

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AUTOMOTIVA

ANTÔNIO ALBINO DE MAGALHÃES NETO

**USO DE FMEA NA MELHORIA DA DURABILIDADE DE UM ACOPLAMENTO
MECÂNICO APLICADO EM MOTOR DE PARTIDA**

Joinville
2014

ANTÔNIO ALBINO DE MAGALHÃES NETO

**USO DE FMEA NA MELHORIA DA DURABILIDADE DE UM ACOPLAMENTO
MECÂNICO APLICADO EM MOTOR DE PARTIDA**

Trabalho apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Automotiva da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para a obtenção do título de Engenheiro Automotivo.

Orientador: James Schipmann Eger

Coordenador: Leonel Rincon Cancino

Joinville

2014

Magalhães Neto, Antônio Albino de, 1988-

Uso de FMEA na melhoria da durabilidade de um acoplamento mecânico aplicado em motor de partida/

Antônio Albino de Magalhães Neto. – 2014

Orientador: James Schipmann Eger

Trabalho de conclusão de curso (graduação) –
Universidade Federal de Santa Catarina, Curso de Engenharia Automotiva, 2014.

1. Durabilidade do acoplamento mecânico. 2. FMEA . 3. Modos de Falha.

ANTÔNIO ALBINO DE MAGALHÃES NETO

**USO DE FMEA NA MELHORIA DA DURABILIDADE DE UM ACOPLAMENTO
MECÂNICO APLICADO EM MOTOR DE PARTIDA**

Esse trabalho foi julgado adequado para a obtenção do título de Engenheiro Automotivo e aprovado em sua forma final pela Comissão examinadora e pelo Curso de Graduação em Engenharia Automotiva da Universidade Federal de Santa Catarina.

Prof. Leonel Rincon Cancino, Dr.
Coordenador do Curso

Banca examinadora:

Prof. James Schipmann Eger, Dr.
Orientador

Prof. Cristiano Vasconcellos Ferreira, Dr.

Prof. Maurício de Campos Porath, Dr.

Aos meus pais, Antônio e Vera, que não mediram esforços para tornar meus projetos possíveis e me apoiaram com confiança no meu potencial.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a DEUS pelas dádivas de sucesso, pela saúde, pela família, e pelos amigos.

À minha família, que, embora distante, foi meu porto seguro quando precisei de apoio e segurança para prosseguir com a faculdade de engenharia em um curso novo, que apresentou inúmeros obstáculos durante esses cinco anos. Só estas palavras não expressam meu reconhecimento por vocês.

Aos meus avós, que Deus os tenha, que souberam como ninguém plantar a semente do bem, da integridade e da perseverança na minha família, fonte de frutos que colho até hoje.

Ao meu amor, Marcela, que sempre me apoiou e me incentivou a crescer, conhece meu coração e minhas limitações como ninguém e me ajudou nos momentos em que me senti confuso durante a faculdade.

Aos colaboradores da Zen S.A., que não só proporcionaram um ambiente de trabalho de verdadeira cooperação como também a justificativa deste trabalho, o projeto de melhoria de um dos produtos da empresa.

Ao meu orientador James e também à professora Andréia. A experiência de vocês ajudou na organização estrutural deste trabalho, que teve que passar por várias alterações até este ponto.

Finalmente, e não poderia me esquecer, agradeço à minha família em Joinville. Sim, vocês são como minha segunda família e esta é a maior gratidão que posso demonstrar em palavras.

“O futuro pertence àqueles que acreditam na beleza de seus sonhos”

(Eleanor Roosevelt)

RESUMO

Diante do cenário competitivo da indústria automotiva no Brasil e no mundo, a confiabilidade dos produtos é um dos fatores determinantes no sucesso dos mesmos. A Zen S.A. Indústria Metalúrgica está inserida neste mercado com amplo portfólio de impulsores de partida, acoplamentos mecânicos, tensionadores e polias, voltados para o mercado de reposição de peças como também para montadoras de veículos. Este trabalho trata de um projeto de melhoria de desempenho em durabilidade de um acoplamento mecânico específico, aplicado em motores de partida para automóveis da linha pesada, como motores MWM, Cummins dentre outros. Este acoplamento teve sua venda temporariamente bloqueada devido reclamações frequentes de clientes, os quais alegavam falha prematura do produto. Será apresentado todo o processo de aplicação de um FMEA voltado para geração de soluções técnicas para o produto e para o sistema de qualidade referente a este, de maneira que os eventuais custos na alteração do projeto sejam justificados por métodos científicos consistentes. O FMEA é o método mais utilizado na indústria automotiva para este fim (AIAG, 2011), uma vez que é voltada para a identificação das causas específicas de falhas, fornecendo base para ação na redução da ocorrência e severidade das mesmas e melhorando os mecanismos de detecção (BERTSCHE, 2008). Com a aplicação deste FMEA foi possível, na prática, alterar alguns parâmetros de projeto dos componentes do acoplamento mecânico, que teve seu desempenho em durabilidade mensurado em teste de bancada.

Palavras-chaves: durabilidade, acoplamento mecânico, FMEA, modos de falha.

ABSTRACT

In view of the competitive scenario where the automobile industry is inserted in Brazil and worldwide, product reliability is decisive for their success. Zen S.A. Indústria Metalúrgica operates in this market area with a vast portfolio of starter motors, mechanical coupling, belt tensioners and alternator pulleys for both replacement service and car manufacturers. This paper deals with a project to enhance the durability of a given mechanical coupling applied to large goods vehicles starter motors, such as MWM, Cummins and the like, which had its sales temporarily suspended after frequent customer complaints about the allegedly premature failure of components. The entire process of application of a specific FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) aimed at reaching technical solutions for the product and its quality assurance system will be presented, so that incidental expenses to modify the project are justified by more consistent scientific methods. Within this framework, the FMEA is the most widely used tool in the car industry for that purpose (AIAG, 2011), since it has been designed to identify precise causes of failures, as well as to furnish the basis for reducing their occurrence and impact and improving detection devices (BERTSCHE, 2008). In practice, the application of this FMEA allowed us to change a set of project parameters of the mechanical coupling whose durability was measured in a bench test.

Keywords: durability, mechanical coupling, FMEA, failure mode.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – SPV.	13
Figura 2 - Desempenho do AM em testes de bancada.	17
Figura 3 - Pinhões quebrados em teste de bancada do AM.	26
Figura 4 - Deslocamento do pino em relação a base do eixo.	27
Figura 5 - Deslocamento perpendicular do pino em relação ao eixo.	27
Figura 6 - Deslocamento da bucha do pinhão.	28
Figura 7 - Bucha trincada/cisalhada.	38
Figura 8 - Bucha ovalizada e trincada.	39
Figura 9 - Análise de montagem de bucha.	39
Figura 10 – Diagrama de probabilidade de pontos para diâmetro do furo do eixo.	40
Figura 11 - Distribuição normal do diâmetro do furo do eixo.	41
Figura 12 - Diagrama de probabilidade de pontos para diâmetro pino.	42
Figura 13 - Distribuição de pontos para diâmetro do pino pós TT.	42
Figura 14 - Diagrama de probabilidade de pontos para perpendicularismo do pino.	43
Figura 15 - Análise metalográfica da interface entre pino e eixo.	47
Figura 16 - Comparação entre perfil do dente real e perfil do dente teórico.	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Lista de componentes do AM.....	14
Tabela 2 - Exemplo de planilha padrão do FMEA.....	23
Tabela 3 - Modos de falha, efeitos e índices de ocorrência.....	29
Tabela 4 - Modos de falha, causas potenciais e índices de ocorrência.....	30
Tabela 5 - Controles atuais e índices de detecção.....	31
Tabela 6 - Índices RPN para causas potenciais de falha.....	32
Tabela 7 - Métodos de detecção propostos.....	33
Tabela 8 - Instrumentos de medição usados nos estudos estatísticos.....	35
Tabela 9 - Métodos para análise metalográfica do pinhão.....	36
Tabela 10 - Comparação de porosidade entre pinhão Zen e pinhão CONCORRENTE A.....	45
Tabela 11 - Ações recomendadas.....	51

LISTA DE ABREVIACOES E SIGLAS

AIAG	Automotive International Action Group (Grupo de Ação da Indria Automotiva)
AM	Acoplamento mecânico
APQP	Advanced product quality planning (Planejamento Avançado da Qualidade do Produto)
CNC	Computer Numerical Control (Controle Numérico Computadorizado)
D	ndice de detecção do FMEA
DOE	Design of Experiments (Planejamento de Experimentos)
FMEA	Failure Mode and Effects Analysis (Análise de Modo e Efeito de Falha)
FTA	Faut Tree Analisys (Análise de árvore de Falhas)
IP	Impulsor de partida
LIE	Limite inferior de especificação
LSE	Limite superior de especificação
MCI	Motor a combustão interna
MP	Motor de partida
O	ndice de ocorrência do FMEA
PPM	Parte por milhão
RPN	Risk Priority Number (Número de Prioridade de Risco)
S	ndice de severidade do FMEA
SAE	Society of Automotive Engineers (Sociedade dos Engenheiros Automotivos)
SPV	Sistema de partida do veículo
TCC	Trabalho de conclusão de curso
TT	Tratamento térmico

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. Zen S.A. Indústria Metalúrgica.....	12
1.2. Acoplamentos Mecânicos Aplicados em Motores de Partida	12
1.3. O Produto.....	14
1.4. O Teste em bancada.....	15
1.5. Justificativa	16
1.6. Objetivos.....	17
1.6.1. Objetivo geral	17
1.6.2. Objetivos específicos.....	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1. Análise de Modo e Efeito de Falha (FMEA).....	19
2.1.1. Definição e normatização	19
2.1.2. Metodologia para aplicação do FMEA	20
2.1.3. Classificação.....	23
3. MATERIAIS E MÉTODOS	25
3.1. Metodologia de trabalho	25
3.2. Principais modos de falha observados em testes de bancada	26
3.3. Modos de falha, efeitos e índices de severidade	28
3.4. Causas potenciais e índices de ocorrência	29
3.5. Controles atuais e índices de detecção.....	30
3.6. Métodos de detecção propostos	32
3.7. Metodologia para aplicação de métodos de detecção propostos	34
3.7.1. Análise de montagem de bucha no pinhão	34
3.7.2. Análise estatística do processo de usinagem do furo do eixo e diâmetro do pino	34
3.7.3. Análise estatística do alinhamento do pino montado ao eixo	35
3.7.4. Análise metalográfica do pinhão e Benchmark com concorrentes diretos.....	35
3.7.5. Análise metalográfica da interface entre pino e furo do eixo.....	36
3.7.6. Escaneamento tridimensional do pinhão	37
3.8. Resultados dos métodos de detecção propostos	38
3.8.1. Análise de montagem de bucha no pinhão	38

3.8.2.	Estudo estatístico de usinagem do furo do eixo	40
3.8.3.	Estudo estatístico de diâmetro do pino.....	41
3.8.4.	Análise estatística do alinhamento do pino	43
3.8.5.	Análise metalográfica do pinhão e Benchmark com concorrentes diretos.....	44
3.8.6.	Análise metalográfica da interface entre pino e furo do eixo.....	46
3.8.7.	Escaneamento tridimensional do pinhão	48
4.	RESULTADOS	49
4.1.	Parâmetros que mais influenciam na falha	49
4.2.	Ações recomendadas.....	51
5.	CONCLUSÃO	52
	REFERÊNCIAS	54
	ANEXOS	56
	ANEXO A - Critérios para atribuição de índice de severidade no FMEA.....	56
	ANEXO B - Critérios para atribuição de índice de detecção no FMEA	57

1. INTRODUÇÃO

1.1. Zen S.A. Indústria Metalúrgica

A Zen S.A. atua, sobretudo, na fabricação de impulsores de partida, planetárias, polias de roda livre e rígidas para aplicações em motores de partida e alternadores. Internamente a Zen transforma aço em semiacabados em processos de conformação, usina-os e monta produtos para o mercado automotivo original – montadoras de automóveis e sistemistas – e de reposição de peças.

Situada em Brusque, Santa Catarina, e fundada em 1960, a Zen é referência em fabricação de peças automotivas e vende seus produtos para mais de 60 países. Isto é resultado de uma visão pautada em inovação, qualidade e responsabilidade social e ambiental.

1.2. Acoplamentos Mecânicos Aplicados em Motores de Partida

Os impulsores de partida (IP) são componentes fundamentais para o funcionamento do veículo e têm funções muito específicas. Trata-se de peças responsáveis pela transmissão de torque do eixo induzido do motor de partida (MP) para a cremalheira do motor a combustão interna (MCI) do veículo.

O MCI necessita de uma fonte externa de energia capaz de fornecer rotação ao virabrequim, possibilitando ignição de combustível dentro dos cilindros, até que a energia oriunda destas ignições vençam as inércias e as forças de resistência ao movimento. Em outras palavras, somente depois que o motor “pegue”, o MP pode parar de fornecer torque à cremalheira.

Existe um intervalo de tempo no qual o MCI já não necessita do MP para que o virabrequim e as bielas movimentem os pistões, mas ainda sim o IP está acoplado à cremalheira do MCI. Nesta situação, a cremalheira passa a fornecer torque ao IP, visto que a rotação estacionária do MCI é superior à rotação do MP.

