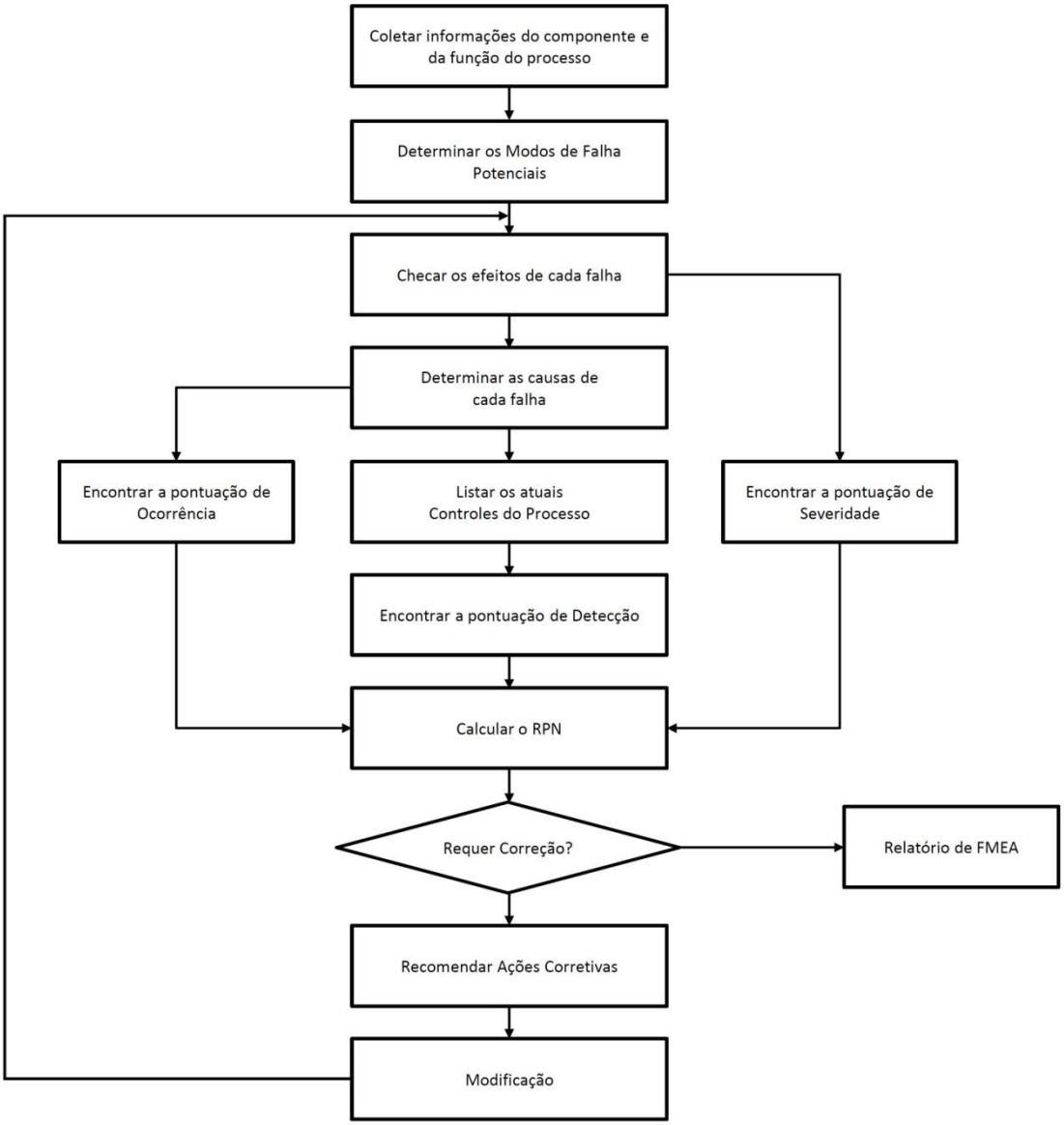
Para realizar o preenchimento do formulário, é importante que seja definido um método para a condução da análise de todos os elementos do FMEA. Não existe uma regra geral para definir as etapas de implementação de um FMEA. Devido ao amplo número de aplicações e combinações com outras ferramentas para aumentar a robustez da análise, as etapas de implementação podem apresentar variações na literatura.

Figura 2 - Formulário de FMEA



Fonte: AIAG (2008).

Figura 3 - Modelo de Implementação do FMEA



Fonte: Adaptado de Teng e Ho (1996)

2.5. A APLICAÇÃO DO FMEA NAS ORGANIZAÇÕES AUTOMOTIVAS

2.5.1. O papel do FMEA na Qualidade Automotiva

A elaboração de um FMEA proporciona uma série de benefícios para as companhias que conseguem aplicar de forma efetiva a ferramenta. No entanto, estes benefícios não são o único motivo pelo qual as companhias investem tempo elaborando uma análise de falhas. Desde a criação da QS-9000, as montadoras têm requisitado na cadeia de fornecedores a submissão de FMEAs como parte do processo de aprovação da

documentação de um produto (TENG *et al.*, 2006). Sendo um requisito normativo, sob o ponto de vista das normas que regulamentam o sistema de qualidade automotivo, as organizações são obrigadas a elaborarem FMEAs de seus produtos e processos, para que possam sustentar suas certificações, dessa forma permanecendo habilitadas a fornecerem seus produtos na cadeia de fornecimento automotivo.

Atualmente, a norma que regulamenta os sistemas de gestão da qualidade de empresas do setor automotivo é a ISO/TS 16949, que é equivalente a QS-9000, no entanto, conta com a incorporação de conceitos da ISO 9001, focado para empresas automotivas (ESTORILIO; POSSO, 2010; MIKULAK; MCDERMOTT; BEAUREGARD, 2011). O item 7.3.3. da ISO/TS 16949 regulamenta que os FMEAs, tanto de projeto quanto de processo, são saídas da etapa de desenvolvimento, e devem ser regulamentados. Ainda nesta mesma norma, o item 8.5.2., relacionado à ações preventivas para melhorias, estabelece que:

> A organização deve determinar ações para eliminar as causas de não-conformidades potenciais, de forma a prevenir sua ocorrência. Ações preventivas devem ser apropriadas aos efeitos dos problemas potenciais.
>
> Um procedimento documentado deve ser estabelecido para definir requisitos para:
>
> a) determinar não-conformidades potenciais e suas causas;
> b) avaliar a necessidade de ações para prevenir a ocorrência de não-conformidades;
> c) determinar e implementar as ações necessárias;
> d) registrar os resultados das ações tomadas (...) e;
> e) rever a efetividade das ações preventivas tomadas. (ISO, 2009, p. 34)

Sendo assim, é possível verificar-se a relação de vários elementos do FMEA com os requisitos do procedimento documentado requerido pela norma. Desta forma, as organizações elaboram FMEAs para que os requisitos normativos da ISO/TS 16949 possam ser plenamente atendidos.

Outro requisito normativo da ISO/TS 16949 é a elaboração de Planos de Controle[1] do produto. Teng e Ho (1996) avaliam a importância do plano de controle, afirmando

[1] Plano que especifica todas as características críticas do produto e do processo que requerem ações de controle durante a produção, além de fornecer informações de amostragem e medição. (TENG; HO, 1996)

que é um plano que assegura que uma peça satisfaça os requisitos do cliente, auxiliando a eliminar problemas no campo de uso, além de indicar como prevenir e controlar as falhas que podem ser críticas. A ISO/TS 16949 estabelece que as organizações devem desenvolver planos de controle que considerem tanto as informações do DFMEA quanto do PFMEA (ISO, 2009). Sempre que um destes dois documentos forem atualizados, o Plano de Controle também deve ser atualizado. Um exemplo de formulário de Plano de Controle pode ser visualizado na Figura 4.

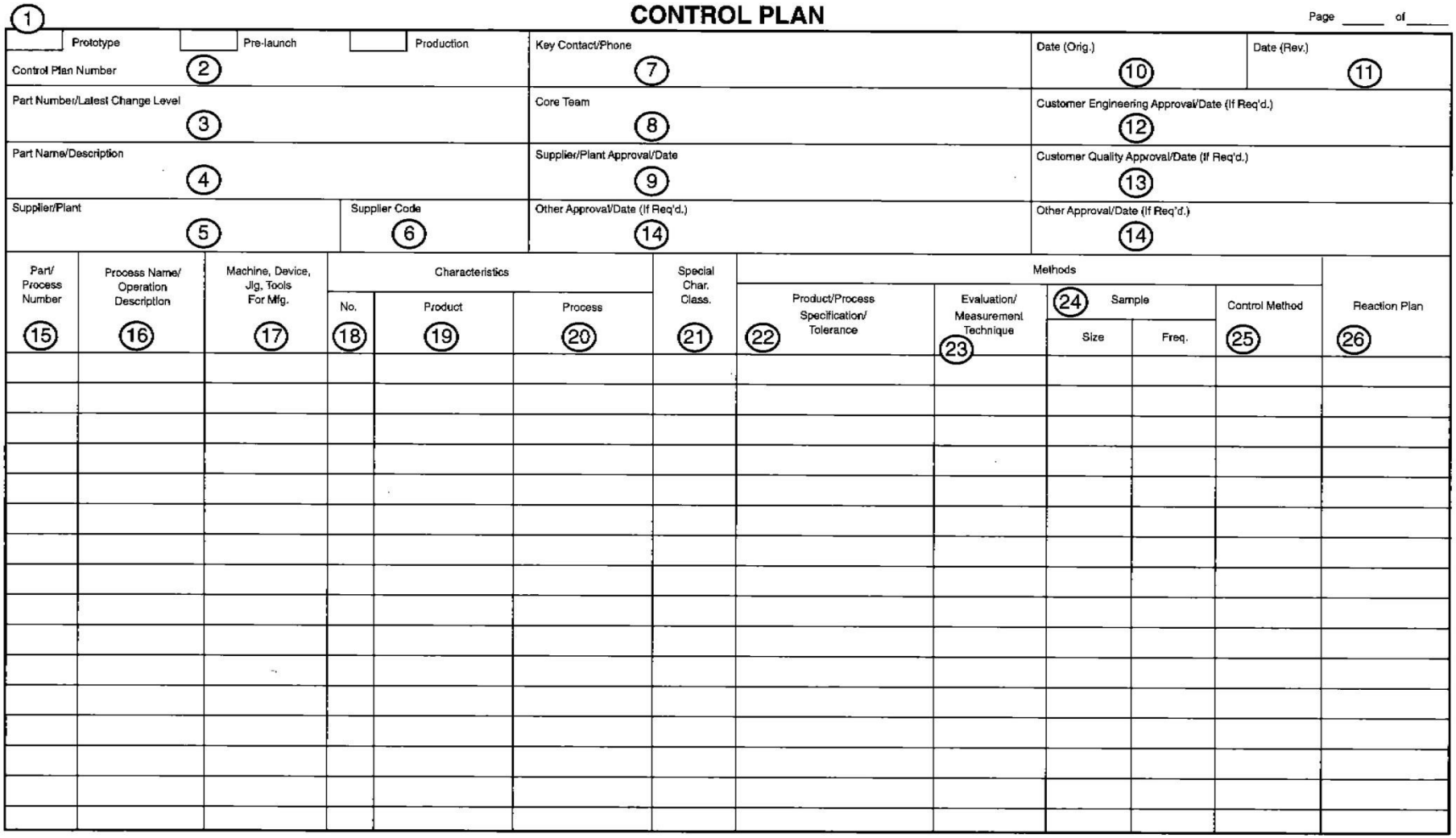
2.5.2. Dificuldades Enfrentadas pelas Organizações para a Implementação do FMEA

O FMEA é uma ferramenta amplamente difundida nas empresas do segmento automotivo. Entretanto, mesmo com a sua universalização, as organizações frequentemente enfrentam dificuldades ao lidarem com sua implementação. O FMEA muitas vezes é encarado pelas organizações como um método que exige grande esforço da equipe de trabalho, consumindo uma grande quantidade de tempo e dinheiro (ESTORILIO; POSSO, 2010).

Aguiar, Salomon e Mello (2015) concluem que as pessoas envolvidas com FMEA nas organizações não a consideram uma ferramenta poderosa, capaz de promover a melhoria contínua em um processo, mas sim um processo burocrático feito somente para atender aos requisitos de qualidade normativos. A razão para que as pessoas tenham esta imagem do FMEA seria o fato de que a maioria dos FMEAs são elaborados e utilizados de forma incorreta. Estorilio e Posso (2010) verificam que as inconsistências na elaboração do FMEA tornam insatisfatórios os resultados da aplicação da ferramenta.

Dale e Shaw (1990) realizaram uma pesquisa em 78 organizações da cadeia de fornecedores automotivos do Reino Unido, com vários questionamentos a respeito da aplicação do FMEA nestas empresas. Johnson e Khan (2003) fizeram um trabalho semelhante neste mesmo país, com dados de 150 empresas. Nestas duas pesquisas, ambas as conclusões foram as mesmas: a principal razão pela qual as organizações elaboram um FMEA é o fato de que este é um requisito exigido pelo cliente, seguidos de outras razões que trazem algum tipo de benefício para a companhia. Isso pode ser comprovado quando Johnson e Khan (2003) verificam que as equipes consideram pouco relevante a importância de mensurar a redução de custos provocada pela

Figura 4 - Formulário de Plano de Controle



CONTROL PLAN

(1) Page _____ of _____

☐ Prototype ☐ Pre-launch ☐ Production Control Plan Number (2)					Key Contact/Phone (7)				Date (Orig.) (10)		Date (Rev.) (11)						
Part Number/Latest Change Level (3)					Core Team (8)				Customer Engineering Approval/Date (If Req'd.) (12)								
Part Name/Description (4)					Supplier/Plant Approval/Date (9)				Customer Quality Approval/Date (If Req'd.) (13)								
Supplier/Plant (5)			Supplier Code (6)		Other Approval/Date (If Req'd.) (14)				Other Approval/Date (If Req'd.) (14)								
Part/ Process Number (15)	Process Name/ Operation Description (16)	Machine, Device, Jig, Tools For Mfg. (17)	Characteristics			Special Char. Class. (21)	Methods						Control Method (25)	Reaction Plan (26)			
			No. (18)	Product (19)	Process (20)		Product/Process Specification/ Tolerance (22)	Evaluation/ Measurement Technique (23)	(24) Sample								
									Size	Freq.							

Fonte: Advanced Product Quality Planning (APQP) and Control Plan Reference Manual, 1995.

elaboração de um FMEA, em detrimento da importância do desenvolvimento do formulário para atender aos requisitos do cliente.

Dessa forma, é possível concluir-se que as empresas muitas vezes não consideram o FMEA como uma ferramenta capaz de aumentar a confiabilidade do processo e auxiliar na tomada de decisões. Segundo Johnson e Khan (2003), este pensamento é mais comum dentro da cadeia de fornecedores automotivos do que nas montadoras. Do lado das montadoras, elas esperam que o FMEA seja aplicado como técnica de prevenção de falhas nos seus fornecedores. Já os fornecedores dificilmente conseguem entender corretamente os conceitos do FMEA, resultando em um documento muitas vezes inconsistente, sendo elaborado apenas com a intenção de obter as certificações necessárias para habilitar o fornecimento de seus produtos às montadoras.

Esta dificuldade em interpretar os conceitos de FMEA pode ser justificada pela falta de treinamento no método. Estorilio e Posso (2010) consideram o treinamento sobre o método para os membros da equipe um item fundamental no desenvolvimento do FMEA, afirmando que há membros convidados a participarem da reunião que muitas vezes não possuem nenhum conhecimento sobre o método. Silverman e Johnson (2013) avaliam que um treinamento básico sobre os conceitos de FMEA antes do início da análise é essencial para evitar desperdícios de tempo com discussões conceituais que atrapalham a dinâmica da reunião. Um treinamento para toda a equipe, mesmo para aqueles já experientes na ferramenta, pode auxiliar a uniformizar os conceitos entre os membros, tornando mais possível o consenso durante a análise de falhas.

A importância do treinamento pode ser justificada analisando-se os resultados da pesquisa de Johnson e Khan (2003). As equipes de FMEA apontam várias dificuldades técnicas como empecilhos para a elaboração do formulário, como por exemplo, o entendimento do PFMEA, da causa-raiz da falha, e a relação entre o FMEA e o Plano de Controle. O FMEA, como afirmado por Aguiar, Salomon e Mello (2015), é uma ferramenta que incorpora uma grande complexidade, dificultando o trabalho das equipes, cujo esforço estará condenado ao fracasso caso os conceitos básicos da ferramenta não sejam plenamente entendidos e corretamente aplicados.

Um outro elemento que pode auxiliar a equipe na elaboração do FMEA é a presença de um facilitador na condução da reunião. Silverman e Johnson (2013) afirmam que a falta de um mediador, ou um que seja pouco habilidoso, abre margem para que a equipe perca tempo em discussões sobre temas irrelevantes, impedindo a

avaliação de novas informações. A atividade torna-se mais estressante e tediosa, consequentemente provocando uma queda do interesse dos membros, ou até mesmo a desistência da participação das reuniões. Carlson (2014) sugere que um facilitador, com bons conhecimentos no método, e treinado em técnicas de mediação (como *brainstorming* e gestão de conflitos, por exemplo) seja nomeado para liderar a equipe. Dessa forma, estas discussões que desperdiçam o tempo da equipe e tornam a atividade estressante podem ser contornadas mais facilmente.

Na pesquisa de Johnson e Khan (2003), as organizações consideram o trabalho em equipe como a questão mais importante para a implementação efetiva do FMEA. Dessa forma, fica evidente que, para as organizações, o FMEA é uma atividade de grupo, e que este é um fator fundamental para o sucesso da sua implementação. Porém, mesmo com as organizações sabendo da importância do trabalho em equipe na execução do método, Palady (1997) e Silverman e Johnson (2013) apontam como um erro comum cometido pelas empresas a definição de um único responsável para elaborar o FMEA. Esta prática prejudica a robustez da análise, tornando-a menos completa, visto que a capacidade de análise de um único indivíduo é limitada, independente do seu nível de conhecimento sobre o processo.

A quantidade ideal de membros para participar de uma equipe de FMEA depende do número de setores envolvidos com o estudo. Silverman e Johnson (2013), por exemplo, consideram uma equipe de 5 a 10 membros ideal, enquanto Mikulak, McDermott e Beauregard (2011) consideram 6 pessoas o número ótimo, sendo que cada área deve estar representada, com membros que estejam familiarizados com os processos estudados. É importante que a equipe de FMEA seja enxuta. Convidar membros não tão familiarizados com o processo, ou equipes grandes tendem a ser um obstáculo para o envolvimento de todos os membros, ou que a reunião seja prejudicada por participações inconvenientes.

Além dos membros da organização, Palady (1997) considera fundamental o envolvimento de representantes do cliente e dos fornecedores, trazendo dados de entrada importantes ao FMEA que não estão disponíveis aos membros da organização. Normalmente, uma equipe de PFMEA é composta por membros da equipe de Processos, Manufatura e Qualidade, sendo que outros setores também podem acabar sendo envolvidos.

A duração da reunião de FMEA é uma questão que afeta diretamente a motivação dos membros da equipe. Dale e Shaw (1990) verificam em seu levantamento que o FMEA é visto como uma atividade pouco motivadora, demasiadamente trabalhosa, e que pode aumentar em até 20% a carga de trabalho (aumento que ocorre especialmente quando o FMEA está sendo elaborado pela primeira vez). Longas reuniões podem acabar desmotivando a equipe, no entanto a situação oposta também pode acabar prejudicando o resultado da análise. FMEAs elaborados de maneira emergencial tendem a ser extremamente superficiais, desconsiderando ou omitindo modos de falha, ou não sendo capazes de definir a causa-raiz de uma falha (SILVERMAN; JOHNSON, 2013). Estorilio e Posso (2010) afirmam que, embora não exista um tempo ideal para a elaboração de um FMEA, uma recomendação é a de que cada reunião dure no máximo 90 minutos, tempo médio em que os membros conseguem permanecer focados na atividade.

Outra razão pela qual o FMEA é considerado uma atividade desmotivadora e de pouco retorno nas organizações é apresentada por Johnson e Khan (2003), verificando que o progresso das equipes de FMEA dificilmente é mensurado pela organização, não existindo indicadores para avaliar o trabalho da equipe. Além dessa questão, as organizações também não são capazes de mensurar a efetividade do FMEA e os ganhos proporcionados por ele, como em custos e confiabilidade, por exemplo. Caso não haja um reconhecimento da gestão para o trabalho de desenvolvimento do FMEA, os membros da equipe não irão considerar a atividade como importante, consequentemente provocando uma perda do comprometimento da equipe e prejudicando a continuidade do processo (SILVERMAN; JOHNSON, 2013).

Existe uma lacuna nas pesquisas sobre FMEA para investigar esta questão do *feedback* do trabalho realizado pela equipe. Pollock (2005) apresenta uma proposta de método para que a organização possa validar a performance de um FMEA. "As organizações alavancam o valor da efetividade da aplicação do FMEA através da criação de uma simples estrutura para dar *feedback* sobre a performance do FMEA" (POLLOCK, 2005). Além de ser uma ferramenta útil para evidenciar os resultados da implementação do FMEA, o método para validação da sua performance permite com que a equipe avalie quais foram os erros cometidos durante o desenvolvimento do formulário, possibilitando sua correção em atividades futuras.

