

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Wilson Barros de Camargo

**REDUÇÃO DE VAZAMENTOS PARA TAMPA DO COMANDO
DO MOTOR EM GARANTIA COM APLICAÇÃO DO 6-SIGMA
JUNTO AO TESTE FUJI E O ENSAIO DE DEFORMAÇÃO
PERMANENTE**

Taubaté - SP

2019

WILSON BARROS DE CAMARGO

**REDUÇÃO DE VAZAMENTOS PARA TAMPA DO COMANDO
DO MOTOR EM GARANTIA COM APLICAÇÃO DO 6-SIGMA
JUNTO AO TESTE FUJI E O ENSAIO DE DEFORMAÇÃO
PERMANENTE**

Dissertação apresentada para obtenção do Título de Mestre no Curso Mestrado Profissionalizante em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Área de Concentração: Gestão de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Álvaro Azevedo Cardoso.

Taubaté - SP

2019

SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas / UNITAU

C172r Camargo, Wilson Barros de
Redução de vazamentos para a tampa do comando do motor em garantia com aplicação do 6-Sigma junto ao Teste Fuji e o ensaio de deformação permanente / Wilson Barros de Camargo. -- 2019.
88 f. : il.

Dissertação (Mestrado) – Universidade de Taubaté, Departamento de Engenharia Mecânica e Elétrica, 2019.
Orientação: Prof. Dr. Álvaro Azevedo Cardoso, Departamento de Engenharia Mecânica.

1. 6-Sigma. 2. DMAIC. 3. Teste Fuji. 4. Deformação Permanente à Compressão. 5. Tampa do comando. I. Título. II. Mestrado em Engenharia Mecânica.

CDD – 658.5

Ficha catalográfica elaborada por Shirlei Righeti – CRB-8/6995

WILSON BARROS DE CAMARGO

**REDUÇÃO DE VAZAMENTOS PARA TAMPA DO COMANDO DO MOTOR EM
GARANTIA COM APLICAÇÃO DO 6-SIGMA JUNTO AO TESTE FUJI E O ENSAIO DE
DEFORMAÇÃO PERMANENTE**

Dissertação apresentada para obtenção do Título de Mestre no Curso Mestrado Profissionalizante em Engenharia Mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Área de Concentração: Gestão de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Álvaro Azevedo Cardoso.

Data: _____

Resultado: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Álvaro Azevedo Cardoso - Universidade de Taubaté

Assinatura _____

Prof. Dra. Miroslava Hamzagic - Universidade de Taubaté

Assinatura _____

Prof. Dr. Francisco Antonio Lotufo - Universidade Estadual Paulista

Assinatura _____

Dedico esse trabalho primeiramente a Deus por me conceder a vida e a saúde, e aos meus pais que sempre me apoiaram a estudar e estiveram comigo nos melhores e nos mais difíceis momentos de minha vida.

AGRADECIMENTOS

A todos os professores do programa de mestrado profissional da UNITAU, e em especial ao professor Dr. Álvaro Azevedo Cardoso que sempre acreditou em meu potencial, me apoiou nos trabalhos e me ensinou com muita qualidade.

Aos colegas de sala pela amizade e pelo clima cooperativo criado entre todos os alunos. Tenho certeza que essa amizade e contato levaremos para toda a vida.

A todos os professores que me ensinaram, colegas de estudo e colegas de trabalho que fazem parte e passaram por minha vida, e assim me tornaram quem eu sou hoje.

À minha família que sempre vibra com cada vitória minha e que são responsáveis pelo o que eu sou hoje.

“Qualquer um que parar de aprender é velho, seja aos 20 ou aos 80. Qualquer pessoa que mantém a aprendizagem continua jovem. A coisa mais importante da vida é manter sua mente jovem”.

Henry Ford

RESUMO

O objetivo desse trabalho é reduzir em 70 percentual os casos de vazamento de óleo pela tampa do comando do motor para veículos em garantia, e aplicar a metodologia DMAIC do 6-SIGMA junto ao teste FUJI para caracterização da compressão da junta após torque final do conjunto no cabeçote e o Ensaio de Deformação Permanente para caracterizar a deformação permanente das juntas de borracha no processo do fornecedor, e conseqüentemente tomar as corretas ações no processo do fornecedor da tampa do comando e seu subfornecedor da matéria prima da borracha da junta.

Os casos de vazamento pela tampa do comando dos motores em garantia correspondem a 62% dos problemas da família de motor produzido pela fábrica localizada na região do Vale do Paraíba em São Paulo, e é a falha de maior contribuição em número de reparos e custo para a família de motores da fábrica em questão, o DPMO inicial é de 5570 considerando os motores em veículos que falham versus toda a população em até um ano em serviço. O problema em questão ganha maior proporção em motores a partir de 3 meses em serviço, e as juntas trocadas em garantia e retornadas para análise mostram que a junta de borracha encolhe para o tamanho da canaleta da tampa gerando vazamento por todo o perímetro na tampa do comando e cabeçote.

Portanto nesse trabalho será demonstrado cada etapa do DMAIC, na fase 'Definir' a declaração do escopo, a declaração refinada do problema e a definição da saída crítica 'Y'; na fase 'Medir' será feito uma revisão de todo processo, levantado com o time os potenciais 'X's' que afetam a saída crítica 'Y', e o cálculo do DPMO inicial; na etapa 'Analisar' será demonstrado a análise e caracterização da causa raiz através do Teste de Deformação Permanente para validar a correlação da deformação permanente da borracha com a temperatura de injeção, e através do teste Fuji realizar a medição da compressão da junta após torque final do conjunto, e assim caracterizar a compressão da junta falhada e comparar a compressão da junta nova do conjunto do fornecedor do Brasil e do mesmo fornecedor da China que fabricam o mesmo produto; na fase 'Melhorar' será realizado a implementação das melhorias propostas pelo fornecedor em conjunto com o time de engenharia de produtos, e na fase controlar será calculado o DPMO final e comparado com o DPMO inicial, e também serão demonstrados os controles para que o problema não volte mais a ocorrer, assim como o resultado em campo após as ações.

Como resultado da aplicação do DMAIC houve uma redução significativa dos casos reparados em garantia por problema de vazamento, mensurado e validado através do DPMO final de 308, assim como uma melhora significativa com relação aos custos da não conformidade, aumento da satisfação do time envolvido, melhora da percepção do cliente final e aumento da competitividade interna quando comparado o desempenho de qualidade em garantia.

Dessa forma conclui-se que o 6-Sigma é uma ferramenta chave para a resolução de problemas de grande proporção como a redução dos casos de vazamento pela tampa do comando na garantia, principalmente quando utilizada em conjunto com ferramentas específicas nas etapas corretas do DMAIC como feito com a aplicação do teste Fuji e o Ensaio de Deformação Permanente.

Palavras-chave: 6-Sigma, DMAIC, Teste Fuji, Deformação Permanente à Compressão, Tampa do comando.

ABSTRACT

The purpose of this work is to reduce in 70% the failures related to engine valve cover oil leak on vehicles on warranty, and apply 6-Sigma DMAIC methodology in conjunction with FUJI test for characterization of the gasket compression after the final torque applied on the valve cover with the cylinder head, as well as the Compression Set technique to characterize the permanent deformation of the gasket rubber material on the supplier process, and consequently apply the correct actions on the valve cover supplier and its gasket rubber raw material sub-supplier.

The leak issues thru valve cover gasket on warranty correspond to 62% for the engine family produced by the factory located in the Sao Paulo countryside, and is the failure with major contribution considering the number of repairs and cost of poor quality for the engine family from the related company, the initial DPMO corresponds to 5570 considering the vehicles equipped with this engine family considering to the whole population on warranty up to one year in service. This problem becomes of greater proportion on vehicles over 3 months in service, and the analysis of the returned failed gaskets shows that the gaskets are shrinking up to the cover groove and consequently leaking thru the whole perimeter on the joint between valve cover gasket and cylinder head.

Therefore this work demonstrates each step of the DMAIC, on the 'Define' phase it will be declared the scope, the refined problem statement and defined the key output 'Y'; on the 'Measure' phase it will be revised the whole process, raised with the team the potential causes 'X's' which can affect the 'Y', and calculated the initial DPMO; on the 'Analyze' phase it will be demonstrated the analysis and the characterization of the root cause thru the Compression set which validates the correlation of the rubber permanent deformation with the injection temperature, and the Fuji Test performed to measure the gasket compression after the assembly final torque, characterize the compression of the failed gasket and used to benchmark the gasket compression for a brand new gasket from the national supplier and the same supplier from China source which manufactures the same product; on the 'Improve' phase it will be implemented the improvement actions proposed by the supplier in conjunction with the product engineering team; and on the 'Control' phase it will be controlled the final DPMO and compared with the initial DPMO, as well as demonstrated the controls implemented to avoid the problem to return, as well as followed the result on field.

As a result of the 6-Sigma DMAIC methodology application a significant reduction of the exchanged valve cover gaskets on warranty were observed, measured and validated thru the calculated final DPMO of 308, as well as a significant improvement of the cost of poor quality, increasement of team satisfaction, improvement of final customer perception and internal competitiveness increasement for the quality warranty performance.

By this work it can be concluded that 6-Sigma is a key tooling to solve problems of great proportion as the reduction of oil leaks for valve cover on warranty, especially when used in conjunction with specific tooling on the correct step of DMAIC as the usage of the Fuji Test and Compression Set.

Keywords: 6-Sigma, DMAIC, Fuji Test, Compression set, Valve Cover.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Defeitos por milhão e a correspondente métrica Sigma	20
Tabela 2 - Tipos de rolos fornecidos de acordo com o nível de pressão	38
Tabela 3 - Especificações e ambiente operacional para realização do teste	39
Tabela 4 - Função e ação de cada membro do time no projeto	53
Tabela 5 - Fornecedor e fontes de fornecimento para cada planta de motores	62
Tabela 6 - Escolha do tipo de filme conforme pressão mínima especificada de 1MPa	65
Tabela 7 - Resumo dos resultados da análise de compressão das tampas com o <i>Fuji Test</i>	70

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Resumo das etapas da fase definir.....	22
Figura 2 - Diferentes ferramentas e técnicas utilizadas na fase definir	23
Figura 3 - Resumo das etapas da fase medir	23
Figura 4 - Diferentes ferramentas e técnicas utilizadas na fase medir	24
Figura 5 - Resumo das etapas da fase analisar	25
Figura 6 - Diferentes ferramentas e técnicas utilizadas na fase analisar	26
Figura 7 - Resumo das etapas da fase melhorar	26
Figura 8 - Diferentes ferramentas e técnicas utilizadas na fase melhorar	27
Figura 9 - Resumo das etapas da fase controlar	28
Figura 10 - Diferentes ferramentas e técnicas utilizadas na fase controlar	28
Figura 11 - Perfil de lideranças de alto e baixo desempenho	29
Figura 12 - Estrutura do fluxo de conhecimento dos times seis sigma	31
Figura 13 - Estrutura para teste com folha única ou <i>Mono-sheet</i>	38
Figura 14 - Estrutura para teste com folha dupla ou <i>Two-sheet</i>	38
Figura 15 - Correlação de densidade versus pressão baseado na humidade relativa e pressão	40
Figura 16 - Ilustração do <i>compression set</i> / deformação permanente	43
Figura 17 - Ilustração do dispositivo de medição do <i>compression set</i>	44
Figura 18 - Ilustração do conjunto de tampa do comando	45
Figura 19 - Funcionamento da tampa durante funcionamento do motor	46
Figura 20 - Ilustração da estrutura da tampa do comando	46
Figura 21 - Gráfico de pareto de R/1000 em garantia de motores em até 1 ano em serviço	52
Figura 22 - Gráfico de pareto de CPU em garantia de motores em até 1 ano em serviço	53
Figura 23 - Foto de uma tampa do comando que vazou em garantia	55
Figura 24 - Foto de uma tampa do comando sem vazamento	56
Figura 25 - Gráfico de pareto com base no resultado das análises de garantia	56
Figura 26 - Mapeamento macro utilizando o SIPOC	58

Figura 27 - Mapeamento do processo do fornecedor para as peças do conjunto da tampa do comando	59
Figura 28 - Diagrama de causa e efeito	60
Figura 29 - Comparativo de R/1000 em 1 ano em serviço para mesma família de motor	61
Figura 30 - Ilustração dos pontos de medição e características utilizadas para comparação da junta	62
Figura 31 - Ilustração dos pontos da temperatura do molde de injeção da junta	64
Figura 32 - Ilustração da diferença da deformação permanente à compressão para peças injetadas na temperatura mínima e peças injetadas na temperatura máxima	64
Figura 33 - Revelação do teste de compressão FUJI para o conjunto da tampa nacional nova.....	66
Figura 34 - Revelação do teste de compressão FUJI para o conjunto da tampa da China nova	67
Figura 35 - Revelação do teste de compressão FUJI para a tampa do comando nacional de garantia..	67
Figura 36 - Correlação da temperatura e humidade relativa para seleção da curva de pressão	67
Figura 37 - Correlação da densidade da cor do filme revelador com a pressão para o conjunto da tampa do comando nacional novo	68
Figura 38 - Correlação da densidade da cor do filme revelador com a pressão para o conjunto da tampa do comando chinês	69
Figura 39 - Correlação da densidade da cor do filme revelador com a pressão para o conjunto da tampa do comando nacional falhado em garantia	69
Figura 40 - Painel de temperatura da injetora da junta de borracha conFigurado para temperatura ideal no fornecedor 'X' do Brasil	71
Figura 41 - Chave e senha implementados no painel para restringir os parâmetros da temperatura de injeção a somente a engenharia de manufatura de processos	72
Figura 42 – Seleção da curva de pressão para os testes com o composto anterior e composto novo.	73
Figura 43 – Revelação do teste Fuji e comparativo de intensidade de cor e pressão entre juntas com composto novo e composto anterior	73
Figura 44 - Folha de registro para controle dos parâmetros críticos de injeção e temperatura	74
Figura 45 - Características críticas da tampa do comando	75
Figura 46 - Características críticas da junta	75
Figura 47 - Controle da altura da canaleta da tampa do comando ao longo do tempo	76
Figura 48 - Controle da largura da canaleta da tampa do comando ao longo do tempo	76

Figura 49 - Controle da espessura da junta ao longo do tempo	76
Figura 50 - Controle da largura da junta ao longo do tempo	77
Figura 51 - Controle da deformação permanente à compressão ao longo do tempo	77
Figura 52 - Cálculo do DPMO antes e depois da melhoria do X1 implementada	78
Figura 53 - Controle da dureza ao longo do tempo	78
Figura 54 - Cálculo do DPMO antes e depois da melhoria do X2 implementada	79
Figura 55 - Acompanhamento da tendência de reparo por vazamento de óleo pela tampa do comando na garantia para veículos em até 12 meses em serviço	79

LISTA DE ABREVIATURAS

AEM: *Ethylene Acrylic Rubber* ou Borracha Acrílica de Etilino

ACM: *Acrylic Rubber* ou Borra Acrílica (ACM – Acrylic Rubber)

BB: *Black Belt*

CPU: Custo por unidade

DFSS: *Design for Six Sigma* ou Projeto para Seis Sigma

DMAIC: *Define, Measure, Analyze, Improve, Control* ou Definir, Medir, Analisar, Melhorar, Controlar

DPM: Defeitos por milhão

FKN: *Fluorinated Rubber* ou Borracha Fluinada

FMEA: *Failure Mode and Effect Analysis* ou Modo de Falha e Análise do Efeito

GB: *Green Belt*

GE: *General Electric*

HNBR: *Hydrated Nitrile Rubber* ou Borracha Nitrílica Hidratada

MPa: Mega Pascal

MBB: *Master Black Belt*

PDCA: *Plan, Do, Check and Act* ou Planejar, Fazer, Verificar e Agir

R/1000: Reparos por mil

SIPOC: *Supplier, Input, Process, Output, Control* ou Fornecedor, Entrada, Processo, Saída, Controle

VMQ: *Silicone Rubber* ou Borracha de Silicone

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1. Objetivos	15
1.2. Objeto de Pesquisa	15
1.3. Delimitação	16
1.4. Limitações da Pesquisa	16
1.5. Justificativa	16
1.6. Estrutura do Trabalho.....	17
2. FUNDAMENTAÇÃO TEORICA.....	18
2.1. Seis Sigma.....	18
2.1.1. Surgimento do Seis Sigma	18
2.1.2. O que é Seis Sigma.....	19
2.2. Metodologia DMAIC	22
2.2.1. ‘D’ – Definir (<i>Define</i>).....	22
2.2.2. ‘M’ – Medir (<i>Measure</i>)	23
2.2.3. ‘A’ – Analisar (<i>Analyze</i>).....	24
2.2.4. ‘I’ – Melhorar (<i>Improve</i>)	26
2.2.5. ‘C’ – Controlar (<i>Control</i>)	27
2.2.6. Liderança no Seis Sigma	29
2.2.7. Equipe Seis Sigma.....	30
2.2.8. Estrutura seis sigma.....	32
2.2.9. Aplicações do seis sigma na indústria automotiva.....	35
2.3. Teste Fuji.....	37
2.3.1 Contribuições acadêmicas	40
2.4. Ensaio de deformação permanente à compressão (<i>Compression set</i>).....	42
2.4.1 Aplicações	44
2.5. Tampa do comando	45
2.5.1 Aplicações	47
3. DESENVOLVIMENTO.....	49
3.1. Metodologia de Pesquisa	49
3.2. Método de Pesquisa	50
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	52
4.1. Escolha do problema.....	52
4.2. Fase Definir.....	53

4.3. Fase Medir.....	57
4.4. Fase Analisar.....	60
4.5. Fase Melhorar	70
4.6. Fase Controlar	74
5. CONCLUSÕES.....	80
REFERÊNCIAS.....	82

1. INTRODUÇÃO

De acordo com o Ministério da Economia (2018) a indústria automotiva brasileira possui um papel muito importante para a economia com participação de 22% no PIB industrial e 4% no PIB total (2015), assim como uma importante participação na estrutura industrial mundial sendo em 2016 o 10º maior produtor e 8º mercado interno. Portanto é importante que as empresas instaladas aqui no Brasil busquem melhorias no processo para se tornarem mais eficientes, produtivas, de melhor qualidade e atendam a satisfação do cliente para se manterem competitivas.

Segundo Pyzdek e Keller (2011) o seis sigma possui amplos objetivos relacionados a melhoria dos processos, sendo uma implementação bem sucedida sinônimo de lucratividade, sustentabilidade e crescimento a longo prazo, além de ser uma valiosa estratégia para atender a forte demanda do mercado por produtos e serviços, através de melhorias em capacidade, produtividade, e com o foco na redução do tempo de venda. Para Hausch (2009) o equilíbrio entre a satisfação do cliente e forças competitivas para as empresas automobilísticas é representada por produtos com qualidade, processos estáveis, custos operacionais adequados que resultam em bons desempenhos financeiros. Atualmente a maioria das grandes montadoras no Brasil aplicam o seis sigma que são institucionalizados por suas matrizes com a finalidade de tornar os processos mais robustos e melhorar as suas métricas de competitividade.

Em estudo realizado por Hwang *et al* (2017) concluem que os métodos estruturados (DMAIC e DFSS) da filosofia seis sigma podem ajudar indivíduos a organizar, a explorar e aumentar sua criatividade e assim melhorar o desempenho de projetos que por consequência aumentam o desempenho da companhia. Os benefícios do seis sigma são mútuos para o líder do projeto e sua equipe, assim como para a companhia.

Nesse contexto esse trabalho visa aplicar a estratégia seis sigma através da metodologia DMAIC para solução de um problema de vazamento de óleo pela tampa do comando do motor que afeta o cliente final durante o período de garantia.

Dos veículos reparados em garantia em torno de 5% do problema de vazamento acontece com 2857 Km, 50 % acontecem com 10998 km e 90 % com 19151 Km, sendo um problema que impacta a satisfação do cliente. Essa pesquisa é justificada pela necessidade de melhoria do processo como um todo, e envolve o processo da montadora, serviços e fornecedor da montadora.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

O objetivo desse estudo de caso é apresentar a aplicabilidade do seis sigma por meio da aplicação de cada fase da metodologia DMAIC em conjunto as ferramentas de Teste Fuji e Deformação Permanente a compressão, e eliminar entre 80% a 100% dos casos de vazamento de óleo em garantia, assim evitando a insatisfação do cliente e eliminando os desperdícios e custos gerados para o reparo do problema.

1.1.2. Objetivos Específicos

Para atender o objetivo geral serão pesquisados os objetivos específicos via pesquisa bibliográfica sobre: 6-Sigma, o teste Fuji, Ensaio de Deformação Permanente a Compressão e a Tampa do Comando do motor. Será explorado no 6-Sigma a importância de cada fase do DMAIC (D – Definir; M – Medir; A – Analisar, I – Melhorar, C – Controlar), assim como suas principais ferramentas. Para o Teste Fuji e o Ensaio de Deformação Permanente serão explorados os seus principais conceitos e aplicações, e para o componente Tampa do Comando do motor será explorado seus conceitos, suas funções no motor e aplicações na indústria automotiva.

Após a pesquisa bibliografia será demonstrado a aplicação do 6-Sigma e de suas ferramentas em cada fase do DMAIC para a eliminação do problema que ocorre com o cliente final durante a garantia. E por fim obter os resultados e conclusões desta dissertação.