Por estes motivos, o conjunto MP e IP devem garantir:

- Acoplamento do IP na cremalheira do MCI quando o motorista gira a chave do veículo no contato;

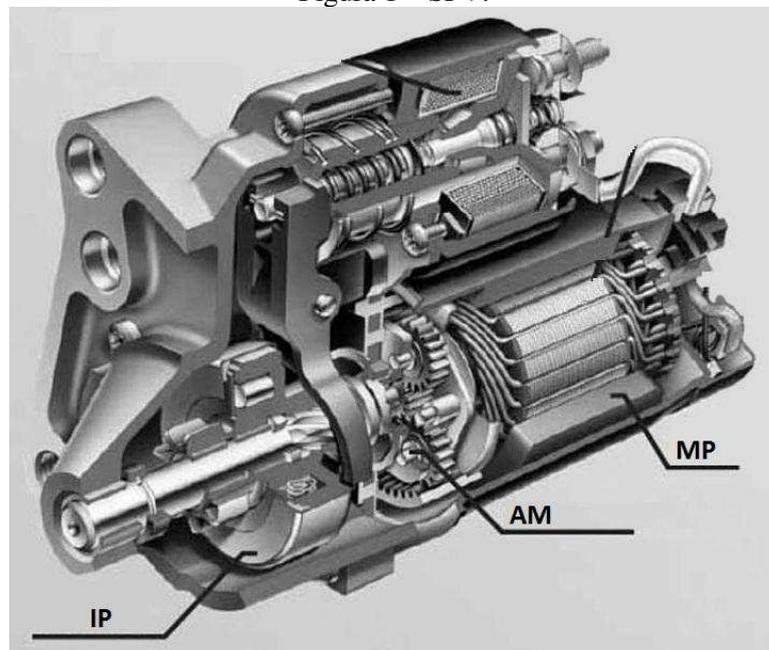
- Transmissão de torque do eixo induzido do MP à cremalheira do MCI até que a ignição nos pistões seja suficiente para mantê-lo em movimento;
- Inibição de transmissão de torque da cremalheira do MCI ao eixo induzido do MP, evitando a danificação do mesmo.

Além destas funções básicas, estes subsistemas devem ser leves e também o mais robustos quanto possível, sendo a redução de peso e a confiabilidade¹ fatores presentes no processo de desenvolvimento de produtos voltados à indústria automotiva no mundo.

Uma alternativa usada na tentativa de redução de peso do sistema de partida do veículo (SPV) é o uso de um subsistema adicional que consiste em um dispositivo de amplificação de rotação do MP, ou seja, uma “caixa” de engrenagens com configuração planetária. Isto viabiliza o uso de um MP menor. Neste trabalho, esta redução do tipo planetária será referenciada simplesmente como acoplamento mecânico (AM). A função global do AM é transmitir torque do MP para o impulsor de partida.

A figura 1 apresenta um tipo específico de sistema de partida, do qual este trabalho trata.

Figura 1 – SPV.



Fonte: <<http://comunidadefiladelfiadelondrina.blogspot.com.br/2013/08/motor-de-arranque-pajero-28-conserto.html>>. Acesso em: 06 jun. 2014.

¹Confiabilidade: Capacidade de um item desempenhar uma função requerida sob condições especificadas, durante um dado intervalo de tempo (ABNT. NBR 5462, 1994).

1.3. O Produto

O acoplamento mecânico objeto de estudo deste trabalho transmite torque do MP para o IP. O eixo induzido do MP contém uma engrenagem central, denominada Sun Gear. Esta engrenagem central transmite torque a três engrenagens que transladam ao redor da mesma, estas são denominadas Planetary Gears e são suportadas por pinos montados a um eixo, o qual representa a saída de torque do AM (NAUNHEIMER, 2011). Estas engrenagens também estão em contato com uma coroa com engrenamento interno, a qual é montada em um mancal o qual também é montado ao mesmo eixo.

A tabela 1 apresenta os principais componentes do AM e a descrição dos mesmos que aponta a relevância deles para este trabalho.

Tabela 1 - Lista de componentes do AM.

IMAGEM DO COMPONENTE	DESCRIÇÃO/FUNÇÃO
 <p data-bbox="512 1290 576 1323">Eixo</p>	<p data-bbox="874 949 1423 1115">Conformado e usinado internamente na Zen. Na ponta do eixo são montados três pinos que suportam os pinhões. O IP é montado nas estrias helicoidais. O eixo recebe torque do MP e transmite-o para o IP.</p>
 <p data-bbox="496 1671 592 1704">Mancal</p>	<p data-bbox="874 1330 1391 1458">Fabricado em alumínio injetado também na Zen. Suporta a coroa e comporta também o eixo mancalizando-o com uma bucha de bronze.</p>

Continua..

Continuação...

 <p style="text-align: center;">Coroa</p>	<p>Montada ao mancal e apoiada também por sapatas de borracha. Fabricada em aço sinterizado e comprada pela Zen. Consiste no trilho dos pinhões.</p>
 <p style="text-align: center;">Pinos</p>	<p>São montados por interferência em furos usinados na ponta do eixo. São fabricados em aço, comprados pela Zen e então montados ao eixo por uma prensa hidro-pneumática. Têm função de suportar os pinhões (Planetary Gears).</p>
 <p style="text-align: center;">Pinhões</p>	<p>São as Planetary Gears do AM. São também comprados pela Zen sem a bucha, fabricados em aço sinterizado. A bucha é montada na Zen por interferência na mesma prensa que monta os pinos no eixo. Têm função de transmitir torque do eixo induzido do MP para o eixo. As buchas devem ser recalçadas nos pinhões.</p>

Fonte: Zen S.A. Indústria Metalúrgica.

O AM é montado em um MP aplicado em motores diesel de grande porte para o mercado automotivo como MWM, Cummins dentre outros. Existem também outros componentes como anéis de pressurização e arruelas que não estão citados na tabela 1.

1.4. O Teste em bancada

O AM em questão foi criado e homologado em 2008 e desde então foram feitos 27 testes em bancada para mensurar o desempenho do produto. A bancada contém um MCI a diesel modelo Mercedes-Benz OM 352 com o sistema de partida acoplado, ou seja, MP com IP e AM acoplados.

São feitas partidas simultâneas que são contadas por um sistema de aquisição de sinal. O critério de aprovação da peça é baseado em quantas partidas o sistema é capaz de fazer atendendo aos requisitos específicos do teste, os quais não serão explicitados aqui. O objetivo para este AM é durar pelo menos um número de ciclos definido, referido neste trabalho como k ciclos. A falha é caracterizada pela incapacidade do AM em cumprir suas funções, as quais foram citadas no item 1.2, como também se durante a operação do mesmo, o sistema apresentar ruído ou vibração excessivos.

Ao final do teste uma equipe é responsável por desmontar o AM e verificar o estado dos componentes, identificar as falhas (se for o caso), os modos de falha, e emitir um relatório com fotos e descrição completa do propósito do teste e o resultado do mesmo.

1.5. Justificativa

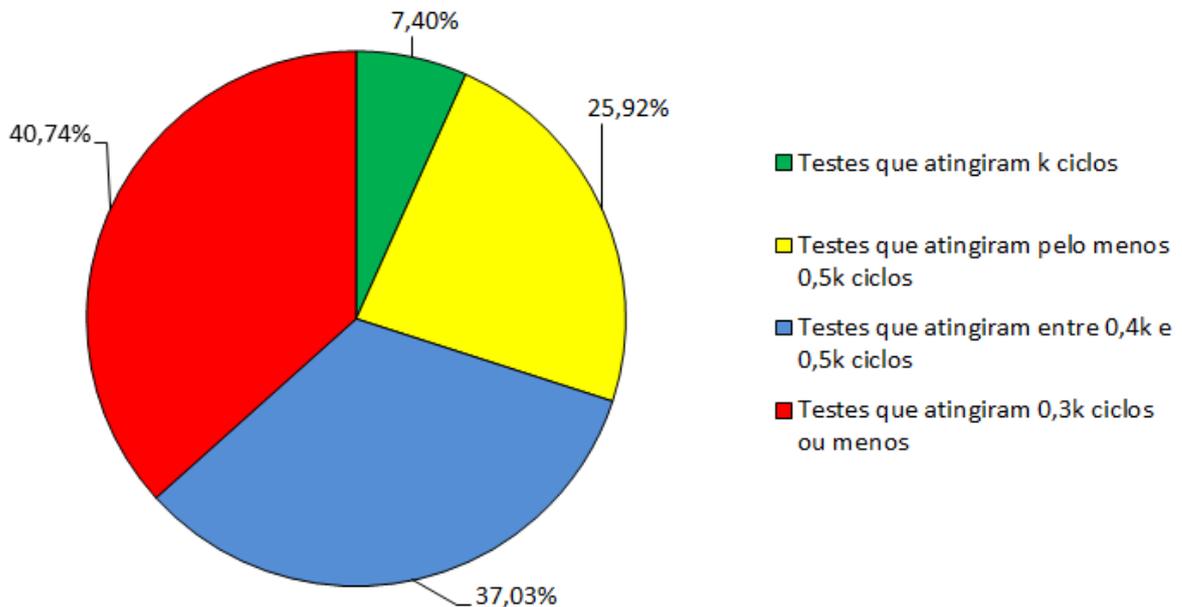
Este trabalho é parte das atividades do 10º semestre de Engenharia Automotiva da UFSC e corresponde a um dos requisitos para a obtenção de título de graduado neste curso. Todas as atividades ligadas a este trabalho foram realizadas entre fevereiro e julho de 2014 na Zen.

Na intenção de aplicar os conhecimentos adquiridos durante a graduação, foi realizado este trabalho de conclusão de curso (TCC) referente às atividades realizadas no estágio curricular obrigatório na Zen, isto é, na melhoria do AM citado no item 1.3, o qual foi retirado do mercado devido a seu alto índice de falha prematura.

É de interesse da Zen melhorar o produto no que se refere ao desempenho em vida útil. Acredita-se que o teste em bancada citado no item 1.4 representa a solicitação que o produto tem em operação quando aplicado aos caminhões no mercado de trabalho. Sendo assim, o histórico de desempenho do AM em teste de bancada foi levantado.

A figura 2 apresenta estatísticas que indicam o desempenho do AM em testes de bancada voltados para melhoria do produto. A estatística foi gerada considerando todos os testes em bancada deste produto já feitos, desconsiderando os que envolvem uso de componentes de concorrentes diretos. Lembrando que o objetivo do teste é atingir k ciclos.

Figura 2 - Desempenho do AM em testes de bancada.



Fonte: Autor.

Nota-se que o desempenho do AM tem alta variabilidade e que é necessário tomar medidas para aumentar o desempenho e a confiabilidade do projeto, visto que apenas 7,4% dos testes atingiram k ciclos. Além disso, tem-se atualmente um alto índice de devolução de peças do mercado de trabalho que falharam antes do término da garantia do produto. Estas devoluções resultaram em mais de 26.000 peças por milhão (PPM).

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é fornecer subsídios para a melhoria contínua do AM em questão. Ao final deste trabalho devem ser geradas propostas para ações de alterações no produto e de implementação de controle de qualidade que resultem no aumento do desempenho em durabilidade do AM em teste de bancada e no mercado de trabalho.

Este objetivo geral será atingido via aplicação de um FMEA (Failure Mode and Effects Analysis - Análise de Modo e Efeito de Falha). A aplicação desta ferramenta será feita conforme as regras sugeridas pela AIAG (Automotive International Action Group – Grupo de Ação da Indústria Automotiva). Este método foi escolhido por tratar-se do método mais

utilizado na indústria para antecipar falhas do produto ou do seu processo de fabricação (STONE, TUMER e STOCK, 2005).

1.6.2. Objetivos específicos

Partindo do histórico de testes de bancada do AM já realizados na Zen, os seguintes dados devem ser levantados:

1. Quais são as falhas mais comuns, em quais componentes se apresentam e quais parâmetros técnicos desses componentes têm influência nas falhas;
2. Qual o efeito destas falhas nos componentes e no AM como um todo;
3. Como ocorre atualmente o controle dos parâmetros técnicos do AM que estão mais diretamente relacionados à falha do mesmo;
4. Quais são as ações recomendadas referentes às alterações de produto ou de processo que irão resultar em maior robustez do produto, ou seja, que aumente o desempenho do AM em durabilidade;

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão introduzidos os conhecimentos teóricos relacionados com o método científico escolhido para atingir os objetivos do trabalho. Conhecimentos básicos como os de metrologia propriedades mecânicas dos materiais não serão citados aqui. Sobretudo será discutido o FMEA.