Métodos como este proposto por Pollock (2005) podem ajudar a solucionar uma das grandes fraquezas que o FMEA apresenta: a desconfiança existente pelas equipes quanto à eficácia da aplicação do método. As equipes frequentemente apresentam dificuldades em quantificar os resultados positivos que o FMEA apresenta em termos de custos, confiabilidade e prevenção de falhas (JOHNSON; KHAN, 2003). Tal dificuldade em evidenciar os benefícios trazidos pela aplicação da ferramenta consequentemente faz com que a própria equipe de FMEA não acredite que o trabalho realizado por ela contribua ativamente para melhorar os indicadores da organização, transformando-se em uma mera formalidade para atender aos requisitos do cliente.

2.5.3. Dificuldades Técnicas na Aplicação do Método FMEA

Além das dificuldades organizacionais existentes para a implementação do FMEA em uma indústria do ramo automotivo, as equipes são obrigadas a lidar com uma série de limitações que a própria ferramenta em si apresenta. Estas dificuldades técnicas acabam aumentando a possibilidade de que o formulário de FMEA seja preenchido com informações inconsistentes, especialmente nos casos em que a equipe não possui uma boa familiarização com a ferramenta, ou desconhece tais deficiências.

Khorshidi, Gunawan e Ibrahim (2016) afirmam que o pensamento subjetivo é utilizado no FMEA para realizar a priorização dos modos de falha. A ferramenta incorpora um alto grau de subjetividade nas análises, por depender da opinião e grau de conhecimento dos indivíduos que elaboram o FMEA. Dois efeitos negativos são consequentes desta subjetividade da análise: as informações presentes podem tornar-se demasiadamente genéricas ou ambíguas, e as pontuações atribuídas podem apresentar-se inconsistentes.

Teng *et al.* (2006) afirmam que essa superficialidade nas informações presentes no FMEA é frequente nas organizações, e que essa falta de detalhamento atrapalha as equipes a entenderem completamente o processo, tornando-se um grande obstáculo para propor-se ações recomendadas relevantes que promovam a melhoria do processo. Estas informações vagas que frequentemente são colocadas no FMEA acabam prejudicando, por exemplo, a definir com precisão a causa-raiz da falha. Aguiar, Salomon e Mello (2015), através de seu estudo de caso, apresenta um FMEA cujas informações estão preenchidas de forma genérica, concluindo que tais irregularidades fazem com que o

documento tenha pouco valor agregado quando se considera seu papel dentro da gestão da qualidade da organização.

Quanto às pontuações, Khorshidi, Gunawan e Ibrahim (2016) verificam que as pontuações de Severidade e Detecção são subjetivas, sendo definidas através de critérios qualitativos definidos pela tabela de pontuação adotada. Liu, Liu e Liu (2013) afirmam que os três fatores de pontuação são difíceis de serem mensurados, e que os termos frequentemente utilizados para quantificar as informações presentes em um FMEA (como, por exemplo, *provavelmente*, *importante* e *muito alto)* adicionam um certo grau de incerteza na conversão das pontuações, tornando-as inconsistentes e não condizentes com a realidade do processo.

Mesmo a pontuação de ocorrência, que teoricamente não possui subjetividade, por depender de dados estatísticos, é frequentemente imprecisa. A dificuldade neste caso está na própria definição da ocorrência, e em como calculá-la. Palady (1997) propõe duas abordagens para analisar a pontuação de Ocorrência: a primeira é realizar o cálculo da *ocorrência do modo de falha*, que é mais simples de ser definida, porém, resulta em uma pontuação genérica e que acaba agregando a probabilidade de várias causas em um único valor, prejudicando a priorização das causas mais relevantes que provocam a falha. A outra abordagem, que é defendida pela grande maioria dos autores na literatura (AGUIAR; SALOMON; MELLO, 2015; AIAG, 2008; CARLSON, 2012; FORD DESIGN INSTITUTE, 2004; KMENTA; ISHII, 2000) é a de calcular-se os valores da *ocorrência de cada causa específica do modo de falha.* É a abordagem mais completa, pois dessa forma é possível priorizar as causas que contribuem de forma mais efetiva para que a falha aconteça.

No entanto, Liu, Liu e Liu (2013) enfatizam que é muito difícil definir com precisão o valor da ocorrência da causa do modo de falha. As organizações são capazes de definir a taxa de ocorrência de um modo de falha específico, algo que pode ser obtido inclusive através de indicadores comuns elaborados pelos setores de manufatura. No entanto, dificilmente esta ocorrência registrada é subdividida nas diversas causas levantadas dentro de um FMEA, fazendo com que a equipe necessite lançar mão da primeira abordagem mencionada, ou atribua a pontuação utilizando um grau elevado de subjetividade, caso não esteja previsto um levantamento da ocorrência baseada na causa do modo de falha.

Esta subjetividade que as pontuações incorporam consequentemente acabam influenciando negativamente o cálculo do RPN. Especialmente nos casos em que existe nota de corte para tomada de ações, a equipe pode sentir-se estimulada a modificar as pontuações dos três fatores para obter uma combinação de RPN em que não seja necessário definir ações recomendadas.

A aplicação do RPN como método de priorização dos riscos de um processo possui diversas limitações, e apresenta diversas críticas na literatura sobre FMEA. Liu, Liu e Liu (2013) realizaram uma revisão bibliográfica, registrando as publicações em que são analisadas as limitações que a abordagem de análise de risco através do RPN apresenta. As principais deficiências do uso do RPN no FMEA são apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2 - Principais Limitações do uso do RPN no FMEA

Deficiências do RPN	Citações na Literatura
A importância relativa entre S, O e D não é levada em consideração	45
Diferentes combinações de S, O e D podem produzir exatamente o mesmo valor de RPN, porém as implicações de seus riscos ocultados podem ser completamente diferentes	33
Os três fatores de risco são difíceis de serem precisamente avaliados	21
A fórmula matemática para cálculo do RPN é questionável e contestável	14
A conversão das pontuações é diferente para os três fatores de risco	13
O RPN não pode ser utilizado para mensurar a efetividade das ações corretivas	12
RPN's não são contínuos, com vários valores não utilizados em sua escala	10
Interdependências entre vários modos de falha e efeitos não são levados em consideração	10
A forma matemática adotada para calcular o RPN é fortemente sensível à variações nas avaliações dos fatores de risco	9
Os elementos do RPN possuem muitos números duplicados	9
O RPN considera somente três fatores de risco, priorizando os termos de segurança.	9

Fonte: Adaptado de Liu, Liu e Liu (2013)

As maiores críticas residem no fato de que os três fatores de risco no RPN possuem a mesma importância, quando, na prática, a importância de cada um dos fatores é distinta. Sharma, Kumar e Kumar (2007) exemplificam esta questão: considerando um FMEA com os modos de falha apresentados na Tabela 1, é possível verificar-se que o MF2 possui um RPN mais elevado que o MF1, mesmo sabendo-se

que o MF1 é prioritário para a tomada de ações, por possuir uma severidade mais elevada, e que as pontuações do MF2 são todas moderadas.

Outra inconsistência que pode ser observada é que diversas combinações de S, O e D podem produzir um mesmo valor de RPN, o que teoricamente indicaria um mesmo grau de risco. Na Tabela 1, combinações diferentes de S, O e D para MF3 e MF4 acabaram produzindo o mesmo valor de RPN de 252, porém, na prática, é possível verificar-se que o risco não pode ser considerado o mesmo para os dois modos de falha (com uma análise de SxO é possível definir-se que MF3 é prioritário neste caso).

Tabela 1 - Exemplo de Inconsistência da Pontuação do RPN

	S	O	D	RPN
Modo de Falha 1 (MF1)	7	3	4	84
Modo de Falha 2 (MF2)	4	5	5	100
Modo de Falha 3 (MF3)	6	7	6	252
Modo de Falha 4 (MF4)	6	6	7	252

Fonte: Adaptado do exemplo de Sharma, Kumar e Kumar (2007)

Outra crítica feita ao uso do RPN no FMEA está relacionada aos elementos considerados para compor o risco, que são a severidade do efeito, probabilidade de ocorrência da falha e sua detectibilidade, desprezando outros elementos, como qualidade do produto e, especialmente, custo de produção e questões econômicas (LIU; LIU; LIU, 2013). Ahsen (2008) enfatiza que, com a abordagem tradicional do cálculo do RPN no FMEA, o método raramente considera as questões econômicas relacionadas à ocorrência de uma falha no processo. As ações recomendadas são priorizadas principalmente sob o aspecto da segurança, deixando em segundo plano os fatores econômicos.

Além disso, Ahsen (2008) ainda destaca que controles com alta taxa de detecção da falha são responsáveis por reduzir o RPN e o risco do processo, porém possuem um custo significativo e desestimulam a necessidade de implementação de ações de melhoria no processo. Dessa forma, a abordagem tradicional do FMEA acaba estimulando as equipes a investirem em controles de detecção (geralmente representados por inspeção de produção com alta frequência ou de 100% do lote), pela facilidade de serem implementados, porém agregando um custo elevado ao processo sem provocar nenhuma melhoria na confiabilidade, em detrimento da implementação de ações preventivas, que são economicamente mais viáveis a longo prazo.

Existem também dificuldades relacionadas à definição das causas, modos de falhas e efeitos. Teng *et al.* (2006) afirmam que as equipes frequentemente confundem o modo de falha com o efeito. Isto ocorre pelo fato de que o modo de falha de um processo pode, simultaneamente, ser o efeito de algum dos modos de falha do processo anterior, provocando confusão na equipe, caso não esteja bem claro qual processo está sendo avaliado. Aguiar, Salomon e Mello (2015) também verificam a existência de outra inconsistência: falhas do processo anterior que são classificadas como causas. Exemplos destas inconsistências podem ser verificadas no Capítulo 3.2. Estas inconsistências fazem com que as equipes definam ações recomendadas e controles que não são efetivos para combater a falha, ou faz com que as pontuações de S, O e D sejam definidas incorretamente.

Todas estas questões técnicas que envolvem o FMEA resultam em inconsistências que podem ser frequentemente encontradas nos formulários elaborados pelas organizações automotivas. Aguiar e Salomon (2006) propõem a categorização destas inconsistências mais comuns encontradas nos formulários de FMEA de organizações automotivas, apresentada no Quadro 3.

Quadro 3 - Inconsistências mais Comuns na Elaboração do FMEA

Modo de Falha	Descrição genérica (e não técnica) do Modo de Falha Modo de Falha não relacionado com a Função do Processo
Efeito da Falha	Efeito não relacionado ao Modo de Falha Efeito não considera a percepção do cliente Descrição genérica (e não técnica) do Efeito
Pontuação de Severidade	Inconsistência nos valores de pontuação de Severidade / Identificação da Classificação Valores distintos de Severidade no FMEA para um mesmo Efeito
Causa Potencial	Definição genérica da Causa, distante da Causa Raiz Causa não ligada ao Modo de Falha
Pontuação de Ocorrência	Pontuação de Ocorrência não relacionada com a Causa Variação da pontuação de Ocorrência para uma mesma Causa no FMEA
Controles do Processo	Controle Preventivo não atua na Causa Falta de Controle Preventivo, FMEA privilegia apenas Controles Detectivos Controle com descrição genérica, ou referenciando Documento Interno Controle de Detecção não relacionado com o Modo de Falha
Pontuação de Detecção	Variação da Pontuação de Detecção para um mesmo controle no FMEA
Definição do NPR	Busca do NPR inferior à Nota de Corte / Erros de multiplicação
Ações Recomendadas	Falta de Ações Recomendadas Indefinição de Responsável e Prazo para as Ações Ações sem foco preventivo (privilegiam a Detecção da Falha) / sem valor agregado Ações Atrasadas

Fonte: Adaptado de Aguiar (2007)

3. ESTUDO DE CASO: REDUÇÃO DE INCONSISTÊNCIAS EM FMEA DA INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

Todas as dificuldades relatadas no Capítulo 2.5 contribuem para que a análise de falhas pelo método do FMEA resulte em um documento repleto de inconsistências, caso não sejam devidamente tratadas. Questões organizacionais, aliadas ao fato do FMEA ser uma ferramenta com peculiaridades que dificultam sua interpretação, fazem com que a análise de falhas frequentemente não atinja os benefícios descritos pela literatura.

Para exemplificar como as inconsistências presentes nas informações do FMEA prejudicam sua plena utilização no contexto da gestão da qualidade de uma organização, fazendo a ferramenta perder seu valor preventivo, será adotado um estudo de caso de utilização do FMEA em uma organização da indústria automotiva. Dessa forma, baseando-se na classificação de inconsistências de Aguiar (2007), serão apresentadas as inconsistências mais comuns presentes nos formulários de FMEA, e como tais desvios inviabilizam a gestão dos riscos do processo através do método.

3.1. CONTEXTUALIZAÇÃO DO ESTUDO DE CASO

O estudo de caso selecionado refere-se à aplicação de FMEA de Processo em uma organização da indústria automotiva. Esta organização, cujo nome será preservado, por questões de confidencialidade, pode ser definida como uma fabricante de componentes estruturais automotivos para veículos de grande porte, *Tier 1* na cadeia de fornecimento automotiva, sendo assim, fornecedor de componentes para as montadoras desses veículos.

Esta organização está presente há décadas no segmento automotivo, possuindo a certificação ISO/TS 16949:2009, além de outras certificações fornecidas por montadoras automotivas. Dessa forma, esta é uma empresa habituada à utilização do FMEA. Entretanto, existe uma grande dificuldade nesta organização no que se refere à elaboração consistente de um FMEA, com formulários que apresentam informações deficientes, que não contribuem de forma efetiva para a tomada de decisão da equipe.

A oportunidade para a realização deste estudo de caso emerge justamente através de uma não conformidade detectada em uma auditoria realizada por um cliente no sistema de gestão da qualidade desta organização. Foi detectado que as inconsistências

presentes nas informações do formulário de FMEA de Processo eram tão numerosas que o documento não era válido sequer para atingir sua função primária: atender aos requisitos do cliente. Assim, verifica-se a necessidade de estruturar-se um processo para revisão das informações do formulário, não só para atender à requisição do cliente, mas sobretudo, para transformar este FMEA em uma ferramenta útil para mapear os riscos do processo, e ser utilizado para auxiliar na definição de ações de melhoria.

O FMEA analisado neste estudo de caso refere-se ao processo de fabricação de longarinas da organização, utilizadas pelo cliente como componente estrutural na fabricação de chassis de veículos coletivos. O formulário analisado continha dados sobre a análise de falhas de 13 operações executadas na fabricação do produto, com exceção das operações de revestimento superficial, que são tratadas pela organização em um FMEA separado.

3.2. LEVANTAMENTO DAS INCONSISTÊNCIAS PRESENTES NO FMEA DO ESTUDO DE CASO

Como forma de exemplificar as inconsistências de FMEA mencionadas na classificação de Aguiar (2007), um extrato do FMEA deste estudo de caso é apresentado na Figura 5. Nele, são apresentados alguns modos de falha levantados no FMEA de Processo da organização em questão, todos eles reproduzindo inconsistências que foram observadas no formulário completo. A intenção é detalhar as razões pelas quais tais informações neste FMEA estão incorretas, e como elas são responsáveis por fazer com que este documento perca sua eficiência, falhando no objetivo de atingir os benefícios descritos na literatura.

1) *Requisitos do Processo não estão Definidos:* Analisando o formulário da Figura 5, percebe-se que o mesmo não contém a coluna de Requisitos. O fato de utilizar-se um formulário cuja coluna de Requisitos esteja oculta não é uma inconsistência em si, embora seja altamente recomendável que ela esteja presente no formulário. Entretanto, caso um modelo de formulário como este seja utilizado, o correto é que os requisitos do processo em questão sejam descritos na coluna de Função do Processo.

As equipes frequentemente não definem os requisitos do processo de forma clara e em termos mensuráveis. A ausência da descrição dos requisitos no formulário de FMEA é uma das principais razões pela qual as equipes não são capazes de realizar uma

Figura 5 - Extrato de FMEA de Processo do Estudo de Caso

Item / Função	Modo de Falha Potencial	Efeitos Potenciais da Falha	Sever	Class	Causas Potenciais da Falha	Controle Preventivo Atual	Occor	Controle Detectivo Atual	Detec	NPR	Ações Recomendadas	Responsáveis pela ação/Prazo definido	Ações Resultantes				
													Ação Tomada	Sev	Occ	Det	NPR
01 - Recebimento de Matéria-Prima	Dimensões fora do especificado (Espessura)	Trincas	8	△	Falha da Usina	Controle da Usina	2	Medidor de Espessura (Na próxima operação)	4	64							
		Produto fora do Especificado	8						4	64							
		Desgaste do Ferramental	6						4	48							
02 - Decapagem Mecânica + Oleamento	Qualidade Superficial não atende ao especificado	Desgaste / Danos nos ferramentais	6		Parâmetros de processo fora do especificado		2	Visual + IGQ 3102.014	5	60							
					Problemas no equipamento		3		5	90							
					Tempo de exposição incorreto após a decapagem		2		5	60							
03 - Cortar Blank	Blank fora de esquadro	Furação deslocada	6		Falta de batente/ posicionamento incorreto		3	Esquadro + paquímetro	6	108							
		Altura de aba incorreta na operação de rollformar	6						6	108							
	Largura blank menor	Aba menor	7		Batente fora de posição / Falha na operação		4	Trena	6	168							
	Largura blank maior	Aba maior	7		Batente fora de posição / Falha na operação		4	Trena	6	168							
04 - Rollformar	Trincas	Estrutura do produto comprometida	9	▲	Regulagem de máquina inadequada		2	Visual	6	108	Acrescentar inspeção 100% para esta característica juntamente com operação de rebarbar	Eng. XXXXX	OK	9	2	4	72
					Severidade de rolagem		1	Visual	6	54					1		36
					Rolo danificado e/ou engripado	Manutenção periódica	2	Visual	6	108					2		72
					Lubrificação inadequada		2	Visual	6	108					2		72
					Folga inadequada do ferramental	Manutenção periódica	2	Visual	6	108					2		72
					Rebarbas	Controle da Rebarba	2	Visual	6	108					2		72
					Falha durante a preparação do ferramental		2	Visual	6	108					2		72
05 - Puncionar peça no CNC	Excesso de Furos	Reclamação do Cliente	4		Falha durante a preparação do ferramental		2	Visual	4	32	Revisar Documentação	Eng. XXXXX	OK	4	2	3	24
					Excesso de coordenada no programa		3	Visual	4	48	Aumentar Inspeção	Eng. XXXXX	OK		2		24
	Rebarbas	Acidentes e/ou problemas nas operações seguintes	8	△	Folga inadequada entre punções e buchas	Manutenção periódica	4	Visual	4	128	Revisar Ferramental para minimizar as folgas	Eng. XXXXX	OK	8	3	3	72
					Folga inadequada nos sensores	Manutenção periódica	4	Visual	4	128					3		72
					Punções e/ou buchas danificadas	Manutenção periódica	3	Visual	4	96	Aumentar o número de inspeções	Eng. XXXXX	OK		2		48
					Desgaste de ferramental	Manutenção periódica	3	Visual	4	96					2		48
06 - Furar à Broca Manual	Falta de furos	Problema na montagem do cliente	6		Falha no sequenciamento das operações		1	Visual	4	24	Acrescentar Furos em Ferramenta	Eng. XXXXX	OK	6			
					Falha dos Operadores	Treinamento operacional periódico	4	Visual	4	96	Construir Calibre e checar a existência dos furos						
					Utilização da máscara errada	Pilotos e batentes	2	Visual	4	48	Reabilitar máscara existente e construir nova (se necessário)						
					Falta de clareza nas informações		3	Visual	4	72	Revisar Documentação						
	Furos com diâmetro fora do especificado	Problema na montagem do cliente	9	▲	Utilização de broca com o diâmetro errado	Checagem do diâmetro da broca	2	Paquímetro + Calibres	8	48	Fazer cotação de novo processo	Eng. XXXXX	Aguardando cliente				
					Falha dos Operadores	Treinamento operacional periódico	3	Paquímetro + Calibres	8	72	Revisar Documentação	Eng. XXXXX					
					Falta de clareza nas informações		3	Paquímetro + Calibres	8	72							
07 - Lavar / Acabamento / Tipar Eixos	Riscos e marcas (na Região de gravação do nº VIN)	Sucateamento da Longarina	8		Falha na operação de lixamento	Treinamento operacional periódico	6	Visual	7	336							
08 - Formar Rampa	Variação do ângulo de dobra	Interferência na montagem	6		Regulagem de máquina errada		3	Visual + Trena/Régua e Paquímetro	2								

Fonte: (Elaboração Própria)

análise de falhas consistente. É fundamental para a equipe que ela saiba claramente quais funções o processo deve executar, e quais são os requisitos de projeto que este processo deve satisfazer (TENG *et al.*, 2006). Uma falha ocorre quando o processo não realiza sua função especificada, ou não atinge os requisitos de projeto. Sem conhecimento claro da função do processo, ou dos seus requisitos, a equipe não tem condições de definir quais são os modos de falha potenciais do processo em questão.