1.2. Objeto de Pesquisa

Este trabalho propõe a pesquisa e a aplicação de todas as etapas do DMAIC e algumas de suas ferramentas, a pesquisa e aplicação do teste Fuji e do Ensaio de Deformação Permanente à compressão, com a finalidade de solucionar um problema de vazamento de óleo do motor à combustão ocorrente em garantia pela tampa do comando do motor.

1.3. Delimitação

Esta pesquisa está delimitada em atuar nos processos de montagem da tampa do comando na empresa, e nos processos de injeção de junta e montagem do conjunto no fornecedor, assim como a atuação junto ao time de serviços para análise dos casos de garantia. A metodologia do 6-Sigma à ser utilizada será o DMAIC para melhoria do processo e eliminação dos casos de vazamento de óleo no cliente final.

1.4. Limitações da Pesquisa

Este trabalho está limitado a pesquisa bibliográfica com levantamento de no mínimo 70% das referências dos últimos 9 anos de autores, congressos, jornais, monografias, artigos, dissertações e teses, atlas, revistas e jornais especializados, e documentos que possam contribuir com o conhecimento das melhores tecnologias disponíveis no Brasil e mundo.

1.5. Justificativa

Segundo Martins *et al* (2014) é necessário verificar se o tema selecionado é relevante cientificamente e para tanto faz se necessário a justificativa do mesmo. Portanto a justificativa desse trabalho visa valorizar o tema selecionado em caráter científico e prático.

Segundo Salomon apud Martins (2014) a justificativa deve apresentar razões sobretudo teórica que legitimam a pesquisa científica. Portanto nesse trabalho será explorado na revisão da literatura as palavras chaves que compõem sua estrutura, assim como sua relevância que está relacionada à sua aplicação e na demonstração em caráter científico em eliminar o maior problema em garantia que se tornou uma causa comum para o consumidor final e que impacta diretamente sua satisfação. Para isso será aplicado a filosofia seis sigma através da metodologia DMAIC, e será explorado as ferramentas de teste FUJI e Ensaio de Deformação Permanente à Compressão junto a metodologia DMAIC.

Para garantir o sucesso da aplicação do seis sigma a fase inicial é crucial, pois demanda montar a equipe correta envolvendo todo o time afetado e que possa contribuir, refinamento da voz do cliente através do acompanhamento das ocorrências nas concessionárias e análise dos dados de garantia dos veículos reparados, e da caracterização da saída chave 'Y',

para que todas demais fases do DMAIC sejam guiadas corretamente e seja obtido sucesso na implementação desse projeto.

1.6. Estrutura do Trabalho

Esta dissertação está detalhada para facilitar a compreensão do leitor e conforme normas ABNT e UNITAU, sendo organizada em Resumo, Introdução (Cap.1), Fundamentação Teórica (Cap.2), Desenvolvimento (Cap.3), Resultados (Cap.4), Conclusões (Cap.5) e Referências.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEORICA

2.1. Seis Sigma

2.1.1. Surgimento do Seis Sigma

De acordo com Pyzdek e Keller (2011) o seis sigma originou-se em 1970 quando uma empresa japonesa assumiu a fabrica da Motorola que produzia televisores ‘Quasar’ nos Estados Unidos, e com a gestão dos japoneses a mesma fábrica começou a fabricar televisores com 20 vezes menos defeitos, e obtendo esse resultado com a mesma mão-de-obra, tecnologia e recursos, que por consequência reduziu os custos e provou que o problema estava na antiga gestão da Motorola. Segundo Rodrigues (2006) a aplicação dos conceitos seis sigma foi proposta pelo engenheiro Bill Smith da Motorola em 1987 para atender a expectativa do então presidente Bob Galvin, que estabeleceu em 1981 a meta de aumentar o desempenho da Motorola em dez vezes em apenas cinco anos. De acordo com King-Jang apud Patel e Desai (2018) a motorola lançou o Seis Sigma em 1987, e seus resultados foram significativos no início do programa que resultou no prêmio Malcolm Bridge em 1988. Para Witt e Baker (2018) o seis sigma desde sua implementação se expandiu ao redor do globo e expandiu seu escopo através de melhorias de processo, assim como desenvolvimento de novos produtos, aplicações de empresas de puro serviço como o de cuidados com a saúde. De acordo com Murphy apud Henderson e Evans (2000) relatam que os primeiros proponentes após a Motorola foram a Texas Instruments, Allied Signal, Eastman Kodak, Borger-Warner Automotive, GenCorp, Navistar International e Siebe plc. De acordo com Rodrigues (2006) em 1994 Jack Welch que então era o atual presidente da GE iniciou os estudos da metodologia seis sigma e afirmou que era o caminho para a busca de bens e serviços com nível de qualidade superior e de maior rentabilidade para a empresa. De acordo com Coronado e Antony (2002) a GE (*General Electric*) é uma das empresas mais bem sucedida a implementar os projetos seis Sigma, e segundo o relatório anual da GE em 1999 relata que a iniciativa seis sigma em seu quinto ano como sistema operacional, onde se iniciou sem benefício financeiro, e finalizou em 1999 produzindo mais de \$2 bilhões em benefícios financeiros. O seis sigma se mostra eficiente desde sua primeira aplicação para a solução dos problemas e vem sendo aplicado por diversas empresas nacionais e globais, e empresas de diversos ramos como manufatura, automotivas,

saúde, instituições de ensino, serviços em geral e outras áreas, pois sua aplicação muda a forma de gerir das empresas de maneira mais estruturada e com mais eficiência.

2.1.2. O que é Seis Sigma

Para Pande *et al* (2001) a melhor definição para seis sigma está relacionado a um sistema abrangente e flexível para alcançar, sustentar e maximizar o sucesso das empresas, sendo direcionado por uma próxima compreensão das necessidades dos clientes, pela disciplina no uso dos fatos, dados e análise estatística com atenção e de maneira rápida, eficaz e responsável com relação a gestão, melhorias e a reinvenção de processos relacionados aos negócios. No seis sigma é crucial a definição do problema através do entendimento do que realmente o cliente necessita para que todo projeto tenha sucesso, e então trabalhar com os dados e fatos fará com que se chegue a causa raiz e a elimine de modo que o problema não mais retorne.

Segundo Muralidharan (2015) o seis sigma é um processo disciplinado, orientado a projeto, possui uma abordagem direcionada por dados e é uma metodologia para eliminação dos defeitos no processo, desde manufatura a transacionais, e de produto a serviço, e também é uma filosofia de gerenciamento que busca a melhora da eficiência e da eficácia. Para Pochampally e Gupta (2014) é uma metodologia utilizada para melhorar um processo existente (manufatura / serviços). Segundo Ramos *et al* (2008) seis sigma é considerado uma estratégia gerencial para acelerar o aprimoramento em processos, produtos e serviços, e o termo ‘Sigma’ mede a capacidade do processo trabalhar sem falhas, ou seja, o Seis Sigma busca uma redução que entrega aos clientes uma perfeição de 99,99966% ou 3,4 falhas por milhão.

Pyzdek e Keller (2011) se referem ao seis sigma como aplicação do método científico para o projeto de sistema de gerenciamento, e processos de negócios, que proporcionam aos funcionários a entregar maior valor aos clientes e empregados. O método científico funciona conforme (Pyzdek e Keller, 2011):

1. Observação dos aspectos importantes do mercado e/ou do seu negócio;
2. Desenvolvimento de uma explicação experimental ou hipótese que seja compatível com as observações feitas;
3. Realização das previsões baseando-se nas hipóteses;

4. Teste das previsões através de experimentos ou de observações mais cuidadosas. Guardar as observações e modificar as hipóteses baseados em fatos, e se houver variação utilizar a estatística;

5. Repetir os passos 3 e 4 até que chegue ao ponto de não haver mais discrepâncias entre hipóteses e resultados de experimentos.

Para Muralidharan (2015) o principal objetivo do seis sigma é identificar, isolar, e eliminar a variação ou defeitos em um processo de manufatura ou transacional, sendo o seis sigma um processo robusto que busca a satisfação do cliente através da redução das variações. O seis sigma envolve alguns conceitos chaves (MURALIDHARAN, 2015):

- Defeito: Falha para entregar o que o cliente deseja;
- Variação: O que o consumidor enxerga e sente;
- Crítico para Qualidade: Os atributos mais importantes para o cliente;
- Operações Estáveis: Assegurar consistência, prever melhorias ao processo os quais o cliente enxergue e sinta;
- Capacidade do processo: O que o processo pode entregar;
- Projeto para seis sigma (*Design for Six Sigma*): Projetar para atender as necessidades do cliente e capacidade do processo.

De acordo com Westgard *et al* (2018) o ‘seis’ no seis sigma refere-se ao objetivo final ideal de todos processos com seis desvios padrão que podem ser colocados dentro do limite de tolerância do processo, e qualquer coisa fora desses limites de especificação são considerados um defeito, e os defeitos podem ser contados e estimados para então serem convertidos a taxa de defeitos por milhão (DPM) conforme Tabela 1.

Tabela 1 - Defeitos por milhão e a correspondente métrica Sigma

DPM	Nível Sigma de Curto Prazo	Nível Sigma de Longo Prazo	Yield (Rendimento)
3,4	6	4,5	99,99966
32	5,5	4	99,9968
233	5	3,5	99,98
1350	4,5	3	99,87
6210	4	2,5	99,4
22750	3,5	2	97,7
66807	3	1,5	93,3

158655	2,5	1	84,1
308538	2	0,5	69,1
500000	1,5	0	50,0
691462	1	-0,5	30,9
841345	0,5	-1	15,9
911193	0	-1,5	6,7

Fonte: Westgard *et al*, 2018

De acordo com Rodrigues (2006) a curva de gaus é a representação da probabilidade de um evento e do conceito de variabilidade, onde o grau de concentração dos dados estão em torno de um valor central e o esperado, e essa variabilidade pode ser medida através do desvio padrão, que é representado pela letra grega sigma (σ). O Sigma é o desvio padrão e segundo Triola (2013) o desvio padrão é a medida de variação mais comumente utilizada, e é uma medida de variação dos valores em torno da média, e pode ser calculado o desvio padrão da amostra ou o desvio padrão da população, conforme equações 1 e 2 abaixo:

$$s = \sqrt{(\sum(x - \bar{x})^2) \div (n - 1)} \quad (1)$$

onde:

s = desvio padrão da amostra

x = valor no conjunto de dados

\bar{x} = média da amostra

n = tamanho da amostra

$$\sigma = \sqrt{(\sum(x - \mu)^2) \div (N)} \quad (2)$$

onde:

σ = Desvio padrão da população

x = valor no conjunto de dados

μ = média da população

N = tamanho da população

2.2. Metodologia DMAIC

Segundo Ramos *et al* (2008) a Motorola desenvolveu o ‘MAIC’ (Medir, Analisar, Melhorar, Controlar) como uma evolução do ciclo PDCA e que depois foi adotado pela GE acrescentando o ‘D’ e formando o DMAIC (Definir, Medir, Analisar, Melhorar, Controlar).

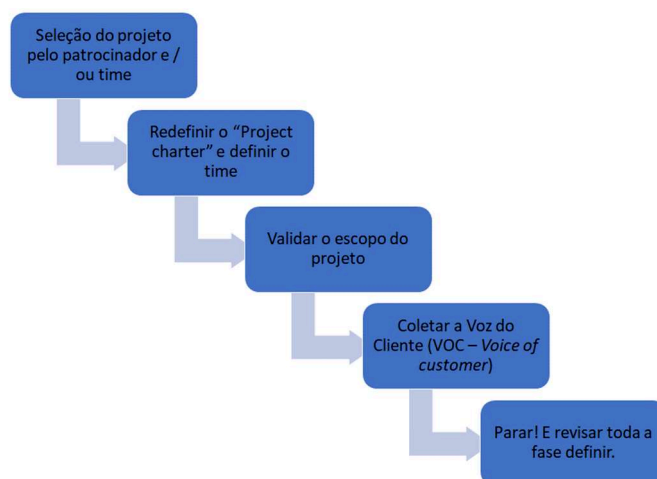
De acordo com Furterer (2014) o seis sigma utiliza a abordagem de resolução de problemas DMAIC e um amplo conjunto de ferramentas de qualidade para a solução do problema. O DMAIC é utilizado para melhorar processos, sendo as fases do DMAIC bem definidas e padronizadas, porém as etapas de cada fase do DMAIC podem variar de acordo com a referência utilizada.

De acordo com Girdler *et al* (2016) as cinco etapas da metodologia seis sigma conhecida como DMAIC são ‘Definir’ (*Define*), ‘Medir’ (*Measure*), ‘Analisar’ (*Analyze*), ‘Melhorar’ (*Improve*), e ‘Controlar’ (*Control*). E as etapas serão revista conforme sequência.

2.2.1. ‘D’ – Definir (*Define*)

De acordo com Girdler *et al* (2016) definir envolve identificar problemas, objetivos, recursos, escopo, e organograma para a finalização do projeto. Para George *et al* (2005) o propósito da fase definir é de que o time e seu patrocinador acordem o escopo, os objetivos, metas financeiras e de desempenho para o projeto. A Figura 1 resume as etapas da fase definir.

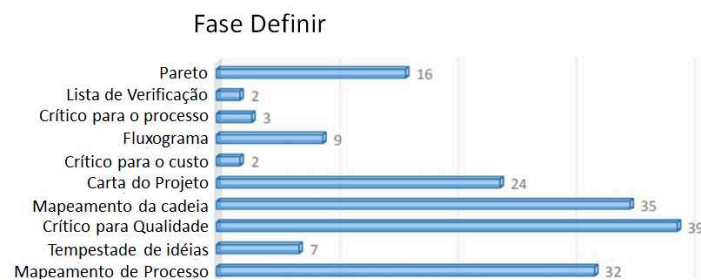
Figura 1 - Resumo das etapas da fase definir



Fonte: George *et al*, 2005

Com relação as principais ferramentas utilizadas na fase definir Patel e Desai (2018) estudaram a utilização das ferramentas e concluíram que o CTQ – *Critical to Quality* (Crítico para qualidade), SIPOC – (*Supplier* (fornecedor), *Input* (entrada), *Process* (processo), *Output* (saída), *Customer* (cliente), *Process Map* (Mapeamento do processo), *Project Charter* (Carta do projeto) foram as mais utilizadas, enquanto que as ferramentas como *Brainstorming*, CTP – *Critical to Process* (Crítico para o processo), CTC – *Critical to cost* (Crítico para o custo), formulário check-list foram dificilmente utilizadas. A Figura 2 ilustra a quantidade de utilização.

Figura 2 - Diferentes ferramentas e técnicas utilizadas na fase definir

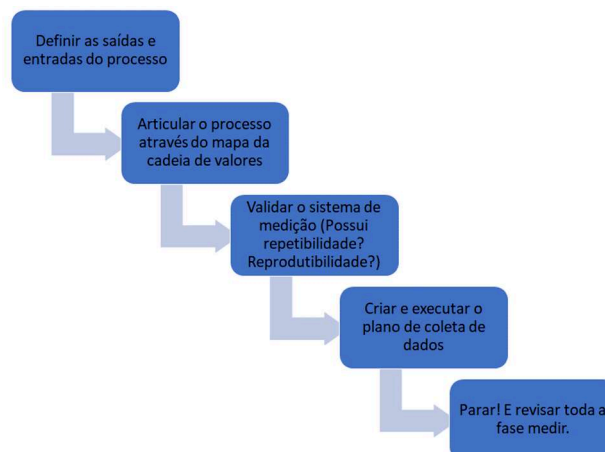


Fonte: Patel e Desai, 2018

2.2.2. ‘M’ – Medir (*Measure*)

Para Girdler *et al* (2016) a fase medir coleta dados para medir o desempenho atual do processo. De acordo com George *et al* (2005) o propósito da fase definir é obter o completo entendimento do estado atual do processo e coletar dados confiáveis relacionados a velocidade do processo, qualidade, e custos que irão ser utilizados para expor as causas fundamentais dos problemas. A Figura 3 ilustra resumidamente as etapas da fase medir.

Figura 3 - Resumo das etapas da fase medir



Fonte: George *et al*, 2005

Em estudo realizado por Patel e Desai (2018) sobre as principais ferramentas utilizadas na fase medir conclui-se que o *Process Capability* (Capabilidade do processo), *Data Collection Plan* (Plano de coleta de dados), *Pareto chart* (Gráfico pareto), *Cause and effect diagram* (Diagrama de causa e efeito) foram mais utilizados amplamente, enquanto ferramentas como *Check Sheet* (Folha de verificação), *R&R gauge* (gage R&R), *DPMO – Defects per million opportunities* (Defeitos por milhão de oportunidades), *Control Chart* (Gráfico de controle), *DOE - Design of experiments* (Delineamento de experimentos), *Histogram* (Histograma), *Probability Plot* (gráfico de probabilidade), *data mining* (mineração de dados), e *MSA – Measuring System Analysis* (Análise do sistema de medição) foram utilizados com menor frequência. A Figura 4 ilustra a quantidade de vezes que as diferentes ferramentas e técnicas foram utilizadas.

Figura 4 - Diferentes ferramentas e técnicas utilizadas na fase medir

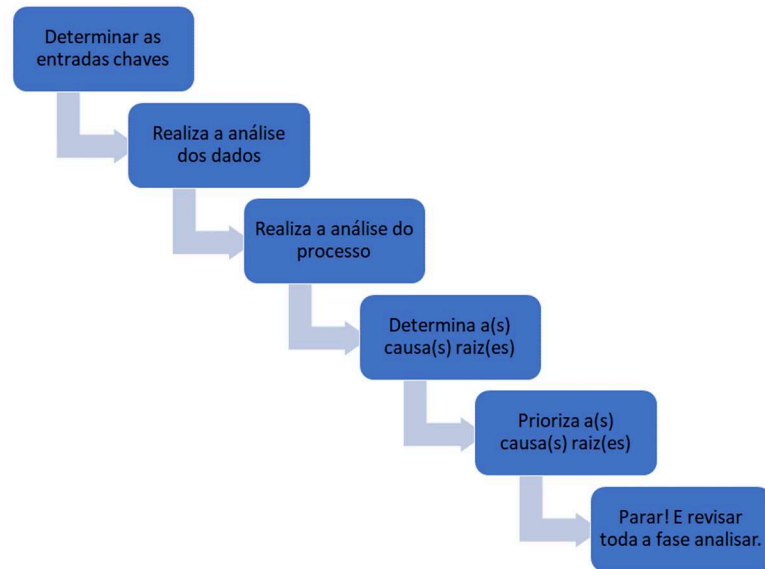


Fonte: Patel e Desai, 2018

2.2.3. 'A' – Analisar (*Analyze*)

De acordo com Girdler *et al* (2016) a fase analisar identifica e remove as verdadeiras causas raízes da variação do processo. Para George *et al* (2005) o propósito da fase analisar é identificar e validar as causas que afetam as entradas chaves e variáveis de saída relacionadas ao objetivo do projeto. A Figura 5 ilustra resumidamente as etapas da fase medir.

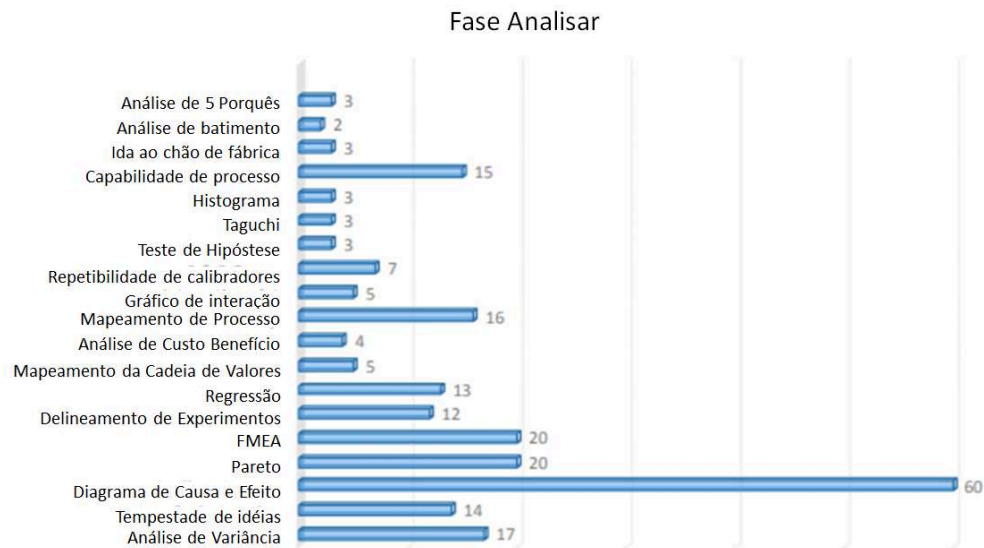
Figura 5 - Resumo das etapas da fase analisar



Fonte: George *et al*, 2005

Com relação a utilização das principais ferramentas da fase analisar Patel e Desai (2018) realizaram um estudo e concluíram que o *Cause and effect diagram* (Diagrama de causa e efeito), *FMEA – Failure Mode and Effect Analysis* (Análise do modo de falha e efeito), *Pareto chart* (gráfico de Pareto), *Process Map* (mapeamento de processo), *DOE – Design of Experiments* (Delineamento de experimentos), *Regression* (Regressão) e *Process Capability* (Capabilidade de processo) foram extensivamente utilizados na implementação do seis sigma em diferentes indústrias de manufatura, enquanto as análises dos ‘*why why*’ (porquês), *run out analysis* (análise das rodadas), *GEMBA* (Ir e ver no local), *Histogram* (Histograma), *Taguchi*, *Hypothesis testing* (Teste de Hipótese), *R&R gauge* (Gage R&R), *Interaction plot* (Gráfico de interação), *Cost Benefit analysis* (Análise de custo benefício), *VSM - Value Stream Mapping* (Mapa da cadeia de valor) não foram frequentemente utilizados. A Figura 6 ilustra a quantidade de vezes que as diferentes ferramentas e técnicas foram utilizadas.