2.1. Análise de Modo e Efeito de Falha (FMEA)

Nesta seção será abordado:

- A definição do FMEA e a normatização do método;
- Em quais circunstâncias recomenda-se a aplicação deste método;
- Quais são os inputs e outputs do FMEA;
- Quais são os tipos de FMEA e onde se enquadram;

2.1.1. Definição e normatização

O FMEA consiste num método de análise de falha² de um produto ou processo. Trata-se de uma ferramenta de solução de problemas voltada para ação em grupo na identificação, eliminação ou redução dos efeitos negativos das falhas em sistemas, subsistemas, produtos ou processos antes que estas ocorram. Este método pode ser usado isoladamente ou também como parte de um programa de qualidade como o da ISO 9000, QS 9000 e Advanced product quality planning (APQP - Planejamento avançado da qualidade do produto). Existem três tipos de normatização para o FMEA, a militar (MIL-STD 1629^a), a da SAE (Society of Automotive Engineers) – SAEJ1739 – e a da AIAG (Automotive industry action group) (BORROR, 2008).

A Ford Company foi a primeira empresa automotiva a integrar o FMEA em seu conceito de garantia da qualidade (CLARKE, 2005). Na década de 1980, as empresas que compõem a AIAG também incorporaram o FMEA por meio da norma ISO/TS 16949. A indústria automobilística alemã também o fez logo em seguida, segundo procedimentos definidos pela VDA (Verband der Automobilindustrie) (BERTSCHE, 2008).

² Falha: Perda de uma ou mais funções definidas como requisitos de um componente, produto ou sistema (BERTSCHE, 2008).

2.1.2. Metodologia para aplicação do FMEA

O principal objetivo do FMEA é evitar ocorrência de falhas no produto final para o cliente. Esta ferramenta pode ser aplicada principalmente nas seguintes situações (TOLEDO;AMARAL, 2006):

- Diminuir probabilidade da ocorrência de falhas em projetos de novos produtos ou processos;
- Diminuir probabilidade de falhas potenciais em produtos ou processos já em operação;
- Aumentar a confiabilidade de produtos ou processos em operação por meio da análise das falhas que já ocorreram;
- Diminuir os riscos de erros e aumentar a qualidade em procedimentos administrativos.

Para construir um FMEA, é necessário reunir informações de diferentes fontes, que correspondem aos inputs, dos quais se destacam (BORROR, 2008):

- Diagramas de fluxo de processo ou diagramas de bloco funcionais;
- Especificações de projeto;
- Requisitos dos clientes;
- Informações de testes;
- FMEA's prévios;
- Resultados de DOE's (Design of Experiments- Planejamento de Experimentos), análise de capacidade de processos e análises de confiabilidade;
- Histogramas;
- Diagramas de pareto;
- FTA (Faut Tree Analisis- Análise da Árvore de Falhas).

Estes inputs serão utilizados para alimentar o FMEA. A definição dos termos apresentadas a seguir estão na ordem estrutural na qual o FMEA deve ser realizado (AIAG, 2011; BERTSCHE, 2008):

- **Descrição do produto ou processo:** o produto e os componentes que o compõem devem ser descritos no nível de abstração coerente com o objetivo do FMEA;

- **Funções do produto:** devem ser citadas quais são as funções do produto, processo do qual o FMEA trata. Funções podem ser divididas em globais e funções adjacentes ou dos componentes que compõem o produto. A perda destas funções é o que caracteriza a falha.
- **Modos de falha potenciais:** devem ser apontados quais são os modos de falha potenciais. Eles consistem no modo pelo qual a falha se apresenta e é observada.
- **Efeito de falhas potenciais:** são as consequências dos respectivos modos de falha nos componentes nos quais ocorre a falha e também no produto final.
- **Índice de severidade (S):** deve-se quantificar, em uma escala de 0 a 10, a severidade da falha quanto ao efeito negativo no produto que ela causa. Um índice de severidade alto atribuído a um modo de falha caracteriza um efeito fortemente negativo nos aspectos funcionais do produto, processo ou sistema.
- **Causa potencial das falhas:** são as principais causas das respectivas falhas. O levantamento destas causas pode envolver um estudo mais aprofundado e muitas vezes é necessário utilizar os inputs como o DOE, ensaios de materiais, simulações computacionais dentre outros.
- **Índice de ocorrência (O):** quantifica-se, em uma escala de 0 a 10, a ocorrência da causa do modo de falha em questão. Este índice pode ser gerado pelo histórico de peças que falharam ou pode também ser estimado pela equipe responsável pelo FMEA. Um índice de ocorrência alto, como 8, 9 ou 10, indica alta ocorrência da causa potencial atribuída a um específico modo de falha.
- **Controles atuais de prevenção:** são os meios pelos quais o projeto é feito de forma a evitar que a falha ocorra. Alguns modos de falha não têm controle de prevenção articulado pela equipe de projeto, outros têm.
- **Controles atuais de detecção:** cita-se quais são os métodos utilizados para detectar as causas do modo de falha antes que o produto, processo ou serviço esteja disponível ao cliente final.
- **Índice de detecção (D):** quantifica-se, em uma escala de 0 a 10, qual é a probabilidade do controle atual de detecção detectar uma causa de um modo de falha específico, assumindo que tenha ocorrido a falha. Quanto maior o índice de detecção, pior é qualificado o controle de detecção atual da causa potencial da falha.
- **Índice NPR (Número de Prioridade de Risco, em inglês Risk Priority Number):** é calculado pela multiplicação de S, O e D. Indica quais falhas justificam atenção

prioritária na atuação de contenção ou diminuição de ocorrência e da severidade bem como no aumento do índice de detecção. Entretanto, não é recomendada a prática de atuação no produto somente nas causas potenciais com os maiores índices NPR (AIAG, 2011).

- **Ações recomendadas:** são ações tomadas, considerando o índice NPR gerado, que levam ao cumprimento dos requisitos que justificaram a aplicação do FMEA. Estas ações podem ser de alteração do produto ou do processo ou do sistema de qualidade em si, as quais vão de encontro ao aumento da confiabilidade e qualidade do produto ou serviço. As ações recomendadas visam, sobretudo, atuar em eliminação ou diminuição da ocorrência de falha, redução da severidade e melhoramento da detecção da falha (BORROR, 2008).
- **Mecanismo da falha:** é uma explicação detalhada de como a falha ocorre. O mecanismo da falha só pode ser determinado quando se conhece a fundo a causa oriunda de um específico modo de falha. Os mecanismos das falhas geralmente só são desvendados depois que as causas das falhas são investigadas a fundo.
- **Responsabilidades e prazos:** define-se responsabilidades e prazos para tomada de ações recomendadas para toda a equipe envolvida com o FMEA.
- **Revisão de índices S, O e D:** São novos índices atribuídos após as ações recomendadas terem sido tomadas.

Vale ressaltar que o índice de severidade é sempre atribuído aos modos de falha, já os índices de ocorrência e detecção podem ser atribuídos tanto aos modos de falha quanto às causas potenciais, dependendo da abordagem do FMEA (BORROR, 2008). Os principais outputs do FMEA são as ações recomendadas. O FMEA como um todo é sintetizado em uma planilha padrão, conforme exemplificado na tabela 2.

Tabela 2 - Exemplo de planilha padrão do FMEA.

Excerpt from Hand Brake Subsystem Design FMEA (with errors introduced for FMEA Quality Objectives evaluation)

Item / Function	Potential Failure Mode	Potential Effect(s) of Failure	S E V	Classification	Potential Cause(s) of Failure	O C C	Current Design Controls (Prevention)	Current Design Controls (Detection)	D E T	R P N	Recommended Actions	Responsibility & Target Completion Date	Action Results									
													Actions Taken & Effective Date	S E V	O C C	D E T	R P N					
Provide the correct level of friction between brake pad assembly and wheel rim to safely stop bicycle in the required distance, under all operating conditions.	Insufficient friction delivered by hand brake subsystem between brake pads and wheels during heavy rain conditions.	Bicycle wheel does not slow down when the brake lever is pulled potentially resulting in accident.	10		Cable Binds due to inadequate lubrication or poor routing	4	Design review of brake system	Bicycle system durability test # 789	2	80	Modify bicycle durability testing to include periodic brake cable checks for binding											
					External foreign material reduces friction	2			3	60	Modify bicycle durability testing to include foreign material (dust, leaves, etc.) at interface of brake pad and wheel rim											
					Cable breaks	6	Cable material selection based on ANSI #ABC.	Bicycle system durability test # 789	4	240	1. Require cable DFMEA / PFMEA from cable supplier approved by All-Terrain FMEA team. 2. Based on results of Cable DFMEA, develop cable strength test											
					Brake Lever breaks	1	Design review of brake system	Bicycle system durability test # 789	1	10												
					Selected brake pad material does not apply required friction to wheel	2			2	40	Add bench test to evaluate adequate brake pad friction											
Brake system is easy to adjust and keep in optimal working order.	Brake system misadjusted by bicycle user	Brake system does not stop bicycle in required distance or is erratic, potentially resulting in accident.	10		Brake cable mis-adjusted by user	6		Bicycle system durability test # 789	5	300	1. Develop new brake cable adjustment test that identifies mis-adjustment problems 2. Revise bicycle durability test regimen to periodically check for brake cable, pad and lever mis-adjustment											
					Brake pad mis-adjusted by user	1	Design review of brake system	Bicycle system durability test # 789	1	10												
					Brake lever mis-adjusted by user	1	Design review of brake system	Bicycle system durability test # 789	2	20												
	Brake becomes mis-adjusted due to failure of interaction/interface between brake cable assy, brake pad assy and/or wheel assy.																					

TRUNCATED

Excerpted from *Effective FMEAs*, by Carl S. Carlson, John Wiley & Sons, © 2012, all rights reservedFonte: <http://www.weibull.com/hotwire/issue138/ht138-1_sm.gif>, Acesso em 30 jul.2014.

2.1.3. Classificação

A classificação entre os tipos de FMEA varia entre as literaturas. STAMATIS (2005) e BORROR (2008) classificam o FMEA em quatro tipos:

- **FMEA de sistema:** usado para analisar sistemas e subsistemas no projeto inicial do produto. Foca em modos de falha potenciais e nas interações entre elementos de um sistema. Neste tipo de FMEA se dá uma atenção especial na fronteira entre os subsistemas que compõem o sistema, identificando falha na comunicação funcional entre esses subsistemas.
- **FMEA de produto:** usado para analisar produtos antes da fabricação. Foca em modos de falha causados por deficiência no projeto do produto no que se referem a projetos, materiais, tolerâncias, etc.

- **FMEA de processo:** usado para analisar processos de fabricação e montagem focando em modos de falha relacionado a estas etapas. Mas neste tipo de FMEA, se dá foco em todo fluxo de informação, operações, equipamentos usados, etc.
- **FMEA de serviço:** usado na análise de serviços antes que eles cheguem ao consumidor. Foca em modos de falha causados por enganos e erros em tarefas do sistema ou do processo.

BERTSCHE (2008), por sua vez, define que o tipo de FMEA a ser utilizado depende do nível de complexidade ou abstração requerida na análise do produto, processo ou serviço. Por exemplo, dado o produto final como um automóvel, composto por diversos sistemas e subsistemas, se o FMEA irá tratar de um sistema como o de transmissão, por exemplo, um FMEA de sistema deverá ser aplicado.

Se no sistema de transmissão do veículo serão analisados os processos de fabricação dos mesmos em toda a cadeia produtiva dos elementos envolvidos, cabe a aplicação de um FMEA de processo. Se o foco serão os parâmetros de projeto de um subsistema ou produto, um FMEA de produto é aplicado. O tipo de FMEA depende do nível de abstração no qual o grupo responsável pretende atuar. Um FMEA de produto - o qual será desenvolvido neste trabalho - deve se iniciar com a definição de funções dos componentes que compõem o produto. A análise de falhas deve partir da falha do produto para a falha dos componentes.

Nem sempre a aplicação do FMEA leva a conhecer as causas raízes das falhas no produto ou processo de que se trata. Entretanto, o método corresponde numa metodologia poderosa que resulta no aumento da maturidade do grupo envolvido no que se referem a projetos, qualidade e confiabilidade de processos, padronização e conhecimento mercadológico.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo serão apresentados os materiais, metodologias e métodos para a aplicação de um FMEA, referente ao AM do qual este trabalho trata, que atenda os requisitos dos objetivos do trabalho. Também serão apresentados os métodos e a metodologia para a realização de testes e estudos que foram feitos para preencher o FMEA.

3.1. Metodologia de trabalho

A metodologia de trabalho é justamente aquela já apresentada no item 2.1.2, com exceção da definição de pessoas responsáveis pelo FMEA. Adiante será explicado mais detalhadamente como foi realizada cada etapa do FMEA. O objetivo final é gerar uma planilha com ações recomendadas, conforme exposto na tabela 2. Sabe-se, porém, que o FMEA é um documento vivo que deve ser revisado e preenchido periodicamente (BERTSCHE, 2008), cabendo à equipe responsável por este produto continuar atualizando-o.

3.2. Principais modos de falha observados em testes de bancada

Para preencher os modos de falha do FMEA primeiramente foi levada em conta uma análise da árvore de falhas (Faut Tree Analysis – FTA), que não será apresentada neste trabalho por questões de confidencialidade. Este FTA foi feito em março de 2014 e contém todas as falhas concebíveis ao AM, apontadas pela equipe de pesquisa e desenvolvimento da Zen. Dentre as falhas presentes no FTA, as mais recorrentes observadas nos testes de bancada do AM entre 2008 e 2012 são:

- Quebra dos pinhões sinterizados: Não se sabe exatamente qual é o mecanismo da falha do pinhão. No FMEA este modo de falha será referenciado como “quebra do pinhão”.