2) *Modos de Falha Potenciais:* A primeira inconsistência que pode ser observada na Figura 5 é a presença de modos de falha com uma descrição demasiadamente genérica. Isto pode ser observado, por exemplo, no modo de falha *Qualidade Superficial não atende ao especificado* (na operação *Decapagem Mecânica + Oleamento*).

Descrever a falha de forma genérica (e não técnica) prejudica tanto a avaliação dos efeitos como das causas deste modo de falha. Ou seja, a análise de todos os outros elementos do FMEA ficam comprometidos quando o modo de falha é definido incorretamente. *Qualidade Superficial*, por exemplo, poderia ser desmembrado em diversos tipos diferentes de falha, como por exemplo, riscos, marcas, batidas, oxidação, presença de granalha (da decapagem mecânica), etc., todas elas com diferentes efeitos para os clientes, e com causas que são distintas entre si.

Generalizar a falha impede que todos estes efeitos e causas possam ser analisados mais profundamente e de forma individual. As causas da falha *Riscos na peça*, por exemplo, certamente seriam diferentes da causa *Oxidação*, caso o modo de falha fosse descrito de forma mais técnica, considerando os requisitos desta função do processo. Teng *et al.* (2006) consideram a confusão causada na equipe pela ambiguidade deste tipo de informação no FMEA como um grande obstáculo para a plena utilização desta ferramenta.

Outro modo de falha definido incorretamente está na operação de *Recebimento de Matéria-Prima*, onde considera-se o modo de falha *Dimensões Fora do Especificado (Espessura)*. Este modo de falha não possui nenhuma relação com a função deste processo. Como regra geral, a função de uma operação de Recebimento consiste-se em inspecionar a matéria prima, aprovando ou rejeitando o material. Considerando estas funções do processo de Recebimento, percebe-se que tal operação não é responsável por modificar a característica *Espessura* do produto, o que pode ser facilmente percebido verificando-se que esta é uma operação que não modifica nenhuma característica dimensional do produto.

Dessa forma, fica claro que a característica *Espessura* somente pode ser controlada nos processos anteriores ao Recebimento, neste caso, nos processos do fornecedor da matéria-prima. Com este modo de falha incorretamente descrito, a equipe é tendenciada a definir causas e controles que não podem ser aplicadas neste processo. Isso pode ser observado analisando-se a causa definida para este modo de falha (*Falha da Usina*) e o controle estabelecido (*Controle da Usina*), que não possuem valor nenhum neste caso, pois sequer podem ser controlados pela organização, mas somente pelo fornecedor da matéria-prima.

O resultado desta questão foi que nenhum dos modos de falha definidos pela organização para a função *Recebimento de Matéria-Prima* neste FMEA realmente estavam relacionados com as funções desta operação (receber material e inspecionar). Aguiar, Salomon e Mello (2015) citam que operações como esta, em que não há transformação do produto, não recebem a devida atenção das equipes de FMEA, mesmo se tratando de operações em que uma falha pode ocasionar um efeito catastrófico para o cliente (como, por exemplo, fabricar a peça com um material mais frágil que o especificado em projeto).

3) *Efeitos Potenciais da Falha:* Dois tipos de inconsistências relacionadas ao efeito da falha podem ser observadas neste FMEA. A primeira delas são aquelas cujos efeitos não consideram a percepção do cliente. Por exemplo, para o modo de falha *Blank fora de esquadro*, na operação *Cortar Blank*, foram identificados dois efeitos potenciais: *Furação Deslocada* e *Altura de aba incorreta na operação de rollformar*. São efeitos que, de fato, existem no processo, e estão definidos corretamente. No entanto, Palady (1997) enfatiza que as consequências de um modo de falha devem ser analisados adotando-se a perspectiva do cliente, para que a real severidade deste efeito possa ser compreendida pela equipe. Assim, adotando-se a perspectiva do cliente, este modo de falha deveria ter o efeito *Interferência na montagem do cliente* considerado, com consequências mais severas do que os efeitos internos listados no FMEA desta organização.

Este tipo de inconsistência ocorre principalmente quando o cliente não é consultado pela equipe durante a elaboração do FMEA, visto que a equipe dificilmente tem condições de analisar questões que estão fora dos domínios da organização. Teng *et al.* (2006) verificam que as informações sobre a aplicação de um componente ou sistema podem não estar adequadamente disponíveis dentro da cadeia de fornecimento

automotivo, o que irá prejudicar estes fornecedores a definir corretamente os efeitos potenciais em seus FMEAs.

Outra deficiência que pode ser observada neste FMEA é a presença de efeitos descritos de forma demasiadamente genérica. É possível observar efeitos descritos como *Problema na montagem do cliente* ou *Reclamação do cliente*. Esta descrição é não técnica, impedindo a equipe de analisar de forma correta a severidade destes efeitos, visto que problemas de montagem podem ter diferentes graus de severidade, e reclamação do cliente é algo inerente a um problema de qualidade, não possuindo relação nenhuma com a utilização do produto e suas questões técnicas, não devendo sequer ser mencionado no FMEA. Aguiar, Salomon e Mello (2015) observam que uma descrição genérica do efeito impede a análise do real impacto causado pelo modo de falha, prejudicando a definição de uma pontuação consistente de severidade.

4) *Pontuação de Severidade:* Analisando-se o FMEA da Figura 5, é possível verificar que todos os efeitos contidos em um mesmo modo de falha receberam uma pontuação distinta de severidade. Esta prática é incorreta, pois segundo AIAG (2008) e Carlson (2012), a pontuação de Severidade sempre deverá ser atribuída ao efeito de maior gravidade de um dado modo de falha. Não há sentido em se atribuir pontuações de severidade para os efeitos menos graves, visto que, em se tratando de uma análise de risco, sempre o evento com maior risco irá prevalecer sobre aqueles de menor risco.

Em geral, os problemas de classificação de Severidade de um FMEA estão relacionadas à incoerências nas pontuações atribuídas aos efeitos, quando comparados entre si, ou com a tabela de pontuação adotada. Um exemplo claro de incoerência pode ser observado à pontuação de Severidade igual a 8 para o efeito *Acidentes e/ou problemas nas operações seguintes*, para o modo de falha *Rebarbas*.

A equipe provavelmente atribuiu uma pontuação desta magnitude pelo fato de tratar-se aparentemente de uma questão de segurança dos colaboradores dos postos subsequentes. No entanto, as rebarbas podem causar apenas um ferimento leve nas mãos de quem manusear o produto, desde que ela esteja sem os equipamentos de segurança do posto de trabalho. Além disso, baseando-se na tabela de Severidade da AIAG (2008), uma pontuação de Severidade 8 corresponde à "100% da produção pode ter de ser sucateada. Parada de linha de produção ou parada do embarque", definição que não corresponde à real gravidade dos efeitos relacionados a presença de rebarbas na peça

nos processos posteriores, falha que pode ser retrabalhada, evitando o sucateamento do item que configuraria uma pontuação de Severidade deste nível.

Outro problema observado é a presença de dois efeitos descritos de forma idêntica, porém com pontuações diferentes. Na operação *Furar à broca manual*, o efeito *Problema na montagem do cliente* pode ser encontrado com duas pontuações diferentes de Severidade (9 e 6). Se dois efeitos são exatamente iguais, a pontuação obtida através da tabela de referência deve ser a mesma. Neste exemplo, conforme descrito anteriormente, o modo genérico como estes efeitos foram descritos provocaram tal inconsistência. Analisando-se as pontuações, fica claro que os modos de falha *Falta de Furos* e *Furos com diâmetro fora do especificado* possuem efeitos distintos entre si, no entanto, a forma genérica que a equipe utilizou para descrevê-los não permite que isso fique evidente no formulário.

Um último detalhe acerca deste tópico é a falta de simbologia para característica significativa no modo de falha *Riscos e Marcas (na região de gravação do n° VIN)*, na operação *Lavar / Acabamento / Tipar Eixos*. De acordo com Ford Design Institute (2004), a coluna de Classificação é utilizada para representar características especiais do processo, que requerem um controle especial dentro do Plano de Controle, por se tratarem de características do produto que podem afetar a segurança do seu usuário, questões governamentais, ou ainda provocar grande prejuízo durante sua produção. A classificação é realizada de acordo com as normas da organização, ou do cliente, e controles devem estar previstos para estas características no Plano de Controle. Neste caso, por tratar-se de um modo de falha com Severidade igual a 8, e ocorrência maior do que 4, a coluna de Classificação deveria receber a simbologia adequada para classificar este modo de falha adequadamente.

5) *Causas Potenciais da Falha*: Na Figura 5, é possível encontrar-se atribuída à dois modos de falha a causa *Falta de Clareza nas Informações*. Esta causa, além de não ser muito clara no que ela realmente representa, é algo que não está relacionado aos modos de falha *Falta de Furos* ou *Furos com diâmetro fora do especificado*, por não ter relação alguma com a operação em si, de realizar furos na peça através de furadeira de bancada.

Outro exemplo de causa não relacionada ao modo de falha pode ser observado na operação de *Recebimento de Matéria-Prima*, em que a causa *Falha da Usina* é atribuída ao modo de falha. Eventos relacionados à usina que processa a matéria-prima não fazem

parte do escopo da função de Recebimento. Assim, tal causa não pode ter relação alguma com os modos de falha do Recebimento de matéria-prima. Provavelmente, esta inconsistência foi cometida pelo fato da equipe assumir que houve falha no fornecedor, adotando a matéria-prima não conforme como um *input* da operação de Recebimento. AIAG (2008) define que, na elaboração do FMEA, deve ser assumido que os materiais entram na operação conforme as especificações de projeto. Dessa forma, a investigação fica limitada às causas pertencentes ao processo estudado, eliminando causas presentes em processos anteriores que possam confundir a equipe.

Percebe-se também que as causas são descritas de forma excessivamente vaga neste FMEA, como por exemplo, *Problemas no equipamento* (em *Decapagem Mecânica + Oleamento*), ou ainda *Regulagem de máquina inadequada* (em *Rollformar*). Este tipo de descrição, segundo Teng *et al.* (2006), mesmo não estando incorreta (pois, de fato, uma regulagem incorreta provoca estes modos de falha), é uma descrição óbvia, que não fornece detalhes para a equipe definir qual tipo de parâmetro da regulagem de máquina deve ser controlado para evitar a falha, dessa forma, não sendo útil para aumentar a confiabilidade do processo.

Uma descrição demasiadamente genérica representa um elevado grau de superficialidade na investigação, impossibilitando a definição da causa-raiz. Ford Design Institute (2004) estabelece que a causa deve ser investigada até que possa ser descrita em termos de algo que possa ser corrigido ou controlado. Seguindo essa recomendação, a equipe é capaz de realizar um estudo mais aprofundado e encontrar a real causa-raiz da falha, diferente do cenário observado no FMEA da Figura 5.

Um erro comum neste FMEA é o excesso de causas descritas como falhas de algum componente ou operação. Exemplos são *Falha no Sequenciamento das Operações*, *Falha na Operação do Lixamento*, etc. Descrever uma falha como causa de um outro modo de falha demonstra uma investigação superficial da equipe, e impossibilita a definição de controles preventivos, o que pode ser confirmado verificando-se que todas estas causas deste exemplo não possuem controles preventivos definidos no FMEA. O mais correto seria a equipe investigar quais são as causas desta falha no sequenciamento das operações, até que um parâmetro controlável capaz de prevenir a ocorrência da falha *Falta de Furos* seja encontrado, na operação *Furar à Broca Manual.*

É possível verificar-se que algumas causas neste FMEA focam bastante o erro humano, como por exemplo, *Falha dos Operadores*, *Falha durante a preparação do ferramental,* etc. De fato, as pessoas são propícias ao erro, sendo difícil de se eliminar estas causas do processo. No entanto, conforme afirmado por Silverman e Johnson (2013), o escopo da investigação das causas no FMEA deve ser o processo executado pelo colaborador, e não o erro humano em si. A atividade humana dentro do processo pode ser padronizada através de instruções de trabalho e procedimentos, que estabelecem a forma de atuação dos colaboradores, assim como o erro humano pode ser prevenido através do desenvolvimento de *poka-yokes*[1]. Com essa visão da atuação humana dentro do processo, o FMEA pode contribuir com a prevenção de falhas através de uma análise de riscos do procedimento estabelecido para a realização das atividades dentro do processo, permitindo que a equipe possa recomendar modificações na forma como esta atividade é executada pelos colaboradores, ou propondo a aplicação de dispositivos *poka-yoke* para prevenção do erro humano quando necessário.

6) *Pontuação de Ocorrência:* Em um primeiro momento, não é possível avaliar-se a consistência das pontuações de Ocorrência sem ter em mãos os dados estatísticos sobre a frequência com que as causas definidas no FMEA acontecem no processo, e a respectiva tabela de referência adotada pela equipe para a conversão das pontuações. No entanto, mesmo assim, algumas considerações podem ser tecidas a respeito das pontuações.

Como visto anteriormente, grande parte destas causas foram definidas de maneira demasiadamente genérica, ou incorretamente, confundindo-se falha com causa, misturando-se várias causas possíveis em uma única causa, ou ainda atribuindo-se erro humano como causa da falha. Levando em conta que para se definir a pontuação de Ocorrência é necessário aferir a frequência com que cada causa ocorre no processo, provavelmente estas pontuações estão inconsistentes, visto que a equipe definiu as pontuações baseada em causas incertas, não definidas de forma clara.

A incerteza presente na descrição destas causas reflete-se em uma incerteza na definição da pontuação. Por exemplo, quando a equipe analisa a causa *Parâmetros de processo fora do especificado* (na operação *Decapagem Mecânica + Oleamento*), não é

[1] Dispositivo à prova de erros, concebido para prevenir ou detectar anormalidades em 100% das peças, cujo funcionamento é independente da atuação do homem no processo. (SAURIN; RIBEIRO; VIDOR, 2012)

possível definir-se quantos e quais parâmetros do processo devem ter sua frequência de ocorrência consultadas para que se possa definir a pontuação correta de Ocorrência no FMEA. Na mesma operação, quando a causa *Problemas no equipamento* é citada, não existe sequer um critério estabelecido para conceituar o que seria um problema no equipamento que permita realizar um levantamento estatístico da ocorrência desta causa no processo.

Da forma como as pontuações de Ocorrência apresentam-se distribuídas neste FMEA, pode-se supor que as pontuações foram definidas de forma arbitrária pela equipe, com os valores variando predominantemente na faixa de valores entre 2 e 5, com algumas exceções. No entanto, só é possível tornar estas pontuações mais concretas realizando-se uma análise consistente das causas presentes em cada etapa do processo, removendo-se todas as incertezas presentes nas descrições registradas neste FMEA.

7) *Controles de Processo*: Este é o item que apresenta o maior número de inconsistências no FMEA deste estudo de caso. A princípio, vários campos destinados ao registro do *Controle Preventivo Atual* estão em branco. A falta de informações neste campo é um indicativo de que a equipe não fez uma visita ao processo para investigar *in loco* as informações relevantes para a elaboração do FMEA.

"FMEAs efetivos não podem ser feitos por uma única pessoa sozinha sentada no escritório preenchendo os formulários de FMEA" (MIKULAK; MCDERMOTT; BEAUREGARD, 2011, p. ix). É fundamental que a equipe pelo menos faça uma visita ao processo, para que tenha condições de verificar se as informações compiladas no formulário estão coerentes com a realidade praticada no chão de fábrica, e buscar dados que as equipes não são capazes de averiguar através das reuniões. Essa falta de informações sobre os controles preventivos no FMEA mostra que a equipe simplesmente não sabe como o processo é controlado.

Uma consequência dessa falta de controles de prevenção no FMEA é a elaboração de um Plano de Controle deficiente. Os dados de controles de prevenção e de detecção do FMEA possuem uma forte ligação com as informações do Plano de Controle (TENG;HO, 1996). Dessa forma, caso não sejam definidos controles preventivos no FMEA, provavelmente não existe controle estabelecido no Plano de Controle, o que demonstra uma gestão organizacional que prioriza a detecção das falhas, e não a eliminação das suas causas.

Dos poucos controles preventivos que foram definidos no formulário, a maioria deles encontram inconsistências. Por exemplo, na operação de *Recebimento de Matéria-Prima*, o controle preventivo *Controle da Usina* é estabelecido. Este controle não está ao alcance da organização, por tratar-se de uma questão do fornecedor. Tal inconsistência é fruto da definição incorreta do modo de falha desta operação, conforme exposto anteriormente.

Outra inconsistência é a definição genérica dos controles. Por exemplo, vários dos controles definidos neste FMEA são descritos como *Manutenção periódica*. No entanto, neste FMEA, somente fica claro qual tipo de manutenção deve ser realizada no equipamento quando o controle preventivo é analisado em conjunto com sua respectiva causa (por exemplo, para a causa *Folga inadequada nos sensores*, a manutenção periódica está relacionada à intervenção nestes dispositivos). O ideal seria descrever de forma mais clara estes controles, a fim de facilitar sua identificação no Plano de Controle do processo, visto que somente o controle é transferido do FMEA para este documento. Desta forma, sem a causa descrita no Plano de Controle, a simples descrição *Manutenção Periódica* não fornece informações precisas sobre o que deve receber manutenção no processo.

É possível verificar-se que a equipe define, para os casos em que foram detectados erro humano na execução da operação, *Treinamento operacional periódico* como forma de prevenção da falha. Este tipo de controle não deve ser considerado em um FMEA. Partindo-se do pressuposto que qualquer colaborador somente executa uma atividade dentro do processo caso ele seja devidamente qualificado para isso, *Treinamento* não deve ser considerado um controle de prevenção da falha, mas sim um pré-requisito para que esta pessoa esteja habilitada a realizar a operação dentro do processo. Assim como no caso da investigação das causas, a atribuição de controles de prevenção de falhas relacionadas ao erro humano devem ter como foco aumentar a confiabilidade do método estabelecido para que o colaborador realize a atividade dentro do processo.

Analisando-se os controles de detecção estabelecidos neste caso, este é o item que apresenta o menor número de inconsistências, devido a sua facilidade de ser identificado e definido, por tratar-se normalmente de atividades de inspeção do produto. No entanto, alguns itens ainda apresentam inconsistências. Por exemplo, para o modo de falha *Qualidade Superficial não atende ao especificado* (operação *Decapagem Mecânica + Oleamento*), define-se o controle de detecção *Visual + IGQ 3102.014*.

Aguiar (2007) classifica a utilização de controles referenciando um documento interno da organização como uma inconsistência na elaboração do FMEA. Esta descrição de controle, citando o documento *IGQ 3102.014,* torna-se inconclusiva para quem estiver analisando este FMEA, não fornecendo nenhuma informação relativa ao procedimento realizado para executar tal inspeção, e prejudicando na atribuição da pontuação de Detecção. Caso este documento possua algum método específico de controle de detecção, uma descrição sucinta do controle deveria ser feita no FMEA. A referência ao documento pode ser realizada no Plano de Controle, na coluna de "Método de Controle".

Outra inconsistência observada refere-se novamente ao modo de falha da operação de *Recebimento de Matéria-Prima.* O controle *Medidor de Espessura (na próxima operação)*, além de não possuir relação com os modos de falha desta operação (visto que o modo de falha foi definido incorretamente), ainda apresenta a descrição peculiar *Na próxima operação*. Ou seja, é um controle totalmente ineficaz, pois sua atuação está fora dos limites da operação de Recebimento, com atuação somente no cliente, visto que a operação subsequente é considerada um cliente interno da operação analisada. Carlson (2012) afirma que os controles de detecção devem atuar antes que a falha atinja o cliente do processo, ou em outras palavras, que os efeitos da falha possam ser percebidos pelo cliente.

8) *Pontuação de Detecção*: Assim como no caso das outras pontuações, é complexo realizar-se uma análise de inconsistências na pontuação de Detecção sem ter em mãos qual tabela foi aplicada pela equipe. No entanto, aparentemente neste quesito não existem inconsistências no FMEA. Um questionamento que pode ser feito é acerca da pontuação atribuída ao controle de detecção *Visual*, com valores variando no range de 4 a 7 para um mesmo tipo de controle.

Neste caso, duas observações podem ser feitas para explicar tal comportamento da pontuação. A primeira é que esta pontuação é predominantemente arbitrária, pois as tabelas de pontuação de Detecção, em geral, tratam a probabilidade de detecção de forma qualitativa, e não quantitativa. Existem tabelas que quantificam a probabilidade de detecção para a atribuição de uma pontuação mais consistente, cujos exemplos podem ser encontrados em Aguiar, Souza e Salomon (2010). No entanto, são métodos demasiadamente complexos, visto que para determinar-se a taxa de detecção de um controle, é necessário que a falha ocorra no processo, e seja mensurada a taxa de

produtos cujos efeitos da falha foram percebidos pelo cliente, algo difícil de reproduzir-se, especialmente nos casos em que a Ocorrência é baixa. Dado esse cenário, a aplicação de tabelas que tratam a pontuação de Detecção de forma qualitativa é simplificada, desde que seja aplicada de forma consistente pela equipe.