Figura 6 - Diferentes ferramentas e técnicas utilizadas na fase analisar

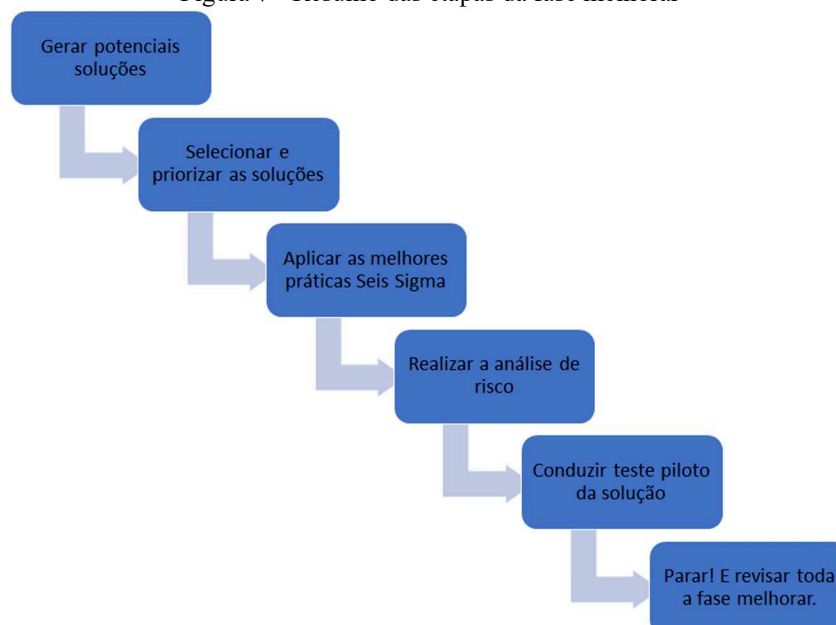


Fonte: Patel e Desai, 2018

2.2.4. 'I' – Melhorar (*Improve*)

De acordo com Girdler *et al* (2016) a fase melhorar visa um plano de eliminação da principais causas do sistema de variação que devem ser estabelecidos e implementados, como, por exemplo, a padronização de procedimentos não padronizados e simplificação de processos não burocráticos são frequentemente processos de melhorias efetivos. Segundo George *et al* (2005) é aprender através de experimentos pilotos da solução selecionada e executar a implementação de grande escala. A Figura 7 ilustra resumidamente as etapas da fase melhorar.

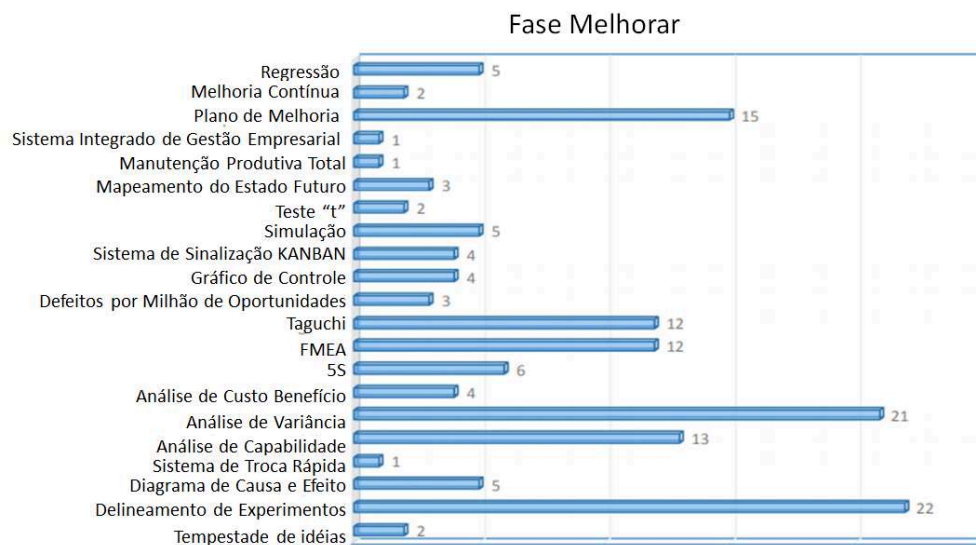
Figura 7 - Resumo das etapas da fase melhorar



Fonte: George *et al*, 2005

Com relação as ferramentas da fase melhorar segundo estudo realizado por Patel e Desai (2018) estão entre as mais utilizadas pela indústria o DOE – *Design of Experiments* (Delineamento de experimentos), ANOVA – *Analysis of Variance* (Análise de variância), Taguchi, *Process Capability* (Capabilidade de Processo), *Improvement plan* (Plano de melhoria), enquanto outras ferramentas foram mais dificilmente utilizadas como *Brainstorming*, SMED – *Single Minute Exchange of Die* (Redução do tempo de *setup*), *Cause and Effect Diagram* (Diagrama de causa e efeito), *Cost benefit analysis* (Análise de custo benefício), 5 S, DPMO – *Defects per million opportunities* (Defeitos por milhão de oportuniadds), *Control Chart* (Gráfico de controle), KANBAN, *Simulation* (Simulação), t-test (teste t), *future state map* (mapa do estado futuro), TPM – *Total Productive Maintenance* (Manutenção produtiva total), ERP – *Enterprise Resource Planning* (Software logístico de planejamento de recursos), Kaizen, *Regression* (Regressão). A Figura 8 ilustra a quantidade de vezes que as diferentes ferramentas e técnicas foram utilizadas.

Figura 8 - Diferentes ferramentas e técnicas utilizadas na fase melhorar



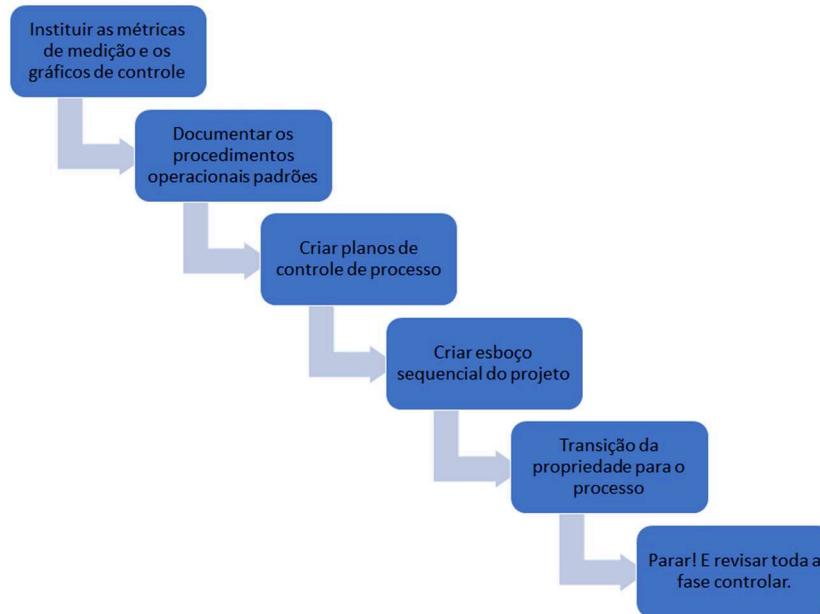
Fonte: Patel e Desai, 2018

2.2.5. 'C' – Controlar (*Control*)

Para Girdler *et al* (2016) a fase controlar consiste na validação da nova técnica de processo que deve ser monitorada através das análises das saídas, e consiste em realização de análises estatísticas que compara os resultados antes e depois da intervenção. De acordo com George *et al* (2005) o propósito da fase controlar é completar o projeto e entregar o processo

melhorado ao dono do processo (*process owner*) com os procedimentos para manutenção dos ganhos. A Figura 9 ilustra resumidamente as etapas da fase controlar.

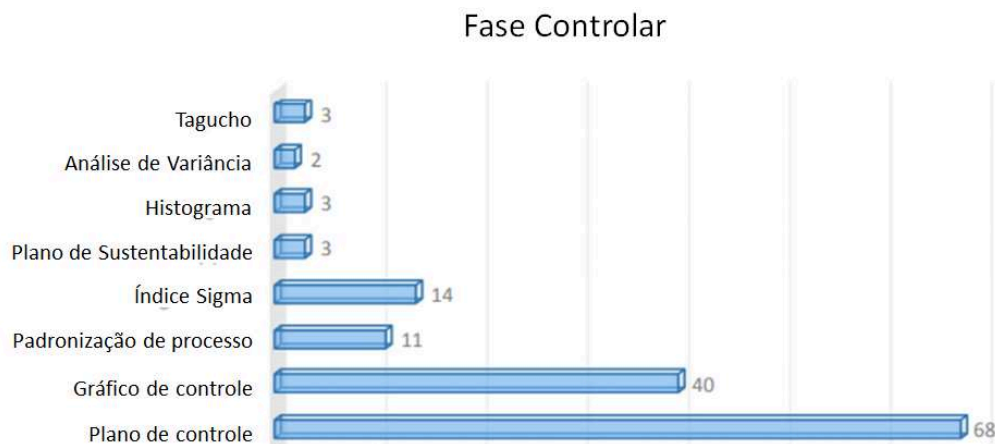
Figura 9 - Resumo das etapas da fase controlar



Fonte: George *et al*, 2005

Em estudo realizado por Patel e Desai (2018) sobre as ferramentas utilizadas na fase controlar as que mais frequentemente foram utilizadas na indústria são o *Control Plan* (Plano de Controle), *Control Chart* (Gráfico de controle), *Sigma Index* (Índice Sigma), *Standardization* (Padronização), enquanto outras ferramentas foram menos utilizadas como *Sustainability Plan* (Pano de sustentabilidade), *Histogram* (Histograma), ANOVA – *Analysis of variance* (Análise de variância) e Taguchi. A Figura 10 ilustra a quantidade de vezes que as diferentes ferramentas e técnicas foram utilizadas.

Figura 10 - Diferentes ferramentas e técnicas utilizadas na fase controlar

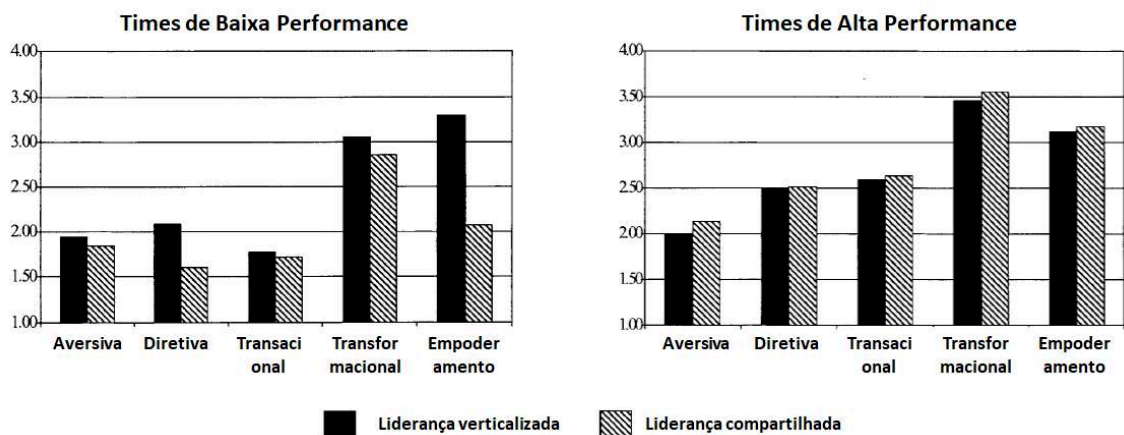


Fonte: Patel e Desai, 2018

2.2.6. Liderança no Seis Sigma

Wu *et al* (2012) em estudo sobre liderança e sucesso em projetos 6 Sigma concluem que o estilo de liderança realça a relação entre o líder do time e os membros do time, enquanto que também ajuda a melhorar as associações entre os membros do time ganhando maior independência, e que a liderança pode agir como um catalizador para confiança, comunicação, e compartilha os valores e visões com os times. De acordo com Balkundi e Kilduff (2006) liderança requer o gerenciamento das relações sociais, que se inicia pelo líder adquirir mais conhecimento com relação aos padrões da rede de ego, rede organizacional, e rede inter-organizacional, onde laços sociais são formados e mantidos, iniciativas são lançadas e evitadas, e assim o trabalho do líder é cumprido. Pearce e Sims Jr. (2002) realizaram uma pesquisa em uma grande empresa de manufatura automotiva nos Estados Unidos, e concluíram através de estudo estatístico utilizando regressão múltipla que a liderança compartilhada se destaca por possuir um importante ingrediente na explicação da efetividade do time. Pearce e Sims Jr (2002) em sua pesquisa realizaram um experimento com equipes de alto e baixo desempenhos, considerando 10 dimensões da liderança para os dois tipos de liderança, a compartilhada e a verticalizada, e desse estudo concluiu 2 aspectos importantes, sendo o primeiro: os times de alto desempenho possuem maior liderança, pois dentro de 10 dimensões, 9 se demonstraram com melhor desempenho, e o segundo aspecto é de que times de alto desempenho exibem atuação muito maior em algumas dimensões, e pouco melhor em outras dimensões para liderança compartilhada, enquanto que os times de baixo desempenho apresentam maior liderança verticalizada, conforme ilustra a Figura 11.

Figura 11 - Perfil de lideranças de alto e baixo desempenho



Fonte: Pearce e Sims Jr, 2002

Segundo Wu *et al* (2012) a coerência dos membros da equipe mede a relação entre liderança transformacional e o sucesso do projeto seis sigma em termos de inovação, desempenho técnico e atendimento ao objetivo.

A liderança nos projetos seis sigma possui um papel extremamente importante, pois é quem dá o direcional para todo o time, compartilha os objetivos e visões, motiva e envolve as pessoas corretas para que o projeto seis sigma obtenha o sucesso esperado.

2.2.7. Equipe Seis Sigma

De acordo com Zou e Lee (2010) os times seis sigma são um time especial de melhoria contínua que teve origem nos Estados Unidos na década de 80 e logo se tornou popular na indústria de manufatura mundialmente. Ainda para Zou e Lee (2010) o dilema para os times seis sigma é que precisam gerar soluções inovadoras para problemas urgentes, onde ao mesmo tempo são estritamente vinculados a uma rigorosa abordagem seis sigma. Devido a competitividade e o foco no cliente os problemas precisam ser rapidamente tratados, porém de maneira efetiva com base em dados e através da utilização correta das ferramentas em cada fase do DMAIC para que o problema seja solucionado pelo time.

Para Garland (2010) os time e as metodologias seis sigma são utilizados por muitas empresas para melhorar seus processos de manufatura. Nos dias atuais é imprescindível o conhecimento e a aplicação do seis sigma através dos times na manufatura, e que se expandem para todas areas de uma empresa, e também para os setores de serviços e saúde.

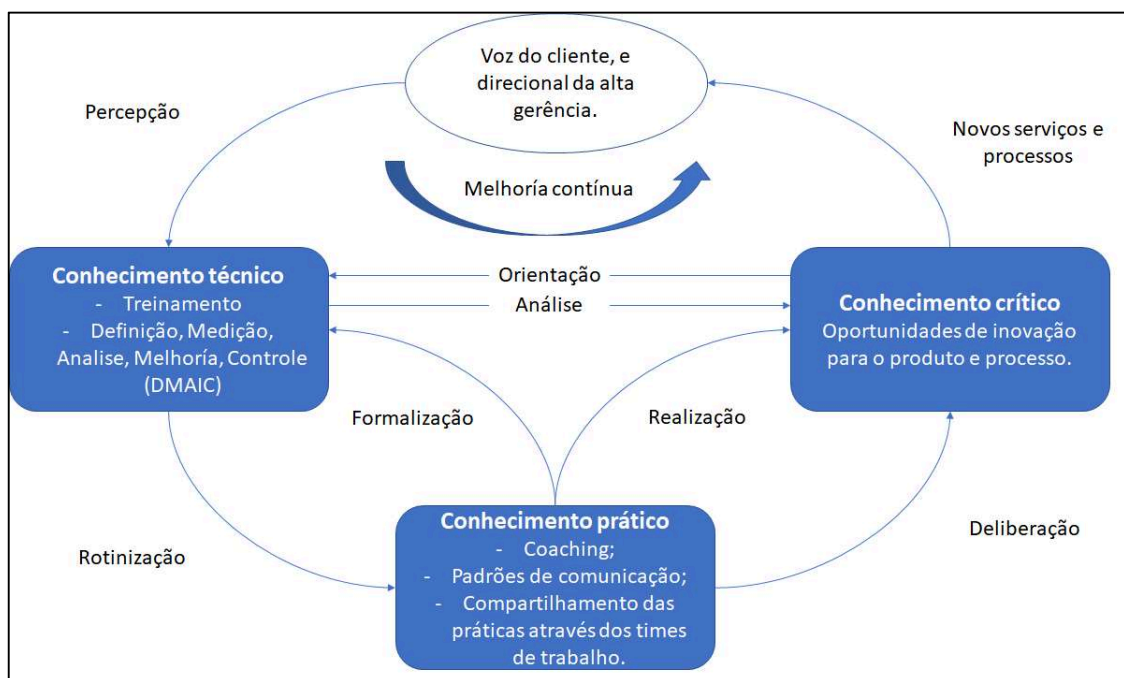
De acordo com Schroeder *et al* apud Gutierrez *et al* (2016) a definição de seis sigma consiste em uma estrutura organizada e meso-paralela para reduzir a variação em processos organizacionais através de especialistas em melhorias, métodos estruturados e métricas de desempenho para o alcance dos objetivos estratégicos. Grandes empresas, e em especiais as multinacionais possuem plantas de manufatura em todo mundo, e no entanto muitas concentram seus especialistas em desenvolvimento de processos e produtos em suas matrizes ou unidades específicas, e esses especialistas servem como ferramenta para consulta e melhoria, e por isso é extremamente recomendado a participação desses especialistas no projeto seis sigma, e especialmente na fase definir para que o projeto tome um rumo correto.

Segundo Wu e Lin apud Zou e Lee (2010) as maiores fontes de conhecimento dos time seis sigma é o *feedback* dos clientes internos e externos, e o direcional da alta gerência e outras autoridade, e para Zou e Lee (2010) o *feedback* do cliente não se torna automaticamente

conhecimento do time até que o mesmo seja disseminado entre os membros do time ou transformado em documentação. Para Ho apud Zou e Lee (2010) o envolvimento e comprometimento é considerado como um dos mais importantes fatores de sucesso para o time de seis sigma. É de extrema importância o papel da gerência e diretoria, pois possuem a visão estratégica do negócio para direcionar o líder do projeto seis sigma, ou seja o *Black Belt*, e então o líder deve transmitir a prioridade e o *feedback* do cliente ao time, assim como suas prioridades.

Segundo Zou e Lee (2010) o conhecimento crítico envolve analisar o conhecimento técnico, e então refletir sobre o conhecimento prático, sendo isso recursos para potenciais melhorias de processos e produtos na companhia, que consecutivamente podem gerar múltiplos projetos, e esse conhecimento crítico pode ser utilizado como orientação para outros projetos relacionados assim como realçar a efetividade do time a longo prazo. A Figura 12 ilustra segundo Yang apud Zou e Lee (2010) o fluxo do modelo holístico sobre transformação da informação do conhecimento técnico, crítico e prático nos grupos sociais.

Figura 12 - Estrutura do fluxo de conhecimento dos times seis sigma



Fonte: Zou e Lee, 2010

De acordo com Pyzdek e Keller (2011) as equipes seis sigma são o principal meio de desenvolver a metodologia seis sigma e atender os objetivos da empresa, e normalmente essas equipes são lideradas por um *Black Belt*, porém também pode ser liderado por um *Green Belt* treinado ou um *Six Sigma Champion*, e de qualquer forma é necessário incluir um *Black Belt* para análise dos dados, pois é uma atividade que é aplicada exclusivamente no treinamento

de *Black Belt*. Nas empresas o número de *Black Belts* é muito inferior ao número de problemas, e muitos problemas são menos complexos, o que facilita os *Green Belts* devidamente treinados a liderar alguns projetos e a se familiarizarem com a metodologia DMAIC, e à medida passarem a liderar e a auxiliar projetos cada vez mais complexos.

2.2.8. Estrutura seis sigma

Para Pyzdek e Keller (2011) para uma implantação bem-sucedida do seis sigma é necessário que haja uma estrutura organizacional para gerir e suportar as atividades do projeto. Na sequência será abordado as principais funções dentro da estrutura seis sigma.