Figura 3 - Pinhões quebrados em teste de bancada do AM.



Fonte: Laboratório de pesquisa e desenvolvimento da Zen S.A. Indústria Metalúrgica.

- Deslocamento dos pinos no sentido paralelo ao eixo: o pino sobe em relação a base do eixo do AM. Em certas vezes o pino chega a sair do furo do eixo completamente.

Figura 4 - Deslocamento do pino em relação a base do eixo.



Fonte: Laboratório de pesquisa e desenvolvimento da Zen S.A. Indústria Metalúrgica.

- Deslocamento dos pinos no sentido perpendicular ao eixo: o pino sofre deformação ficando angulado em relação ao furo do eixo. Certas vezes o pino se solta completamente do eixo e é possível notar que o furo do eixo se deformou devido à movimentação do pino.

Figura 5 - Deslocamento perpendicular do pino em relação ao eixo.



Fonte: Laboratório de pesquisa e desenvolvimento da Zen S.A. Indústria Metalúrgica.

- Deslocamento da bucha do pinhão no sentido paralelo ao furo do mesmo: observa-se a bucha literalmente subir em relação ao furo do pinhão.

Figura 6 - Deslocamento da bucha do pinhão.



Fonte: Laboratório de pesquisa e desenvolvimento da Zen S.A. Indústria Metalúrgica.

3.3. Modos de falha, efeitos e índices de severidade

Seguindo a metodologia definida em 2.1.2, a tabela 3 apresenta os modos de falha mais frequentes, os efeitos destes nos componentes e no AM como um todo, bem como um índice de severidade para os respectivos modos de falha. Os efeitos descritos nesta tabela são observados por análises dos componentes feitas depois do teste de bancada. Os índices de severidade foram atribuídos segundo critérios sugeridos pela AIAG (2011), detalhados no ANEXO A. As funções dos componentes já foram apresentadas na tabela 1.

Tabela 3 - Modos de falha, efeitos e índices de ocorrência.

MODO DE FALHA	EFEITOS	ÍNDICE DE SEVERIDADE (S)
1) Pino se desloca paralelamente ao eixo.	Pino pode tocar a tampa superior do mancal do AM desgastando-a e empurrando-a contra as espiras do eixo induzido do MP. Pino pode se soltar do eixo, deixando de cumprir sua função e gerar quebra de todos os pinhões.	7 – Degradação da função primária do AM, já que este modo de falha caracteriza falha iminente.
2) Pino se desloca perpendicularmente ao eixo.	Engrenamento incorreto do pinhão com coroa e eixo induzido do MP e desgaste excessivo do conjunto, seguido de trepidações e quebra dos pinhões e da coroa. Pino pode se soltar e interromper função global do AM por quebra dos pinhões.	7 – Degradação da função primária do AM, já que este modo de falha caracteriza falha iminente.
3) Pinhão quebra.	Possível deslocamento dos pinos, quebra da coroa e interrupção da função global do AM.	8 – Perda da função primária do AM. Veículo torna-se inoperável porque o SPV não funciona.
4) Bucha do pinhão se desloca.	Quebra iminente dos pinhões devido ao desequilíbrio de forças no apoio entre pinhão e bucha e, logo, interrupção da função global do AM.	7 – Degradação da função primária do AM, já que este modo de falha caracteriza falha iminente.

Fonte: Autor.

3.4. Causas potenciais e índices de ocorrência

A próxima etapa corresponde no apontamento de causas potenciais de falha e atribuição de índices de ocorrência às mesmas. Por enquanto não serão apresentados os mecanismos da falha, ou seja, de que forma elas ocorrem detalhadamente. A tabela 4,

apresenta novamente os principais modos de falha, quais são as causas potenciais dos mesmos e o índice de ocorrência.

As causas potenciais da tabela 4 foram obtidas através do FTA já citado e também por discussões entre a equipe de engenharia da Zen. Os índices de ocorrência foram atribuídos segundo análise dos relatórios de testes de bancada do AM, levando em consideração a experiência da equipe do laboratório de testes da Zen.

Tabela 4 - Modos de falha, causas potenciais e índices de ocorrência.

MODOS DE FALHA	CAUSAS POTENCIAIS	ÍNDICE DE OCORRÊNCIA (O)
1. Pino de desloca paralelamente ao eixo.	Interferência de montagem do pino está fora do especificado.	6 - Alta
	Montagem do pino inadequada.	6 - Alta
2. Pino se desloca perpendicularmente ao eixo.	Dureza do eixo está fora do especificado.	5 – Moderada
	Impacto gerado por fragmentos do pinhão quebrado.	8 – Alta
3. Pinhão quebra.	Material do pinhão está fora do especificado.	8 - Alta
	Dimensional do pinhão está fora do especificado.	3 - Baixa
4. Bucha do pinhão se desloca.	Não ocorre recalque na montagem da bucha.	9 - Alta

Fonte: Autor.

3.5. Controles atuais e índices de detecção

A tabela 5 apresenta os controles atuais de prevenção e de detecção das causas potenciais de falha do FMEA. Os índices de detecção serão atribuídos conforme sugere o ANEXO B deste relatório partindo de uma inferência de qual seria a probabilidade de a falha ocorrer devido à ineficácia do controle atual de detecção.

A causa da tabela 4 denominada “Impacto gerado por fragmentos do pinhão quebrado” não será incluída na tabela 5 porque ela consiste no do modo de falha denominado “quebra do pinhão”. Isto porque foi identificado que estas duas falhas só ocorrem simultaneamente. Isto é, o pino só se desloca perpendicularmente ao eixo quando ocorre quebra dos pinhões.

Tabela 5 - Controles atuais e índices de detecção.

CAUSAS POTENCIAIS	CONTROLES ATUAIS DE PREVENÇÃO	CONTROLES ATUAIS DE DETECÇÃO	ÍNDICES DE DETECÇÃO (D)
Interferência de montagem do pino está fora do especificado.	Especificação de diâmetro do furo e diâmetro do pino conforme desenhos técnicos e especificação de troca de ferramenta de usinagem de furo no plano de usinagem.	Medições periódicas do diâmetro do furo do eixo e inspeção de uma peça de cada lote do pino comprado.	5 – Moderada
Montagem do pino inadequada.	Ferramental de montagem do pino garantindo alinhamento do mesmo e folha de operação de montagem definindo setup no centro de trabalho onde é feita a montagem.	Não é controlado em peças da linha de produção, somente é observado em alguns acoplamentos submetidos a testes.	8 - Remota
Dureza do eixo está fora do especificado.	Desenho técnico com especificação de dureza e plano de TT especificado.	Não existe.	5 – Moderada
Material do pinhão está fora do especificado.	Desenho técnico com especificação de dureza e densidade.	Laudo metalográfico emitido pelo fornecedor a cada lote fabricado.	4 – Moderadamente alto

Continua...

Continuação...

CAUSAS POTENCIAIS	CONTROLES ATUAIS DE PREVENÇÃO	CONTROLES ATUAIS DE DETECÇÃO	ÍNDICES DE DETECÇÃO (D)
Dimensões do pinhão estão fora do especificado.	Desenho técnico do pinhão com todas cotas e respectivas tolerâncias.	Inspeção dimensional de uma unidade para liberação do lote recebido.	4 – Moderadamente alto
Não ocorre recalque na montagem da bucha.	Especificação de força axial sob qual a bucha deve se manter montada ao pinhão.	Não existe controle.	9 – Muito remota

Fonte: Autor.

Finalmente a tabela 6 apresenta o índice NPR para cada causa de modo de falha, calculado pela multiplicação de S, O e D para cada causa potencial apresentada. As causas estão listadas em ordem decrescente de NPR.

Tabela 6 - Índices RPN para causas potenciais de falha.

CAUSAS POTENCIAIS	ÍNDICE NPR
Não ocorre recalque na montagem da bucha.	567
Montagem do pino inadequada.	336
Material do pinhão está fora do especificado.	256
Interferência de montagem do pino está fora do especificado.	210
Dureza do eixo está fora do especificado.	175
Dimensional do pinhão está fora do especificado.	96

Fonte: Autor.

3.6. Métodos de detecção propostos

Até então, os índices NPR nos dão prioridade às causas potenciais dos modos de falha apresentados. Porém, é preciso identificar o mecanismo dos modos de falha, investigar mais a fundo quais parâmetros de projeto estão ligados às causas potenciais. Além disso, é necessário aprimorar os métodos de detecção, os quais se apresentaram incapazes em apontar quais parâmetros técnicos do produto estão levando à falha prematura do mesmo.

Partindo do conhecimento do grupo de engenharia envolvido com a melhoria deste produto na empresa, ou seja, o FTA feito para este produto, Benchmark com concorrentes realizado em março de 2014 e a análise dos relatórios dos 27 testes já feitos para o AM, as causas dos modos de falha apresentados na tabela 4 serão investigadas por métodos de detecção que serão propostos adiante.

A tabela 7 apresenta propostas de métodos de investigação de causas de falha. Esses métodos foram escolhidos para rastrear a causa das falhas de forma mais efetiva e fornecer resultados para indicar ações de alteração do produto recomendadas, fornecendo condições para atualizar os índices de detecção e ocorrência e desvendar o mecanismo das falhas, se possível. Esses métodos de detecção foram escolhidos segundo critérios de cumprimento de prazo para obtenção de seus respectivos resultados, custo e capacidade que cada um tem de examinar as respectivas causas potenciais de falha já apresentadas.

Do ponto de vista de definição do FMEA, os métodos de detecção propostos na tabela 7 também se enquadram dentro de ações recomendadas (BORROR, 2008). Estes métodos propostos são parte dos outputs do FMEA, mas serão apresentados neste capítulo pelo fato de que sem os resultados desses testes propostos, não há como propor alterações consistentes no produto, as quais serão apresentadas no capítulo 4.

Tabela 7 - Métodos de detecção propostos.

CAUSAS POTENCIAIS/(NPR)	MÉTODO DE DETECÇÃO PROPOSTO
Não ocorre recalque na montagem da bucha (567).	1. Análise de montagem de bucha no pinhão.
Montagem do pino inadequada (336).	2. Análise estatística do alinhamento do pino montado ao eixo.
Material do pinhão está fora do especificado (256).	3. Análise metalográfica do pinhão e Benchmark com concorrentes diretos.
Interferência de montagem do pino está fora do especificado (210).	4. Análise estatística do processo de usinagem do furo do eixo e diâmetro do pino.
Dureza do eixo está fora do especificado (175).	5. Análise metalográfica da interface entre pino e furo do eixo.
Dimensional do pinhão está fora do especificado (96).	6. Escaneamento tridimensional do pinhão.

Fonte – Autor

3.7. Metodologia para aplicação de métodos de detecção propostos

Neste item serão especificados os materiais e métodos utilizados para confrontar as causas das falhas. Para cada método descrito na tabela 7, serão apresentados como são propostos os estudos de detecção de falha, em que condições, onde são feitos, o maquinário e as pessoas envolvidas. Os métodos serão descritos em ordem decrescente de NPR.

3.7.1. Análise de montagem de bucha no pinhão

Esta análise tem o objetivo de verificar se a montagem de bucha está ocorrendo de forma correta. Ou seja, se o ferramental de montagem garante recalque da bucha. Esta análise foi feita cortando transversalmente pinhões com bucha montada, embutindo estas amostras em baquelite e analisando a região do corte no microscópio ótico e no estereoscópio no setor de metalografia da Zen.

3.7.2. Análise estatística do processo de usinagem do furo do eixo e diâmetro do pino

Para o 2º método de detecção proposto na tabela 7, serão feitos estudos estatísticos de processo de usinagem do furo do eixo e diâmetro do pino. Este método de detecção de causa de falha tem o objetivo de identificar se a interferência de montagem do pino está ocorrendo dentro do especificado.

Para tal será amostrado um lote de 20 eixos com furo usinado, totalizando 60 furos (obedecendo no mínimo 50 medições conforme recomenda AIAG , 2011). O diâmetro dos três furos de cada eixo será medido para gerar uma distribuição de pontos. O mesmo será feito com um lote de pinos. Se o diâmetro do furo estiver acima do especificado e o diâmetro do pino abaixo do especificado, por exemplo, o mecanismo do modo de falha 1 será desvendado.

O resultado das medições deve passar por um teste de normalidade Anderson-Darling conforme proposto por MONTGOMERY (2005). Também devem ser geradas distribuições normais representativas (dispostas entre os limites inferior e superior de especificação LIE e LSE) e índices Cpk^3 para caracterizar os processos como capazes ou não.

³ Cpk: Mensura a distância da média da distribuição de valores em relação a LIE e LSE, bem como a dispersão desses valores (KANE, 1986).

O software usado para realizar estes estudos estatísticos foi o Minitab 16. Nos gráficos gerados pelo software, os valores das medições estão representados como soma ou diferença, em milímetros, em relação à média dos valores (\bar{X}_b), por questões de confidencialidade.

A tabela 8 apresenta para cada estudo estatístico de processo qual foi o instrumento de medição utilizado. Todos os instrumentos contêm o selo de calibração do setor de metrologia da Zen e estão em condições normais de uso.