Outra questão é que a pontuação é atribuída à probabilidade de detecção da falha, e não ao método de detecção em si. Dessa forma, o controle *Visual* pode ter probabilidades de detecção diversas dentro do processo, dependendo do contexto em que é aplicada, provocando variação da pontuação. Um exemplo disso pode ser observado ao comparar-se a eficácia do controle *Visual* na detecção do modo de falha *Trincas* (operação *Rollformar*) e da falha *Excesso de Furos* (na operação *Puncionar peça no CNC*). No primeiro caso, a detecção visual de trincas é uma atividade complexa, visto que trincas podem ser minúsculas e difíceis de serem detectadas a olho nu, baixando a probabilidade de detecção e elevando sua pontuação de risco. No segundo caso, a detecção de falta ou excesso de furos é mais simples que a inspeção de trincas, pois estes furos podem ser visualizados com maior facilidade pelo inspetor do que trincas, logo, a probabilidade desta detecção é maior, justificando a variação desta pontuação no FMEA.

9) *Definição do NPR:* Referente ao valor do NPR, duas incorreções podem ser observadas, referentes ao cálculo do mesmo. No modo de falha *Furos com diâmetro fora do especificado* (na operação *Furar à Broca Manual*), é possível verificar que o NPR calculado foi de 72 (os NPRs de valores mais baixos não deveriam ser considerados no FMEA), quando a combinação S = 9, O = 3 e D = 8 resulta em um valor de NPR igual a 216, constituindo-se em um erro de multiplicação justamente em um RPN de valor crítico para este FMEA, embora o erro não tenha prejudicado a avaliação da equipe no sentido de recomendar ações para este modo de falha. Já na operação *Formar Rampa*, verifica-se também que não há RPN calculado no formulário (o RPN é igual a 36).

Embora não tenha sido detectado neste FMEA do estudo de caso, uma inconsistência comum que pode ser observada nos FMEAs em que são definidas notas de corte para tomada de ações é a tendência da equipe em forçar um RPN que não exija atuação no processo. Como as pontuações de S, O e D possuem certo grau de subjetividade em sua definição, a equipe pode acabar aproveitando-se deste elemento

para definir de forma arbitrária notas que ocultem o risco do processo, evitando a necessidade da recomendação de ações.

Contudo, esta prática, além de ser um obstáculo à melhoria contínua do processo, faz com que problemas do processo possam ser ocultados, com a justificativa de que o sistema de gestão da qualidade não exige a tomada de ação. Organizações que atuam desta forma tendem a apresentar dificuldades de sobreviver no mercado atual, que exige das empresas constante melhora em termos de qualidade e custo do produto, para atender clientes com requisitos cada vez mais exigentes (PACIAROTTI; MAZZUTO; D'ETTORRE, 2014).

Entretanto, neste FMEA do estudo de caso, provavelmente esta prática não tenha sido realizada pela equipe. Isso porque a empresa adota três critérios para a recomendação de ações no FMEA: além da nota de corte (igual a 250), o critério de matriz S x O e o de maior severidade são utilizados na organização. A adoção destes critérios por si só já é uma forma de evitar-se que a equipe defina arbitrariamente valores de RPN inferiores à nota de corte.

10) Ações Recomendadas: Neste quesito, apenas os modos de falha que estejam conforme os critérios definidos pela organização para tomada de ação apresentam ações recomendadas. No entanto, mesmo existindo esses critérios, ainda existem inconsistências no FMEA desta organização. É possível ver que, em alguns casos, os critérios não foram seguidos adequadamente. Um exemplo disso pode ser percebido analisando-se o modo de falha *Excesso de Furos* (na operação *Puncionar peça no CNC*). Mesmo sendo um modo de falha de baixo risco, por apresentar Severidade igual a 4, e um RPN igual a 48, a equipe optou por recomendar ações para este item no FMEA.

Não existe problemas em recomendar ações para RPNs fora dos critérios de tomada de ação, visto que a equipe em algum momento pode identificar oportunidades de melhoria, desde que isso não afete a tomada de ações para os RPNs mais altos. No entanto, é possível verificar-se na Figura 5 que existem modos de falha com RPNs muito mais críticos do que o do modo de falha *Excesso de Furos* em que não foram recomendadas ações de melhoria. Exemplos são os modos de falha *Largura do Blank Menor / Maior* (na operação *Cortar Blank*), em que um RPN de 168 é observado, com Severidade igual a 7. Mesmo possuindo um grau de risco muito mais elevado, quando

comparado ao RPN de 48 do exemplo anterior, a equipe priorizou a alocação de recursos para um modo de falha pouco expressivo no processo.

Uma inconsistência ainda mais grave é a falta de recomendação de ações para o modo de falha *Riscos e Marcas (na Região de gravação do N° VIN)*, na operação *Lavar/Acabamento/Tipar Eixos*. Este modo de falha se enquadra em pelo menos dois critérios para recomendação de ações, por possuir RPN igual a 366 (superior aos 250 da nota de corte) e Severidade igual a 9. No entanto, não existe nenhuma menção de ação definida para reduzir este RPN. Analisando este fato sob o ponto de vista do cliente, a falta de ações para reduzir o risco deste modo de falha é preocupante, inclusive por tratar-se de uma questão governamental, pois a legislação proíbe alterações na região onde é gravado o código do chassi do veículo.

Desta forma, é possível concluir-se que, mesmo com a organização definindo critérios para exigir a recomendação de ações, a equipe de elaboração do FMEA não aplicou de forma consistente estes critérios. Como é impossível gerenciar ações para reduzir os riscos de todos os modos de falha do FMEA, os recursos devem ser alocados para aqueles que representam um maior risco para o cliente. Khorshidi, Gunawan e Ibrahim (2016) verificam que o FMEA é uma ferramenta útil para alocar ações corretivas nos modos de falha de alto risco, visando à redução da taxa de ocorrência de falhas no processo. Visto que os recursos são limitados para a organização, a equipe não pode desperdiçá-los em problemas de baixa relevância no processo, em detrimento de falhas que podem ser críticas para o cliente, da forma como foi apresentado nos exemplos deste FMEA do estudo de caso.

Outras inconsistências ainda podem ser observadas na definição das ações. Por exemplo, para o modo de falha *Furos com diâmetro fora do especificado* (na operação *Furar à Broca Manual*), uma das ações recomendadas é *Fazer cotação de novo processo*. Puente *et al.* (2002) afirma que as ações devem eliminar a causa do modo de falha, ou reduzir as pontuações de O e D (ou ainda, em casos especiais, a Severidade) para provocar a redução do risco. Realizar uma cotação é uma ação que não atua nem na prevenção do modo de falha, nem na detecção da falha. Ações deste tipo não devem ser consideradas em um FMEA, pois elas não reduzem o risco após serem implementadas.

Além de ações recomendadas pela equipe que não são efetivas, observa-se que neste FMEA existe um grande foco em ações que privilegiam a detecção da falha. FMEAs efetivos são aqueles em que a confiabilidade do processo é melhorada através

de ações apropriadas que reduzam a taxa de ocorrência da falha. No entanto os FMEAs frequentemente apresentem ações corretivas *cosméticas*, visando aumentar a probabilidade de detecção da falha, pelo fato de serem de fácil implementação, porém pouco efetivas no sentido de eliminar a falha do processo, ao invés da aplicação de ações *substanciais*, responsáveis por reduzir a pontuação de Ocorrência, que deveriam ser priorizadas em um FMEA (CASSANELLI; FANTINI; SERRA, 2003). Exemplos deste tipo de ação na Figura 5 são *Acrescentar Inspeção 100%* (na operação *Rollformar*), e *Aumentar o número de inspeções*, para alguns modos de falha deste FMEA.

Ainda é possível observar-se neste FMEA do estudo de caso que a equipe não define prazos para a realização das ações, nem registra no formulário as datas em que as mesmas foram finalizadas. Todas as ações recomendadas em um FMEA devem possuir um responsável pela sua execução, e um prazo definido para sua conclusão. Quando finalizadas, o que foi executado deve ser registrado no formulário, junto de sua data de implementação, com consequente revisão das pontuações no FMEA (AGUIAR, 2007). Nos exemplos, a equipe fez somente o registro dos responsáveis pela implementação das ações, porém os prazos e datas de conclusão não são registradas, bem como um simples *OK* registra que a ação foi finalizada, não fornecendo detalhes sobre sua implementação. Assim, não é possível determinar se a equipe encerrou todas as ações recomendadas dentro do prazo estipulado.

Também é possível verificar-se que existem ações recomendadas que foram finalizadas, entretanto, não houve uma revisão do formulário de FMEA. Este exemplo pode ser encontrado em *Furar à Broca Manual*, para o modo de falha *Falta de Furos.* As ações recomendadas estão classificadas como finalizadas no formulário (*OK* na coluna *Ação Tomada*), porém o RPN não foi recalculado, bem como as pontuações de O e D estão em branco. Sharin (2004) afirma que "o FMEA é um documento vivo e deve sempre ser modificado em função de novas informações ou mudanças". Porém, as equipes de FMEA apresentam dificuldades em manter atualizados os formulários, o que pode ser percebido neste exemplo, quando o RPN deste modo de falha deveria ter sido novamente calculado. Isso também indica que não houve uma preocupação da equipe em avaliar se a ação implementada foi realmente efetiva para atuar na redução do risco deste modo de falha.

Ao realizar essa revisão das pontuações do FMEA, após a implementação de uma ação corretiva, a equipe deve compreender sobre qual dos fatores de risco a ação terá efeito. É importante enfatizar que uma ação recomendada não pode modificar mais de uma pontuação ao mesmo tempo. Ações que reduzem a Ocorrência do modo de falha estão relacionadas à modificações no processo, para aumentar sua confiabilidade e reduzir a taxa de ocorrência das falhas. Já modificações na pontuação de Detecção são obtidas através de melhorias nos controles de inspeção do produto. A redução da Severidade pode ser obtida através de modificação no projeto do produto, e são mais difíceis de serem realizadas.

Uma inconsistência que a equipe pode cometer na revisão das pontuações é justamente modificar a pontuação de O e D simultaneamente para a mesma ação implementada no processo. Na operação *Furar à Broca Manual*, por exemplo, para o modo de falha *Rebarbas*, a ação recomendada *Acrescentar inspeção 100%* modificou ambas as pontuações de O e D, segundo a avaliação da equipe. Aumentar a frequência de inspeção em uma operação não modifica a pontuação da Ocorrência, pois esta ação não atua na redução da taxa de ocorrência da falha, mas sim apenas aumenta a probabilidade de detecção da falha potencial. Dessa forma, somente a pontuação de Detecção pode ser modificada através da implementação desta ação.

3.3. PROCESSO PARA REDUÇÃO DAS INCONSISTÊNCIAS PRESENTES NO FORMULÁRIO DE FMEA

As inconsistências cometidas pelas equipes durante o desenvolvimento de um FMEA é uma das principais razões pela qual a aplicação da ferramenta nas organizações transforma-se em insucesso (ESTORILIO; POSSO, 2010). Analisando-se os erros presentes no formulário do estudo de caso do Capítulo 3.2, é possível verificar que o alto grau de incerteza nas informações, dados genéricos e considerações incorretas transformaram este FMEA em um documento de valor nulo para o sistema de gestão da qualidade da organização.

Sendo assim, é necessário estruturar-se um processo para realizar a revisão destas informações incorretas presentes no FMEA desta organização. O desenvolvimento deste processo tem o objetivo de eliminar uma das principais causas que atrapalham o desenvolvimento de um FMEA, segundo Aguiar (2016): a dificuldade da equipe em entender corretamente a sequência de eventos na ocorrência de uma falha, e a relação

entre causa e efeito presente no FMEA. Johnson e Khan (2003) verificam em sua pesquisa que as equipes possuem diversas dificuldades técnicas relacionadas aos conceitos básicos do FMEA. É importante que esta dificuldade seja eliminada, através de uma forma estruturada de condução do desenvolvimento do FMEA, para que as equipes possam elaborar assim uma análise de falhas mais robusta. Aguiar (2007) afirma que as chances da equipe cometer inconsistências no preenchimento do FMEA tornam-se bem menores se o trabalho for realizado de forma organizada e disciplinada.

3.3.1. Aplicação da Abordagem por Processos no Desenvolvimento do FMEA

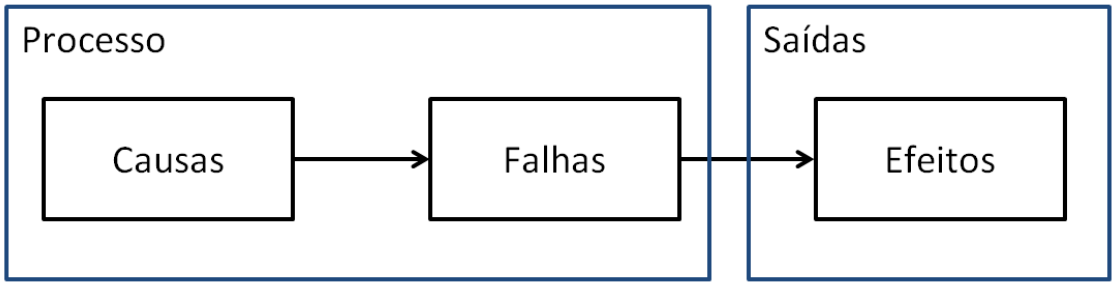
Para estruturar o desenvolvimento de uma análise de falhas, Aguiar, Salomon e Mello (2015) propõem o desenvolvimento do FMEA inserido no contexto da abordagem por processos definida pela ISO 9001, apresentada na Figura 1, como forma de facilitar a interpretação correta da sequência de eventos de uma falha. Kmenta e Ishii (2000) verificam que o foco de um FMEA é a identificação de uma cadeia indesejada de eventos dentro do processo, que são responsáveis por provocar a falha. Aguiar e Mello (2008) definem que as causas, modos de falha e efeitos estão relacionados entre si nesta cadeia conforme indicado na Figura 6.

Figura 6 - Cadeia de Eventos de um FMEA

Fonte: Aguiar e Mello (2008)

Considerando-se que o FMEA é aplicado no estudo de falhas potenciais em processos, a sequência de eventos de uma falha pode ser combinado ao modelo de abordagem por processos definido pela ISO 9001, conforme proposto por Aguiar, Salomon e Mello (2015). Um diagrama de como a sequência de eventos definida pelo FMEA ocorre dentro de um processo é apresentada na Figura 7.

Figura 7 - Cadeia de Eventos do FMEA inserida em um processo



Fonte: Aguiar, Salomon e Mello (2015)

Através deste modelo, é possível observar-se que as causas e os modos de falha fazem parte do processo que está sendo analisado pelo FMEA. Os efeitos estão relacionados às saídas do processo e serão percebidos pelo seu cliente. Dessa forma, todas as causas e modos de falha definidos pela equipe em um FMEA devem pertencer ao contexto do processo que está sendo estudado, bem como os efeitos definidos devem estar relacionados com as saídas que este processo irá fornecer ao seu cliente. Causas e falhas que pertencem à processos predecessores devem ser considerados somente no FMEA dos processos aos quais elas pertencem (AGUIAR; SALOMON; MELLO, 2015).

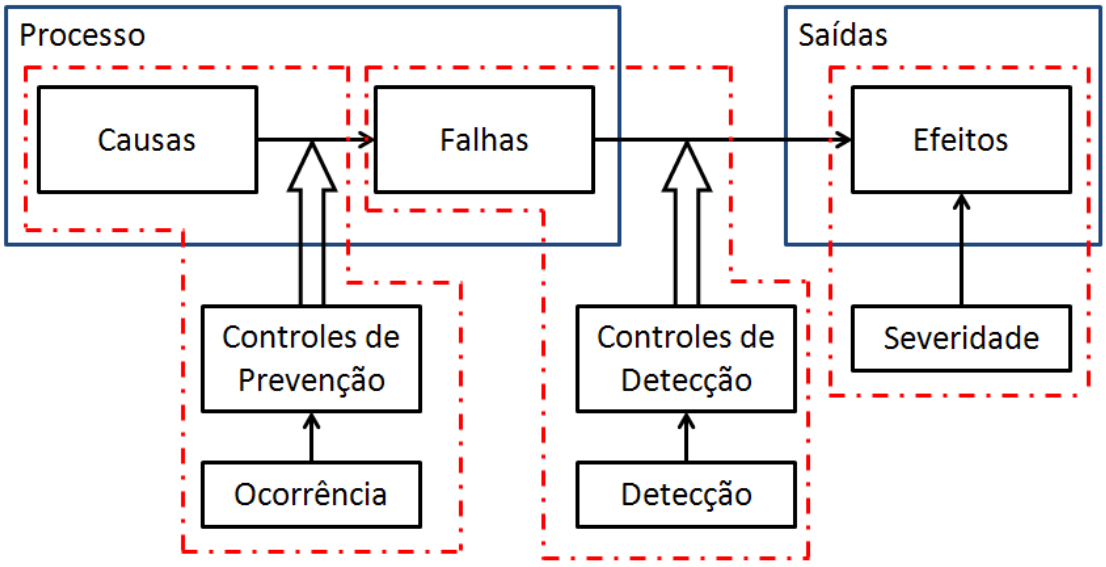
Tal abordagem delimita as fronteiras em que um FMEA deve ser desenvolvido, mitigando os problemas observados por Teng *et al.* (2006) e Aguiar, Salomon e Mello (2015), das equipes frequentemente confundirem as causas, modos de falha e efeitos entre si, eliminando as inconsistências relacionadas a estes conceitos. Com esta abordagem proposta, a equipe deve verificar se a cadeia de eventos definida por ela encaixa-se adequadamente no processo, para determinar se as informações do FMEA estão consistentes.

Aguiar (2016) complementa a utilização da abordagem por processos no FMEA inserindo no modelo da Figura 7 os controles de processo e pontuações de risco. Assim, um modelo completo de como todos os elementos presentes no FMEA relacionam-se entre si e com o processo analisado é apresentado na Figura 8. O formulário de FMEA tradicional não é intuitivo no aspecto de evidenciar a sequência de eventos que representam a ocorrência de uma falha, no entanto, através do modelo da Figura 8, a inter-relação entre os elementos do formulário pode ser interpretada de forma mais

clara, eliminando as incertezas que permeiam o trabalho das equipes em um desenvolvimento de FMEA.

Considerando-se o estudo de caso, a aplicação da abordagem por processos no desenvolvimento do FMEA apresenta-se como o modelo ideal para estruturar a revisão das informações inconsistentes apresentadas no Capítulo 3.2. Através da aplicação destes conceitos, é possível determinar-se durante o desenvolvimento do FMEA se as informações apresentam-se inconsistentes no formulário, bem como auxiliar a equipe a elaborar um FMEA que realmente possa oferecer suporte à prevenção de falhas e aumento da confiabilidade do processo. Dessa forma, a estruturação do processo para revisão das informações inconsistentes do FMEA deste estudo de caso é baseado no modelo conceitual proposto por Aguiar (2016), apresentado na Figura 8.

Figura 8 - Abordagem por Processos combinada ao Método FMEA



Fonte: Aguiar (2016)

3.3.2. Estruturação do Procedimento para Redução de Inconsistências do FMEA do Estudo de Caso

Existem alguns procedimentos desenvolvidos para a condução de uma análise de falhas, como por exemplo, o proposto por Teng e Ho (1996), que é apresentado na Figura 3. No entanto, devido ao formato de roteiro que o formulário de FMEA possui (AGUIAR; SALOMON; MELLO, 2015), a equipe tem a tendência de realizar o preenchimento do formulário linha a linha. Tal prática dificulta a análise da equipe, até pelo fato de que a investigação dos diferentes elementos do FMEA, como modo de

falha, causa e efeitos, por exemplo, possuem formas distintas de serem realizadas. Palady (1997) recomenda que o preenchimento do FMEA deve ser desenvolvido coluna a coluna separadamente, fazendo com que a equipe aumente o seu foco no elemento que está sendo investigado. Silverman e Johnson (2013) afirmam que este *pensamento vertical* da equipe em desenvolver as colunas do FMEA tornam as informações do formulário mais uniformes, além de aumentar a eficiência do trabalho da equipe.

Esta forma de conduzir os trabalhos permite a elaboração de *pré-formulários* de FMEA, recurso que pode facilitar a análise da equipe. O formulário de FMEA não é intuitivo, e sua utilização direta durante a análise de falhas pode implicar dificuldades adicionais para a equipe, especialmente no sentido de desenvolver individualmente cada coluna. Palady (1997) e Estorilio e Posso (2010) apresentam aplicações de pré-formulários desenvolvidos para facilitar o desenvolvimento da análise de falhas. O formulário parametrizado de Estorilio e Posso (2010), por exemplo, estabelece que informações sobre efeitos e severidade sejam preenchidas previamente pelo cliente, para aumentar a consistência dos dados que dependem exclusivamente de informações que não estão disponíveis à equipe de FMEA durante a reunião, permitindo assim uma integração maior de informações dentro da cadeia de fornecimento automotivo.