Campeões – *Champions*

De acordo com Pyzdek e Keller (2011) os campeões são profissionais de alto escalão que possuem conhecimento sobre o seis sigma e procuram garantir o seu sucesso, assim como também podem ser os líderes informais que utilizam o seis sigma diariamente transmitindo a mensagem seis sigma. Para Muralidharan (2015) o papel do campeão ou *champion* é assegurar que os projetos corretos sejam identificados e trabalhados, garantir que o time faça um bom progresso, e garantir que os recursos requeridos para o sucesso da conclusão do projeto estejam disponível, além de que os campeões também são os patrocinadores ou *sponsors*. O campeão (RAMOS *et al*, 2008):

- Possui a função liderança dos executivos-chaves;
- Organiza e guia o começo, o desdobramento e a implementação do Seis Sigma por toda a organização;
- Compreende as teorias, princípios e práticas do Seis Sigma;
- É capaz de pavimentar o caminho para as mudanças necessárias;
- Define as pessoas que irão disseminar os conhecimentos sobre o Seis Sigma por toda empresa.

Os campeões que são mais conhecidos como *champions* mesmo nas empresas aqui no Brasil possuem um papel de extrema importancia durante todo o projeto, pois além de ajudarem a definir as prioridades, objetivo e escopo, também ajudam na eliminação das barreiras que acontecem durante todo o decorrer do projeto.

Master Black Belt

De acordo com Pyzdek e Keller (2011) o *master black belt* é o mais alto nível de proeficiência técnica e profissional, e representa a liderança técnica no programa seis sigma, devendo estar familiarizados com as boas práticas do *black belt*, assim como possuir conhecimentos aprofundados sobre a teoria da matemática que forma a base dos métodos estatísticos, de gerenciamento de projetos, *coaching*, ensino, e da organização do programa em toda empresa. Para Muralidharan (2015) os *master black belts* (MBB) são responsáveis pelo treinamento e orientação dos *black belts* (BB) assim como liderar as estratégias envolvidas no projeto seis sigma, sendo sua responsabilidade assegurar que as atividades de melhorias sejam implementadas e nas perspectivas corretas. Com relação a estrutura da empresa de acordo com Muralidharan (2015) os MBBs podem ser BBs treinados ou um consultor externo a organização. Com relação as suas habilidades de acordo com Pydek e Keller (2011) os MBBs devem possuir excelentes habilidades de comunicação e serem instrutores, e também de acordo com Muralidharan (2015) devem ser *experts* na tomada de decisão e nos conceitos de engenharia. Para Ramos *et al* (2008) algumas das atividades dos MBBs são descritas na sequência abaixo.

- Auxilia na implementação indispensável do seis sigma dentro da organização;
- Agente de mudanças dentro das organizações;
- Diretamente ligado aos campões ou *champions* e os auxilia no planejamento de treinamento de novos projetos para melhoria contínua;
- Liderança técnica para os projetos seis sigma;
- Tempo integral dedicado ao seis sigma;
- Treinado intensivamente;
- *Expert* em solução de problemas estatísticos.

O *Master Black Belt* assim como o *Champion* possui um papel importante de quebrar as barreiras sempre que o líder do projeto encontrar dificuldades, principalmente relacionado a dificuldades técnicas, além de ser o responsável pela revisão e aprovação de cada fase dos projetos seis sigma na empresa.

Black Belt

Para Pyzdek e Keller (2011) os *Black Belts* atuam como agente de mudanças e devem possuir excelentes habilidades interpessoais, conhecer várias ferramentas técnicas, e possuírem boa comunicação verbal e escrita, facilidade em se comunicar em fóruns públicos e

privados, facilidade em atuar em grupos pequenos sendo como participante ou sendo como líder, facilidade em trabalho em dupla, bom entendimento e seguimento das instruções recebidas dos líderes e patrocinadores. Para Muralidharan (2015) os BBs são líderes de times treinados na metodologia DMAIC com habilidades de facilitação, responsáveis por guiar os projetos de melhoria até a sua finalização, além de serem responsáveis por treinar e guiar os *Green Belts* (GB) assim como liderar projetos de melhoria utilizando metodologias específicas. Com relação a sua função segundo Muralidharan (2015) os BBs devem realizar rigorosas análises estatísticas com a aquisição de dados adicionais e de entrada de outros recursos, e assim fazer recomendações aos MBBs e aos *champions* dos projetos. Com relação as suas habilidades os *Black Belts* de acordo com Ramos *et al* (2008) devem possuir:

- Habilidade de relacionamento interpessoal;
- Iniciativa e entusiasmo;
- Motivação para realizar as mudanças e alcançar os resultados planejados;
- Possuir boa influência no setor em que atuam;
- Trabalho em equipe;
- Profundos conhecimentos técnicos em sua área de trabalho;
- Saber aplicar ferramentas específicas e os conhecimentos do seis sigma de acordo com cada projeto;
- Habilidades técnicas em estatística e de solução de problemas;
- Prover treinamento aos *Green Belts*;
- Prover orientação e *coaching* aos *Green Belts*;

Durante sua atuação o *Black Belt* segundo Ramos *et al* (2008) precisa realizar as ações conforme:

- Caracterização e otimização dos processos-chaves dos negócios;
- Identificação e execução de projetos para redução dos defeitos, nos processos, produtos e serviços, assim minimizando ou eliminando a variação;
- Auxiliar atividades que reduzam trabalho, materiais, tempo de desenvolvimento e estoques, assim ajudando a enxergar e eliminando desperdícios;
- Solucionar problemas, através da identificação dos fatores responsáveis pelas saídas dos processos, dessa forma eliminando o problema em sua causa raiz.

Os *Black Belts* possuem um papel centralizado nos projetos seis sigma, pois são os responsáveis de captar as informações dos clientes, *champions* e *master black belts* e informar ao time, estando sempre em contato com todos os membros do time, e liderando as ações dos

projetos, além de terem a responsabilidade de selecionar as pessoas corretas para o desenvolvimento do projeto.

Green Belts

De acordo com Pyzdek e Keller (2011) os *Green Belts* também são líderes de projetos seis sigma, e possuem a capacidade de criar e facilitar as equipes, liderando os projetos desde o início ao fim, porém devido aos *Green Belts* não serem treinados em todas as ferramentas no ciclo DMAIC, quando lideram projetos, precisam ser assistidos por *Black Belts*. Para Muralidharan (2015) os *green belts* (GB) estão mais próximos aos processos operacionais e trabalham diretamente com os operadores do chão de fábrica e ao pessoal de entrega dos serviços, sendo responsáveis pela coleta, interpretação inicial, e início da formulação das recomendações que alimentam os *black belts*. Segundo Ramos *et al* (2008) os *green belts* pertencem à média chefia dentro da organização, e suas responsabilidades estão descritas conforme a sequência:

- Execução do seis sigma em período parcial, sendo parte de suas tarefas diárias;
- Auxilia os *black belts* na coleta de dados e no desenvolvimento e realização dos experimentos;
- Lideram projetos de menor impacto dentro de suas respectivas áreas;
- Possuem menor conhecimento das ferramentas seis sigma, pois seu treinamento é mais simplificado comparado ao dos *Black Belts*.

Os *green belts* dentro das empresas possuem papéis muito importantes no auxílio ao *black belt* durante o projeto, através do auxílio da coleta de dados, e dos conhecimentos técnicos de suas áreas, e são imprescindíveis no time do projeto e para o sucesso do projeto.

2.2.9. Aplicações do seis sigma na indústria automotiva

As pesquisas relacionadas ao seis sigma recentemente mostram-se de grande importância acadêmica e científica, assim como também de extrema importância para a indústria automotiva mundial e no Brasil. Olsson *et al* (2018) da Volvo Car Group demonstram a utilização do Projeto para seis sigma (*Design for Six Sigma - DFSS*) durante o desenvolvimento do veículo, e utilizando ferramentas como DOE e simulação Monte-Carlo para prever a robustez e variação da vibração do assento causado pelo desbalanceamento de rodas e direção. Kondaru *et al* (2018) do grupo Mahindra da Índia em estudo utilizaram a

abordagem de Desenvolvimento para Seis Sigma para adquirir dados de rodagem com veículos no mundo real e simular estatisticamente os ciclos de direção, assim selecionando através de um processo robusto os dados mais apropriados para o ciclo de direção. Zhang *et al* (2018) da Fiat Chrysler Automotive (FCA) Estados Unidos utilizaram a abordagem de desenvolvimento para seis sigma (DFSS) para o desenvolvimento do sistema de indução de ar (*Air Induction System – AIS*) para um motor V8 atingindo seus requerimentos funcionais, e como ferramenta utilizou o modelo de delineamento Taguchi para desenvolvimento dos parâmetros do sistema de indução de ar (AIS), e como resultado o modelo otimizado apresentou-se robusto com relação a variação de temperatura e melhor com relação ao desempenho do ruído do sistema de admissão. Sambandan *et al* (2018) da Fiat Chrysler Automotive (FCA) India utilizaram o desenvolvimento para seis sigma (DFSS) para captura da voz do cliente interno e traduziram para medidas técnicas para prover discernimento dos dados requeridos para a seleção do sistema ‘TXV’ que realiza a separação da parte inferior e superior do vapor comprimido do sistema de refrigeração e regula a quantidade de fluxo de refrigerante do sistema de ar condicionado. Carmona (2017) utilizou em seu estudo uma das ferramentas mais utilizadas no seis sigma, a análise de regressão, e aplicou suas análise em carroceria de veículos, onde a amostra de veículos foi utilizada para explicar o nível de reclamação do cliente com relação ao esforço de fechamento da porta através de medições executadas em laboratórios utilizando padrão. Shankaranarayana (2017) da Hero MotoCorp aplicou a metodologia DMAIC do seis sigma para melhorar o processo de injeção de peças em seu fornecedor na indústria de motocicletas, e aplicou ferramentas como SIPOC (*Supplier – Input – Process – Output – Customer*), PMAP (*Process Map*), Diagrama de causa e efeito, e o delineamento de experimento (*design of experiments – DOE*) para melhoria do processo e redução dos defeitos em seu fornecedor. Meyer *et al* (2017) da AVL Test Systems utilizaram os conceitos de limites seis sigma para considerar a precisão e acuracidade da medição da pressão da combustão pela calibração dos motores a combustão. Almeida (2017) da Ford Motor Company estudou uma das ferramentas do seis sigma, o mapeamento de processo para implementação com qualidade de futuros modelos a serem implementados. Jeong *et al* (2016) da Hyundai Motor Company utilizaram o desenvolvimento para seis sigma (DFSS) para otimizar o nível de percepção do sistema freio e eliminando ruídos de freio como os agudos. Ge *et al* (2015) da Catepillar estudaram as metodologias tradicionais como *Advance Product Quality Planning* (APQP) e *Design for X*, e então se aprofundaram no estudo do desenvolvimento para seis sigma (DFSS) para aplicações de sistemas integrados de motores, como foco no controle da taxa de ar-combustível que afeta

tanto o desempenho quanto as emissões dos motores. Arvanitis *et al* (2015) em estudo conjunto da FCA Estados Unidos e FEV North America aplicaram a metodologia de desenvolvimento para seis sigma (DFSS) para o desenvolvimento de som do conjunto de *powertrain* (sistema de arraste) para veículos de alto desempenho.

Vários estudos científicos e acadêmicos sobre o seis sigma estão sendo aplicados na indústria automotiva recentemente, e no entanto em sua maioria são aplicados na fase de desenvolvimento. Também não foram encontrados estudos da aplicação da metodologia DMAIC do 6-Sigma para melhoria de processo para redução de vazamento pela tampa do comando do motor junto a utilização dos conceitos de ‘*Fuji Test*’ e ‘*compression set*’ ou ‘ensaio de deformação permanente à compressão’ que serão revistos na sequência desse trabalho.

2.3. Teste Fuji

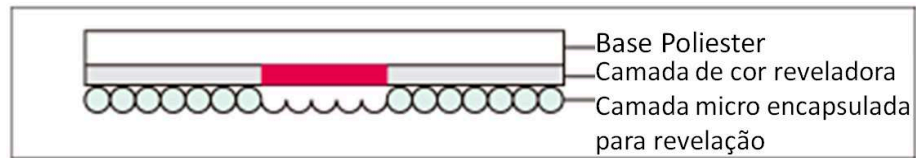
De acordo com a Sensor Products Inc. (2018) o termo ‘*Fuji Paper Test*’ refere-se a qualquer experimento de medição feito com o ‘*Fujifilm Prescale*’ ou ‘*Pressurex-micro*’, que são produtos que contêm uma camada de micro-esferas que rompem quando a pressão é aplicada, e após a ruptura o revelador muda de cor para uma sombra rosada se for o ‘*Fujifilm Prescale*’ ou cor cinza se for ‘*Pressurex-micro*’, e a sua intensidade de cor muda de proporção de acordo com a quantidade de pressão.

De acordo com a FujiFilm Global (2018) o ‘*Fujifilm Prescale*’ pode medir de maneira precisa a pressão, a distribuição da pressão, e o balanceamento da pressão, onde caminhos vermelhos irão aparecer quando a pressão for aplicada, assim como a densidade da cor modifica de acordo com a variação dos níveis de pressão.

Em estudo realizado por Lekue *et al* apud Fujifilm Global (2018) o filme é composto de base de tereftalato de polietileno (PET - *polyethylene terephthalate*) que é coberto com material colorido que estoura quando aplicado um certo nível de pressão, e o fluido liberado reage com o filme do meio, formando caminhos vermelhos de diferentes intensidades dependendo da pressão aplicada.

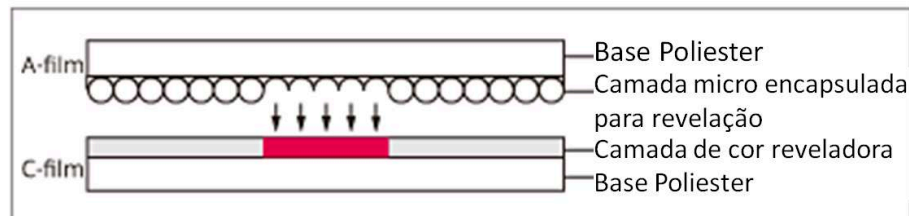
De acordo com a Fujifilm Global (2018) existe dois tipos de Prescale, conforme:

1. *Mono-Sheet type* (Tipo folha única) – De acordo com a Fujifilm Global (2018) o tipo ‘*Mono-sheet*’ ou folha única é composto de base de poliéster o qual é revestido por material colorido para revelação, e com material micro-encapsulado com camada colorida no topo. A Figura 13 ilustra a composição do tipo folha única ou *Mono-sheet*.

Figura 13 - Estrutura para teste com folha única ou *Mono-sheet*

Fonte: Fujifilm Global, 2018

2. *Two-Sheet type* (Tipo folha dupla) – De acordo com a FujiFilm Global (2018) o tipo ‘*Two-sheet*’ é composto por duas camadas de base de poliéster, sendo uma revestida como uma micro camada encapsulada com material colorido, e a outra com uma camada de material colorido para revelação. A Figura 14 ilustra a composição do tipo folha dupla ou *Two-sheet*.

Figura 14 - Estrutura para teste com folha dupla ou *Two-sheet*

Fonte: Fujifilm Global, 2018

De acordo com a FujiFilm Global (2018) existe oito tipos de rolos fornecidos de acordo com o nível de pressão, que deve ser escolhido de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 - Tipos de rolos fornecidos de acordo com o nível de pressão

Product	Product Code	Pressure range [MPa] 1 MPa \approx 10.2kgf/cm ²		Product Size W(mm) x L(m)	Type					
		0,05 7,25	0,2 29			0,50,6 73 87	2,5 363	10 1,450	50 7,290	130 18,890
		Pressure range [psi] 1psi \approx 6895pa								
Super High Pressure (HHS)	PRESCALE HHS R270 10M								270 x 10	Mono-sheet
High Pressure (HS)	PRESCALE HS R270 10M								270 x 10	Mono-sheet
Medium Pressure (MS)	PRESCALE MS R270 10M								270 x 10	Mono-sheet
Medium Pressure (MW)	PRESCALE MW R270 10M								270 x 10	Two-sheet
Low Pressure (LW)	PRESCALE LW R270 10M								270 x 10	Two-sheet
Super Low Pressure (LLW)	PRESCALE LLW R270 6M								270 x 6	Two-sheet
Ultra Super Low Pressure (LLLW)	PRESCALE LLLW R270 5M								270 x 5	Two-sheet
Extreme Low Pressure (4LW)	PRESCALE 4LW R310 3M								310 x 3	Two-sheet

Fonte: Fujifilm Global (2018) – http://www.fujifilm.com/products/prescale/prescalefilm/#See_All

Nesse trabalho será utilizado o tipo folha dupla ou *'Two-sheet'* para medição de uma pressão mínima de 1Mpa ou 10.2 Kgf/cm², e o procedimento de utilização para a folha dupla segundo a FujiFilm Global (2018) consiste em:

- 1 – Medir a temperatura e humidade relativa antes do início do teste;
- 2 – Cortar os dois filmes Prescale apropriadamente (O filme 'A' no saco preto, e o filme 'C' no saco azul);
- 3 – Colocar os filmes voltados para as suas faces rugosas;
- 4 – Colocar os filmes aonde se deseja medir a pressão;
- 5 – Aplicar a pressão;
- 6 – Os caminhos vermelhos irão aparecer no filme e a densidade de cor irá mudar de acordo com o nível de pressão;
- 7 – Retire o filme 'C', observe e verifique a distribuição de pressão.

De acordo com a FujiFilm Global (2018) as especificações e ambiente operacional para realização do teste devem estar de acordo com o recomendado na Tabela 3.

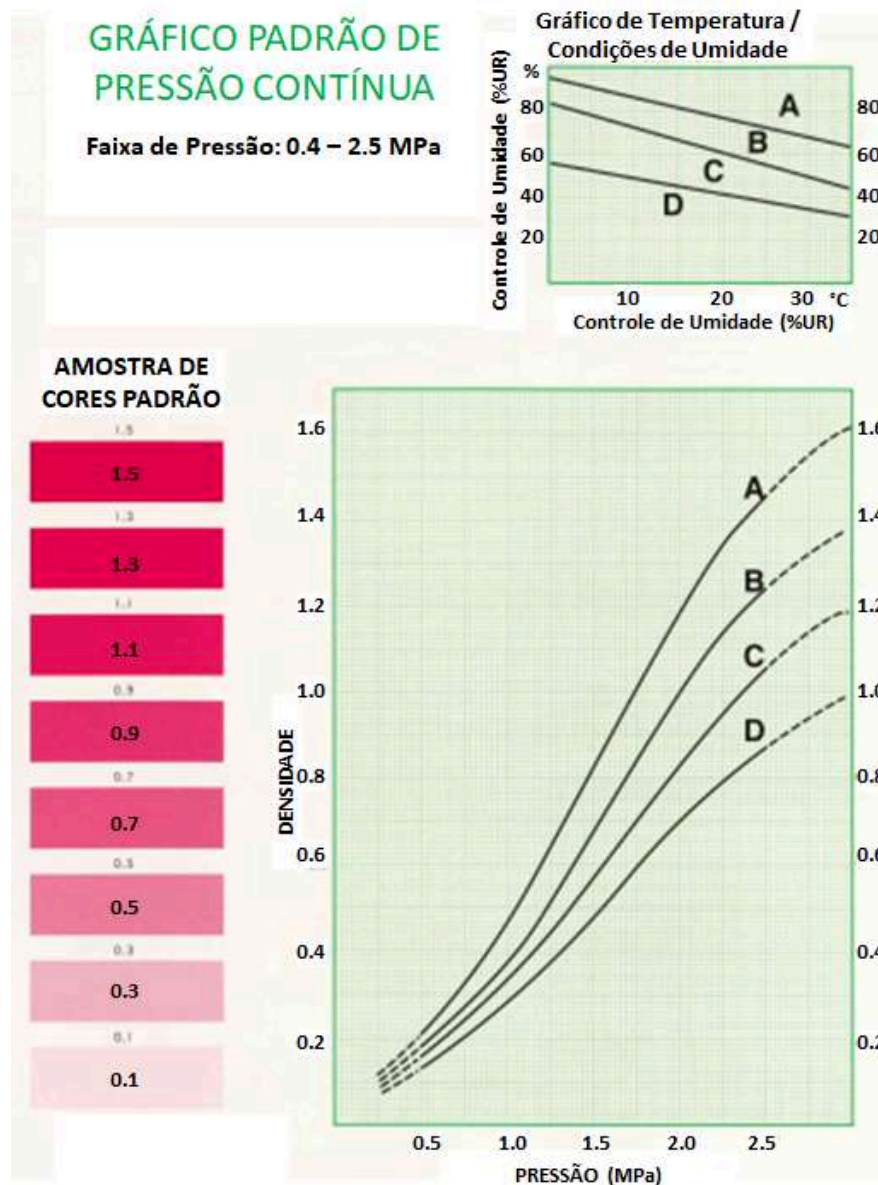
Tabela 3 - Especificações e ambiente operacional para realização do teste

Especificações e ambiente operacional	
Precisão	± 10% ou menos (medido por densitômetro a 23° C, 65% humidade relativa)
Temperatura de serviço recomendada	20°C ~ 35°C (68°C ~ 95°F)
Humidade de serviço recomendada	35% HR a 80% HR
Espessura	Tipo folha única ou <i>Mono-Sheet</i> (S) - 100µm
	Tipo folha dupla ou <i>two-sheet</i> (W) - 100µm -2x

Fonte: Fujifilm Global (2018)

Segundo a FujiFilm Global (2018) há dois tipos de pressão para se medir, sendo a pressão contínua e a pressão momentânea. Nesse trabalho será utilizado a pressão contínua para realizar a medição da pressão da junta e, portanto, segundo a FujiFilm Global (2018) para pressão contínua e acima de 1MPa deve ser utilizado o gráfico da Figura 15 na sequência.