Tabela 8 - Instrumentos de medição usados nos estudos estatísticos.

ESTUDO ESTATÍSTICO	INSTRUMENTO DE MEDIÇÃO	ESPECIFICAÇÕES DO INSTRUMENTO
Diâmetro do furo do eixo	Micrômetro Interno Digital	MITUTOYO. Resolução de 1 μm .
Diâmetro do pino	Micrômetro Digital	MITUTOYO. Resolução de 1 μm .
Alinhamento do pino	Máquina de Medição por Coordenadas	LEITZ (HEXAGON METROLOGY) Resolução de 0,5 μm .

Fonte: Autor.

3.7.3. Análise estatística do alinhamento do pino montado ao eixo

Para o 4º método de detecção proposto na tabela 7, será feito um estudo estatístico do alinhamento do pino em relação à base do eixo. Esta medição na indústria é comumente chamada de paralelismo. Para tal, é medido qual é a maior distância – perpendicular ao eixo – entre a base e o topo do pino. Esta é uma maneira eficaz de mensurar o alinhamento do pino em relação ao eixo.

Este parâmetro tem altíssima relevância na qualidade do engrenamento entre pinhão e coroa do AM, embora não seja controlado e nem especificado em desenho técnico, como mostra a tabela 4. O instrumento de medição utilizado para esta medição já foi apresentado na tabela 8, bem como o software usado para fazer o teste de normalidade foi citado antes.

3.7.4. Análise metalográfica do pinhão e Benchmark com concorrentes diretos

Para verificação das propriedades mecânicas do pinhão, a Zen contratou o serviço de um laboratório especializado nesta função, que neste trabalho será referenciado como laboratório A. Todas as medições de propriedades químicas e mecânicas foram feitas conforme normas apresentadas na tabela 9.

Tabela 9 - Métodos para análise metalográfica do pinhão.

PROPRIEDADE MEDIDA	MÉTODO DE MEDIÇÃO/NORMA
Composição Química	ISO 15350 ASTM E415
Densidade	ISO 2738 (Comparável à ASTM B 328 e MPIF Standard n° 42)
Dureza	ISO 4498 (Comparável a MPIF Standard n° 43)

Fonte – Laboratório A.

Também foi analisada a estrutura do material sinterizado sem ataque NITAL no microscópico ótico na Zen. Esta análise tem o objetivo de verificar como está a porosidade do material, se há presença de inclusões macro, e se a compactação e sinterização ocorreram de forma homogênea.

Para esta análise de porosidade foram amostrados 4 pinhões comprados em um lote que chegou na Zen em março de 2014. Estes pinhões foram cortados transversalmente em uma politriz e embutidos em baquelite.

3.7.5. Análise metalográfica da interface entre pino e furo do eixo

A análise metalográfica do eixo com pino montado foi feita no laboratório de metalografia da Zen em um microscópico ótico. O procedimento para obtenção da amostra é simples, os passos para tal estão explicados a seguir:

- Cortar de um eixo com pino montado na região do furo perpendicularmente ao diâmetro do furo/pino;
- Embutir amostra em baquelite e prepará-la;
- Preparar quimicamente amostra com ataque NITAL 3%;
- Analisar microestrutura do eixo e do pino;
- Medir dureza HRC do eixo que tinha sido cortado e também do pino.

Os objetivos dessa análise metalográfica são verificar se o eixo e o pino têm estrutura metalográfica predominantemente martensítica e estão na especificação de dureza correta. Além disso, deve-se verificar se a têmpera ocorreu por completo e não só na superfície do metal. Isto para garantir que a interface entre pino e furo do eixo não corresponde a uma região mais dúctil do metal facilitando deslocamento do pino.

3.7.6. Escaneamento tridimensional do pinhão

Este método de detecção foi proposto para verificar se o pinhão, chega à Zen de fato com as dimensões dentro do especificado. Nesta medição o perfil dos dentes do pinhão são escaneados, a circularidade⁴ e a cilindricidade⁵ do furo são também medidas.

Estas medições são feitas na mesma máquina citada na tabela 8, utilizada também para medir alinhamento do pino com o eixo. As medições serão comparadas com o desenho técnico para averiguar algum desvio em uma cota que pode ter relação com a falha do pinhão em teste.

⁴ Circularidade: Condição pela qual qualquer círculo deve estar dentro de uma faixa definida por dois círculos concêntricos, distantes no valor da tolerância especificada (VIANA, 2009).

⁵ Cilindricidade: Condição pela qual a zona de tolerância especificada é a distância radial entre dois cilindros coaxiais (VIANA, 2009).

3.8. Resultados dos métodos de detecção propostos

Neste tópico serão apresentados quais foram os resultados dos métodos de detecção de causas de falha propostos na tabela 7.

3.8.1. Análise de montagem de bucha no pinhão

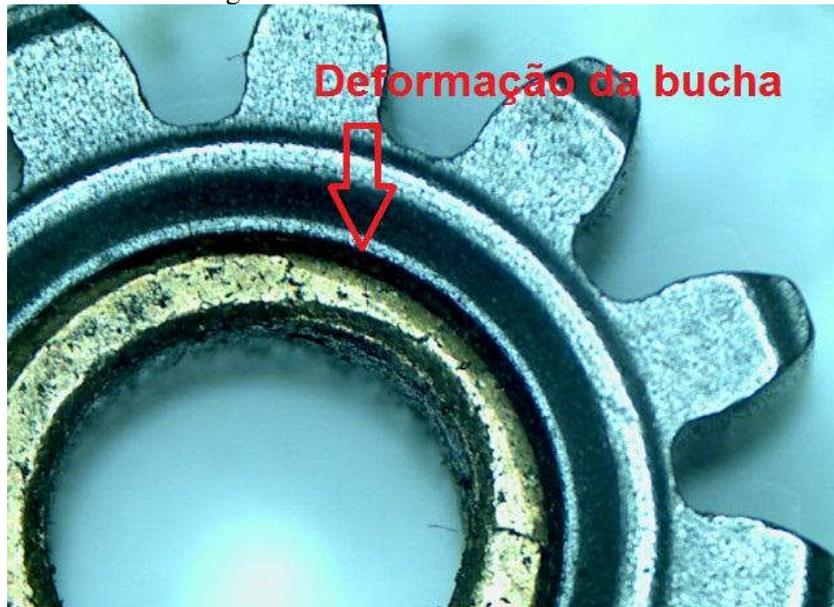
Antes mesmo de cortar as peças foi possível notar que as buchas soltam grande quantidade de pó de bronze na base da prensa em que é montada. Além disso, também foi possível verificar que grande quantidade dos pinhões apresentavam buchas cisalhadas e também ovalizadas, conforme mostram as figuras 7 e 8, respectivamente.

Figura 7 - Bucha trincada/cisalhada.



Fonte: Autor.

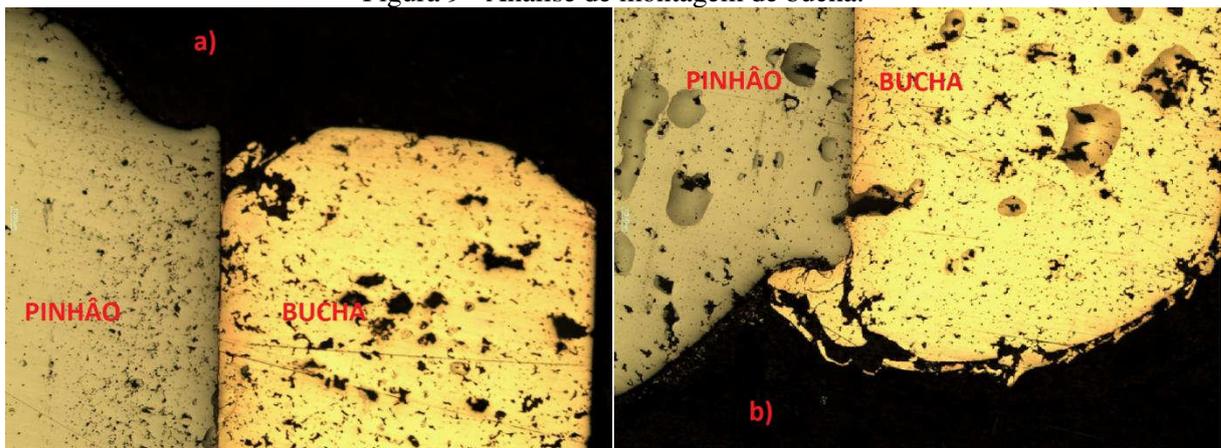
Figura 8 - Bucha ovalizada e trincada.



Fonte: Autor

Cortando transversalmente pinhões com bucha montada, foi possível observar que o recalque não acontece em nenhum dos lados do pinhão (superior e inferior). A figura 9a corresponde ao lado inferior do pinhão, ou seja, a bucha entra pelo lado b. A figura 9b corresponde ao lado superior do pinhão. Nota-se deformação radial da bucha no propósito de gerar recalque, porém esta porção de material está despreendida da bucha, cisalhada pelo “canto vivo” do pinhão, e não garante travamento da bucha.

Figura 9 - Análise de montagem de bucha.



Fonte: Autor.

O “canto vivo” referido aqui consiste numa característica inerente ao processo de metalurgia do pó (CHIAVERINI, 1992). Esta não continuidade do chanfro do pinhão é consequência do formato dos punções de compactação do pó, os quais têm reforços para

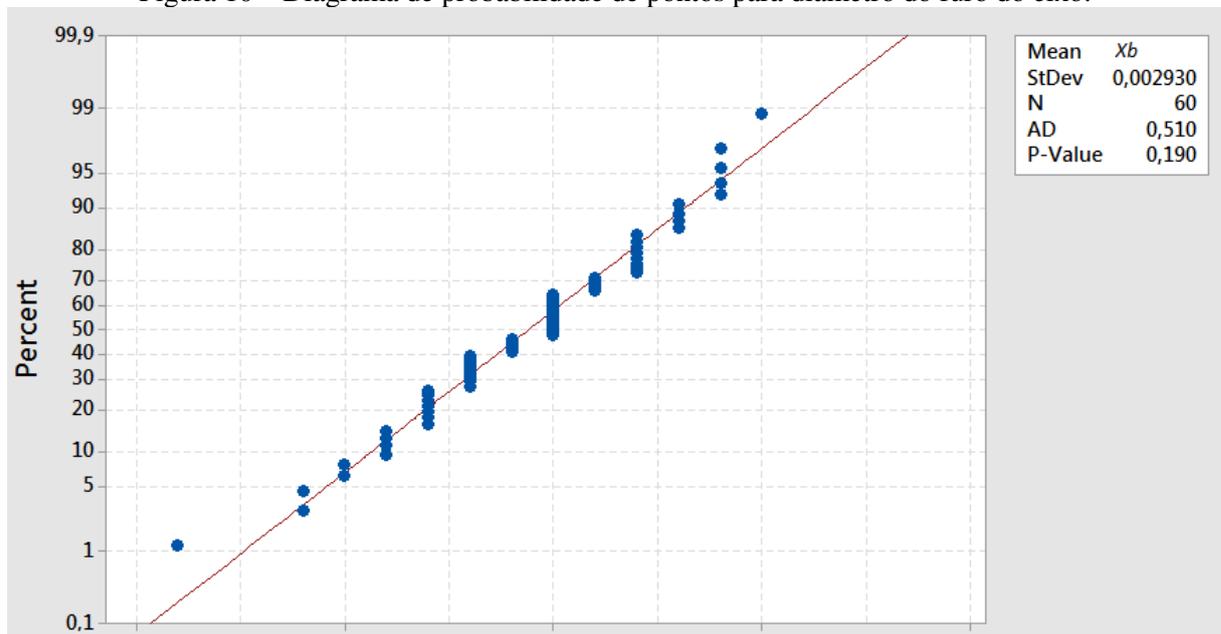
aumentar a vida útil dos mesmos. Para gerar um chanfro com raio concordante no pinhão, a ferramenta de compactação de pó teria um perfil agulha, zona de concentração de tensões mecânicas que resulta em fratura do material em poucos ciclos.

O processo de montagem de bucha se destacou negativamente. As buchas ovalizadas e descentralizadas e sem recalque ou encrave resultam em engrenamento desigual entre coroa e pinhões do AM, resultando em trepidações e desgastes excessivos e deslocamento axial da bucha do pinhão, o que corresponde à falha eminente por quebra dos pinhões.

3.8.2. Estudo estatístico de usinagem do furo do eixo

A usinagem dos furos no eixo que comportam os pinos é feita por um torno CNC. Foram usinadas 20 peças consecutivamente totalizando 60 furos, sendo 3 furos por peça. Não houve interrupção na usinagem das peças. Na figura 10, temos o diagrama de probabilidade de pontos usado para testar a normalidade da distribuição dos diâmetros medidos.

Figura 10 – Diagrama de probabilidade de pontos para diâmetro do furo do eixo.