Para a condução do estudo de caso, foram preparados três pré-formulários a serem utilizados durante as reuniões da equipe de FMEA. A intenção desta medida é eliminar a utilização do formulário de FMEA durante as reuniões, e dessa forma, reduzir as incertezas e confusões provocados na equipe devido ao seu formato pouco intuitivo. Através dos pré-formulários, é possível manter o foco da equipe no elemento do FMEA que está sendo analisado, evitando que a equipe discuta mais de uma coluna do formulário ao mesmo tempo, tornando confusa a análise.

O primeiro pré-formulário, a ser utilizado na fase inicial da elaboração do FMEA, contém as informações da *Operação*, *Função do Processo*, *Requisitos*, *Modos de Falha, Efeitos* e *Severidade*. Um exemplo deste formulário pode ser verificado na Figura 9, aplicado à análise da operação *Cortar Blank* do FMEA do estudo de caso. Neste formulário, as informações devem ser preenchidas *verticalmente*, ou seja, a equipe somente pode iniciar a análise da coluna subsequente após finalizar o preenchimento da coluna que está sendo trabalhada. Um modelo do formulário pode ser encontrado no Apêndice A desta monografia.

Figura 9 - Pré-Formulário de Avaliação das Funções, Modos de Falha e Efeitos do FMEA

PFMEA - Identificação das Funções / Modos de Falha / Efeitos

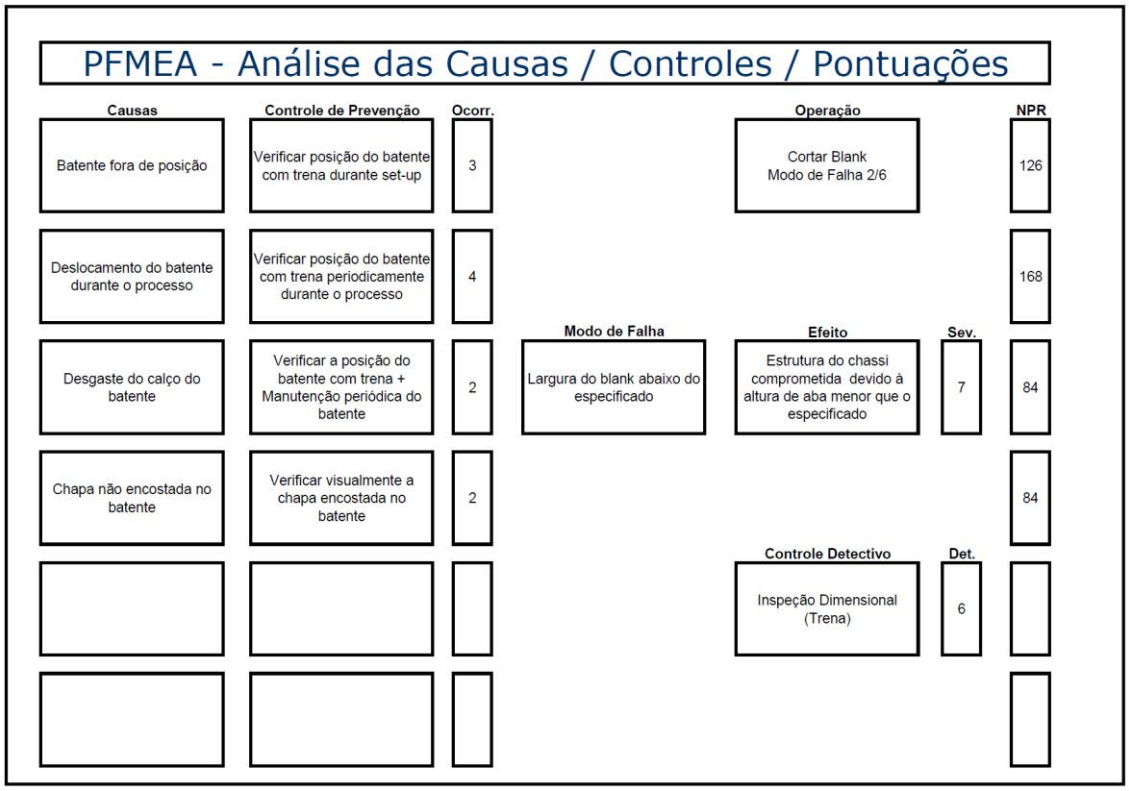
Operação	Função do Processo	Requisitos (Funções Exatas)	Modos de Falha	Efeitos	Sev.
Cortar Blank	Blank na medida especificada	Largura conforme medida especificada	Largura acima do especificado	Interferência na montagem do cliente devido à altura de aba maior que o especificado	7
			Largura abaixo do especificado	Estrutura do chassi comprometida devido à altura de aba menor que o especificado	7
		Esquadro conforme especificado	Blank fora de esquadro	Interferência na montagem do cliente devido à altura de aba maior que o especificado Estrutura do chassi comprometida devido à altura de aba menor que o especificado Interferência na montagem do cliente devido à furação deslocada em relação à forma da peça	6
		Blank sem flecha	Blank com flecha	Interferência na montagem do cliente devido à altura de aba maior que o especificado Estrutura do chassi comprometida devido à altura de aba menor que o especificado	6
		Blank com rebarba conforme especificado	Blank com rebarba acima do especificado	Torque falso na montagem da travessa do motor	6
		Blank sem riscos	Blank riscado	Peças com riscos	6

Fonte: (Elaboração Própria)

O segundo pré-formulário elaborado para utilização nas reuniões de FMEA propõe a análise das *Causas Potenciais*, *Controles de Processo* (de Prevenção e Detecção), e definição das pontuações de Severidade, Ocorrência e Detecção, para cálculo do RPN, além de incorporar as informações obtidas através do pré-formulário da Figura 9. Um exemplo deste formulário pode ser encontrado na Figura 10, aplicado a um dos modos de falha detectados na operação *Cortar Blank*. O modelo deste formulário está disponível no Apêndice B desta monografia. Assim como no pré-formulário da Figura 9, propõe-se que seu preenchimento seja vertical, ou seja, primeiramente os dados da coluna de *Causas* são preenchidos, posteriormente a coluna de *Controles de Prevenção*, seguido da *Ocorrência,* e finalizando com os campos de *Controle Detectivo* e *Detecção.*

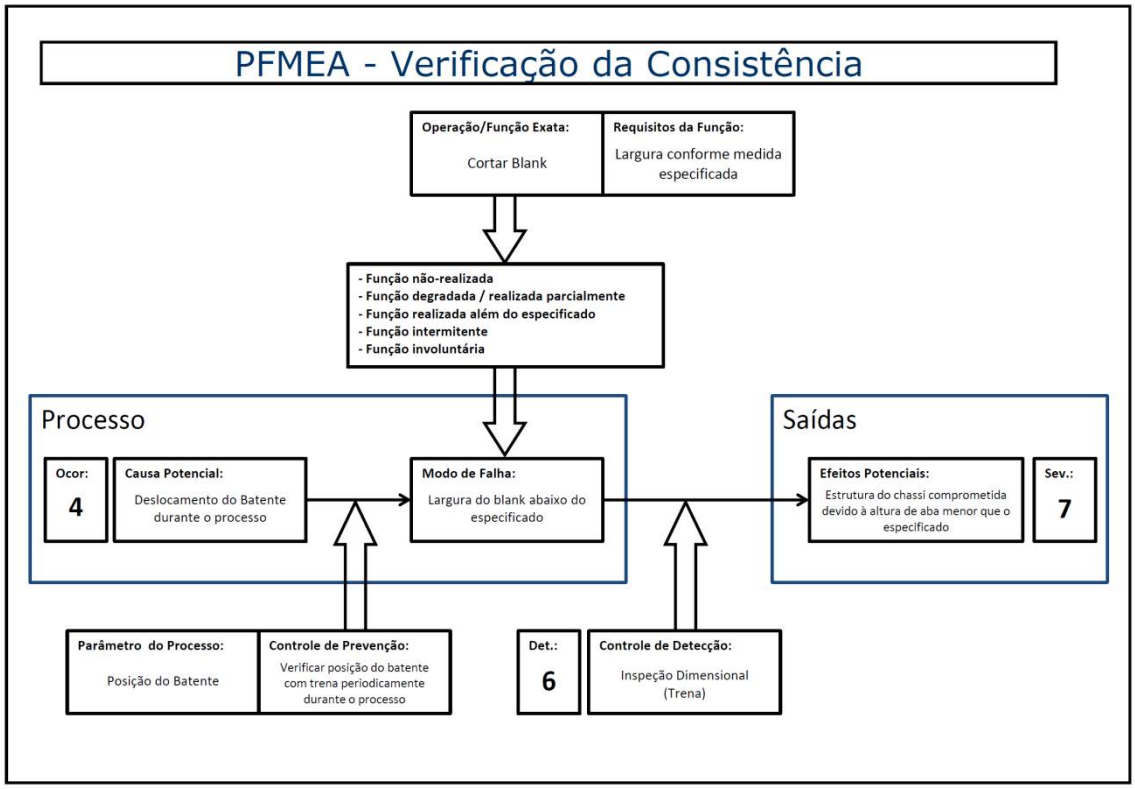
O último pré-formulário foi elaborado para que a equipe possa realizar uma verificação da consistência das informações desenvolvidas durante a reunião, e deve ser utilizado associado ao preenchimento dos pré-formulários da Figura 9 e Figura 10. Na Figura 11, é possível visualizar-se um exemplo deste pré-formulário, preenchido já após a redução das inconsistências do FMEA original, para o modo de falha *Largura do blank abaixo do especificado*, na operação *Cortar Blank.*

Figura 10 - Pré-Formulário de Análise das Causas, Controles e Pontuações de Risco



Fonte: (Elaboração Própria)

Figura 11 - Pré-Formulário de Verificação da Consistência do FMEA



Fonte: (Elaboração Própria)

Este pré-formulário reproduz o modelo proposto por Aguiar (2016), apresentado na Figura 8. Dessa forma, através de sua utilização, a equipe é capaz de testar a coerência das informações do FMEA aplicando o modelo conceitual de Aguiar (2016). Caso tais informações apresentem-se coerentes, estes dados podem ser transcritos para o formulário de FMEA de Processo. É importante ressaltar que cada um dos campos do pré-formulário da Figura 11 possui uma coluna correspondente no formulário de FMEA de Processo tradicional (Figura 2). O modelo deste pré-formulário está disponível no Apêndice C deste trabalho.

A vantagem da utilização deste pré-formulário da Figura 11 é o fato deste modelo ser mais intuitivo que o formato proposto pelos manuais de referência para o formulário de FMEA de Processo. Através dele, a equipe pode compreender melhor como os elementos do FMEA devem estar relacionados entre si e com o processo, para que não ocorram incertezas nas definições. Por exemplo, é possível verificar-se na Figura 11 que o *Modo de Falha* deve possuir relação com a *Função do Processo* e com os *Requisitos* associados à esta função. Dessa forma, o modo de falha somente poderá estar consistente caso sua descrição represente uma das cinco condições de não execução da função (descritas no pré-formulário para que a equipe tenha essa informação disponível durante a análise dos modos de falha).

Outra questão que deve ser verificada é se o *Modo de Falha* e a *Causa Potencial* estão relacionadas com o processo analisado. As falhas e causas definidas devem ser descritas através de elementos que estejam inseridos no contexto do processo analisado. Descrições que contenham elementos pertencentes à processos anteriores ou posteriores não podem ser considerados no FMEA. As setas horizontais indicam uma relação de causa e efeito entre as informações. Dessa forma, a causa estipulada deve obrigatoriamente provocar o modo de falha, assim como o modo de falha deve provocar o efeito descrito no pré-formulário. Um sinal de inconsistência nas informações do FMEA é a presença de causas, modos de falha ou efeitos que não estabeleçam uma cadeia de eventos coerente entre si.

O pré-formulário também dispõem os controles do processo de forma intuitiva, para permitir que a equipe defina-os de forma adequada. Através das setas verticais, é possível identificar em qual etapa da cadeia de eventos da falha os controles de processo têm sua atuação. *Controles de Prevenção* quebram a cadeia de eventos do FMEA impedindo que a causa transforme-se em falha. Já os *Controles de Detecção* quebram a

sequência evitando que a falha, já provocada, deixe o processo, gerando assim o efeito que será observado pelo cliente.

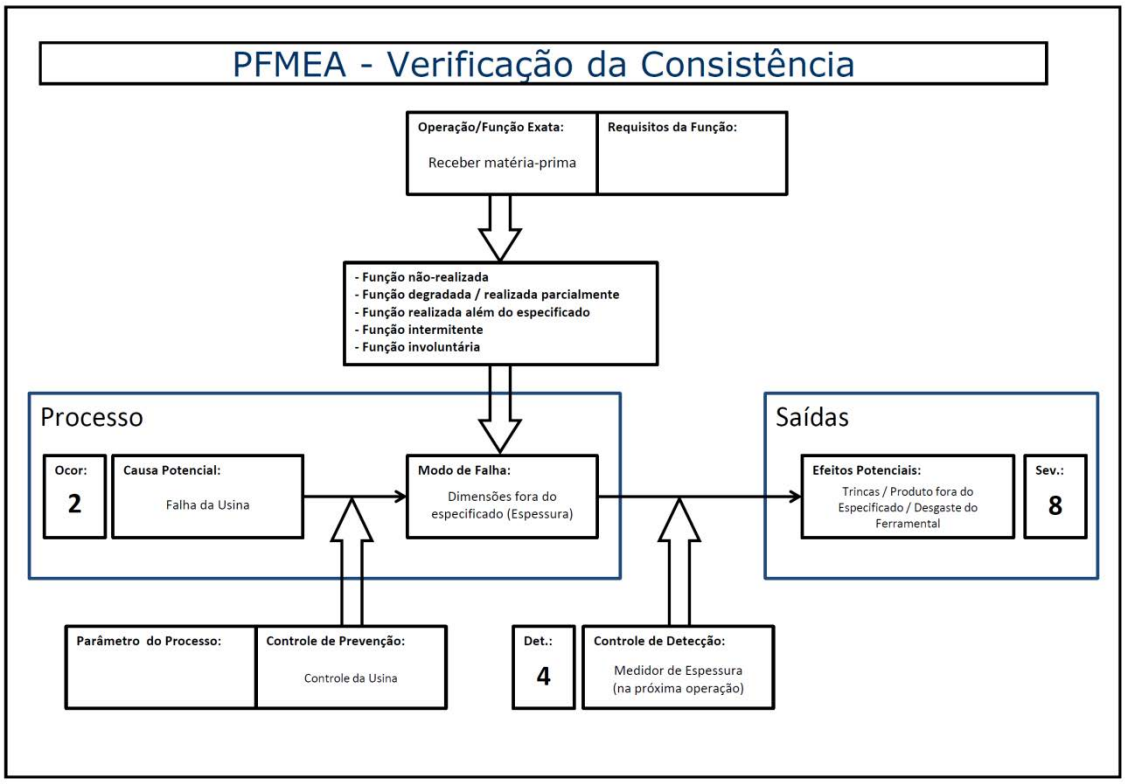
Um campo também é acrescentado no pré-formulário para auxiliar na atribuição dos controles: associado ao Controle de Processo está o campo *Parâmetro do Processo*, em que os parâmetros controláveis do equipamento ou do processo são definidos. Este campo contribui para evitar que o controle de processo seja descrito de forma demasiadamente genérica, pois a equipe somente será capaz de preencher esta informação caso a investigação seja aprofundada o suficiente para definir os parâmetros controláveis do processo.

Além disso, eles reforçam a ideia de que os controles preventivos devem atuar em parâmetros controláveis do processo. O campo de *Parâmetro do Processo* ainda contribui na definição correta da Causa Potencial. Para que a equipe possa atingir um nível de análise que permita a determinação do parâmetro que deve ser controlado no processo, a causa também deve estar definida em termos controláveis. Dessa forma, a equipe não será capaz de prosseguir o preenchimento deste pré-formulário definindo uma causa genérica, ou não relacionada ao processo.

Para exemplificar como a verificação da consistência é realizada através deste formulário, na Figura 12 é apresentado um pré-formulário preenchido com os dados da operação de *Recebimento de Matéria-Prima* do FMEA do estudo de caso da Figura 5. Fica claro através deste FMEA que uma das funções exatas desta operação é *Receber Matéria-Prima*, no entanto, os requisitos não foram identificados pela equipe, consequentemente deixando o campo de *Requisitos da Função* em branco neste pré-formulário, indicando uma inconsistência neste FMEA.

Prosseguindo a verificação, o modo de falha *Dimensões fora do Especificado (Espessura)* não respeita uma das cinco formas de não execução da função apresentadas no pré-formulário, quebrando a cadeia de eventos da falha deste FMEA. Na verdade, este modo de falha sequer possui relação com a operação de Recebimento, visto que esta não é uma operação que modifica as dimensões do produto. Para ilustrar o tipo de modo de falha que seria adequado nessa análise, basicamente em uma operação de Recebimento a não execução da função ocorre de duas formas: *Aprovar material não-conforme* e *Rejeitar material conforme*, visto que o requisito básico de uma operação de Recebimento de material consiste em verificar e inspecionar o material recebido.

Figura 12 - Exemplo de Verificação da Consistência do FMEA do Estudo de Caso na Operação de Recebimento



Fonte: (Elaboração Própria)

Visto que o modo de falha deste FMEA está incorreto, é possível deduzir-se que as causas e efeitos definidos para este caso também estão inconsistentes, pois a cadeia de eventos não possui lógica com este modo de falha definido pela equipe. Com o modo de falha incorreto, é impossível estabelecer-se uma cadeia de eventos coerente dentro do FMEA. A causa definida pela equipe neste caso, *Falha da Usina*, evidentemente não faz sentido, pois conforme o modelo, a causa deveria estar inserida no contexto do processo analisado, e uma falha do fornecedor não faz parte do contexto do Recebimento. Da mesma forma, o controle definido, *Controle da Usina*, assim como não representa um controle capaz de atuar no processo do Recebimento, está definido de uma forma demasiadamente genérica, não oferecendo um parâmetro controlável que elimine a causa definida pela equipe.

Por fim, o controle de Detecção *Medidor de Espessura (na próxima operação)* não possui atuação no final deste processo, pois está sendo aplicado na operação subsequente. Dessa forma, ele não possui eficácia no sentido de quebrar a cadeia de eventos do FMEA, impedindo que o produto com a falha manifestada deixe o processo

e chegue ao processo seguinte. Destas questões apresentadas através da análise do pré-formulário, uma única delas individualmente seria suficiente para classificar este FMEA como inconsistente, necessitando de intervenção da equipe para melhorar a qualidade destes dados.

O objetivo desta análise é permitir que a equipe detecte as inconsistências em seus FMEAs, e proceda a revisão das informações até que o FMEA seja de fato coerente. Os elementos do FMEA devem encaixar-se harmonicamente entre si, como pode ser observado no exemplo da Figura 11. Quando uma cadeia lógica de eventos puder ser estabelecida dentro do FMEA, os controles atuarem devidamente no processo, e as pontuações estiverem adequadas, a equipe terá condições de preencher o formulário de FMEA com dados robustos para auxiliar a alocação de recursos no âmbito de aumentar a confiabilidade do processo.

Através de uma forma organizada e estruturada de condução de uma análise de falhas, separando as atividades de desenvolvimento do FMEA com a realização do preenchimento de informações entre colunas, e com a utilização de um pré-formulário de verificação da consistência do FMEA, a equipe da organização deste estudo de caso apresentou maior facilidade para revisar as informações inconsistentes do FMEA original, eliminando as incoerências apresentadas no Capítulo 3.2 empregando este processo de trabalho, cuja aplicação e resultados são apresentadas no capítulo seguinte.

3.4. APLICAÇÃO DO PROCESSO DE REDUÇÃO DE INCONSISTÊNCIAS DO FMEA AO ESTUDO DE CASO

A revisão do FMEA da organização deste estudo de caso foi conduzida através da aplicação dos conceitos e ferramentas apresentados no Capítulo 3.3 desta monografia. O início desta força-tarefa é caracterizada pela composição da equipe de FMEA incumbida de realizar a revisão das informações do formulário, conforme exigido pelo cliente desta organização após auditoria realizada na empresa.

A configuração inicial da equipe era de 15 membros, contendo pessoas com diferentes níveis de *expertise* acerca dos processos estudados. Um dos membros convidados para a equipe era responsável pelo relacionamento com o cliente que solicitou a revisão do FMEA da organização. Esta ação vai ao encontro da recomendação de Teng *et al.* (2006), de que os membros da cadeia de fornecimento

automotivo devem possuir acesso às informações do cliente na elaboração de um FMEA. Tal medida permite que as informações referentes ao impacto da falha no cliente, características críticas do processo e dados históricos da qualidade do produto para este cliente estejam disponíveis à equipe, dada a impossibilidade de incluir o cliente na atividade de revisão do FMEA.