Figura 15: Correlação de densidade versus pressão baseado na humidade relativa e pressão



Fonte: Fujifilm Global, 2018

De acordo com o FujiFilm Global (2018) primeiramente é necessário medir a temperatura em °C e medição da Umidade Relativa para seleccionar a curva A, B, C ou D do gráfico da Figura 13 para obter a medição correta da pressão.

2.3.1 Contribuições acadêmicas

As pesquisas sobre o teste de medição de pressão por filme ou *Fuji Test* demonstra grande significância acadêmica. Lekue *et al* (2018) em sua pesquisa reproduziu a medição da área de contato de roda de trilho utilizando o filme de medição de pressão e demonstrou a

resposta de suas medições de acordo com a variação da rugosidade são resistentes com os mecanismos de contato. Fujiki *et al* (2018) realizaram estudo de distribuição de pressão de amostras de concreto e sua influência na distribuição de tensão medida, e como resultado concluíram que: 1- não há diferença na distribuição da pressão de carregamento para as faces com diferentes métodos de tratamento, porém a média dos valores e o lado oposto da tensão do módulo *Young* são similares independentes dos métodos de tratamento, 2- Através da utilização do valor médio da tensão das duas pontas opostas, a influência do passo na ponta da face superior no módulo *Young* pode ser significativamente reduzida. 3 – Na análise do método de elementos finitos utilizado para medição da distribuição da pressão, a influência da distribuição no lado superior da ponta da face da amostra foi amplamente reproduzida na distribuição da tensão. Lekue *et al* (2017) em outra pesquisa utilizando o método de elementos finitos investigaram o erro sistemático da medição de pressão por filme utilizando para as rodas de trilho, e demonstraram os valores de erro mostrados em cada filme podem ser explicados por microcápsulas de diferentes tamanhos e que depende do tamanho da faixa de medição da pressão. Kawakami *et al* (2017) realizou um estudo para entender a relação entre a resistência do pneu e da face pavimentada, através da determinação da pressão do contato do pneu e do pavimento utilizando o filme de medição da pressão, e o resultado divulgado conclui que a distribuição da pressão é totalmente diferente dependendo da textura do pavimento e seria mais recomendado avaliar a textura negativa que tendem a oferecer baixa resistência nas faces do pavimento. Alizadeh *et al* (2017) desenvolveram um estudo para medir o esforço de fixação para o mecanismo convencional e novo mecanismo de fixação das membranas eletrolíticas de polímero para as células de combustíveis, e os resultados foram coletados através da utilização do filme de medição de pressão, que confirmaram que os resultados alcançados via método de elementos finitos e o método experimental possuem concordância, e como conclusão foi confirmado que o novo sistema de fixação possui melhor uniformidade de pressão do que o sistema convencional. Muriuki *et al* (2008) também utilizaram o teste *Fuji* realizaram um estudo de caracterização do desempenho do programa customizado para processamento da imagem da medição da pressão por filme (*Fuji*). Na indústria automotiva Cho *et al* (2010) utilizaram o teste *Fuji Prescale* para examinar a confiabilidade do modelo da junta entre bloco e cabeçote após montagem e torque, e como resultado o teste suportou a uma maior confiabilidade e precisão para a análise de elementos finitos, concluindo que a junta do cabeçote e bloco pode ser melhorada sem adição de tempo de computação, através de distinção entre metade do caminho e da metade do caminho isolada dentro do modelo de junta, e por determinar

o diâmetro da rosca do parafuso cilíndrico igual a tensão da área do parafuso. Caccese *et al* (2009) realizaram um estudo de influência de relaxamento da tensão para força de aperto em juntas híbridas de compostos e metal presas com parafuso e o *Fujifilm Prescale* foi utilizado para quantificar a pressão entre as chapas.

Vários estudos científicos e acadêmicos foram realizados utilizando o teste de medição por filme ou *Fuji Test*, porém não foi encontrado na literatura esse teste aplicado dentro da metodologia DMAIC do seis sigma, e também não foi encontrado na literatura aplicações para medição específica da junta da tampa do comando do motor.

2.4. Ensaio de deformação permanente à compressão (*Compression set*)

De acordo com Lou *et al* (2018) o teste de *compression set* (CS) fornece informação sobre a resistência a amostra à deformação antes e depois do envelhecimento sobre uma pressão de compressão, sendo calculado o *compression set* de acordo com a equação 3 a seguir.

$$\text{'CS} = \frac{h_0 - h_2}{h_0 - h_1} \times 100 \text{ \%}' \quad (3)$$

Onde:

h_0 = altura inicial;

h_1 = altura comprimida;

h_2 = medição da altura recuperada.

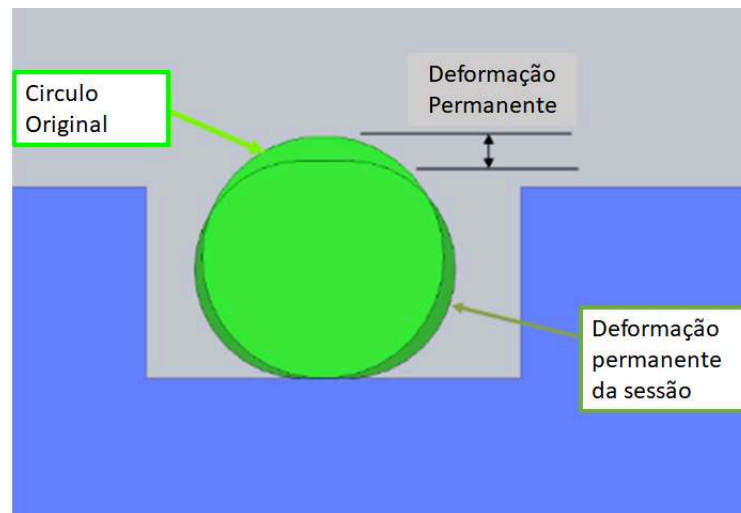
Para Ramirez *et al* (2019) o teste de *compression set* mede a deformação permanente da borracha / espuma após certas condições de tempo e temperatura, e quanto menor for os valores de *compression set* maior a elasticidade da borracha / espuma, e assim melhor a habilidade em retornar a sua espessura original após a compressão.

Para Mali *et al* (2017) *compression set* é a habilidade do material se recuperar após ter sido comprimido por uma específica duração de tempo e temperatura, e o instrumento de medição do *compression set* consiste em duas ou mais chapas de aço com suas faces em paralelo, onde a amostra é comprimida.

De acordo com a Apple Rubber (2018) o *compression set* pode ser definido como uma deformação permanente que toma um lugar mais baixo no ponto de rendimento menor do material, e materiais de borracha se deformam permanentemente sobre tensão, e essas

deformações permanentes são em particular uma preocupação quando elastômetros são utilizados em vedações, pois diminuir a força de vedação apresenta potencial de criar vazamentos ao longo do tempo. A deformação permanente ou *compression set* é ilustrada na Figura 16.

Figura 16 - Ilustração do *compression set* / deformação permanente



Fonte: Apple Rubber, 2018

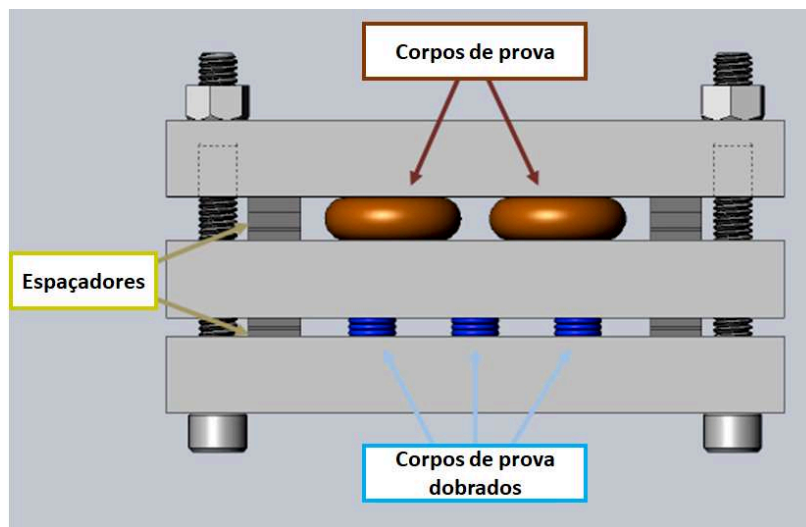
De acordo com a Stockwell Elastomerics (2018) a maioria dos testes de *compression set* seguem a norma ASTM D395, teste método B.

De acordo com a Apple Rubber (2018) o procedimento de teste consiste das seguintes etapas:

- 1- O corpo de prova da borracha é dimensionado para determinar sua altura original;
- 2- Espaçadores medindo 75% da altura do corpo de prova são instalados;
- 3- As chapas são comprimidas para assegurar que as chapas estejam em contato com os espaçadores;
- 4- O dispositivo contendo os corpos de prova comprimidos são colocados dentro de uma câmara de temperatura controlada;
- 5- As amostras são removidas do dispositivo após 30 minutos, e então suas alturas dimensionadas.
- 6- Os resultados são calculados e expressados em porcentagem.

A Figura 17 ilustra a medição do *compression set* dos corpos de provas.

Figura 17 - Ilustração do dispositivo de medição do *compression set*



Fonte: Apple Rubber, 2018

2.4.1 Aplicações

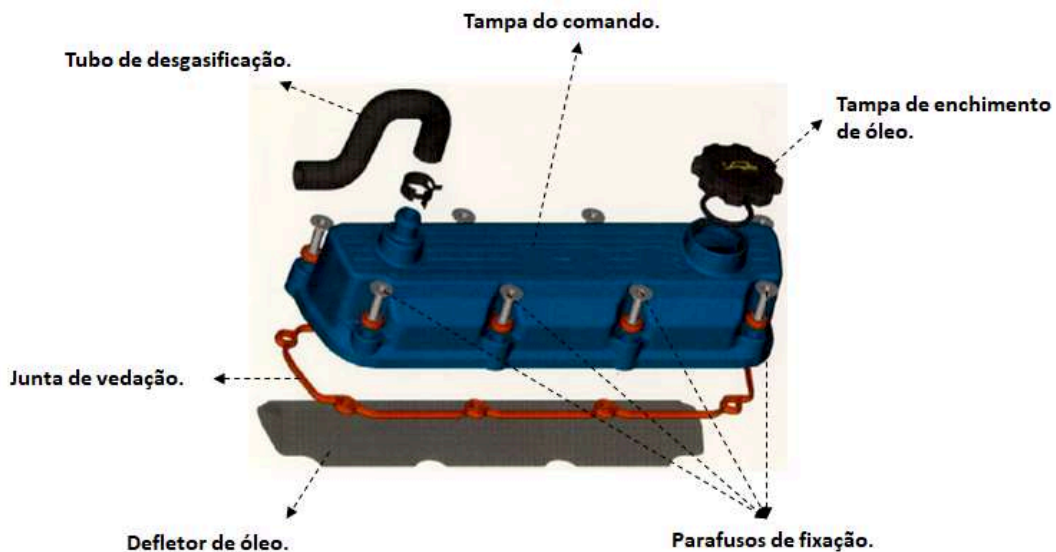
As pesquisas sobre o *compression set* demonstram grande significância acadêmica e prática. Najipoor *et al* (2018) realizou um estudo de falhas de nitrilo de borrachas vulcanizadas em descompressão rápida de gás e analisou suas propriedades física-mecânicas incluindo o *compression set* como uma de suas principais respostas. Pan *et al* (2018) realizou um estudo de estimativa de vida útil para *O-ring* de borracha de butadieno nitrilo sobre condições de estoque utilizando a variação de tempo, e considerou com duas saídas para caracterizar o desempenho, sendo o *compression set* e o alívio da tensão de compressão, e provou que comparando com as variações de tempo em estoque utilizando as abordagens propostas alcançaram um melhor resultado. Ji *et al* (2018) em seus estudos para melhorar a estabilidade dimensional da borracha butadieno estireno adicional a composição o etileno vinil acetato e demonstraram seus resultados utilizando o *compression set* e outras técnicas de medir o desempenho de borrachas. Kong *et al* (2018) realizaram um estudo de aceleração do envelhecimento e vida útil da borracha com compósitos de borracha natural reforçados com grafeno e concluíram que a predição da vida útil foi bem-sucedida especialmente com relação as propriedades de *compression set* do material. Zhao *et al* (2018) utilizaram o teste de *compression set* e outras técnicas para caracterização e demonstração de um método eficiente para correlacionar o grafeno híbrido e o dióxido de silício (SiO₂).

Vários estudos científicos foram realizados e demonstram que o *compression set* é uma das principais saídas para medir o desempenho da borracha.

2.5. Tampa do comando

A tampa do comando, também conhecida como tampa do cabeçote ou tampa de válvulas de acordo com Lu (2007) é um componente localizado no topo do motor a combustão, e sua função primária é vedar o óleo dentro do motor evitando vazamentos, e também possui a função de atenuar os ruídos causados pela vibração dos motores. Para Bastías *et al* (2004) a tampa do comando plastica é um componente importante nos motores modernos, e não são projetadas apenas por espaço e economia, mas também pelo crescente número de funções que acompanham a tampa como: vedação a prova de vazamento com o cabeçote e tampa frontal do motor, isola as vibrações transmitidas do motor através da tampa para o ambiente, controla a pressão do separador de óleo, e hospeda dispositivos para separação do óleo com o gás da mistura da explosão. Para Tikoliya *et al* (2016) a tampa do comando possui um papel essencial entre os componentes do motor e sua função é hospedar o sistema de válvulas e outros periféricos do cabeçote, assim como separar o óleo dos gases da explosão. De acordo com Tikoliya *et al* apud Sean (2016) o projeto da tampa do comando inicia e explica a complexidade do *design* completo do motor. Para Trindade (2009) a tampa do comando está presente nos motores de combustão e é importante para a vedação do óleo pressurizado da região dos eixos de comando. Trindade (2009) afirma que as principais funções estão entre a vedação do separador de óleo, proteção do sistema de válvulas, e proteção dos periféricos devem ser asseguradas mesmo apesar do significativo aumento de temperatura que se torna mais comum nos atuais motores com carga alta. A Figura 18 ilustra um típico conjunto de tampa do comando.

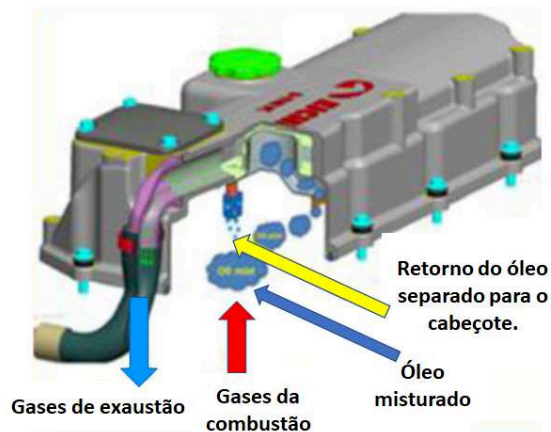
Figura 18 - Ilustração do conjunto de tampa do comando



Fonte: Lu e Anderson, 2002

Além da vedação e com relação ao seu funcionamento segundo Tikoliya *et al* (2016) em seu estudo de um novo modelo mais completo descreve que a mistura de óleo e gases da combustão entra no defletor, e durante o percurso o vapor de óleo é condensado, e como o peso específico do óleo é maior que os dos gases de exaustão, então o óleo cai por gravidade percorrendo através de um pequeno orifício que fica no caminho da desgaseificação para o cabeçote. A Figura 19 ilustra o funcionamento da tampa durante ciclo do motor.

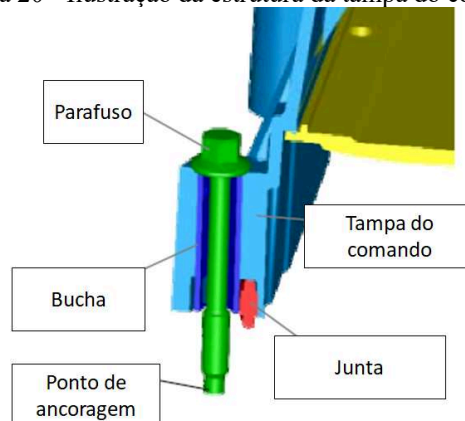
Figura 19 - Funcionamento da tampa durante ciclo do motor



Fonte: Tikoliya *et al*, 2016

Com relação a estrutura da tampa do comando de acordo com Bendl *et al* (2004) os furos dos parafusos são reforçados com buchas para evitar o contato direto com o plástico sob a tensão do parafuso. A Figura 20 ilustra a estrutura da tampa de comando com relação a sua fixação.

Figura 20 - Ilustração da estrutura da tampa do comando



Fonte: Bendl *et al*, 2004

Com relação ao material da junta de acordo com Bendl e al (2004) a borracha pode ser Borracha Acrílica de Etilino (AEM - *Ethylene Acrylic Rubber*), Borracha Acrílica (ACM – *Acrylic Rubber*), Borracha de Silicone (VMQ – *Silicone Rubber*), Borracha Nitrílica Hidratada (HNBR – *Hydrated Nitrile Rubber*) e Borracha Fluinada (FKM – *Fluorinated Rubber*).

2.5.1 Aplicações

As pesquisas sobre tampa do comando demonstram grande importância acadêmica com relação as pesquisas relacionadas a motores no ramo automotivo. Tikoliya *et al* (2016) estudou uma nova proposta de modelo de tampa do comando com defletor interno para uma maior eficiência na separação do óleo e gases da combustão e todos o sistema com suas novas variações, onde foi realizado 26 DOE's de diferentes tamanhos e posições de filtro e defletor, assim como também realizou a validação rigorosa de todo sistema com relação a durabilidade, consumo de óleo, vazamento, realizou o *Fuji Test* para validação da uniformidade da pressão da vedação, teste de vibrações e fluxo de óleo, assim validando uma melhor solução para o design atual. Uy *et al* (2016) estudaram o efeito da da formulação do óleo considerando os separadores de óleo do virabrequim e tampa do comando em diferentes velocidades e cargas do motor, e como resultado do desempenho dos separadores de óleo concluíram que a quantidade de gases provenientes da combustão muda de acordo com a carga, a composição química do aerosol varia dependendo da velocidade do motor, da carga e do modelo de separador utilizado, enquanto as análises pelo microscópio eletrônico de transmissão mostra que a morfologia do aerosol muda de acordo com a viscosidade do lubrificante e também das condições dos motores. Shanmugam *et al* (2014) em seu estudo de caso levou em consideração o desenvolvimento rápido para redução do ruído do motor considerando seus componentes de maior contruição, sendo a tampa do comando e a tampa frontal do motor, e como resultado utilizando um *software* de análise de elementos finitos foi observado na simulação que o modelo sugerido de projeto e desenvolvimento reduziu o tempo de desenvolvimento em 2 meses para 3 semanas. Kolhe *et al* (2012) em seu estudo avaliou um novo conceito de separador de óleo da tampa do comando e de separador externo do óleo misturado, onde o controle da velocidade dos gases da combustão é provida junto a mídia que entrega uma boa eficiência para variados tamanhos de particulas de óleo em uma ampla faixa de velocidade e carga, sendo provado através de uma série de testes. Em estudo para redução do nível de ruído em veículos triciclos Upadhyay *et al* (2011) identificaram o motor como uma das principais fontes de ruído, sendo mais dominantes os

ruídos provenientes da tampa do comando e da região do volante, e portanto foram realizadas mudanças na tampa do comando e volante com a finalidade de reduzir os níveis de ruído para os passageiros. Armentani *et al* (2010) realizar análises e estudos de correlação de vibração através do método de elementos finitos e análise acústica através do método de elementos de limite para avaliar a tampa do comando em um motor a gasolina. Trindade (2009) realizou um estudo de otimização da espessura da parede da tampa do comando através da técnica conhecida como otimização multi-objetiva para definir as espessuras das paredes da tampa do comando em diversas regiões com o objetivo de melhorar a flexibilidade e reduzir a massa. Gokten *et al* (2008) realizaram um estudo de desenvolvimento de um sistema separador de óleo e da mistura do óleo integrados a tampa do comando para os motores Ecotorq Heady Duty Diesel Engines produzidos na planta da Ford Otosan. Lu (2007) em seu estudo examinou as propriedades viscoelásticas de alguns elatômetros utilizados para tampas de vedações no motor, com maior foco na tampa do comando com relação a ruídos e vibrações. Lee *et al* (2007) estudou os casos de vazamento pela junta da tampa do comando de uma família de motores a gasolina da Hyundai com o objetivo de melhorar o desempenho de vedação e conhecer os mecanismos de vedação para a produção de tampa do comando, e conseqüente para aplicação em outras famílias de motores.