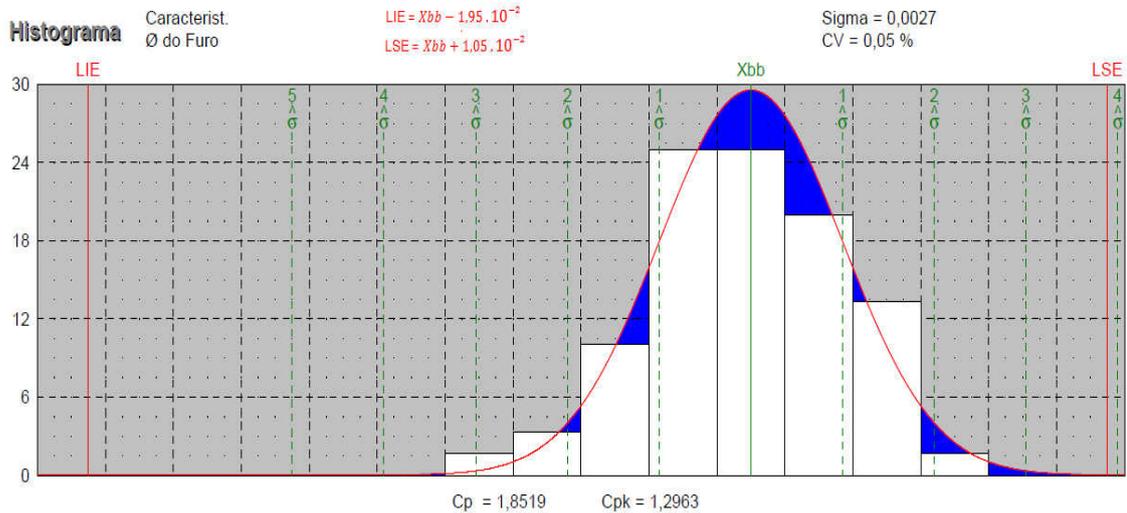


Fonte: Autor.

Assumindo hipótese inicial de que a distribuição de pontos segue uma distribuição normal, e um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$), esta hipótese pode ser mantida, uma vez que p-Value é maior que α (MONTGOMERY, 2010). Na figura 11 temos a distribuição

normal da média dos três furos de cada eixo em milímetros, disposta entre os limites inferior e superior de especificação (LIE e LSE).

Figura 11 - Distribuição normal do diâmetro do furo do eixo.



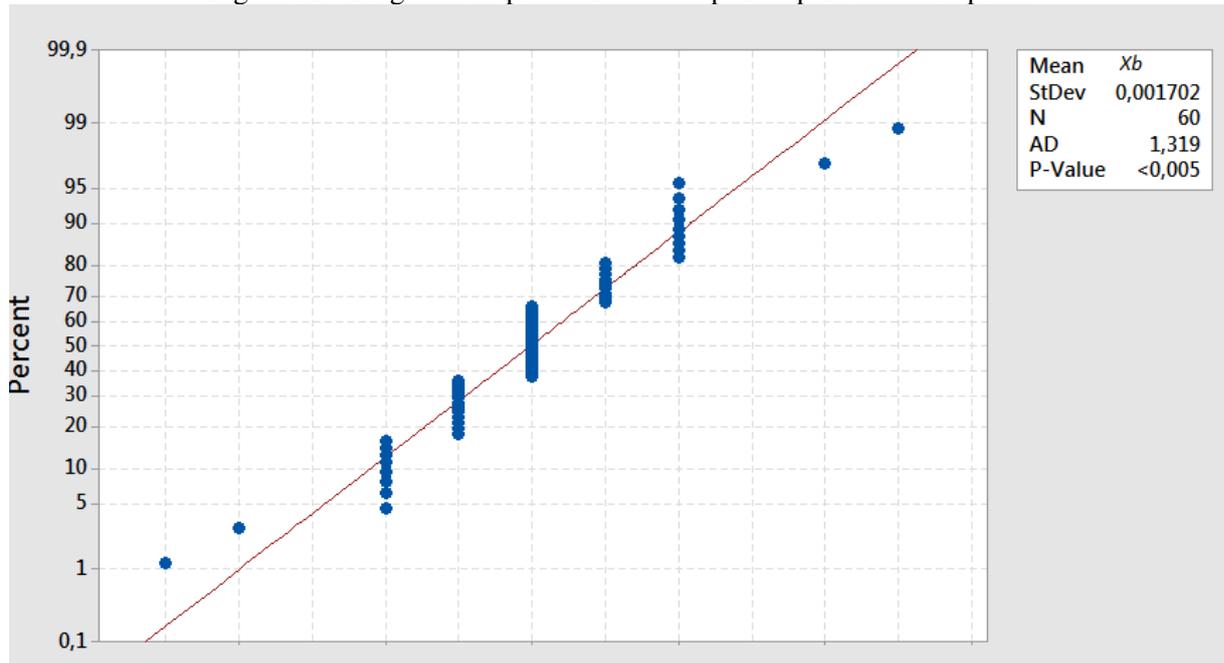
Fonte: Autor.

Ainda que a distribuição normal não esteja centralizada em relação aos limites de especificação, o processo é considerado capaz com este índice $Cpk = 1,2963$, segundo critérios de qualidade da Zen para esta usinagem.

3.8.3. Estudo estatístico de diâmetro do pino

O diâmetro dos pinos também foi medido, nas mesmas amostras usadas no estudo estatístico de diâmetro do furo apresentado no item anterior, pós-TT da peça. É esperado que as dimensões da peça mudem devido ao rearranjo estrutural (CALLISTER, 2008) causado pelo TT. A figura 12 apresenta o diagrama de probabilidade de pontos do teste de normalidade para a distribuição de valores de diâmetro do pino medidos.

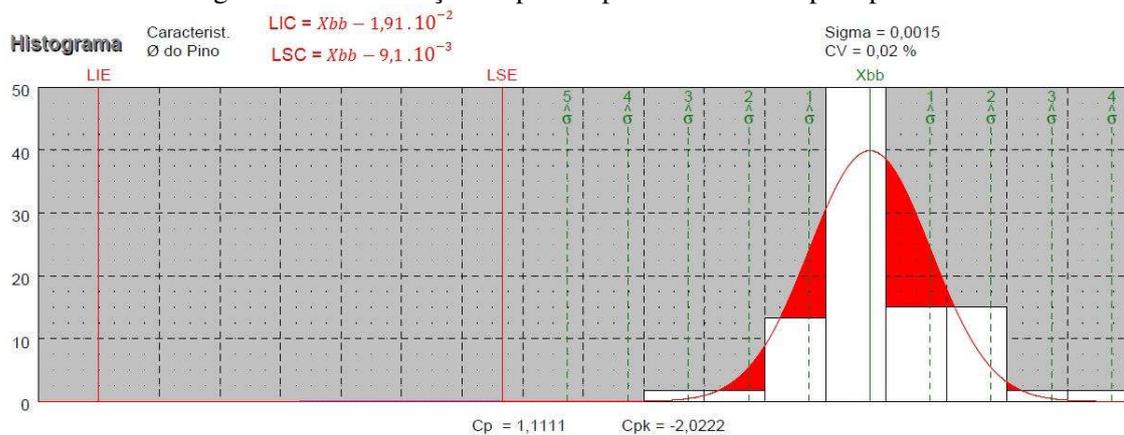
Figura 12 - Diagrama de probabilidade de pontos para diâmetro pino.



Fonte: Autor.

Assumindo hipótese inicial de que os valores se aderem a uma distribuição normal, e nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$), esta hipótese deve ser descartada, uma vez que p-Value é menor que α . A figura 13 apresenta a distribuição de pontos referente ao diâmetro do pino, posicionada em relação ao LIE e ao LSE, ainda que esta distribuição não possa ser atribuída como distribuição normal.

Figura 13 - Distribuição de pontos para diâmetro do pino pós TT.



Fonte: Autor.

A média geral está deslocada em 1,41 centésimos de milímetro em relação ao centro do intervalo compreendido entre LIE e LSE.. De fato, espera-se que, uma vez que o diâmetro

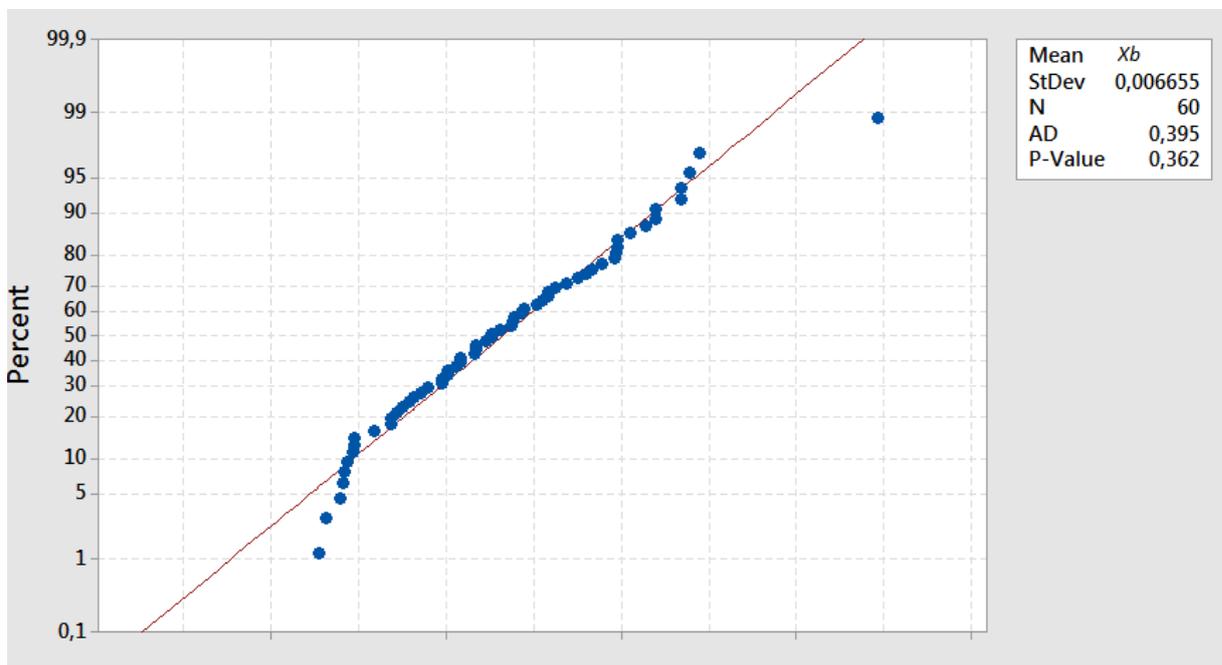
do pino aumente, e o diâmetro do furo tende a diminuir depois do TT, o pino é de fato montado na interferência correta.

Entretanto, a figura 13 evidencia que quase 100% dos acoplamentos mecânicos têm eixos com diâmetro do pino fora do especificado. Isto influencia na folga entre bucha do pinhão e pino e, portanto, no desempenho do AM. Esta folga, ainda que seja um parâmetro não apresentado no FMEA, é uma especificação de projeto e a influência desta deverá ser melhor estudada futuramente.

3.8.4. Análise estatística do alinhamento do pino

Enfim o último estudo estatístico referente à hipótese levantada em relação à montagem do pino, o estudo de capacidade da prensa que o monta. Deseja-se saber se este processo de montagem é capaz de montar o pino de forma alinhada à base do eixo. A figura 14 apresenta o diagrama de probabilidade de pontos para diâmetro pino.

Figura 14 - Diagrama de probabilidade de pontos para perpendicularismo do pino.



Fonte: Autor.

Novamente, assumindo hipótese inicial de que a distribuição de pontos segue uma distribuição normal, e um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$), esta hipótese pode ser mantida, uma vez que p-Value é maior que α (MONTGOMERY, 2010).

O alinhamento do pino não é um parâmetro especificado em projeto, é apenas uma medida que auxilia na investigação da hipótese levantada anteriormente. As médias estão dispostas em um intervalo de aproximadamente 0,02 mm e a média geral foi de 0,0144 mm.

Não há como classificar o processo como capaz porque não existe LIE e LSE. Este resultado é satisfatório no sentido de mostrar que o pino é de fato montado alinhado ao sentido axial do eixo. Em outras palavras, esta inclinação do pino medida é considerada satisfatória no desempenho do produto final.