Na composição desta equipe também foi considerado a inclusão de um membro especialista em FMEA. Como descrito no Capítulo 2, Silverman e Johnson (2013) consideram como elemento fundamental para o sucesso da elaboração do FMEA a presença de um facilitador na equipe que seja especialista em FMEA, para conduzir de forma adequada as reuniões e orientar a equipe mediante às dificuldades técnicas sobre a ferramenta. Para uniformizar os conceitos de FMEA entre a equipe antes do início das reuniões, este membro especialista foi o responsável por ministrar um treinamento, focado na abordagem por processos aplicada ao FMEA, apresentada no Capítulo 3.3. O treinamento é uma atividade recomendada por Silverman e Johnson (2013) antes do desenvolvimento de um FMEA para aumentar a eficiência das reuniões, e para evitar dificuldades na equipe que possam provocar inconsistências durante a elaboração do formulário.

Nas reuniões em que a pauta consistia-se da análise de um processo especifico, eventualmente colaboradores responsáveis pela execução e gestão deste processo eram convidados, a fim de expressar informações adicionais sobre possíveis falhas no processo. Um fato curioso relacionado à contribuição destes membros durante a análise de falhas é a tendência que estas pessoas possuem de adotar uma *postura defensiva* nas reuniões, visto que há uma predisposição em omitir possíveis falhas, devido ao receio de alguma ação punitiva por parte da equipe de FMEA a este indivíduo. É importante que a equipe procure comunicar de forma clara aos membros convidados os reais objetivos da reunião de FMEA e da elaboração deste documento, especialmente nos casos em que os membros não são treinados neste método de análise de falhas. A contribuição dos colaboradores envolvidos diariamente com o processo durante o desenvolvimento do FMEA é substancial, desde que esta barreira da postura defensiva por parte dos responsáveis pelo processo seja eliminada, e as informações cruciais do processo não sejam omitidas temendo-se represálias da equipe.

Outra técnica aplicada, mais especificamente durante o levantamento das causas potenciais e controles de processo, foi a realização das reuniões de FMEA no local do

processo, próximo ao equipamento em que o processo é realizado, com um grupo mais enxuto de pessoas. Através da condução de entrevistas ao operador do equipamento, e uma análise detalhada da execução da atividade em si, informações que não estão disponíveis à equipe dentro de uma sala de reunião podem ser obtidas através de uma visita técnica ao processo, tornando mais robusto o FMEA por meio da corroboração das informações levantadas pela equipe.

Um exemplo relacionado a esta questão foi observado durante a investigação do controle preventivo para uma das causas do modo de falha *Chapa Oxidada*, na operação de *Decapagem Mecânica + Oleamento*, processo cuja uma das suas funções principais consiste-se na aplicação de jato de granalha sobre a matéria-prima da longarina, visando à remoção de oxidação e carepa da usina. Inicialmente, a equipe havia determinado durante uma reunião que o controle de prevenção da causa potencial *Volume de Granalha Baixo* seria o *Monitoramento da Velocidade da Turbina de Granalha*, através de um indicador posicionado no painel do operador.

Entretanto, após a realização de uma entrevista com o operador deste processo, foi possível identificar que o indicador mencionado na reunião não funcionava corretamente, e que a prática adotada pelo posto de trabalho para prevenir esta causa era realizar o monitoramento da velocidade da turbina de granalha através de um painel elétrico localizado em um ponto de difícil acesso no equipamento. Este exemplo ratifica a importância de confirmar-se as informações que são transcritas em um formulário de FMEA, pois aquilo que é praticado dentro do processo no cotidiano pode ser totalmente divergente do que a equipe conclui durante a elaboração de um FMEA. A visita técnica da equipe tem esse objetivo de possibilitar a identificação das nuances presentes nas práticas operacionais dentro de uma manufatura, aumentando a consistência do FMEA em relação à realidade praticada no processo.

Antes de realizar-se a análise dos resultados obtidos na aplicação deste processo de revisão e redução de inconsistências do FMEA, é importante ressaltar duas limitações presentes nos resultados deste estudo de caso: como esta atividade foi conduzida em um espaço de tempo limitado pela organização (de aproximadamente dois meses), a equipe não teve condições de analisar a consistência das pontuações de ocorrência do novo FMEA. Através da revisão do FMEA, diversos novos modos de falha e causas potenciais foram definidas pela equipe. Naturalmente, a equipe não dispunha dos dados estatísticos de ocorrência destas causas, pois até então eram causas

desconhecidas, considerando-se o contexto do FMEA desta organização. Dessa forma, a avaliação da ocorrência ocorreu de forma subjetiva, através de atributos definidos pela equipe e julgamento dos participantes.

Outra limitação está relacionada às ações recomendadas baseado no formulário revisado de FMEA. Devido ao tempo limitado da equipe para finalização do formulário, a definição de ações não fez parte do escopo desta atividade, portanto, esta questão não será abordada durante a análise dos resultados deste processo de revisão.

Baseado na sequência proposta por Teng e Ho (1996) na Figura 3 para a realização de um desenvolvimento de FMEA, e aplicando-se o modelo conceitual de Aguiar (2016) da abordagem por processos na elaboração da análise de falhas conforme estruturado no Capítulo 3.3, a revisão das informações do FMEA de Processo desta organização foi conduzida, através do preenchimento dos pré-formulários propostos nos Anexos A, B e C desta monografia. A seguir, uma discussão dos resultados obtidos com a aplicação deste processo de revisão proposto é apresentada, para pontuar as evoluções obtidas com o formulário revisado, em relação ao FMEA original desta organização. Para a realização desta análise, serão comparados os FMEAs (original e revisado) da operação de *Decapagem Mecânica + Oleamento*.

Na Figura 13, é apresentado o FMEA de Processo revisado da operação *Decapagem Mecânica + Oleamento*. Considerando-se a quantidade de modos de falha, o processo de revisão do FMEA desta organização permitiu o registro de novos modos de falha que, provavelmente, já eram de conhecimento da equipe do FMEA, entretanto, não estavam devidamente considerados no formulário original. Dos três modos de falha do FMEA inicial (*Qualidade Superficial, Espessura e Largura fora do especificado*), o FMEA revisado da Figura 13 passou a contar com sete modos de falha distintos.

Comparando-se os dois formulários, é possível concluir-se que houve uma melhora não somente no aspecto quantitativo do FMEA, mas sobretudo, uma melhora qualitativa das informações transcritas. Dos três modos de falha definidos no formulário original, os modos de falha *Espessura* e *Largura fora do especificado* não estavam relacionados com a função analisada, pois a operação de *Decapagem Mecânica + Oleamento*, cujas funções são de limpar e proteger a matéria-prima através de aplicação de jateamento de granalha e oleamento, não modificam estas características durante a execução do processo, prejudicando assim a análise dos riscos desta operação.

Figura 13 - FMEA revisado da Operação *Decapagem Mecânica + Oleamento*

ANÁLISE DOS MODOS DE FALHA E SEUS EFEITOS - FMEA DE PROCESSO

Operação	Requisitos (Funções Exatas)	Modo de Falha Potencial	Efeitos Potenciais da Falha	Sever	Class	Causas Potenciais da Falha	Controle Preventivo Atual	Ocor	Controle Detectivo Atual	Detec	NPR	Ações Recomendadas	Responsáveis pela ação/Prazo definido	Ações Resultantes				
														Ação Tomada	Sev	Occ	Det	NPR
01 - Decapagem Mecânica + Oleamento: Limpar e proteger a chapa	Chapa sem oxidação	Chapa oxidada	Falta de aderência do E-Coat Corrosão prematura do componente	6		Tempo de ação da granalha baixo	Monitorar a velocidade da esteira no painel do operador	3	Visual	4	72							
						Volume de granalha baixo	Monitorar a escala de velocidade da turbina no painel elétrico	4	Visual	4	96							
						Granalha desgastada	Troca periódica da granalha	2	Visual	4	48							
	Chapa sem carepa da usina	Chapa com carepa da usina	Desgaste excessivo de ferramental	6		Tempo de ação da granalha baixo	Monitorar a velocidade da esteira no painel do operador	3	Visual	4	72							
						Volume de granalha baixo	Monitorar a escala de velocidade da turbina no painel elétrico	4	Visual	4	96							
						Granalha desgastada	Troca periódica de granalha	2	Visual	4	48							
	Chapa sem riscos	Chapa riscada	Peças com riscos	6		Borracha do rolo desgastada	Verificar desgaste da borracha do rolo em manutenção periódica	1	Visual	4	24							
						Queda da chapa por falta de vácuo na ventosa	Monitorar manômetro de pressão do ar da ventosa periodicamente durante a operação	3	Visual	4	72							
						Queda de pressão no jato de ar do soprador	Realizar manutenção periódica do soprador	2	Visual	4	48							
						Bico do soprador entupido	Realizar manutenção periódica do soprador	2	Visual	4	48							
						Turbina fora da posição especificada	Verificar posição da turbina em manutenção periódica	2	Visual	4	48							
	Chapa sem marcas de granalha	Chapa com marcas de granalha	Peças com marcas	6		Tempo de ação da granalha excessivo	Verificar a velocidade da esteira no painel do operador	4	Visual	4	96							
						Queda de pressão no jato de ar do soprador	Realizar manutenção periódica do soprador	2	Visual	4	48							
						Bico do soprador entupido	Realizar manutenção periódica do soprador	2	Visual	4	48							
						Turbina fora da posição especificada	Verificar posição da turbina em manutenção periódica	2	Visual	4	48							
	Chapa oleada	Chapa sem óleo	Corrosão prematura do componente	4		Falta de óleo no reservatório	Acionar válvula manual de abastecimento do tanque quando faltar óleo	3	Visual	5	60							
						Bico do pulverizador entupido	Realizar manutenção periódica do pulverizador	2	Visual	5	40							
						Óleo muito viscoso	Controle periódico do óleo	1	Visual	5	20							
						Óleo pouco viscoso	Controle periódico do óleo	1	Visual	5	20							
						Queda da vazão do óleo	Acionar válvula manual para aumentar a vazão do óleo	3	Visual	5	60							
	Chapa sem rugosidade	Chapa com rugosidade excessiva	Baixa espessura da camada de tinta na pintura	6		Tempo de ação da granalha excessivo	Monitorar a velocidade da esteira no painel do operador	4	Visual	4	96							
	Chapa sem granalha	Chapa com granalha	Desgaste excessivo de ferramental	6		Queda de pressão no jato de ar do soprador	Realizar manutenção periódica do soprador	2	Visual	4	48							
						Bico do soprador entupido	Realizar manutenção periódica do soprador	2	Visual	4	48							
						Turbina fora da posição especificada	Verificar posição da turbina em manutenção periódica	2	Visual	4	48							
						Volume de granalha alto	Monitorar a escala de velocidade da turbina no painel elétrico	4	Visual	4	96							

Fonte: (Elaboração Própria)

O modo de falha restante, *Qualidade Superficial fora do especificado*, apesar de estar relacionado à função do processo, é incorreto por ser demasiadamente genérico. Este modo de falha, após o processo de revisão, pôde ser desmembrado pela equipe em seis modos de falha distintos, conforme apresentado na Figura 13: *Chapa oxidada, Chapa com carepa da usina, Chapa riscada, Chapa com marcas de granalha* e *Chapa com rugosidade excessiva*. Isso demonstra que o processo de revisão estruturado no Capítulo 3.3, aliado à aplicação dos pré-formulários, permitiu que a equipe desenvolvesse uma análise mais aprofundada do processo, evitando a definição de modos de falha genéricos, como o observado no formulário original, permitindo uma análise mais consistente dos riscos deste processo.

Outra inconsistência detectada durante a análise do extrato do formulário original apresentado na Figura 5 foram as causas descritas de forma muito genérica, não apresentando parâmetros controláveis do processo, como por exemplo *Parâmetros do processo fora do especificado* e *Problemas no equipamento*. Esta deficiência foi superada no formulário revisado, como pode ser observado na Figura 13. Os parâmetros do processo controláveis, antes descritos de forma genérica pela equipe, foram perfeitamente identificados durante a revisão.

Exemplos são vistos nas causas *Tempo de ação da granalha baixo/excessivo*, *Volume da granalha baixo/alto*, *Queda da vazão do óleo*, dentre outras. Da mesma forma, os possíveis problemas no equipamento causadores de falha mencionados no FMEA original foram avaliados de forma mais substancial: *Bico do soprador entupido, Borracha do rolo desgastada, Falta de vácuo na ventosa*, dentre outros exemplos contidos no formulário revisado.

O desenvolvimento das causas de forma mais detalhada, e em termos controláveis do processo, também permitiu que a equipe encontrasse todos os controles preventivos para estas causas dentro do processo. Neste quesito, o FMEA original não possuía nenhum controle definido, com todas estas células destinadas para este fim em branco no formulário. Analisando sob o aspecto do cliente, um FMEA com a coluna de controles de prevenção em branco transmite uma imagem fortemente negativa sobre a robustez deste processo, indicando que ou processo em questão é mal controlado pela organização, focando na detecção de falhas através de inspeção ao invés de eliminar suas origens através de prevenção, ou que o FMEA elaborado pela organização é *cosmético*, conforme sugerido por Cassanelli *et al.* (2006).

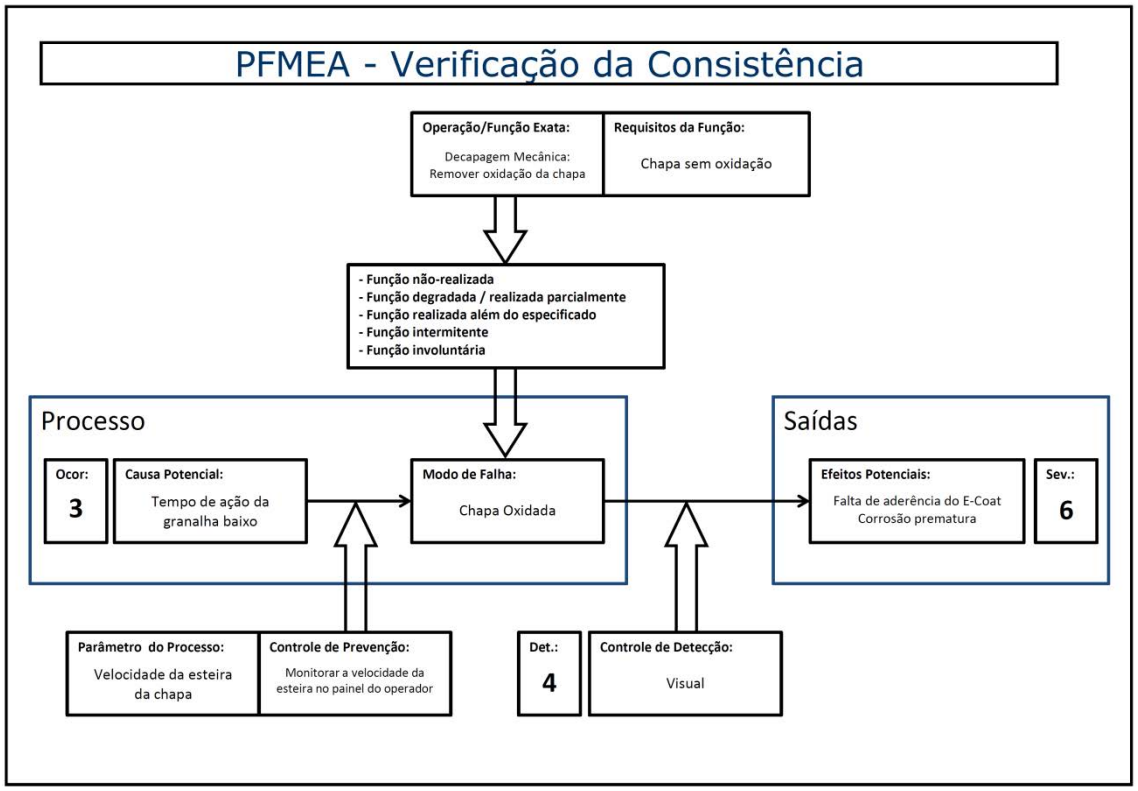
Entretanto, após a revisão, todas as causas encontradas durante a análise de falhas foram associadas aos seus devidos controles preventivos. Isso indica que não havia deficiência no processo decorrente de uma falta de controles preventivos, como o FMEA original da organização sugeria. A falta de informação sobre os controles de prevenção no formulário está na verdade associada ao processo parcamente estruturado de condução de uma análise de falhas, empregado pela equipe anteriormente ao processo de revisão.

Na Figura 14, um exemplo da verificação de consistência do FMEA revisado da Figura 13 é apresentada, aplicada ao modo de falha *Chapa Oxidada*. Novamente, verifica-se que os elementos do FMEA apresentam uma relação lógica entre si. O modo de falha *Chapa Oxidada* representa a não realização da função do processo de *Remover a oxidação da chapa.* Os efeitos estão descritos de forma técnica e apresentando as consequências da falha sob o ponto de vista do cliente interno, em *Falta de aderência do E-coat*, e do cliente externo, em *Corrosão prematura*. A causa *Tempo de ação da granalha baixo* pode ser encaixada no contexto do processo, e está relacionada ao modo de falha, pois uma velocidade elevada da chapa na esteira pode causar um tempo insuficiente de jateamento, reduzindo a eficiência do processo na remoção de oxidação.

Tendo como base esta comparação realizada entre o FMEA original e revisado, fica evidente que a aplicação do processo estruturado de revisão do FMEA atingiu plenamente seu objetivo de eliminar as diversas inconsistências presentes no FMEA de Processo desta organização. Qualitativamente, a evolução da consistência dos dados presentes no formulário revisado de FMEA é nítida. Através do formulário revisado de FMEA, a organização não somente é capaz de atender os requisitos da auditoria realizada pelo cliente, mas sobretudo, pode utilizar este FMEA na gestão de riscos do processo, e aumentar sua confiabilidade, tornando-o cada vez mais competitivo.

Entretanto, uma ressalva deve ser feita. Tais benefícios somente podem ser atingidos pela organização através do FMEA caso exista a disciplina na equipe de manter o documento devidamente atualizado e utilizá-lo em sua rotina de trabalho. Conforme definido por Sharin (2004), o FMEA deve ser visto pela organização como um *documento vivo*, e deve ser modificado sempre que novas informações do processo forem identificados pela equipe de FMEA. Palady (1997) afirma que a elaboração de um FMEA representa um alto custo para a organização, representado principalmente

Figura 14 - Avaliação do FMEA revisado na operação *Decapagem Mecânica + Oleamento*



Fonte: (Elaboração Própria)

pelo tempo gasto pela equipe de FMEA em diversas reuniões de desenvolvimento da análise de falhas. Caso o FMEA seja apropriadamente utilizado na gestão de risco e aumento da confiabilidade do processo, este montante gasto pela organização transforma-se em um investimento eficaz para a prevenção de falhas. Entretanto, caso a abordagem utilizada pela organização em relação ao método seja a de uma atividade com encerramento no momento da entrega do formulário de FMEA ao cliente, como forma de atender aos requisitos normativos dos sistemas de gestão da qualidade automotiva, a organização estará simplesmente desperdiçando os recursos financeiros gastos na elaboração do FMEA, sem extrair benefício nenhum desta despesa elevada, com exceção da possibilidade de manter seus contratos dentro da cadeia de fornecimento automotiva.

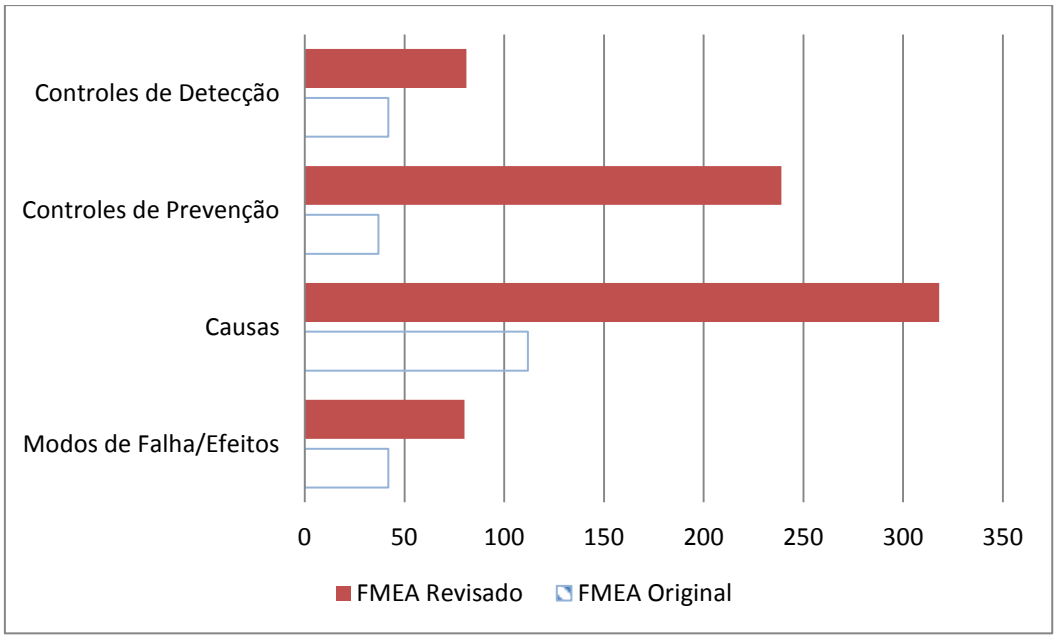
Quantitativamente, é possível observar que o FMEA revisado tornou-se mais robusto que o FMEA original, devido ao aumento da quantidade de dados que foram registrados pela equipe no formulário. Informações que antes estavam omitidas, ou combinadas em um único dado descrito de forma genérica, foram descritas de forma detalhada no formulário revisado, aumentando a precisão e a validade da análise, e

permitindo a avaliação do risco de falhas que já pertenciam ao processo, no entanto, eram desprezadas pela equipe durante a análise via FMEA.