3. DESENVOLVIMENTO

3.1. Metodologia de Pesquisa

Com relação a sua natureza esse trabalho é classificado como aplicado. Segundo Appolinário (2006) a pesquisa aplicada atualmente está mais relacionada a questão da finalidade comercial, onde visa o desenvolvimento de novos produtos ou processos de acordo com a necessidade do mercado. Esse trabalho será aplicado em uma indústria automotiva de montagem de motores a combustão localizada na região do Vale do Paraíba no Estado de São Paulo, e que possui como clientes as plantas de veículos da Ford São Bernardo do Campo - SP, Ford Camaçari - Bahia, Ford México e Ford Argentina. A finalidade desse trabalho é estudar as ocorrências de vazamento de óleo na garantia para o principal contribuidor de motores que são os casos de vazamento pela tampa do comando, e que corresponde em torno de 62% do total das ocorrências de motores em garantia, e em torno de 24% do total de custo de reparo de motores em garantia. Entre as ocorrências de vazamento pela tampa do comando do motor em garantia em torno de 5% dos vazamentos são reparados até 2857 Km, 50 % são reparados até 10998 km e 90 % são reparados até 19151 Km. Esse trabalho visa estudar a melhoria do processo como um todo, e envolve o processo da montadora, serviços e fornecedor da tampa do comando da montadora, e para isso será aplicada a metodologia DMAIC do 6-Sigma para que o problema seja estudado e tratado de forma estruturada. Dentro das fases DMAIC serão aplicados o ensaio de deformação permanente à compressão ou *compression set* para avaliar a borracha da junta e validar uma das entradas chaves do processo de injeção que é a temperatura, e para o conjunto da tampa do comando será utilizado o teste Fuji para comparar a compressão do conjunto com o torque final no cabeçote do motor para um conjunto novo, um conjunto importado da China onde não há ocorrências de vazamento, e um conjunto retornado da garantia por vazamento. Como resultado desse trabalho espera-se diminuir as ocorrências de vazamento em campo por em torno de 70% a 100%.

Com relação a abordagem do problema a pesquisa é classificada como quantitativa. De acordo com Miguel *et al* (2012) na abordagem quantitativa o pesquisador deve obter informações da pesquisa por meio da medição das variáveis, e dessa forma a apreensão dos fatos para a geração do conhecimento não será influenciada por subjetivismo, sofrendo pouca interferência ou nenhuma interferência do pesquisador nas variáveis de pesquisa. Nesse trabalhando durante a fase Definir será estabelecida a saída chave ou 'Y' junto ao time com

base nos dados de garantia através de retorno das peças de campo para análise, na fase Medir será garantido o sistema de medição da saída ‘Y’ e levantado as entradas ‘X’ que afetam a saída ‘Y’, na fase analisar serão coletados dados das entradas mais críticas estabelecidas junto ao time e correlacionado com a saída ‘Y’ através da medição da deformação permanente à compressão e do teste Fuji que medirá a pressão do conjunto com o torque final com o cabeçote comparando um conjunto de tampa do comando novo, um conjunto retornado de garantia e um conjunto importado da China para comparação, na fase melhorar será implementado e validado a melhoria através da comparação do DPMO (Defeitos Por Milhão de Oportunidades) antes e depois, na fase controlar será implementados os controles necessários para que o problema não volte a ocorrer, e medido o comportamento em garantia através de gráficos de controle e para os veículos com vazamento pela tampa do comando com base na produção de veículos.

Com relação ao objetivo a pesquisa é classificada como pesquisa descritiva. De acordo com Gil (2002) o principal objetivo das pesquisas descritivas é descrever as características de determinada população, ou fenômeno, ou estabelecer a relação entre as variáveis, assim determinando a natureza dessa relação, sendo para isso necessário a utilização de técnicas padronizadas de coleta de dados como observação sistemática ou questionários. Nesse trabalho serão coletados conjuntos de tampa que apresentaram vazamento em campo, definido a saída chave ou ‘Y’ e definido junto ao time a principal variável de processo do fornecedor que é a temperatura de injeção com a saída através do método de deformação permanente à compressão, e também estabelecido a principal variável do produto que é o material da borracha através de comparações com o teste de conjunto utilizando o teste Fuji.

3.2. Método de Pesquisa

O método utilizado nessa pesquisa é o estudo de caso. Segundo Martins *et al* (2014) o método estudo de caso é mais apropriado para quando há uma situação tecnicamente única para o pesquisador onde há muito mais variáveis de interesse do que ponto de dados, mas se baseia em várias fontes de evidências, e se beneficia do desenvolvimento de proposições teóricas para conduzir a análise dos dados. Nesse trabalho serão coletados evidências e dados que serão trabalhados nas fases do DMAIC para solução de um problema tecnicamente único na companhia. Na sequência será descrito a abordagem em cada fase do DMAIC.

- Definir (*Define*) – Nessa fase o problema foi definido pelo campeão ou *Champion* em conjunto com o *Master Black Belt* com base nas revisões periódicas dos

principais indicadores de qualidade com a diretoria, assim como a definição do *Black Belt* que irá liderar o projeto. O *Black Belt* na fase definir irá entender a voz do cliente através do levantamento das reclamações em garantia, irá definir o time de suporte para todas as fases do projeto, levantar os custos, definir o problema, o escopo, o objetivo, será mapeado o fluxo de valor e definido a saída chave para o projeto ou o ‘Y’ junto ao time. Para esse projeto foram 2 saídas chaves definidas em conjunto com o time, conforme:

- Y1 – Deformação Permanente a Compressão da junta (*Compression set*) $\leq 30\%$
- Y2 – Carga total do conjunto ≥ 1 MPa (Mega Pascal).

- Medir (*Measure*) – Na fase medir serão levantadas junto ao time as potenciais entradas ou ‘Xs’ que afetam a saída chave ‘Y’, assim como calculdo o DPMO inicial, executado a análise do sistema de medição para garantir que a saída chave ou ‘Y’ esteja sendo medida corretamente, e garantir as contenções para reduzir as ocorrências no cliente final.

- Analisar (*Analyze*) – Na fase analisar serão investigadas as principais entradas ou ‘Xs’ levantadas na fase medir, e então testadas para entender o comportamento das saídas ou ‘Y’. Para o entendimento do ‘Y1’ será variada a temperatura da injeção ‘X’ e efetuado a medição do ‘Y1’ através do ensaio de deformação permanente à compressão ou *compression set* para a borracha da junta. Para o entendimento do ‘Y2’ será investigado a carga de pressão da vedação do conjunto quando aplicado o torque final, e para isso será utilizado o teste Fuji e comparado o resultado para um conjunto de tampa do comando novo, um conjunto retornado de garantia, e um conjunto importado da China para comparação.

- Melhorar (*Improve*) – Na fase melhorar serão aplicadas as melhorias propostas pelo fornecedor em seu processo e produto, e que consistem para o ‘Y1’ o travamento dos parâmetros de injeção, e para o ‘Y2’ a mudança do composto de borracha para melhorar a carga do conjunto. Nessa fase após a implementação serão validadas as melhorias através do comparativo dos resultados do ‘Y1’ e ‘Y2’ antes e depois.

- Controlar (*Control*) - Na fase controlar serão aplicadas as ações preventivas no processo do fornecedor, e atualização de documentos e procedimentos para evitar com que o problema recorra, assim como acompanhar o desempenho dos indicadores de garantia após a implementação da melhoria para garantir que os resultados sejam satisfatórios, assim como comparar o resultado antes e depois utilizando o DPMO para validação dos resultados em campo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Escolha do problema

A escolha do projeto foi realizada por meio de acompanhamento dos indicadores de qualidade de motores em garantia que acontecem durante as reuniões mensais com a diretoria.

Para esse trabalho o *champion* do projeto foi o gerente de produção que ficou incumbido de definir junto ao *master black belt* um *black belt* de sua área e fornecer todos os recursos de seu alcance, assim como ajudar a quebrar as barreiras com outras áreas como Engenharia de Produto, Assistência Técnica ao Fornecedor e o time de Serviços.

O vazamento pela junta da tampa do comando é a falha número um em termos de R/1000 (Reparo a cada 1000 unidades vendidas) e a número dois em termos de CPU (Custo por Unidade) para motores em veículos com até 3 meses em serviço e também em veículos com até 12 meses em serviço.

A Figura 21 ilustra o gráfico de pareto das ocorrências em garantia para motores em termos R/1000 sendo lideradas pelo vazamento pela tampa do comando, e a Figura 22 ilustra o gráfico de pareto das ocorrências de CPU com o vazamento pela tampa do comando na segunda posição.

Figura 21 - Gráfico de pareto de R/1000 em garantia de motores em até 1 ano em serviço

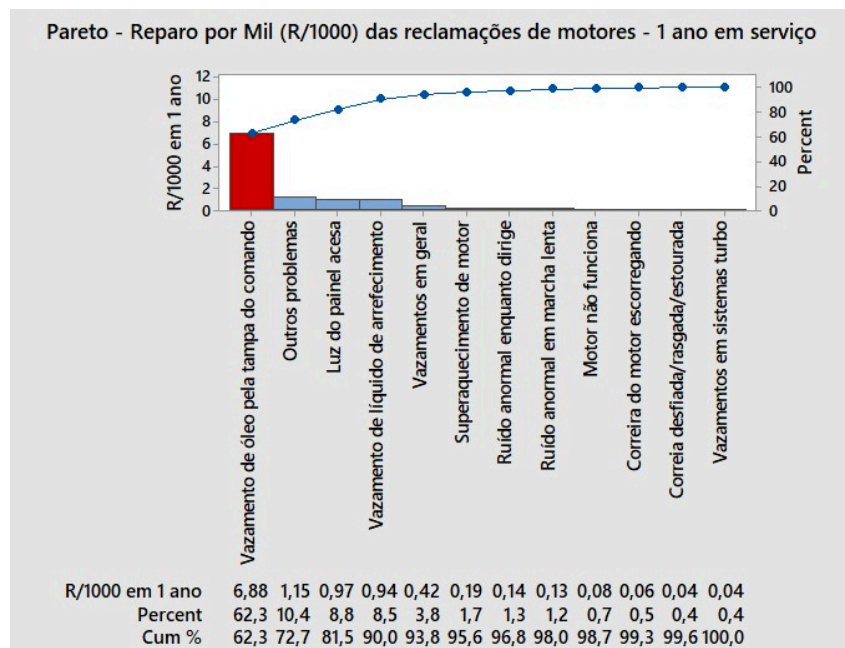
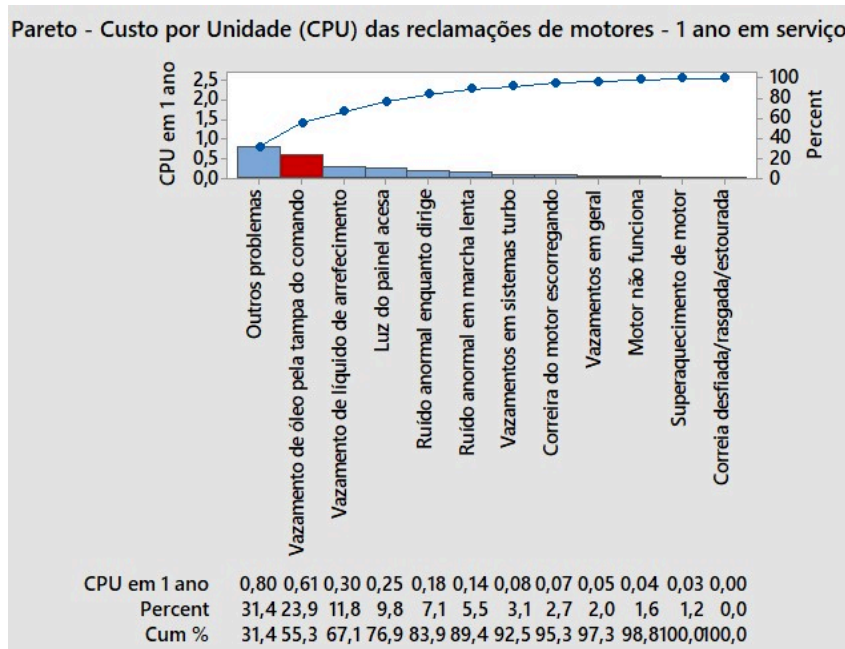


Figura 22 - Gráfico de pareto de CPU em garantia de motores em até 1 ano em serviço



4.2. Fase Definir

Após a escolha do problema pelo *Champion*, então a fase definir será iniciada pelo *Black Belt* que irá liderar o projeto até a conclusão.

O primeiro passo foi definir as pessoas necessárias para o projeto, sendo pessoas da área de Manufatura, Qualidade, PD (Engenharia de Produtos), PD Global (Engenharia de Produtos Global), Assistência Técnica ao Fornecedor e Serviços, e suas funções foram cuidadosamente escolhidas de acordo com suas especialidades e experiências para ajudar no sucesso de todo projeto. A Tabela 4 ilustra a área, a função e a ação de cada membro do time no projeto.

Tabela 4 - Função e ação de cada membro do time no projeto

Area	Função	Ação
Manufatura	Dono do Processo (<i>Process Owner</i>)	Suportar os estudos e a implementação das ações de melhoria no processo
Manufatura	Engenheiro de Processo	Rever e atualizar procedimentos

Manufatura	Líder do time	Seguir os padrões e suportar nas análises de reparo
Qualidade	Analista de Qualidade	Levantar as ocorrências e indicadores de qualidade de garantia
Assistência Técnica ao Fornecedor	Engenheiro residente de assistência técnica ao fornecedor	Suportar a medição das peças e caracterização do modo de falha
Assistência Técnica ao Fornecedor	Supervisor de Assistência ao Fornecedor e especialista em borracha	Suporte técnico nas análises e implementação das ações no fornecedor
Engenharia de Produtos	Engenheiro residente de Produtos	Suportar nas análises de projeto e especificação
Engenharia de Produtos	Engenheiro do componente	Suportar
Engenharia Global	Especialista técnico global em tampa do comando	Suporte técnico nas análises e a definição do ‘Y’
Engenharia Global	Especialista técnico global em junta	Suporte técnico nas análises e a definição do ‘Y’
Engenharia Global	Especialista técnico global em borracha	Suporte técnico nas análises e caracterização das falhas
Serviços	Coordenador de serviços	Suporte nas análises em concessionárias
Serviços	Engenheiro de serviços	Suporte nas análises em concessionárias e informações de veículos

Após a definição do time o Black Belt trabalhou junto ao time para a definição da ‘Voz do Cliente’, do ‘CTQ – Crítico para Qualidade’ ou ‘Requerimento do Cliente’, a definição do defeito para o ‘Y’ em objetivos métricos, ‘Custo da Má Qualidade’, e a definição do ‘Problema’, ‘Escopo’ e ‘Objetivo’. Que serão revistos na sequência.

- **Voz do cliente** – A voz do cliente foi definida com base na leitura dos formulários preenchidos pelos clientes no momento da entrada da reclamação na concessionária, conforme:

‘Veículo com vazamento de óleo pelo motor’.

- **Crítico para qualidade (requerimento do cliente):** Foi definido em consenso com o time como:

Eliminação do Vazamento de óleo na região da junta da tampa do comando.

- **Definição do defeito para o ‘Y’:** A definição correta do ‘Y’ a ser medido e melhorado é de extrema importância para o sucesso do projeto, e nessa etapa foi envolvido o time de serviços para que fosse realizado um acompanhamento e análise do conjunto tampa do comando falhado em campo e sua caracterização, e também dos especialistas técnicos do time de PD Global para auxílio técnico na definição do ‘Y’ a ser medido.

Portanto com a ajuda do time de serviços foram analisados 36 conjuntos de tampas do comando e caracterizado que em cerca de 80% dos casos a junta da tampa do comando estava paralela a canaleta da tampa, conforme ilustrado o modo de falha pela Figura 23.

Figura 23 - Foto de uma tampa do comando que vazou em garantia



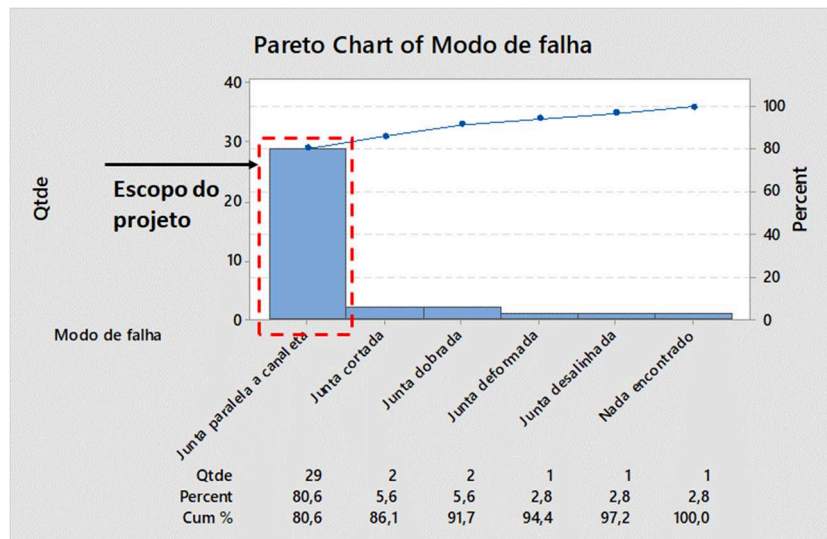
A Figura 24 ilustra uma tampa do comando sem vazamento, onde parte da junta fica aproximadamente dois milímetros para fora da canaleta da tampa.

Figura 24 - Foto de uma tampa do comando sem vazamento



O resultado das análises com uma amostragem de 36 casos em garantia do modo de falha em campo é ilustrado pelo gráfico de Pareto da Figura 25.

Figura 25 - Gráfico de Pareto com base no resultado das análises de garantia



Com base nesses dados foi analisado com os especialistas técnicos globais de junta, tampa e de borracha, onde as opiniões foram convergentes, e definido 2 formas de medição para o 'Y', conforme:

Y1: Deformação a permanente a compressão $\leq 30\%$;

Y2: Carga da vedação ≥ 1 Mpa em todos os pontos de contato.

- **Custo da Má Qualidade:** O custo da má qualidade corresponde à um custo por unidade (CPU) de 0,61 + a satisfação do cliente + o impacto na marca.

- **Definição do Problema:** A definição do problema foi elaborada pelo *Black Belt* e revisada pelo *Master Black Belt*, sendo definida como: ‘Donos de veículos equipados como motorização 1.6 litros produzidos no Vale do Paraíba em São Paulo indicam que o vazamento de óleo pela tampa do comando é uma ocorrência significativa’.

- **Escopo:** O escopo desse projeto é caracterizar o principal modo de falha e eliminá-lo em sua causa raiz.

- **Objetivo:** O objetivo desse trabalho é melhorar os indicadores de R/1000 e CPU no mínimo 70%.

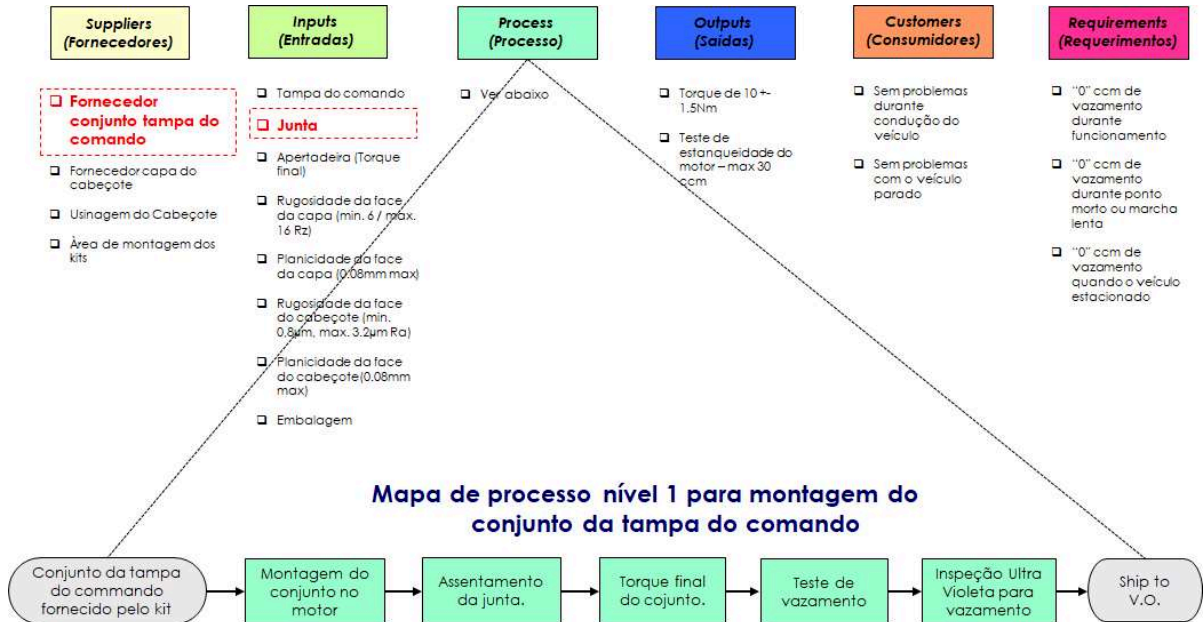
4.3. Fase Medir

Na fase medir foi feito uma revisão de todo o processo para conhecimento mais aprofundado do time e também para assegurar que todo o processo esteja seguindo como planejado e que a medição do ‘Y’ esteja sendo realizada com confiança. Também nessa fase foram levantados os potenciais ‘Xs’ contribuidores que afetam a saída ‘Y’ através do diagrama de causa e efeito e calculado o DPMO inicial do projeto.