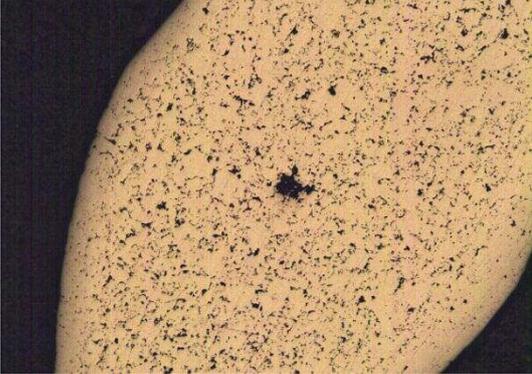
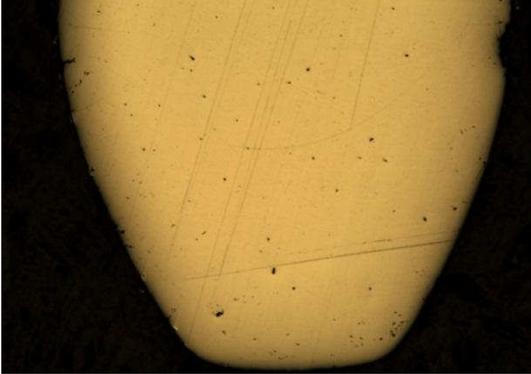
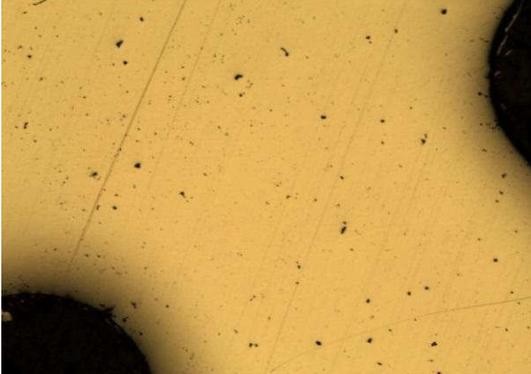
3.8.5. Análise metalográfica do pinhão e Benchmark com concorrentes diretos

A Zen não especifica no desenho técnico do pinhão qual é a composição química. A análise de composição química do material do pinhão foi feita, de acordo com as normas descritas na tabela 9 e comparamos a composição química do pinhão com um pinhão de um concorrente direto, denominado concorrente A, cujo desempenho em teste já foi comprovado como superior.

Este Benchmark indicou que não existem diferenças significativas na composição química entre o pinhão da Zen e o pinhão do concorrente. A porcentagem de elementos na liga não será exposta por questões de confidencialidade. A densidade hidrostática e a microdureza do material também foram medidas e estas propriedades encontram-se dentro do especificado no projeto do pinhão.

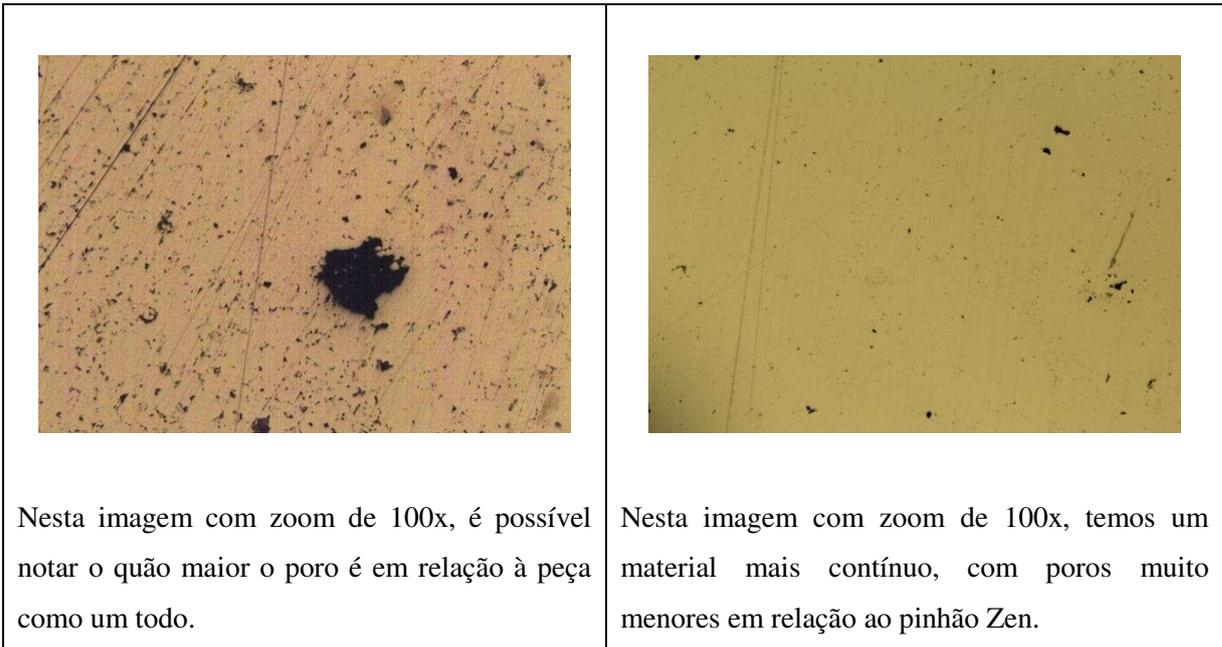
A análise metalográfica sem ataque NITAL feita na Zen indicou, por outro lado, a presença de vazios na peça que chamaram atenção. Os poros encontram-se sobre tudo no centro dos dentes e na base dos dentes do pinhão. A tabela 10 contém imagens capturadas pela câmera acoplada ao microscópio ótico do pinhão do AM e também do pinhão do concorrente direto.

Tabela 10 - Comparação de porosidade entre pinhão Zen e pinhão CONCORRENTE A.

IMAGEM/DESCRIÇÃO - ZEN	IMAGEM/DESCRIÇÃO – CONCORRENTE A
 <p data-bbox="240 869 804 1055">Esta imagem foi capturada com zoom de 50x. Nota-se um poro substancialmente maior em relação aos outros que se encontra no meio do dente do pinhão.</p>	 <p data-bbox="831 869 1426 1003">A imagem, também com zoom de 50x, revela porosidade homogeneamente distribuída e menor, em relação ao pinhão ZEN.</p>
 <p data-bbox="240 1570 804 1704">Nesta imagem com zoom de 50x, nota-se um poro na base do dente do pinhão, região propícia para propagação de trincas.</p>	 <p data-bbox="831 1570 1426 1704">Também com zoom de 50x, o pinhão concorrente apresenta distribuição de poros homogênea, além de aparência distinta em cor.</p>

Continua...

Continuação...



Fonte: Autor.

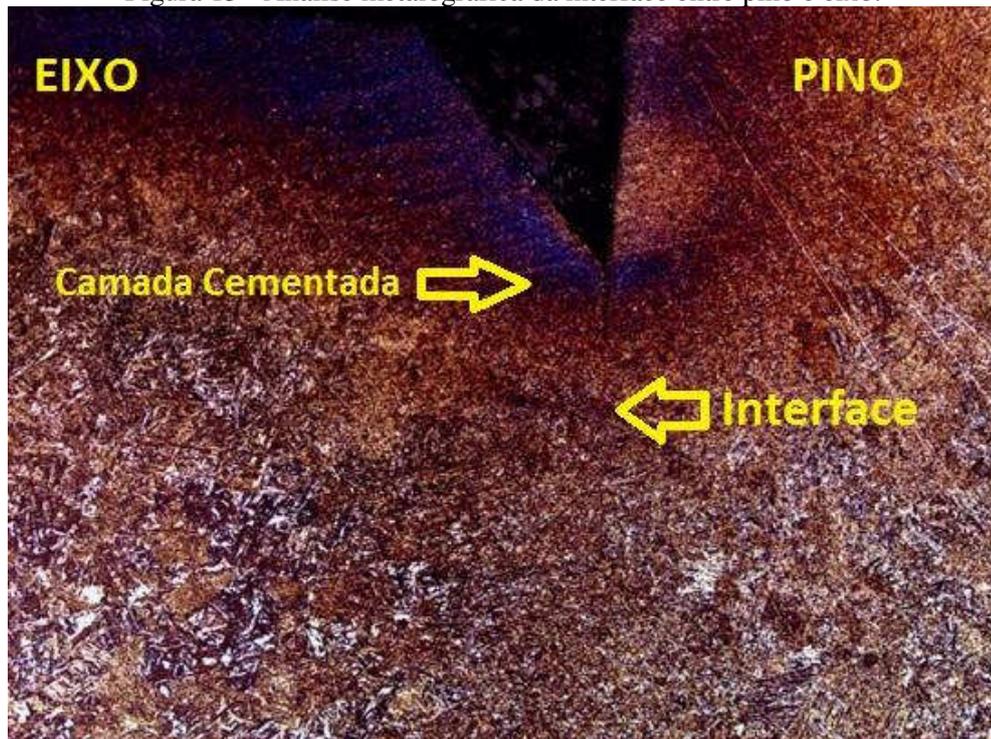
As análises apontam que a densidade hidrostática do pinhão do concorrente A é 7,4% superior que a do pinhão Zen. As imagens da tabela são evidências que levam a acreditar que o material do pinhão pode resultar em falha por fadiga, embora o valor de densidade esteja dentro do limite especificado no desenho técnico da peça.

O procedimento correto para mensurar o quanto a porosidade do pinhão influencia na falha seria fazer um DOE com o fator densidade, com uma diferença entre os níveis maior àquela encontrada nas análises metalográfica dos pinhões ZEN e do concorrente A visando reproduzir a falha prematura do AM com pinhões com a densidade baixa.

3.8.6. Análise metalográfica da interface entre pino e furo do eixo

A figura 15 apresenta uma imagem gerada por uma câmera fotográfica acoplada ao microscópio ótico de uma amostra da interface entre pino e eixo.

Figura 15 - Análise metalográfica da interface entre pino e eixo.



Fonte: Laboratório de Metalografia da Zen S.A. Indústria Metalúrgica.

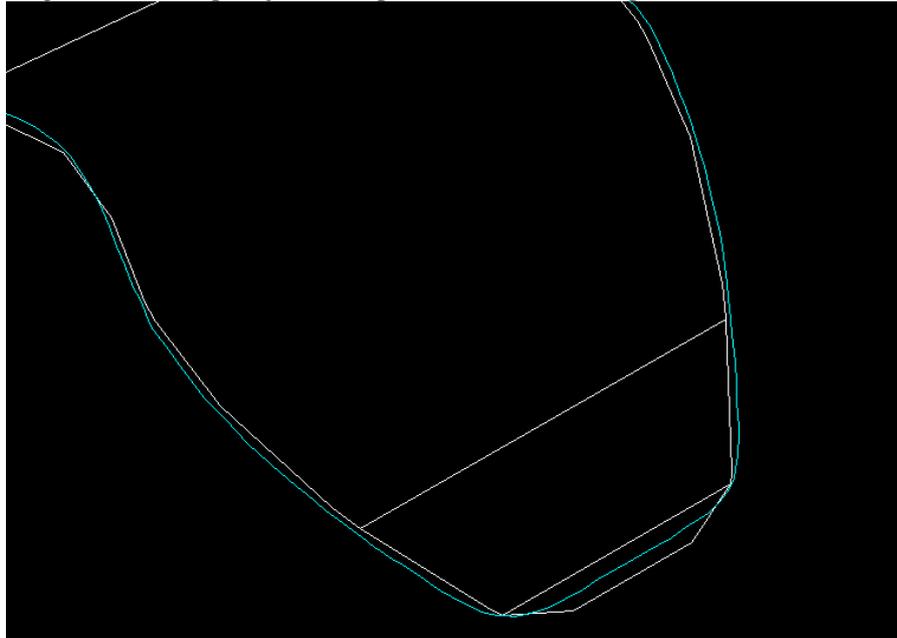
A análise levou às seguintes conclusões:

- A estrutura metalográfica tanto do eixo quanto do pino é predominantemente martensítica, a concluir por comparações com fotos contidas em CHIAVERINI (1998);
- Não existe camada cementada na região do furo. Pode-se considerar que não entra oxigênio na interface entre os componentes, mostrando novamente que a interferência da montagem é mantida;
- A têmpera ocorre por completo, a estrutura metalográfica do eixo e do pino são idênticas;
- A interface consiste numa região de “micro solda” oriunda do TT ao qual a peça é submetida;
- A dureza HRA do eixo é satisfatória não deixando possibilidade do pino se deslocar em condições normais de operação do AM. Os valores de dureza superficial do pino e do eixo são idênticos.

3.8.7. Escaneamento tridimensional do pinhão

O escaneamento dos dentes do pinhão foi feito conforme especifica o item e o perfil dos dentes foi comparado com o perfil teórico do desenho técnico. Na figura 16 a linha em azul corresponde ao perfil real escaneado, a linha em branco é o perfil teórico (desenho técnico).

Figura 16 - Comparação entre perfil do dente real e perfil do dente teórico.



Fonte: Autor.

O perfil escaneado foi analisado no software Solid Edge e verificou-se que a largura do dente do pinhão na posição correspondente ao raio de base estava em média 0,052 mm superior ao LSE. Como o excesso de material do pinhão se apresenta em todo o dente, e que em 5 pinhões medidos todos apresentam dentes mais largos, é prudente assumir que 100% das peças compradas estão fora do especificado, uma vez que trata-se de um processo de fabricação com pouquíssima variabilidade dimensional (CHIAVERINI, 1992; GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ, 2009) e que a matriz de compactação de pó está desgastada. Não é conhecido o quanto este desvio na dimensão do pinhão pode influenciar na falha. Trata-se de um aumento de 0,92% em relação à especificação nominal 2Z da peça.

Para mensurar a relevância deste parâmetro do pinhão no desempenho do AM em testes de bancada, também foi escaneado o pinhão do concorrente A. Os resultados desta medição e a comparação entre os três perfis - Zen real, Zen teórico e Concorrente A – Levou à conclusão de que o desvio na cota 2Z detectado é irrelevante no desempenho do AM.

4. RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos com a construção do FMEA. Todos os objetivos específicos do trabalho devem ser atendidos pelos resultados apresentados aqui. Os objetivos 2 e 3, citados no capítulo 1, já foram atingidos com a construção das tabelas 3 e 4. Os objetivos específicos 1 e 4, são atingidos com os resultados apresentados nos itens 4.1 e 4.2, respectivamente.

4.1. Parâmetros que mais influenciam na falha

Os métodos de detecção de causas de falha propostos na tabela 7, os quais geraram diretrizes mais específicas em relação aos modos de falha discutidos, levaram às seguintes conclusões em relação ao pinhão do AM:

- **A montagem de bucha no pinhão influencia diretamente e negativamente na falha:** A bucha tem comprimento inadequado para viabilizar travamento por recalque no pinhão. O “canto vivo” do pinhão resulta em buchas ovalizadas e trincadas. Tudo isso resulta em um engrenamento irregular entre pinhão e coroa e, logo, desgaste prematuro e falha do AM.
- **O pinhão apresenta defeitos em seu processo de fabricação:** A presença de poros no pinhão aponta para densidade baixa e os vazios na peça fazem com que o pinhão falhe por fadiga prematuramente. Esta é a característica que difere o desempenho do pinhão comprado pela Zen e o pinhão do concorrente A. A distribuição de porosidade do pinhão Zen aponta para defeitos na compactação e na pureza dos elementos de liga (CHIAVERINI, 1992).
- **A matriz de compactação do pinhão gera peças fora das dimensões especificadas:** A figura 16 apresenta a prova de que esta matriz deve ser substituída. Ainda que o desvio na especificação seja pequeno, a empresa deve prezar por colocar no mercado peças com especificações técnicas conforme o desenho especifica.

Ainda com os resultados dos testes propostos na tabela 7 também foi possível constatar:

- **A montagem do pino no eixo consiste num processo capaz de atender às especificações técnicas:** Os estudos estatísticos propostos na tabela 7 apontaram para uma usinagem do furo satisfatória e dimensões do pino também, garantindo interferência de montagem conforme a especificação de projeto. O TT do eixo garante uma microsolda na interface entre pino e eixo garantindo travamento, levando a acreditar que o deslocamento do pino observado (seja ele na direção que for) é oriundo do impacto gerado pela quebra dos pinhões.

4.2. Ações recomendadas

Finalmente, para atingir também o objetivo 4 no item 1.6.2, a tabela 11 apresenta as ações recomendadas, para cada causa de falha apresentada.

Tabela 11 - Ações recomendadas

CAUSA POTENCIAL	AÇÕES RECOMENDADAS
Não ocorre recalque na montagem da bucha.	Projeto de novo punção e matriz para montagem de bucha no pinhão; retirada do “canto vivo” do pinhão por um processo adicional de fabricação (usinagem, escareamento, tamboreamento controlado); aumento do comprimento da bucha.
Montagem do pino inadequada.	Especificar diâmetro do pino pós TT; adicionar alinhamento do pino em relação ao eixo como especificação de projeto.
Material do pinhão está fora do especificado.	Aumentar a especificação de densidade do pinhão; solicitar desenvolvimento de um processo de compactação mais consistente.
Interferência de montagem do pino está fora do especificado.	Verificar a influência da folga entre bucha do pinhão e pino via DOE;
Dureza do eixo está fora do especificado.	Nenhuma ação recomendada.
Dimensional do pinhão está fora do especificado.	Solicitação de fabricação de uma nova matriz de compactação de pó que garanta dimensões do pinhão dentro das tolerâncias especificadas no desenho técnico.

Fonte: Autor.

Como já foi dito no capítulo 3, na definição do FMEA, segundo BORROS (2008) e BERTSCHE (2008), os métodos de detecção propostos na tabela 7 também fazem parte de ações recomendadas. Eles consistem em outputs do FMEA. Neste trabalho decidiu-se, porém, apresentar estes métodos e seus resultados no capítulo 3, uma vez que são eles que fundamentam as ações recomendadas de alteração do projeto ou do sistema de qualidade do produto, apresentadas na tabela 11.

5. CONCLUSÃO

O FMEA realizado, embora não contenha todas as colunas conforme o exemplo da tabela 2, resultou na obtenção de todas as respostas aos objetivos propostos para o trabalho. Esta ferramenta provou sua eficácia e superou as expectativas do grupo envolvido com o FMEA. Para trabalhos futuros é necessário que sejam gerados novos índices de severidade, ocorrência e detecção, levando em conta o cenário após as ações recomendadas na tabela 11.

De fato essas ações recomendadas foram realizadas na prática. Foi projetado um novo ferramental para montagem de bucha no pinhão, que teve também um chanfro usinado no furo garantindo uma montagem adequada. O comprimento da bucha foi alterado e atualmente a montagem garante travamento da bucha por recalque e encravamento. Esta alteração eliminou o modo de falha denominado “bucha do pinhão se desloca”, isto foi verificado no monitoramento dos testes de bancada realizados depois das alterações feitas no produto.

A densidade do pinhão também foi alterada e o fornecedor desta peça propôs uma alteração na liga do material. Estas alterações resultaram, nos últimos testes de bancada, numa melhoria significativa na durabilidade do AM. Em junho de 2014 tivemos o primeiro AM testado em bancada que atingiu k ciclos com pinhões sinterizados (anteriormente somente pinhões fabricados em aço conformado atingiram k ciclos em testes de bancada).

Ainda é necessário realizar mais testes e continuar acompanhando o índice PPM deste produto para de fato averiguar que houve uma melhora consistente na durabilidade do mesmo, uma vez que foram realizados poucos testes após as modificações que foram feitas no projeto. Mesmo assim a Zen decidiu voltar a vender este produto, que tinha demanda acumulada registrada.

Houve diversos contratempos durante a realização deste trabalho, sobretudo no que se refere ao uso do laboratório de testes, que esteve interditado por mais de um mês entre março e junho de 2014. Foi um grande aprendizado usar o FMEA na melhoria deste produto e esta mostrou sua capacidade de auxiliar na maturidade no gerenciamento de projetos e no trabalho em equipe que a complexidade no processo de melhoria do produto demandou. Este trabalho de conclusão de curso foi um resultado de colaboração mútua entre os setores da Zen, sobre tudo os setores de pesquisa e desenvolvimento, produtos correntes, metrologia, metalografia e produção.

Atualmente a equipe envolvida com a melhoria deste produto atua em outro modo de falha, o qual não foi citado neste trabalho. Os objetivos propostos para o trabalho foram

cumpridos e o FMEA será disponibilizado para a empresa, como histórico de melhoria do AM.

REFERÊNCIAS

- ABNT. NBR 5462 **Confiabilidade e Manutenibilidade – Terminologia**. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1994.
- AIAG. **FMEA – Análise de Modo e Efeitos de Falha Potencial**. 4º edição, 2011.
- AIAG. **CEP - Controle Estatístico de Processo - Manual de Referência**. 2º edição, 2005.
- BERTSCHE, B. **Reliability in Automotive and Mechanical Engineering: Determination of Component and System Reliability**. Berlin: Springer, 2008.
- BORROR, Connie M. **The Certified Quality Engineer**. 3º edição. ASQ Quality Press, 2008.
- CHIAVERINI, Vicente. **Metalurgia do Pó**. 3º edição. São Paulo: ABM, 1992.
- CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos**, 6ª edição, São Paulo, 1988.
- CLARKE, C. **Automotive Production Systems and Standardisation: From Ford to the Case of Mercedes-Benz**. Physica-Verlag Heidelberg, 2005.
- FOWLKES, W. Y.; CREVELING, C. M. **Engineering Methods for Robust Product Design**. Massachusetts Institute of Technology: Addison-Wesley Publishing Company, Inc, 1995.
- GRUPO SETORIAL DE METALURGIA DO PÓ. **A metalurgia do pó**. 1º edição. São Paulo: Metallum Eventos Técnicos, 2009.
- KANE, V. E. **Process capability indices**. Journal of Quality Technology, v. 18, n. 1, 1986.
- MCDERMOTT, R. E.; MIKULAK, R. J.; BEAUREGARD, M. R. **The Basics of FMEA**, 2nd edition. New York: Productivity Press, 2009.
- MONTGOMERY, Douglas C. **Introduction to statistical quality control**. ISBN 0-471-30353-4. 5th edition. Arizona State University: John Wiley & Sons, Inc, 2005.
- NAUNHEIMER, H.; et al. **Automotive Transmissions: Fundamentals, Selection, Design and Application**. 2nd edition. Springer, 2011.
- STAMATIS, D. H. **Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution**. ASQC Quality Press, 1995.
- STONE, R.; TUMER, I.; STOCK, M. **Linking product functionality to historic failures to improve failure analysis in design**. London: Springer-Verlag, 2005.
- TOLEDO, José C; AMARAL, Daniel C. **FMEA – Análise do Tipo e Efeito de Falha**. Ed. GEPEQ – Grupo de Estudos e Pesquisa em Qualidade. UFSCar, 2006.

VIANA, Sérgio. **Notas de aula de metrologia.** Curso de Engenharia de Produção Mecânica e Tecnologia em Mecatrônica Industrial, 2009.

ANEXOS

ANEXO A - Critérios para atribuição de índice de severidade no FMEA

Efeito	Critério: Severidade do Efeito no Produto (Efeito no Cliente)	Classificação
Falha em atender requisitos de segurança ou regulamentares	O modo de falha potencial afeta a segurança na operação do veículo e/ou envolve não-conformidade com a regulamentação governamental sem aviso prévio.	10
	O modo de falha potencial afeta a segurança na operação do veículo e/ou envolve não-conformidade com a regulamentação governamental com aviso prévio.	9
Perda ou degradação da função primária	Perda da função primária (veículo inoperável, não afeta operação segura do veículo).	8
	Degradação da função primária. (veículo operável, mas com nível de desempenho reduzido).	7
Perda ou degradação da função secundária	Perda da função secundária (veículo operável, mas com função(ões) de Conforto / Conveniência inoperável(is)	6
	Degradação da função secundária (veículo operável, mas com função(ões) de Conforto/ Conveniência operável(is) com nível de desempenho reduzido.	5
Incômodo	Aparência ou ruído audível, veículo operável, item não conforme notado pela maioria dos clientes (mais de 75%).	4
	Aparência ou ruído audível, veículo operável, item não conforme notado por muitos clientes (50%).	3
	Aparência ou ruído audível, veículo operável, item não conforme notado por clientes observadores (menos do que 25%).	2
Nenhum	Sem defeito perceptível.	1

Fonte: AIAG (2011), FMEA – Análise de Modo e Efeitos de Falha Potencial, 4º edição.

ANEXO B - Critérios para atribuição de índice de detecção no FMEA

Oportunidade para Detecção	Critério: Probabilidade de Detecção pelos Controles do Processo	Rank	Probabilidade de Detecção
Oportunidade de não detecção	Não existe controle de processo corrente; Não pode detectar ou não foi analisado.	10	Quase Impossível
Provavelmente não irão detectar em nenhuma estação	Modo de Falha e/ou Erros (Causas) não são facilmente detectadas (ex.: auditorias aleatórias).	9	Muito Remota
Detecção de Problemas Depois do Processamento	Detecção do Modo de Falha após o processamento por um operador através de meios visuais/tatos/auditivos.	8	Remota
Detecção de Problemas na Fonte	Detecção do Modo de Falha na estação por um operador através de meios visuais/tatos/auditivos ou através do uso de um dispositivo de atributo (passa não passa, torque manual, torquímetro de estalo, etc). após processamento.	7	Muito Baixa
Detecção de Problemas Depois do Processamento	Detecção do Modo de Falha após processamento pelo operador através do uso de dispositivos por variável ou na estação pelo operador através do uso de um dispositivo de atributos (passa não passa, torque manual, torquímetro de estalo, etc).	6	Baixa
Detecção de Problemas na Fonte	Detecção do Modo de Falha ou Erro (Causa) na estação pelo operador através do uso de dispositivo por variável ou por controles automáticos na estação que irão detectar peças discrepantes e notificar o operador (luzes, alarme, etc.). Dispositivos utilizados no set up e primeiras peças verificadas (para causas de set up apenas).	5	Moderada
Detecção de Problemas Após Processamento	Detecção do Modo de Falha após o processamento, por um controle automático que irá detectar peças discrepantes e bloquear peças para prevenir o processamento futuro.	4	Moderadamente Alta
Detecção de Problemas na Fonte	Detecção do Modo de Falha na estação por controles automáticos que irão detectar peças discrepantes e bloquear peças na estação para prevenir o processamento futuro.	3	Alta
Detecção de Erros e/ou Prevenção de Problemas	Detecção de erros (Causas) na estação através de controles automáticos que irão detectar o erro e prevenir peças discrepantes que foram feitas.	2	Muito Alta
Detecção não aplicada; Prevenção de Erros	Prevenção de Erros (causas) é um resultado de um projeto do dispositivo, projeto de máquina ou projeto da peça. Peças discrepantes não podem ser feitas porque o item é a prova de erros através do projeto do processo/produto.	1	Quase Certa

Fonte: AIAG (2011), FMEA – Análise de Modo e Efeitos de Falha Potencial, 4º edição.