Uma comparação quantitativa entre os dois FMEAs pode ser encontrada na Tabela 2. A comparação é realizada computando-se a quantidade de células preenchidas em ambos os formulários para os seguintes elementos: Modos de Falha/Efeitos, Causas, Controles de Prevenção e Controles de Detecção. Os dados são computados no levantamento mesmo para os casos em que as causas e controles de processo repetem-se em modos de falha distintos, pois cada falha representa uma cadeia de eventos diferente em que a causa e os controles foram considerados.

Na Figura 15, uma comparação gráfica entre os dados da tabela é apresentado. Observa-se que o FMEA do estudo de caso apresentou evolução em todos os seus elementos após a revisão. A equipe foi capaz de identificar praticamente o dobro de modos de falha que estavam presentes no formulário original de FMEA. Esta evolução pode ser atribuída especialmente à definição mais precisa das funções e dos requisitos de cada processo, e a forma com que os modos de falha são definidos a partir destas informações. O indicador da quantidade de controles de detecção identificados também apresentou evolução, entretanto, isso se deve ao crescimento da quantidade de modos de falha. A equipe foi capaz de definir de forma satisfatória os controles de detecção tanto no FMEA original quanto no FMEA revisado.

Figura 15 - Evolução do volume de dados do FMEA do estudo de caso



Fonte: (Elaboração Própria)

Tabela 2 - Levantamento da quantidade de dados presentes no FMEA de Processo da organização

Operação	FMEA Original				FMEA Revisado			
	MF / Efeitos	Causas	Controles Prevenção	Controles Detecção	MF / Efeitos	Causas	Controles Prevenção	Controles Detecção
Recebimento de Matéria-Prima	5	7	5	5	4	14	14	4
Decapagem Mecânica + Oleamento	3	12	0	3	7	25	25	7
Cortar blank	5	7	0	5	6	18	18	6
Calandrar	2	4	0	2	4	10	10	4
Rollformar	3	25	11	3	20	75	44	20
Puncionar CNC Soenen	6	22	10	6	9	41	22	10
Furar à Broca Manual	5	20	10	5	10	43	33	10
Cortar a Quente	4	4	0	4	6	34	24	6
Gravar Tipo	4	5	0	4	4	14	10	4
Desempenar	2	2	0	2	1	5	4	1
Lavar + Acabamento + Tipar Eixos	3	4	1	3	9	39	35	9
Total	**42**	**112**	**37**	**42**	**80**	**318**	**239**	**81**

Fonte: (Elaboração Própria)

A evolução mais significativa no FMEA está relacionada ao aumento na quantidade de causas potenciais e controles de prevenção identificados pela equipe no processo. O processo estruturado neste trabalho permitiu que a equipe triplicasse o número de causas e aumentasse em mais de seis vezes a quantidade de controles de prevenção definidos no FMEA original da organização. Certamente todas estas novas causas e controles de prevenção no contexto do FMEA já existiam e eram de conhecimento dos especialistas de cada processo. Entretanto, a falta de uma forma estruturada de conduzir a análise de falhas impediu que a equipe registrasse de forma adequada estas informações no formulário de FMEA da organização.

Isto representa um grande progresso na aplicação do FMEA. Para que a equipe possa atuar de forma efetiva na prevenção de falhas no processo, é fundamental que a equipe conheça todas as possíveis causas responsáveis por provocar os modos de falha do FMEA. A prevenção da falha somente pode ser obtida em um processo quando as causas são eliminadas, através da implementação de um controle de prevenção, de acordo com o modelo de abordagem por processos aplicada ao FMEA, mostrado na Figura 8. Conhecer de forma precisa as causas, e sabendo qual é o parâmetro do processo que pode ser controlado para eliminá-la é crucial para aumentar a confiabilidade através do FMEA, através da definição de um controle de prevenção que possa de fato controlar este parâmetro responsável por originar a causa potencial de uma falha.

Além disso, apresentar ao cliente um FMEA robusto, em que a análise de falhas foi feita de forma consistente e substancial, transmite uma imagem positiva do processo da organização. Teng *et al.* (2006) observam que, devido ao aumento da competitividade no mercado automotivo, as montadoras monitoram a qualidade dos fornecedores dentro da cadeia de fornecimento automotiva, para assegurar a qualidade de seu próprio produto final. O FMEA é uma ferramenta da qualidade que possibilita ao cliente monitorar se os processos de seus fornecedores são confiáveis o suficiente para assegurar a conformidade do produto, e se o fornecedor atua no sentido de reduzir o risco associado às falhas do processo através da recomendação de ações consistentes. Um FMEA mal elaborado acaba transmitindo uma imagem de que o processo dessa organização não é confiável, e que provavelmente não há controle sobre as variáveis do processo que provocam falhas que comprometam o seu cliente.

Finalizada a revisão do FMEA de Processo, a equipe deve proceder a revisão dos Planos de Controle do processo, registrando todos os controles de prevenção e detecção que não eram contemplados pelo FMEA original, bem como verificar se os controles já definidos são apropriados aos riscos mapeados no formulário revisado, aplicando-se a integração entre FMEA e Plano de Controle proposta por Teng e Ho (1996).

É importante também que a equipe realize a verificação da consistência das pontuações de Ocorrência do FMEA revisado. Como o número de causas aumentou consideravelmente no formulário, a equipe deve realizar um estudo estatístico da frequência destas novas causas (considerando-se o contexto do FMEA), para atribuir as pontuações de forma precisa, conforme os índices estabelecidos nas tabelas de referência. Com as pontuações verificadas, a equipe pode iniciar a recomendação de ações de melhoria do processo, baseada no mapeamento do risco do processo através do cálculo de RPN e critérios para atribuir a necessidade de tomada de ações.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

4.1. VERIFICAÇÃO DOS OBJETIVOS DA PESQUISA

O objetivo desta monografia foi propor um processo para redução de inconsistências comuns presentes em FMEAs de Processo de organizações da indústria automotiva. Para tanto, um estudo de caso foi conduzido, aplicando-se o processo desenvolvido em uma atividade de revisão de FMEA do processo de fabricação de longarinas, pertencente a uma organização *Tier 1* na cadeia de fornecimento automotiva.

Para a condução do estudo de caso, alguns objetivos específicos são definidos para fornecer o embasamento teórico necessário para esta tarefa, que consistem-se em descrever como o desenvolvimento do FMEA deve ser conduzido, discutir os benefícios e dificuldades enfrentadas pelas equipes na implementação do FMEA em uma organização da indústria automotiva, analisar as principais inconsistências cometidas pelas equipes durante o desenvolvimento de um FMEA, pautado no estudo de caso proposto, e a avaliar os resultados apresentados pelo processo de redução das inconsistências do FMEA, comparando o formulário revisado com o formulário original do estudo de caso.

No Capítulo 2 desta monografia, uma introdução aos conceitos fundamentais do método FMEA é realizada. Através de revisão bibliográfica, um breve histórico do FMEA é apresentado, e o significado dos conceitos técnicos e termos aplicados em uma análise de falhas são descritos, para fornecer a fundamentação teórica necessária ao estudo de caso. Um modelo de implementação do FMEA é sugerido, baseado no esquema proposto por Teng e Ho (1996).

Além disso, um panorama da utilização do FMEA na indústria automotiva é apresentado. É realizada uma contextualização do FMEA no sistema de gestão de qualidade automotiva, bem como a relação existente entre FMEA e Plano de Controle é demonstrada. São discutidas, através de revisão bibliográfica, questões organizacionais que interferem no uso do FMEA em organizações automotivas, e dificuldades técnicas do método, que apresentam-se como obstáculos para a equipe durante o desenvolvimento de uma análise de falhas.

O Capítulo 3 é dedicado à condução do estudo de caso. É realizada uma introdução ao estudo de caso, apresentando o cenário em que o método proposto por esta monografia é aplicado. É feito um estudo sobre as inconsistências mais comuns cometidas pelas equipes de FMEA, em que os dados incorretos presentes no formulário de FMEA da organização em questão são utilizados para exemplificar cada uma das inconsistências, e como elas contribuem para prejudicar a validade da análise de falhas elaborada pela equipe de FMEA.

Ainda discute-se a aplicação do processo proposto para eliminar as inconsistências presentes nos formulários de FMEA de Processo das organizações da indústria automotiva. O processo para conduzir a revisão do FMEA é estruturado, através da utilização de pré-formulários, e aplicando-se o modelo conceitual de FMEA desenvolvido por Aguiar (2016) para verificar a consistência das informações presentes no formulário desenvolvido pela equipe de FMEA. Os resultados obtidos pela aplicação do processo na revisão do FMEA deste estudo de caso são avaliados, comparando-se a evolução obtida entre o formulário revisado e o original, nos aspectos quantitativos e qualitativos do FMEA.

4.2. CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA

O FMEA é um método de análise de falhas que está totalmente incorporado aos sistemas de gestão da qualidade automotiva. Seja pela necessidade de aumentar a confiabilidade do processo através da prevenção de falhas, ou para atender à requisitos normativos, as organizações desenvolvem FMEAs de Processo rotineiramente, tornando-se uma prática comum nas indústrias do setor automotivo. Entretanto, mesmo sendo um método amplamente difundido neste mercado, frequentemente as organizações falham em utilizar plenamente o FMEA na gestão de riscos do processo e na prevenção de falhas.

Questões corporativas contribuem para este cenário, mas sobretudo, as dificuldades técnicas e conceituais envolvidas na aplicação do FMEA, dada a complexidade incorporada pelo método, apresentam-se como principal barreira para as equipes interpretarem completamente a dinâmica do método, resultando na elaboração de análises de falha deficientes, repletas de inconsistências que tornam a aplicação do FMEA ineficaz nas organizações. Embora estes FMEAs muitas vezes atendam ao propósito inicial da organização de satisfazer um requisito normativo de seu cliente, o

alto custo do desenvolvimento de um FMEA não se justifica, quando este montante pode ser transformado em investimento preventivo e gerar a redução do custo da falha no processo a longo prazo, quando o método é aplicado de forma efetiva.

As complexidades técnicas residem principalmente na dificuldade que as equipes possuem de interpretar corretamente a relação de causa e efeito existente no contexto do FMEA. Essa dificuldade é acentuada pelo formato do formulário de FMEA tradicional, que é pouco intuitivo, e não permite uma visualização lógica da relação existente entre os elementos que compõe a análise de falhas, dificultando sua interpretação.

A consequência disso são as inconsistências cometidas pelas equipes durante a elaboração de um FMEA de Processo, representadas pela descrição genérica dos dados no formulário, atribuição de causas e modos de falha que não possuem relação com o processo e efeitos que não consideram a perspectiva do cliente. Como efeito cascata destas inconsistências, os controles de processo atribuídos tornam-se ineficazes e as pontuações frequentemente não representam a realidade do processo, prejudicando a gestão dos riscos do processo, o que resulta na recomendação de ações ineficazes alocadas de forma incorreta devido a uma deficiência no mapeamento do risco.

Dessa forma, existe a necessidade de mitigar a dificuldade técnica enfrentada pelas equipes durante o desenvolvimento do FMEA. Sendo assim, a proposta do processo de redução das suas inconsistências tem o propósito de oferecer uma forma mais intuitiva de desenvolver a análise de falhas, através da utilização de pré-formulários de desenvolvimento do FMEA nas reuniões, mais intuitivos que o formulário tradicional, e a implementação da Verificação da Consistência, baseada no modelo conceitual proposto por Aguiar (2016), em que a abordagem por processos aplicada ao contexto do FMEA é empregada. A equipe realiza uma avaliação dos dados apurados nos pré-formulários através do modelo proposto, antes da transcrição dos dados ao formulário tradicional, facilitando a interpretação da relação entre causa e efeito, e eliminando assim a dificuldade das equipes de interpretação da dinâmica do FMEA.

Através do estudo de caso da aplicação deste processo de redução de inconsistências em uma organização automotiva, verificou-se que o emprego desta forma estruturada de desenvolver o FMEA obteve resultados positivos, tanto quantitativamente quanto qualitativamente. O FMEA revisado apresentou um

significativo aumento de dados, dobrando o número de modos de falha identificados, triplicando a quantidade de causas encontradas, e aumentando em mais de seis vezes a quantidade de controles de prevenção identificados pela equipe durante a revisão do FMEA da organização. Além disso, as informações presentes no formulário revisado do FMEA possuem uma relação lógica entre si, sendo coerentes com a realidade do processo estudado. São descritos de forma mais precisa, apresentando um verdadeiro mapa de riscos do processo.

Com este FMEA revisado, a equipe é capaz de implementar uma gestão de riscos eficiente, visando ao aumento da confiabilidade do processo. Entretanto, a elaboração de um FMEA consistente por si só não é suficiente para que a organização possa aproveitar plenamente os benefícios que a implementação do método pode oferecer. É necessário que a organização aborde o FMEA como uma *ferramenta viva*, que periodicamente deve ser revisada pela equipe, conforme novas informações a respeito do processo são descobertas, e que deve ser constantemente utilizada para definir ações de caráter preventivo, visando à redução dos riscos do processo e à melhoria contínua.

O processo desenvolvido para eliminar inconsistências pode ser aplicado plenamente em qualquer organização que incorpora o FMEA ao seu sistema de gestão da qualidade, não sendo limitado à indústria automotiva. Devido à simplicidade de sua aplicação, por consistir-se apenas da utilização de pré-formulários, um treinamento para a equipe sobre os conceitos aplicados neste processo é suficiente para possibilitar sua utilização dentro da organização. A simplicidade é fundamental para a devida aplicação do processo no ambiente corporativo, visto que existem diversas abordagens propostas na literatura científica que combinam ferramentas matemáticas e de auxílio à decisão, com o objetivo de eliminar as deficiências do FMEA tradicional, entretanto, pelo fato de incorporarem ferramentas muitas vezes mais complexas que o próprio FMEA, não encontram uma grande aceitação nas organizações, devido a grande dificuldade de serem implementadas sem o aporte científico necessário para tal, ou sem o auxílio de *softwares*.

Quanto às contribuições acadêmicas desta pesquisa, o processo proposto por esta monografia auxilia a preencher a lacuna existente na literatura sobre FMEA no que se refere à formas de tornar as informações do formulário de análise de falhas mais robusta. Atuando em uma das principais causas pelas quais as equipes elaboram FMEAs pouco eficazes, o processo de redução de inconsistências, através do uso da Abordagem

por Processos aplicada ao FMEA, propõe a elaboração de pré-formulários que tornam a atividade de desenvolvimento de análise de falhas mais intuitiva, permitindo que a equipe seja capaz de desenvolver FMEAs com informações mais técnicas e precisas referentes ao processo. Além disso, o pré-formulário de Verificação da Consistência materializa o modelo conceitual desenvolvido por Aguiar (2016) no contexto das reuniões de FMEA, permitindo sua aplicação por parte da equipe.

4.3. RECOMENDAÇÕES PARA NOVAS PESQUISAS

Apesar do FMEA ser uma ferramenta importante na prevenção de falhas de um processo e na gestão de riscos, existem deficiências apresentadas pelo método que podem comprometer a sua utilização eficaz dentro das organizações. Dessa forma, existe margem para a pesquisa em campos pouco explorados pela literatura.

Um desdobramento proposto para o processo desenvolvido nesta monografia em pesquisas futuras é a integração do processo de redução de inconsistências do FMEA ao Plano de Controle. Teng e Ho (1996) enfatizam a importância da integração dos dados entre o FMEA e o Plano de Controle. Da mesma forma que as organizações elaboram FMEAs inconsistentes com bastante frequência, pressupõe-se que os Planos de Controle destas organizações também não sejam adequados à realidade do processo. Combinado à Verificação de Consistência do FMEA, o modelo poderia ser ampliado para avaliar a consistência dos dados do Plano de Controle. Dessa forma, seria possível verificar se existe uma conexão lógica entre estes dois documentos, e se as práticas descritas no Plano de Controle realmente são eficazes para manter o processo operando conforme planejado.

Outra possibilidade de pesquisa é relacionada à definição das pontuações de Severidade, Ocorrência e Detecção. Na literatura científica, existem diversos estudos relacionados à abordagens alternativas para o cálculo do RPN, e a combinação de métodos de auxílio à decisão, como AHP e *lógica fuzzy*, para a atribuição da pontuação dos três fatores de risco. No entanto, são métodos de difícil aplicação e pouco intuitivos. Existe a necessidade de desenvolver-se um modelo de verificação da consistência destes três fatores de risco, o que aumentaria a robustez do mapeamento dos riscos do processo através das pontuações e do cálculo do RPN.

Um campo relacionado ao estudo do FMEA pouco explorado pela literatura é o desenvolvimento de métodos para avaliar a eficiência da implementação do FMEA dentro de uma organização. Conforme abordado por Pollock (2005), é importante que a organização seja capaz de mensurar os ganhos obtidos através da implementação e utilização do FMEA. Frequentemente as equipes consideram o desenvolvimento do FMEA uma atividade estressante e enfadonha, necessária apenas para cumprir os requisitos do cliente, porém que não resulta em benefícios para a organização. Essa cultura existe principalmente porque as organizações falham em apresentar de forma clara os benefícios e prejuízos obtidos durante a implementação de um programa de FMEA. Dessa forma, um modelo para avaliar o impacto da implementação do FMEA em indicadores de custos, confiabilidade, satisfação do cliente, dentre outros parâmetros, seria útil para que a organização possa avaliar a eficiência de um FMEA não em termos intangíveis, mas sim em valores tangíveis e passíveis de serem transformados em indicadores, possibilitando a criação de um *feedback* consistente da atividade desenvolvida pela equipe.

Finalmente, uma possibilidade de pesquisa baseada no processo de redução de inconsistências do FMEA é o desenvolvimento de um *software* para auxiliar as equipes durante o desenvolvimento da análise de falhas aplicando-se o modelo proposto. A utilização de uma plataforma eletrônica em substituição aos pré-formulários pode auxiliar a equipe não somente em termos de agilizar seu preenchimento e a transcrição dos dados ao formulário de FMEA e do Plano de Controle, mas sobretudo, realizar a verificação eletrônica da coerência dos dados do FMEA através de um algoritmo que reproduza o modelo presente no pré-formulário de Verificação de Consistência, em que os dados do FMEA são confrontados com as informações presentes em um banco de dados do processo, avaliando automaticamente se os dados levantados pela equipe durante o desenvolvimento da análise de falhas irão gerar um FMEA livre de inconsistências.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 9001:2008:** Sistemas de Gestão da Qualidade - Requisitos. 2. ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2008. 28 p.

AGUIAR, D. C. **Avaliação de sistemas de prevenção de falhas em processos de manufatura na indústria automotiva com metodologia de auxílio à decisão.** 2007. 135f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2007.

AGUIAR, D. C. **Modelo conceitual para a aplicação de FMEA de processo na indústria automotiva**. 2016. 135 p. Tese (Doutor em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

AGUIAR, D. C., MELLO, C. H. P. FMEA de processo: uma proposta de aplicação baseada nos conceitos da ISO 9001:2000. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 28., 2008, Rio de Janeiro. **Anais eletrônicos...** Rio de Janeiro: ABEPRO, 2008. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2008_TN_STO_070_501_10838.pdf>. Acesso em: 29 abr. 2016.

AGUIAR, D. C., SALOMON, V. A. P. Levantamento de erros na aplicação de FMEA de processo em empresas dos níveis mais inferiores da cadeia de fornecimento da indústria automotiva. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 26, 2006. Fortaleza. **Anais eletrônicos...** Rio de Janeiro: ABEPRO, 2006. Disponível em: < http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2006_TR470320_7283.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2016.

AGUIAR, D. C., SALOMON, V. A. P. Avaliação da prevenção de falhas em processos utilizando métodos de tomada de decisão. **Produção**, v. 17, n. 3, p. 502-519, 2007.

AGUIAR, D. C., SALOMON, V. A. P., MELLO, C. H. P. An ISO 9001 based approach for the implementation of process FMEA in the Brazilian automotive industry. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 32, n. 6, p. 589–602, 2015.

AGUIAR, D. C., SOUZA, H. J. C., SALOMON, V. A. P. An AHP application to evaluate scoring criteria for Failure Mode and Effect Analysis (FMEA). **International Journal of the Analytic Hierarchy Process**, v. 2, n.1, p. 3–13, 2010.

AHSEN, A. V. Cost-oriented failure mode and effects analysis. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 25, n. 5, p. 466–476, 2008.

AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP. **Advanced Product Quality Planning (APQP) and Control Plan.** Southfield, MI: AIAG, 1995. 114 p.

AUTOMOTIVE INDUSTRY ACTION GROUP. **Potential Failure Mode and Effects Analysis (FMEA).** 4th. ed. Southfield, MI: AIAG, 2008. 142 p.