- SIPOC – Foi realizado um mapeamento macro para entender todo o processo desde o fornecedor até o consumidor final, assim como o entendimento do requerimento do consumidor. Para isso foi utilizado a ferramenta SIPOC que consiste em levantar quem são os fornecedores (*suppliers*), as principais entradas (*inputs*), processo (*process*), saídas (*outputs*) e consumidor (*customer*). O SIPOC foi realizado percorrendo todo o processo junto ao time, levantando cada uma das etapas e realizando visitas em fornecedores e concessionárias. Foi constatado que todas etapas atendiam os requerimentos, e após a construção do SIPOC e da revisão de todos processos foi concluído que o processo crítico e foco para o projeto deveria

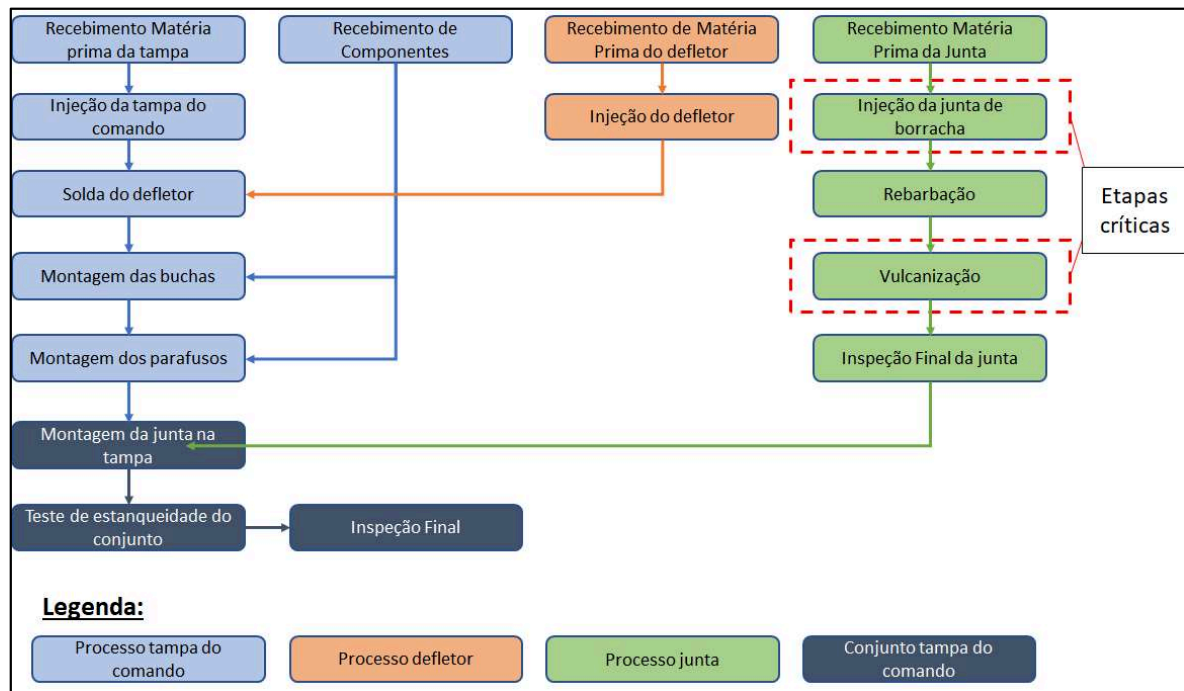
ser no ‘fornecedor do conjunto da tampa do comando’, e no processo da ‘junta’. A Figura 26 ilustra o SIPOC realizado em equipe.

Figura 26 - Mapeamento macro utilizando o SIPOC



Com base no SIPOC foi feito um mapeamento mais detalhado no processo do fornecedor do conjunto da tampa do comando envolvendo os times de manufatura, qualidade, engenharia de produto e assistência técnica ao fornecedor, considerando os três componentes que compõem o conjunto, os quais são: junta de vedação, defletor, e a tampa do comando. Com base na definição do ‘Y’ o time identificou as etapas críticas as etapas de injeção da junta de borracha e de vulcanização contidas dentro do processo da junta de vedação. A Figura 27 ilustra o mapeamento mais detalhado dos processos do fornecedor com compõem o conjunto da tampa do comando.

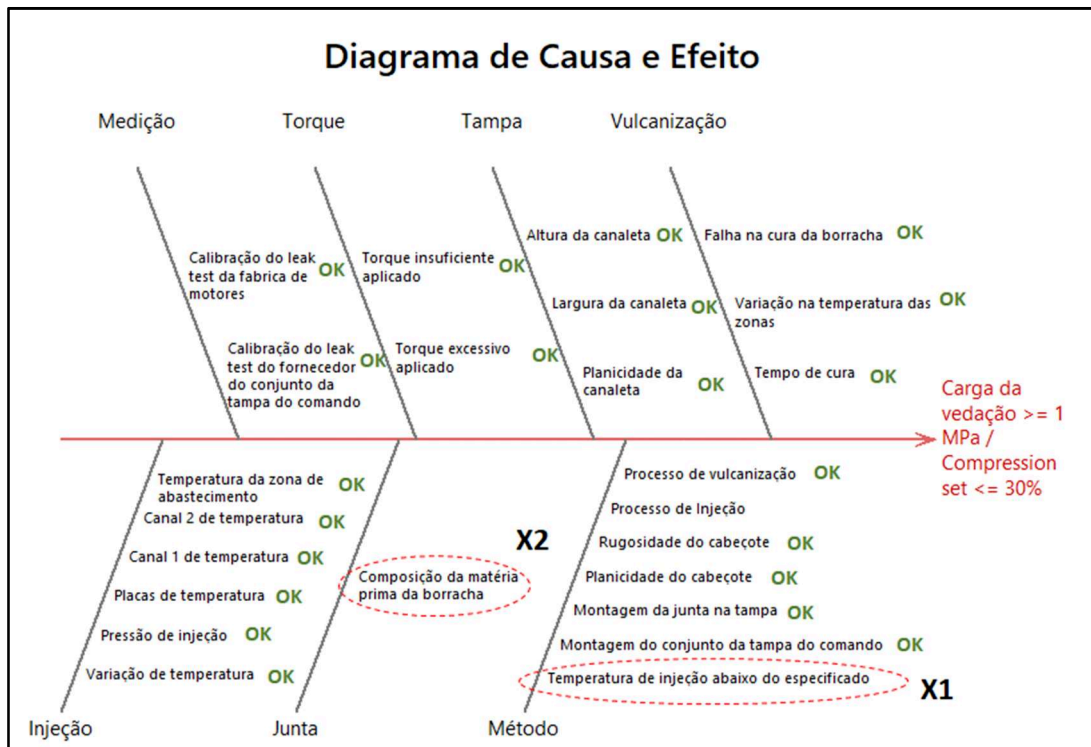
Figura 27 - Mapeamento do processo do fornecedor para as peças do conjunto da tampa do comando



• Diagrama de causa e efeito – Com maior nível de conhecimento adquirido com as análises realizadas para as juntas retornadas em campo utilizados na fase definir para escolher o ‘Y’, e também com base no SIPOC e mapa do processo para todas as etapas, o diagrama de causa e efeito foi dividido em 8 pilares, sendo: Medição, torque, tampa, vulcanização, injeção, junta e método, onde foram listadas junto ao time as principais entradas dentro de cada pilar que possa afetar as saídas ou ‘Ys’ que seriam a ‘Carga da vedação ≥ 1 Mpa’ e o ‘*Compression set* $\leq 30\%$ ’.

Ainda nessa etapa, com o envolvimento do time foi apontado as entradas ou ‘Xs’ mais críticas com base no conhecimento técnico e na entrevista com os operadores de chão de fábrica realizado durante o mapeamento, e os ‘Xs’ que o time estava confiante e que foram validados foram classificados com um ‘OK’ no próprio diagrama de causa e efeito. O ‘X1’ a ser explorado na fase de ‘Analisar’ será a ‘temperatura de injeção abaixo do especificado’, e o ‘X2’ será a ‘composição da matéria-prima da borracha’. A Figura 28 ilustra o diagrama de causa e efeito executado junto ao time para determinar as potenciais entradas críticas ‘Xs’ que afetam a saída ‘Y’.

Figura 28 - Diagrama de causa e efeito



- DPMO – Ainda nessa etapa foi calculado o DPMO inicial do projeto ou Defeitos por Milhão de Oportunidades que foi calculado com base na fórmula 4, a seguir:

$$DPMO = \frac{D}{(U \times OP)} \times 1.000.000 \quad (4)$$

Sendo: D = Defeitos

U = Unidades produzidas

OP = Oportunidades

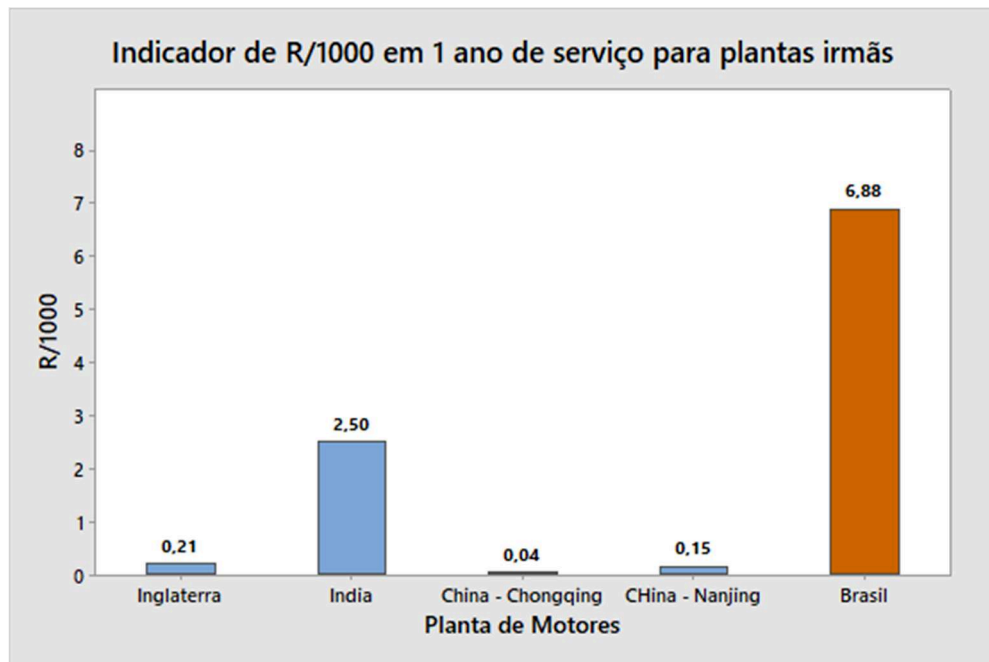
Portanto o DPMO inicial calculado foi de 5570.

4.4. Fase Analisar

No início da fase analisar para complementar os dados levantados na fase definir e na fase medir foi realizado um comparativo ou *benchmark* do indicador de serviço para as plantas irmãs. Essas plantas fabricam o mesmo produto e abastecem seus mercados locais. O período coletado é de 1 ano em serviço para motores montados em veículos produzidos no mesmo período e proporções similares. As plantas consideradas foram as plantas da Inglaterra que abastece o mercado Europeu e parte do mercado Norte Americano, a planta da Índia que

abastece o mercado Indiano e mercado Europeu, as plantas da China em Nanjing e Chongqing que abastecem o mercado Chinês, e a planta do Brasil que abastece o mercado Sul Americano e parte do mercado Norte Americano. Pelo comparativo realizado a planta de motores do Brasil apresentou um indicador de 6,88 R/1000 que é em torno de 64% pior em desempenho em comparação com o segundo pior a Índia com 2,5 R/1000, e em torno de 99% pior em desempenho do que a planta de motores da China em Chongqing. Esse comparativo está ilustrado conforme Figura 29.

Figura 29 - Comparativo de R/1000 em 1 ano em serviço para mesma família de motor



Com base na comparação de R/1000 foi efetuado o comparativo de plantas que fornecem o conjunto da tampa do comando para cada uma das plantas. E então foi diagnosticado que a empresa fornecedora era a mesma para todas as plantas, sendo o fornecedor 'X' de diferentes fontes. Ou seja o fornecedor 'X' produz o mesmo produto em plantas locais próximas as plantas de montagem de motores. O que pode ser demonstrado na Tabela 5.

Tabela 5 - Fornecedor e fontes de fornecimento para cada planta de motores

Planta de motores	Fornecedor
Inglaterra	Fornecedor "X" da Alemanha
Índia	Fornecedor "X" da Índia
China - Chongqing	Fornecedor "X" da China
China - Nanjing	Fornecedor "X" da China
Brasil	Fornecedor "X" do Brasil

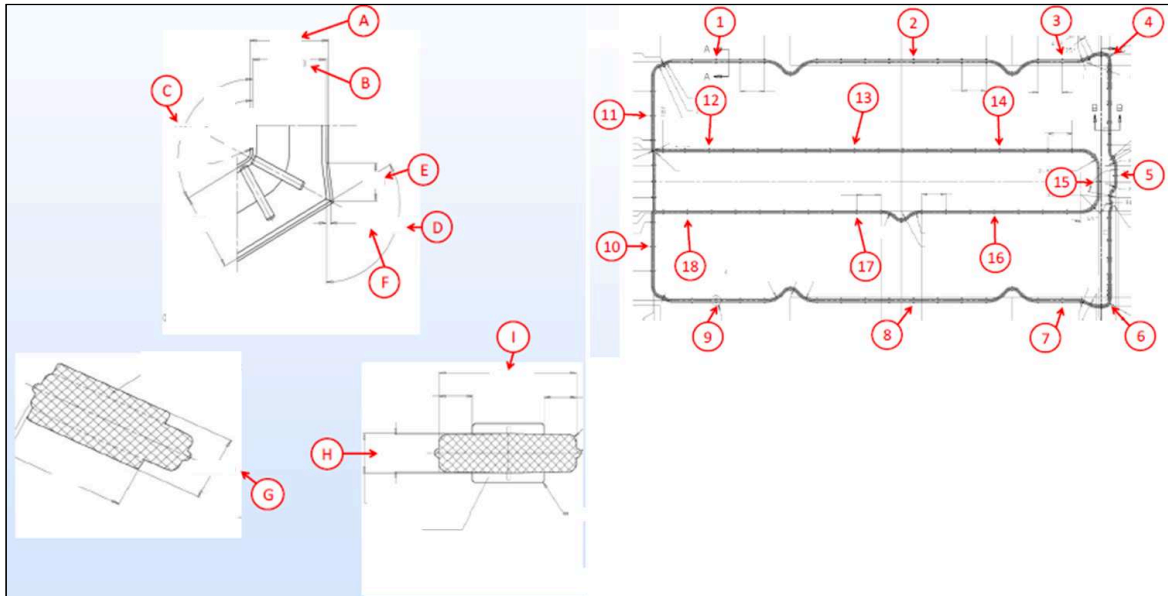
Portanto com base no comparativo de desempenho entre as plantas para os casos de vazamento pela tampa do comando em garantia, assim como na caracterização do ‘Y’ com amostras retornadas de campo mostrado na fase definir, e também com base no mapeamento e no levantamento dos potenciais ‘Xs’ que afetam Y1 e Y2 foi definido como objeto de estudo o processo de injeção e o material da junta da tampa do comando.

O primeiro passo foi importar alguns conjuntos de tampa do comando da China para estudo comparativo das características críticas que possam afetar o *compression set* da junta da tampa do comando.

- **X1. Temperatura de injeção abaixo do especificado**

Foram enviados 3 conjuntos novos de tampa do comando do fornecedor ‘X’ do Brasil e 3 conjuntos novos de tampa do comando do fornecedor ‘X’ da China para o laboratório de análise que fica na matriz do fornecedor ‘X’ na Alemanha para análise dimensional e comparativo entre China e Brasil. Foram medidas as características críticas para o *compression set* em 3 peças de cada fornecedor, sendo 9 características de ângulos, espessuras e alturas em 18 pontos diferentes da junta para as peças do fornecedor ‘X’ da China e para as peças do fornecedor ‘X’ do Brasil, conforme ilustração da Figura 30.

Figura 30 - Ilustração dos pontos de medição e características utilizadas para comparação da junta



Pelas análises do fornecedor todas as medidas realizadas obtiveram resultados dentro do especificado, possuindo uma tendência entre o nominal e a máxima. O que segundo o fornecedor é uma condição mais favorável para uma melhor compressão da junta.

O valor de *compression set* das juntas do fornecedor 'X' do Brasil estavam entre 18 a 22%, e o *compression set* das juntas do fornecedor 'X' da China estavam entre 12 a 22%, sendo o especificado abaixo de 30%, e portanto todas juntas novas dentro do especificado.

Portanto com a validação das medições dentro do especificado, conclui-se que os moldes de injeção estavam conforme especificados, e que não havia problemas com as dimensões da junta do fornecedor 'X' do Brasil.

Com base nas amostras de garantia enviadas para análise do fornecedor 'X' na Alemanha, conforme foto 'NOK' da Figura 23 da junta que apresentou vazamento concluiu-se que a junta sofreu deformação por compressão durante o tempo em serviço, e pelo fato de não ser 100% dos motores montados com junta do fornecedor 'X' do Brasil que vazam, os especialistas concluíram que o problema poderia estar durante o início do processo de injeção (*start-up*) ou durante o processo de limpeza que podem sofrer com o efeito da temperatura do molde, e portanto indicaram uma revisão no processo de injeção com foco na temperatura no fornecedor 'X' da planta do Brasil.

O time de STA e fornecedor então voltou para o processo de injeção e buscou-se mais detalhes dentro do processo de injeção do fornecedor, e então encontrou uma oportunidade durante o início do processo ou *start-up* de injeção da junta de borracha, pois as injetoras demoravam em torno de 1 hora para atingir a faixa de temperatura de injeção que varia entre 150°C (mínimo) e 185°.

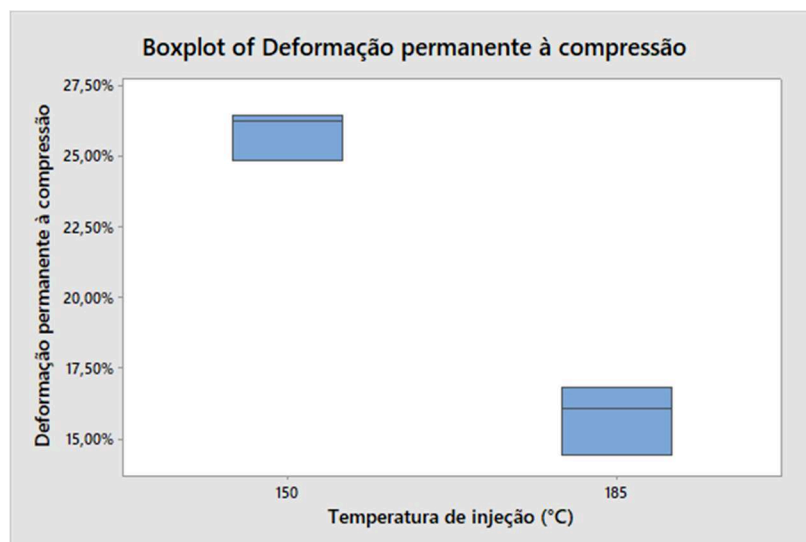
Para provar o efeito da temperatura o fornecedor injetou peças no limite mínimo, e peças no limite máximo, e executou a medição da temperatura em 5 pontos do molde de injeção utilizando um multímetro calibrado, e então foram injetadas peças com a temperatura mínima (150° C) e peças com a temperatura (185°C). A Figura 31 ilustra os pontos de medição da temperatura do molde utilizando o multímetro digital calibrado.

Figura 31 - Ilustração dos pontos da temperatura do molde de injeção da junta



Após injetado as peças com a temperatura mínima (150°C) e as peças com a temperatura máxima do experimento (185°C) foi executado a medição da deformação permanente à compressão, e constatado uma diferença muito significativa, estando em torno de 10% de diferença entre as peças injetadas na temperatura mínima e as peças injetadas na temperatura máxima. A Figura 32 ilustra a diferença das populações das juntas injetadas com a temperatura mínima e com a temperatura máxima do experimento.

Figura 32 - Ilustração da diferença da deformação permanente à compressão para peças injetadas na temperatura mínima e peças injetadas na temperatura máxima



Dessa forma foi validado a influência da temperatura do molde de injeção, e pela constatação junto aos operadores que durante o início do ciclo eram injetadas juntas com a temperatura abaixo do especificado foi validada como entrada crítica (X) a temperatura de injeção abaixo do especificado, e portanto as ações de melhoria no processo serão apresentadas na fase melhorar (*Improve*).

- **X2. Composição da matéria prima da borracha**

Com base no comparativo do desempenho de vazamento de óleo pela tampa do comando em R/1000 na garantia em até 1 ano em serviço foi importante 1 conjunto novo da tampa do comando do fornecedor 'X' da China' que apresenta melhor desempenho, 1 conjunto novo da tampa do comando do fornecedor 'X' do Brasil e 1 conjunto do fornecedor 'X' do Brasil que apresentou vazamento de óleo na garantia e foi retornado da concessionária.

As três peças foram submetidas ao teste de pressão da junta após torque final do conjunto no motor, e o procedimento consistiu dos seguintes passos:

- **Passo 1** – Determinação do tipo de filme, considerando a especificação de no mínimo 1 MPa. Portanto para a medição da pressão do conjunto após o torque final foi escolhido de acordo com a Tabela 6 de especificação do fornecedor o filme 'Super Low Pressure' que mede a pressão entre 0,5 MPa e 2,5 MPa e consiste da folha dupla composta pelo filme 'A' que consiste de um material de poliéster formado por uma camada de material colorido no topo, e o filme 'C' que consiste na camada reveladora colorida.