BAURA, G. D. **Engineering Ethics:** An industrial perspective. Burlington, MA: Elsevier Academic Press, 2006. 219 p.

CARLSON, C. S. **Effective FMEAs:** Achieving safe, reliable, and economical products and processes using Failure Mode and Effects Analysis. Hoboken, New Jersey: John Wiley e Sons Inc., 2012. 464 p.:

CARLSON, C. S. Understanding and applying the fundamentals of FMEAs. In: 2014 ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM (RAMS), 2014, Colorado Springs, CO. **Proceedings...** IEEE, 2014. 35 p.

CASSANELLI, G., FANTINI, F., SERRA, S. S. G. Reliability in automotive electronics: a case study applied to diesel engine control. **Microelectronics Reliability**, v. 43, n. 9–11, p. 1411–1416, 2003.

CASSANELLI, G., MURA, G., FANTINI, F., VANZI, M., PLANO, B. Failure Analysis-assisted FMEA. **Microelectronics Reliability**, v. 46, n. 9–11, p. 1795–1799, 2006.

CHANG, K. H., CHANG, Y. C., LAI, P. T. Applying the concept of exponential approach to enhance the assessment capability of FMEA. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 25, n. 6, p. 1413–1427, 2014.

DALE, B. G., SHAW, P. Failure mode and effects analysis in the U.K. motor industry. A state-of-the-art study. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 6, n. 3, p. 179–188, 1990.

ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA. US Department of Defense. **US MIL-STD-1629A:** Procedures for performing a failure mode effects and criticality analysis. Washington D.C.: US Department of Defense, 1980. 54 p.

ESTORILIO, C., POSSO, R. K. The reduction of irregularities in the use of "Process FMEA." **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 27, n. 6, p. 721–733, 2010.

FORD DESIGN INSTITUTE. **Failure Mode and Effects Analysis**. v. 4.1. Dearborn, MI: Ford Motor Company, 2004. 290 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/TS 16949:2009:** Quality management systems - Particular requirements for the application of ISO 9001:2008 for automotive production and relevant service part organizations. 3th. ed. Genebra, Suíça: ISO, 2009. 39 p.

JOHNSON, K. G., KHAN, M. K. A study into the use of the process failure mode and effects analysis (PFMEA) in the automotive industry in the UK. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 139, n. 1, p. 348-356, 2003.

KHORSHIDI, H. A., GUNAWAN, I., IBRAHIM, M. Y. Applying UGF concept to enhance the assessment capability of FMEA. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 32, n. 3, p. 1085–1093, 2016.

KMENTA, S., ISHII, K. (2000). Scenario-Based FMEA: A life cycle cost perspective. In: ASME DESIGN ENGINEERING TECHNICAL CONFERENCES. **Proceedings...** Baltimore, MD, 2000.

KRASICH, M. Can failure modes and effects analysis assure a reliable product?. In: ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM, RAMS, 2007, Orlando, FL. **Proceedings...** Orlando, FL, 2007. p. 277-281.

KUMAR, S., SHARMA, V., KUMARI. M. Reliability improvement of modern aircraft engine through failure modes and effects analysis of rotor support system. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 28, n. 6, p. 675–687, 2011.

LIU, H.-C., LIU, L., LIU, N. Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review. **Expert Systems with Applications**, v. 40, n. 2, p. 828–838, 2013.

LIU, H.-C., YOU, J.-X., DING, X.-F., SU, Q. Improving risk evaluation in FMEA with a hybrid multiple criteria decision making method. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 32, n. 7, p. 763–782, 2015.

LIU, L., SHUAI, M., WANG, Z., LI, P. Use-related risk analysis for medical devices based on improved FMEA. **Work**, v. 41, p. 5860–5865, 2012.

MANDAL, S., MAITI, J. Risk analysis using FMEA: Fuzzy similarity value and possibility theory based approach. **Expert Systems with Applications**, v. 41, n. 7, p. 3527–3537, 2014.

MIGUEL, P. A. C. Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução. **Produção**, v. 17, n. 1, p. 216–229, 2007.

NAKANO, D. Métodos de Pesquisa Adotados na Engenharia de Produção e Gestão de Operações. In: MIGUEL, P. A. C. (Organizador). **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações.** 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

MIKULAK, R., MCDERMOTT, R., BEAUREGARD, M. **The basics of FMEA**. 2nd. ed. Nova York, NY: CRC Press, 2009.

PACIAROTTI, C., MAZZUTO, G., D'ETTORRE, D. A revised FMEA application to the quality control management. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 31, n. 7, p. 788–810, 2014.

PALADY, P. **Análise dos Modos de Falha e Efeitos:** Prevendo e prevenindo problemas antes que ocorram. São Paulo: IMAN, 1997.

POLLOCK, S. **Create a Simple Framework To Validate FMEA Performance**. Six Sigma Forum Magazine, USA, p. 27–34.

PUENTE, J., PINO, R., PRIORE, P., FUENTE, D. D. LA. A decision support system for applying failure mode and effects analysis. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 19, n. 2, p. 137–150, 2002.

SANT'ANNA, A. P. Probabilistic priority numbers for failure modes and effects analysis. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 29, n. 3, p. 349–362, 2012.

SAURIN, T. A., RIBEIRO, J. L. D., VIDOR, G. A framework for assessing poka-yoke devices. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 31, n. 3, p. 358–366.

SHARIN, A. Integration of FMEA and the Kano model: An exploratory examination. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 21, p. 731–746, 2004.

SHARMA, R. K., KUMAR, D., KUMAR, P. Modeling and analysing system failure behaviour using RCA, FMEA and NHPPP models. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 24, n. 5, p. 525–546, 2007.

SILVERMAN, M., JOHNSON, J. R. FMEA on FMEA. In: ANNUAL RELIABILITY AND MAINTAINABILITY SYMPOSIUM (RAMS), Orlando, FL, 2013. **Proceedings...** Orlando, FL, 2013. p. 1-5.

SOUZA, R. V. B. D., CARPINETTI, L. C. R. A FMEA-based approach to prioritize waste reduction in lean implementation. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 31, n. 4, p. 346–366, 2014.

TENG, S. G., HO, S. M., SHUMAR, D., LIU, P. C. Implementing FMEA in a collaborative supply chain environment. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 23, n. 2, p. 179–196, 2006.

TENG, S. G., HO, S. M. Failure mode and effects analysis. **International Journal of Quality & Reliability Management**, v. 13, n. 5, p. 8–26, 1996.

WANG, J., ARCIDIACONO, G. Automative Reliability. **Quality and Reliability Engineering International**, v. 20, n. 2, p. iii–iv, 2004.

WU, Z., MING, X. G., SONG, W., ZHU, B., XU, Z. Nuclear product design knowledge system based on FMEA method in new product development. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 39, n. 3, p. 2191–2203, 2014.

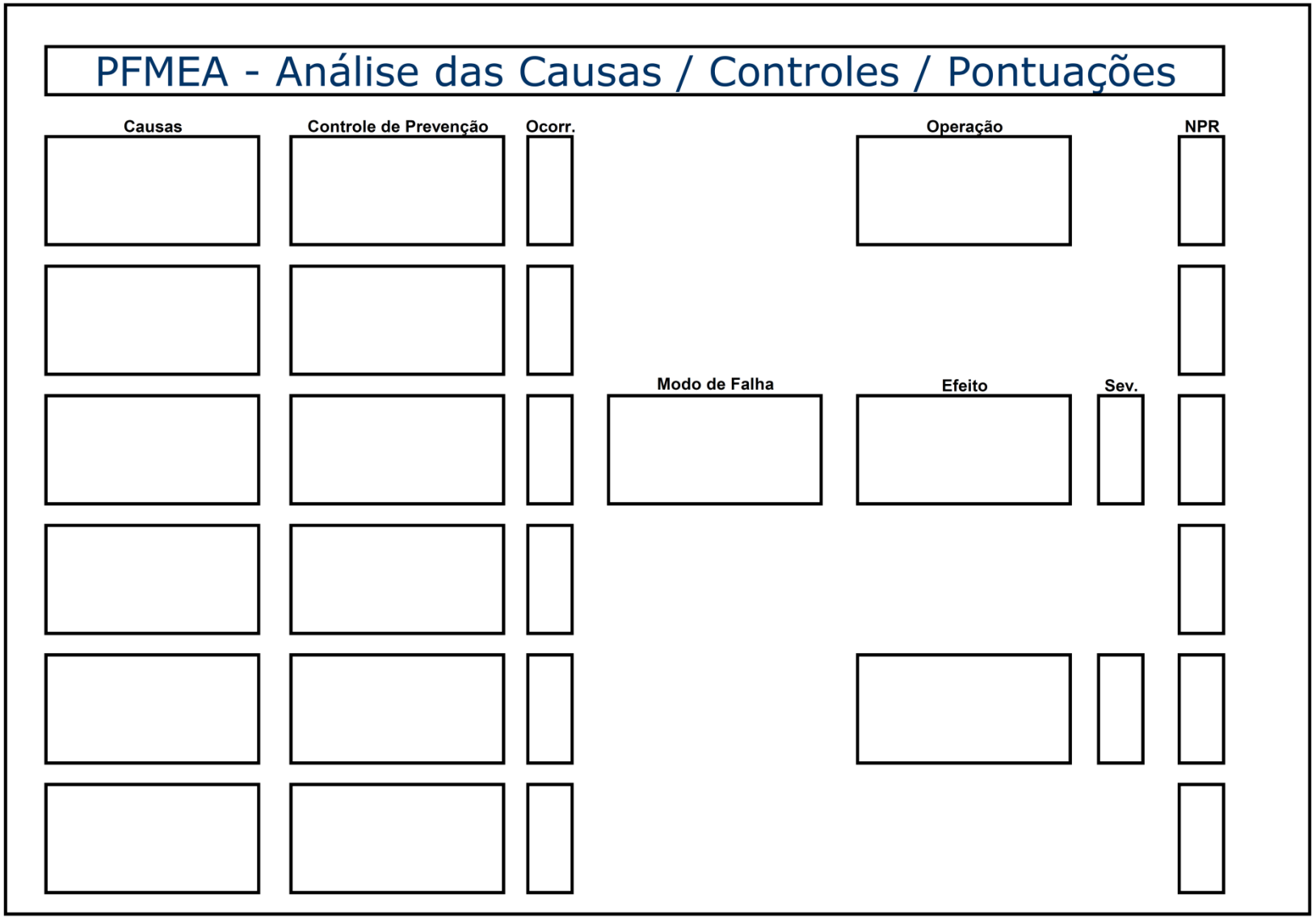
YIN, R. K. **Estudo De Caso:** Planejamento e Metodos. 2.ed. Porto Alegre: Bookman, 2001. 205 p.

APÊNDICE A - PRÉ-FORMULÁRIO DE AVALIAÇÃO DAS FUNÇÕES, MODOS DE FALHA E EFEITOS DO FMEA

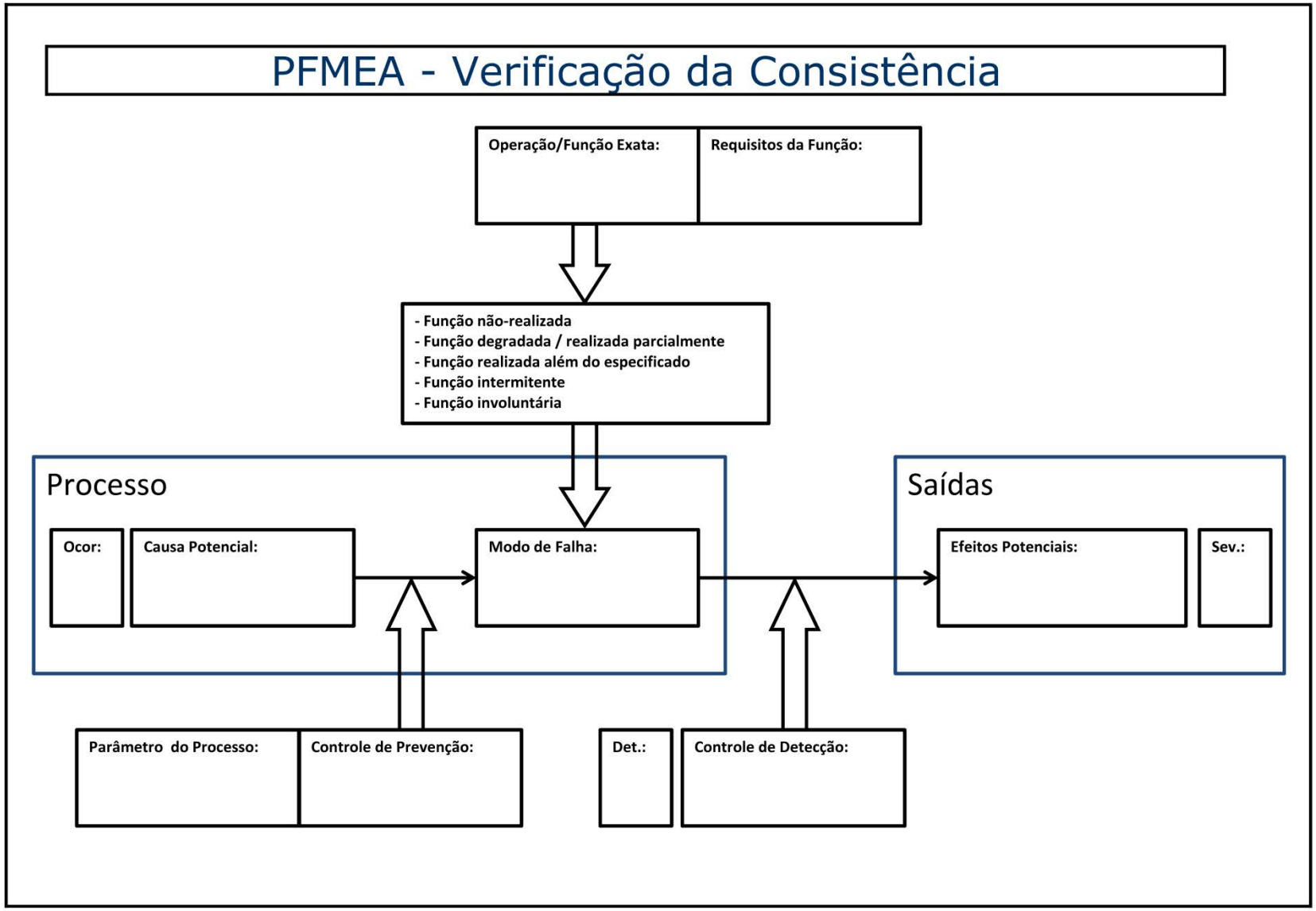
PFMEA - Identificação das Funções / Modos de Falha / Efeitos

Operação	Função do Processo	Requisitos (Funções Exatas)	Modos de Falha	Efeitos	Sev.

APÊNDICE B - PRÉ-FORMULÁRIO DE ANÁLISE DAS CAUSAS, CONTROLES E PONTUAÇÕES DE RISCO



APÊNDICE C - PRÉ-FORMULÁRIO DE VERIFICAÇÃO DA CONSISTÊNCIA DO FMEA



ANEXO A - TABELA DE CRITÉRIO PARA AVALIAÇÃO DE SEVERIDADE

Efeito	Critério: Severidade do Efeito no Produto (Efeito no Cliente)	Pontuação	Efeito	Critério: Severidade do Efeito no Processo (Efeito na Fabricação/Montagem)
Falha em Atender Requisitos Regulatórios e/ou de Segurança	Modo de Falha Potencial afeta a segurança da operação do veículo e/ou envolve não-conformidade com regulamentação governamental sem aviso prévio.	**10**	**Falha em Atender Requisitos Regulatórios e/ou de Segurança**	Pode colocar o operador em risco (máquina ou conjunto) sem aviso prévio.
	Modo de Falha Potencial afeta a segurança da operação do veículo e/ou envolve não-conformidade com regulamentação governamental com aviso prévio.	**9**		Pode colocar o operador em risco (máquina ou conjunto) com aviso prévio.
Perda ou Degradação da Função Primária	Perda da função primária (veículo inoperável, não afeta a operação segura do veículo).	**8**	**Grande Perturbação**	100% da produção pode ter de ser sucateada. Parada de linha de produção ou do embarque
	Degradação da função primária (veículo operável, mas com nível reduzido de performance).	**7**	**Perturbação Significante**	Uma porção da corrida de produção pode ter de ser sucateada. Desvios do processo primário incluindo queda da velocidade da linha de produção ou acréscimo de mão-de-obra.
Perda ou Degradação da Função Secundária	Perda de função secundária (veículo operável, mas funções de conforto / conveniência inoperáveis).	**6**	**Perturbação Moderada**	100% da corrida de produção pode ter de ser retrabalhada fora da linha de produção e aceita.
	Degradação da função secundária (veículo operável, mas funções de conforto / conveniência com nível reduzido de performance).	**5**		Uma porção da corrida de produção pode ter de ser retrabalhada fora da linha de produção e aceita.
	Aparência ou Ruído Audível, veículo operável, item não conforme e percebido pela maioria dos clientes (>75%)	**4**		100% da corrida de produção pode ter de ser retrabalhada na estação de trabalho depois de ser processada
	Aparência ou Ruído Audível, veículo operável, item não conforme e percebido por muitos dos clientes (50%)	**3**		Uma porção da corrida de produção pode ter de ser retrabalhada na estação de trabalho depois de ser processada
	Aparência ou Ruído Audível, veículo operável, item não conforme e percebido por clientes discriminadores (<25%)	**2**	**Pequena perturbação**	Leve inconveniência ao processo, operação ou operador
Sem efeito	Sem efeito discernível	**1**	**Sem efeito**	Sem efeito discernível

Fonte: Traduzido de AIAG (2008)

ANEXO B - TABELA DE CRITÉRIO PARA AVALIAÇÃO DE OCORRÊNCIA

Probabilidade da Falha	Critério: Ocorrência da Causa - PFMEA (incidentes por itens/veículos)	Pontuação
Muito alta	≥ 100 em cada mil ≥ 1 em 10	**10**
Alta	50 em cada mil 1 em 20	**9**
	20 em cada mil 1 em 50	**8**
	10 em cada mil 1 em 100	**7**
Moderada	2 em cada mil 1 em 500	**6**
	0,5 em cada mil 1 em 2.000	**5**
	0,1 em cada mil 1 em 10.000	**4**
Baixa	0,01 em cada mil 1 em 100.000	**3**
	0,001 em cada mil 1 em 1.000.000	**2**
Muito baixa	A falha é eliminada através de controle preventivo	**1**

Fonte: Traduzido de AIAG (2008)

ANEXO C - TABELA DE CRITÉRIO PARA AVALIAÇÃO DE DETECÇÃO

Oportunidade para Detecção	Critério: Probabilidade de Detecção por Controle de Processo	Pontuação	Probabilidade de Detecção
Sem oportunidade de detecção	Sem controle de processo atualmente; Não pode ser detectado ou não é analisado.	10	Quase Impossível
Não é provável que seja detectado em qualquer estágio	Modo de Falha e/ou Erro (Causa) não é facilmente detectado (por exemplo, auditorias aleatórias)	9	Muito Remota
Detecção do Problema Pós-Processamento	Detecção do Modo de Falha pós-processado pelo operador através de meios visuais / táteis / audíveis	8	Remota
Detecção do Problema na Fonte	Detecção do Modo de Falha na estação pelo operador através de meios visuais / táteis / audíveis ou pós-processado através de uso de medição por atributo (passa/não-passa, checagem de torque manual/chave com "clique", etc.)	7	Muito Baixa
Detecção do Problema Pós-Processamento	Detecção do Modo de Falha pós-processado pelo operador através do uso de medição por variável ou na estação pelo operador através do uso de medição por atributo (passa/não-passa, checagem de torque manual/chave com "clique", etc.)	6	Baixa
Detecção do Problema na Fonte	Detecção do Modo de Falha ou Erro (Causa) na estação pelo operador através do uso de medição por variável ou por controles automáticos na estação que irão detectar peças discrepantes e notificar o operador (luz, sinal sonoro, etc.). Medição realizada no setup e checagem de primeira peça (somente para causas de set-up).	5	Moderado
Detecção do Problema Pós-Processamento	Detecção do Modo de Falha pós-processado por controles automatizados que irão detectar peças discrepantes e bloquear a peça para prevenir processamento posterior.	4	Moderadamente Alto
Detecção do Problema na Fonte	Detecção do Modo de Falha na estação por controles automatizados que irão detectar peças discrepantes e bloquear a peça na estação para prevenir processamento posterior.	3	Alta
Detecção do Erro e/ou Prevenção do Problema	Detecção do Erro (Causa) na estação por controles automatizados que irão detectar o erro e prevenir peças discrepantes de serem fabricadas.	2	Muito Alta
Detecção não Aplicável; Prevenção do Erro	Prevenção do Erro (Causa) como resultado de projeto de dispositivo, projeto de máquina ou projeto da peça. Peças discrepantes não podem ser fabricadas porque o item é à prova de erros devido ao projeto do processo/produto	1	Quase Certa

Fonte: Traduzido de AIAG (2008)