Tabela 6 - Escolha do tipo de filme conforme pressão mínima especificada de 1MPa

Product	Product Code	Pressure range [MPa] 1 MPa ≈ 10.2kgf/cm ²		Product Size W(mm) x L(m)	Type
		0.05 7.25	0.2 29		
Super High Pressure (HHS)	FRESCALE HHS R270 10M			270 x 10	Mono-sheet
High Pressure (HS)	FRESCALE HS R270 10M			270 x 10	Mono-sheet
Medium Pressure (MS)	FRESCALE MS R270 10M			270 x 10	Mono-sheet
Medium Pressure (MW)	FRESCALE MW R270 10M			270 x 10	Two-sheet
Low Pressure (LW)	FRESCALE LW R270 10M			270 x 10	Two-sheet
Super Low Pressure (LLW)	FRESCALE LLW R270 6M			270 x 6	Two-sheet
Ultra Super Low Pressure (LLLW)	FRESCALE LLLW R270 5M			270 x 5	Two-sheet
Extreme Low Pressure (4LW)	FRESCALE 4LW R310 3M			310 x 3	Two-sheet

- **Passo 2** – Preparação dos filmes para medição.
Os filmes de medição foram recortados conforme dimensional do cabeçote de largura e comprimento, e executado furos para o encaixe dos parafusos e recortes da região dos mancais e eixo de comando para o filme ‘A’ e para o filme ‘C’.
- **Passo 3** – Efetuado a medição da umidade relativa e temperatura com o auxílio de um termo higrômetro calibrado.
- **Passo 4** – Colocado o filme ‘A’ e o filme ‘C’ com as faces rugosas voltadas uma para a outra, e colocado sobre a face do cabeçote no motor na linha de produção.
- **Passo 5** – Colocado o conjunto da tampa do comando sobre o filme no cabeçote cuidadosamente para não deslocar o filme e apontar manualmente os parafusos no torque zero.
- **Passo 6** – Aplicado o torque normal pela apertadeira calibrada da linha produção com torque controlado de $10 \pm 1,5$ Nm simultaneamente para todos parafusos.
- **Passo 7** – Rejeitado o motor após o torque final para análise da pressão da junta sobre o filme após o torque final.
- **Passo 8** – Após o motor sair da linha foi aguardado 5 minutos e foi analisado 1 por motor por vez repetindo os passos de 1 a 7 para cada motor de cada condição do conjunto de tampa do comando.

As revelações da pressão de cada um dos 3 conjuntos testados nos motores após a aplicação do torque final serão mostradas nas Figuras 33, 34 e 35.

No conjunto novo do fornecedor ‘X’ do Brasil é observado que a linha de vedação da junta é mais forte próximo aos furos do parafuso e nas regiões mais afastadas é notório uma linha de vedação mais clara.

Figura 33 - Revelação do teste de compressão FUJI para o conjunto da tampa nacional nova



No conjunto novo do fornecedor 'X' da China é observado que a linha de vedação é mais forte e contínua durante todo o perímetro.

Figura 34 - Revelação do teste de compressão FUJI para o conjunto da tampa da China nova



No conjunto do fornecedor 'X' do Brasil retornado de campo por vazamento de óleo é observado uma linha fraca e em alguns trechos imperceptível durante todo o perímetro.

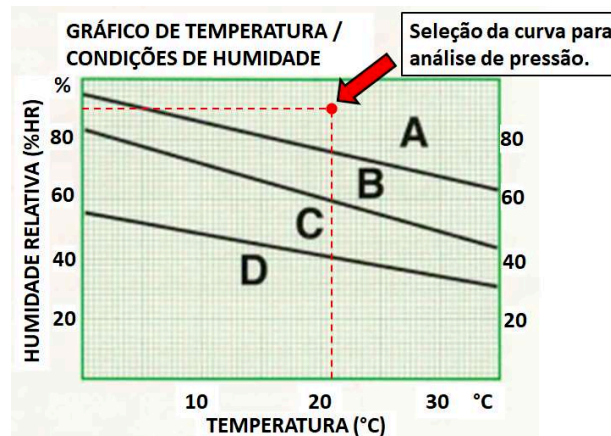
Figura 35 - Revelação do teste de compressão FUJI para a tampa do comando nacional de garantia



Na sequência será detalhado a análise do teste FUJI.

O primeiro passo foi correlacionar a temperatura de 21°C e umidade relativa de 90% com a curva de pressão para o filme FUJI 'Super Low', e a curva encontrada foi a curva 'A' conforme ilustra a Figura 36 na sequência. A curva 'A' será utilizada para os 3 motores que foram montados sobre a mesma condição de temperatura e umidade relativa.

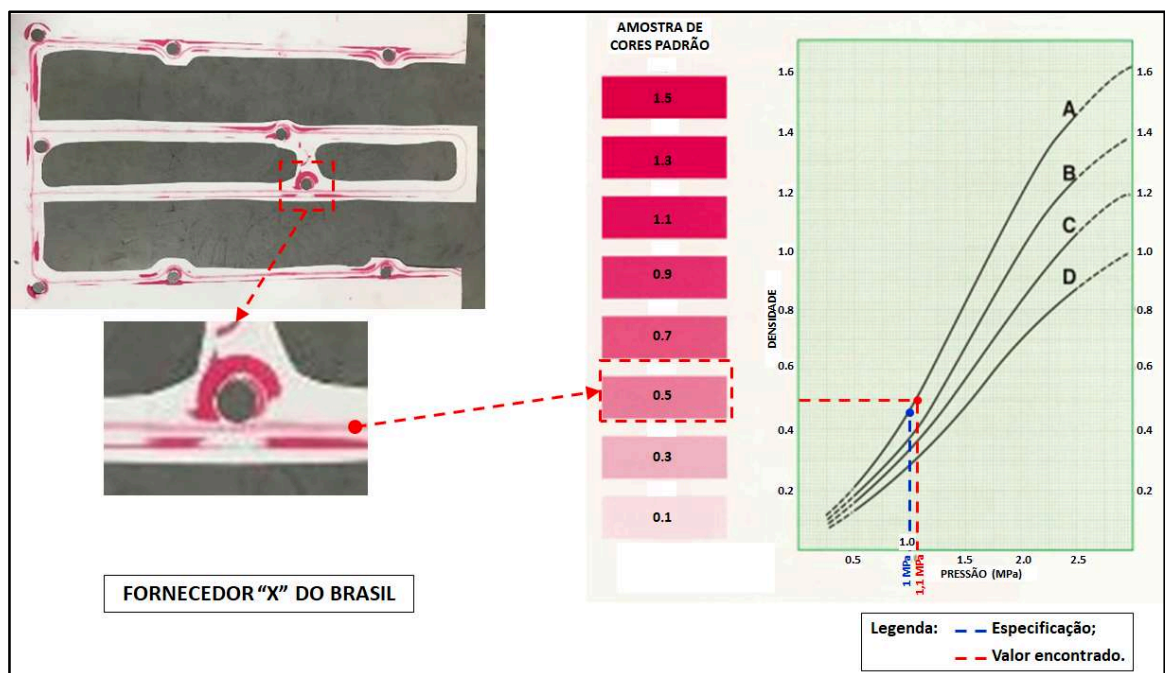
Figura 36 - Correlação da temperatura e umidade relativa para seleção da curva de pressão



O próximo passo foi realizar uma análise atributiva do filme ‘C’ ou seja do filme revelador, sendo essa análise uma comparação da densidade da cor rosada revelada no filme ‘C’ com o padrão de cores.

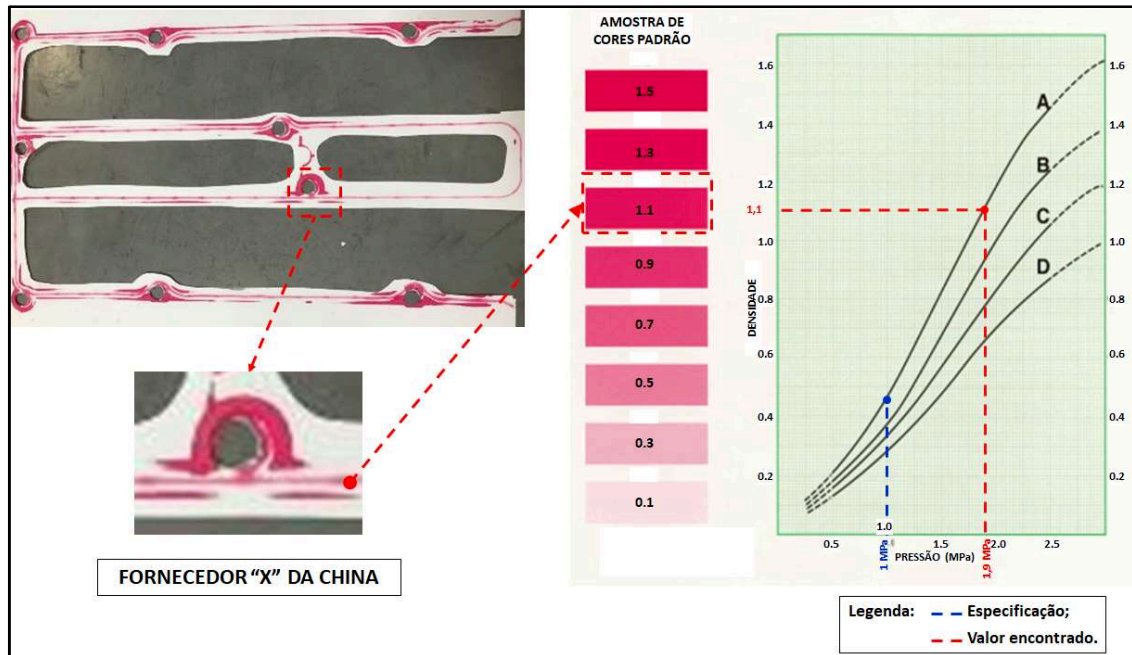
Para o conjunto da tampa do comando novo do fornecedor ‘X’ do Brasil na análise feita junto ao fornecedor foi concessado que a densidade estava em 0,5 e que quando projetada na curva de presão ‘A’ o valor correlacionado de pressão é equivalente à 1,1 Mpa, conforme ilustrado na Figura 37.

Figura 37 - Correlação da densidade da cor do filme revelador com a pressão para o conjunto da tampa do comando nacional novo



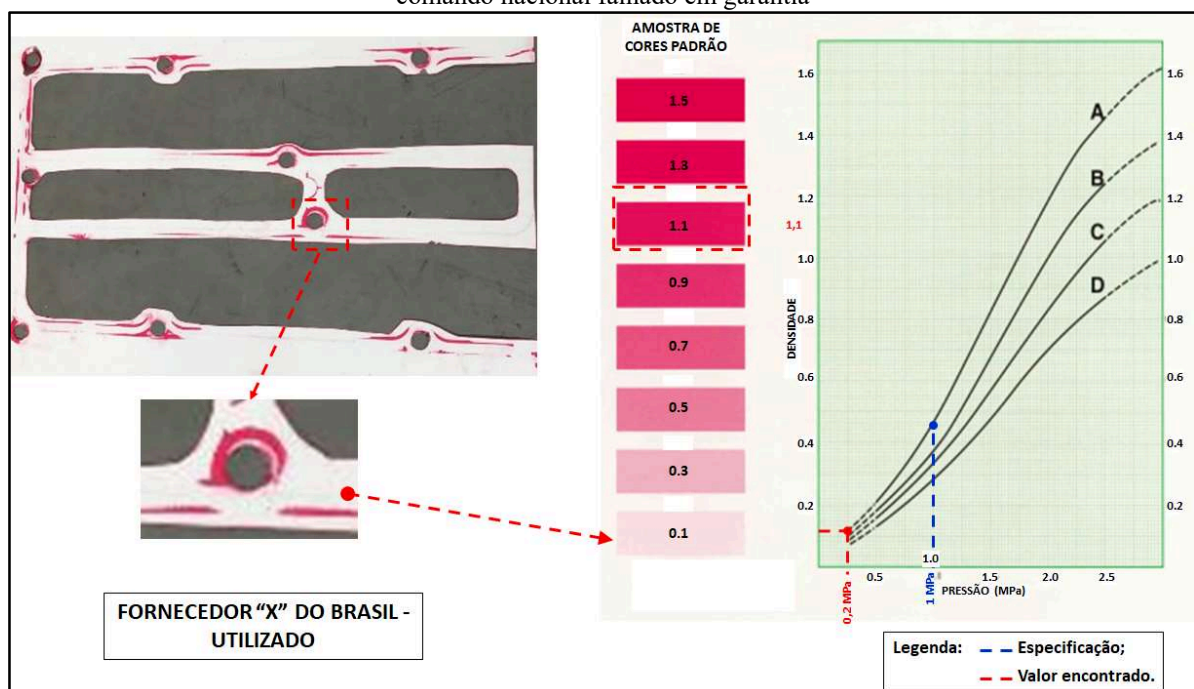
Para o conjunto da tampa do comando novo do fornecedor ‘X’ da China na análise feita junto ao fornecedor foi concessado que a densidade estava em 1,1 e que quando projetada na curva de presão ‘A’ o valor correlacionado de pressão é equivalente à 1,9 Mpa, conforme ilustrado na Figura 38.

Figura 38 - Correlação da densidade da cor do filme revelador com a pressão para o conjunto da tampa do comando chinês



Para o conjunto da tampa do comando falhado em garantia do fornecedor 'X' do Brasil na análise feita junto ao fornecedor foi concessado que a densidade estava abaixo de 0,1 e que quando projetada na curva de pressão 'A' o valor correlacionado de pressão é equivalente à 0,2 MPa, conforme ilustrado na Figura 39.

Figura 39 - Correlação da densidade da cor do filme revelador com a pressão para o conjunto da tampa do comando nacional falhado em garantia



Com base nas análises do *Fuji test* foi comprovado que o conjunto novo da tampa do comando do fornecedor ‘X’ da China possui uma melhor compressão com uma melhor uniformidade em todo seu perímetro, e o conjunto novo da tampa do comando do fornecedor ‘X’ do Brasil possui uma compressão operando muito próxima da especificação mínima e observado uma variação maior visualmente por todo perímetro da junta.

O *Fuji test* também caracterizou o Y2 com relação a junta falhada em campo, pois a mesma perdeu compressão não atingindo o mínimo especificado e perdendo sua propriedade de vedação com o cabeçote do motor. A Tabela 7 resume os resultados e análises dos testes de compressão do conjunto da tampa do comando após torque final no cabeçote do motor.

Tabela 7 - Resumo dos resultados da análise de compressão das tampas com o *Fuji Test*

Tipo de Junta	Fornecedor	Resultado teste compressão com FUJI	Especificação	% acima/abaixo	Comentários
Junta nova	Fornecedor "X" da China	1,9 MPa	mínimo 1MPa	90%	Conjunto tampa do comando novo do fornecedor "X" da China apresenta uma compressão de 90% acima do especificado. Observado visualmente pouca variação em todo perímetro da junta.
Junta nova	Fornecedor "X" do Brasil	1,1 MPa	mínimo 1 Mpa	10%	Conjunto tampa do comando novo do fornecedor "X" do Brasil apresenta uma compressão de 10% acima do especificado. Observado visualmente maior variação em todo perímetro da junta.
Junta falha retornada de campo	Fornecedor "X" do Brasil	<0,2 Mpa	mínimo 1 Mpa	-80%	Conjunto tampa do comando falhado em campo do fornecedor "X" do Brasil perdeu totalmente a propriedade de compressão e não atingiu o mínimo requerido. Junta rejeitada.

Após análise dos resultados com o *Fuji test* foi feito confirmado que a diferença estava no conjunto da tampa do comando e, portanto, foi realizada uma análise nas especificações da tampa e da junta. Como resultado foi encontrado uma diferença no material do composto da borracha utilizado pelo fornecedor ‘X’ da China que não foi capturado pelo fornecedor ‘X’ do Brasil.

4.5. Fase Melhorar

Na fase analisar foi investigado e validado o ‘X1’ que seria a ‘temperatura de injeção abaixo do especificado’ através do ‘*Compression set*’ e o ‘X2’ que seria a ‘Composição da matéria prima da borracha’ através do ‘*Fuji test*’. Agora na fase melhorar serão implementadas as ações pelo time junto ao fornecedor e também as ações de melhoria do produto para eliminar e prevenir que o problema aconteça.

- **X1. Temperatura de injeção abaixo do especificado**

Para estabelecer uma faixa segura para a temperatura de injeção o fornecedor 'X' do Brasil foi consultado a matriz da Alemanha e a planta irmã da China e concluiu que as temperaturas ideais deveriam estar entre 200°C a 220°C, estabelecendo faixas entre 200°C a 210°C, 205°C a 215°C e 210°C a 220°C nas placas de aquecimento da injetora.

Cada placa recebeu seu limite de controle com as faixas de temperatura mencionadas, e então a injetora foi programada para não injetar peças até que todas as placas atinjam a sua faixa de temperatura especificada. A Figura 40 ilustra o painel da injetora com os limites estabelecidos para cada placa de aquecimento.

Figura 40 - Painel de temperatura da injetora da junta de borracha conFigurado para temperatura ideal no fornecedor 'X' do Brasil

Temperatura	°C	Estado	Nominal	Real	Tol 1	Tol 2
Placa aquec. Fixa 1		✓	210	209	5	-5
Placa aquec. Fixa 2		✓	205	205	5	-5
Placa aquec. Fixa 3		✓	210	210	5	-5
Placa aquec. Móvel 1		✓	210	211	5	-5
Placa aquec. Móvel 2		✓	205	206	5	-5
Placa aquec. Móvel 3		✓	210	211	5	-5
Placa aquec. 1 Lateral		✓	215	214	5	-5
Placa aquec. 2 Lateral		✓	210	210	5	-5
Placa aquec. 3 Lateral		✓	215	213	5	-5

Parâmetros de controle de temperatura.

Após a configuração das injetoras foi realizado um travamento dos parâmetros de temperatura da máquina com chave no painel e uma senha para proteção, e portanto dessa forma somente a engenharia de manufatura responsável pelo processo de injeção possui acesso aos parâmetros da máquina. A Figura 41 ilustra a chave e senha colocadas no painel para proteger os parâmetros de temperatura de injeção.

Figura 41 - Chave e senha implementados no painel para restringir os parâmetros da temperatura de injeção a somente a engenharia de manufatura de processos



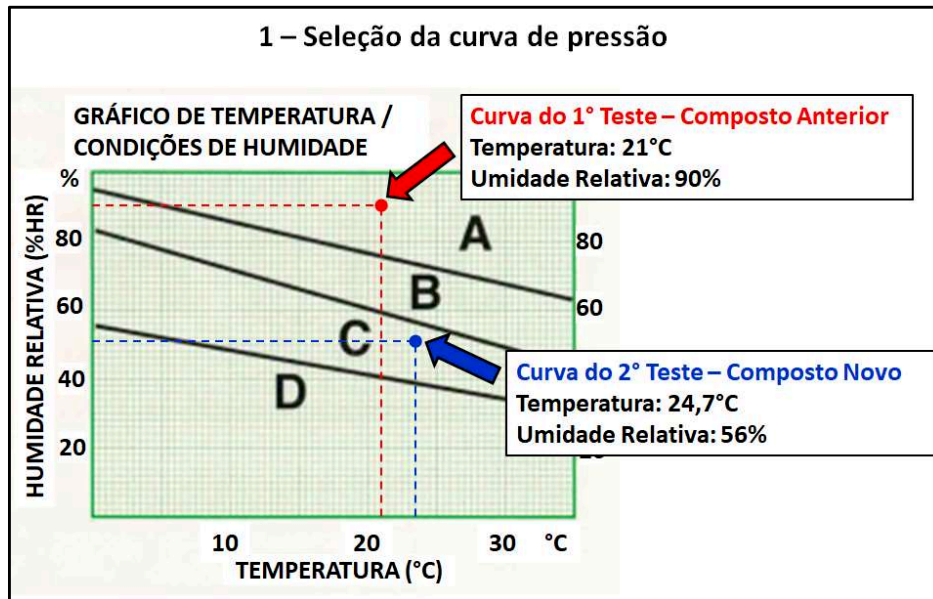
- **X2. Composição da matéria prima da borracha**

A especificação do material da borracha do fornecedor 'X' da China era 'Borracha Acrílica de Etilino' (AEM - *Ethylene Acrylic Rubber*) de 60 *Shore 'A'* de dureza, e a especificação da borracha 'X' do Brasil era 'Borracha Acrílica de Etilino' (AEM - *Ethylene Acrylic Rubber*) de 40 *Shore 'A'* de dureza.

Como visto na fase analisar foram medidas as compressões com o *Fuji test* e validado que o conjunto da tampa do comando do fornecedor 'X' da China entregava uma força de compressão de 1,9 MPa que é 72% maior que o mesmo fornecedor 'X' do Brasil que entrega uma força de compressão de 1,1 Mpa e opera muito próximo da compressão mínima que seria de 1 MPa. Portanto para validar a melhoria foi injetada uma junta com mesmo composto da borracha acrílica de Etileno 'AEM' com a dureza de 60 *Shore 'A'* e submetido novamente ao teste *Fuji* e comparado a melhoria da compressão com o anterior medido na fase analisar e também com a junta de referência do fornecedor X da China.

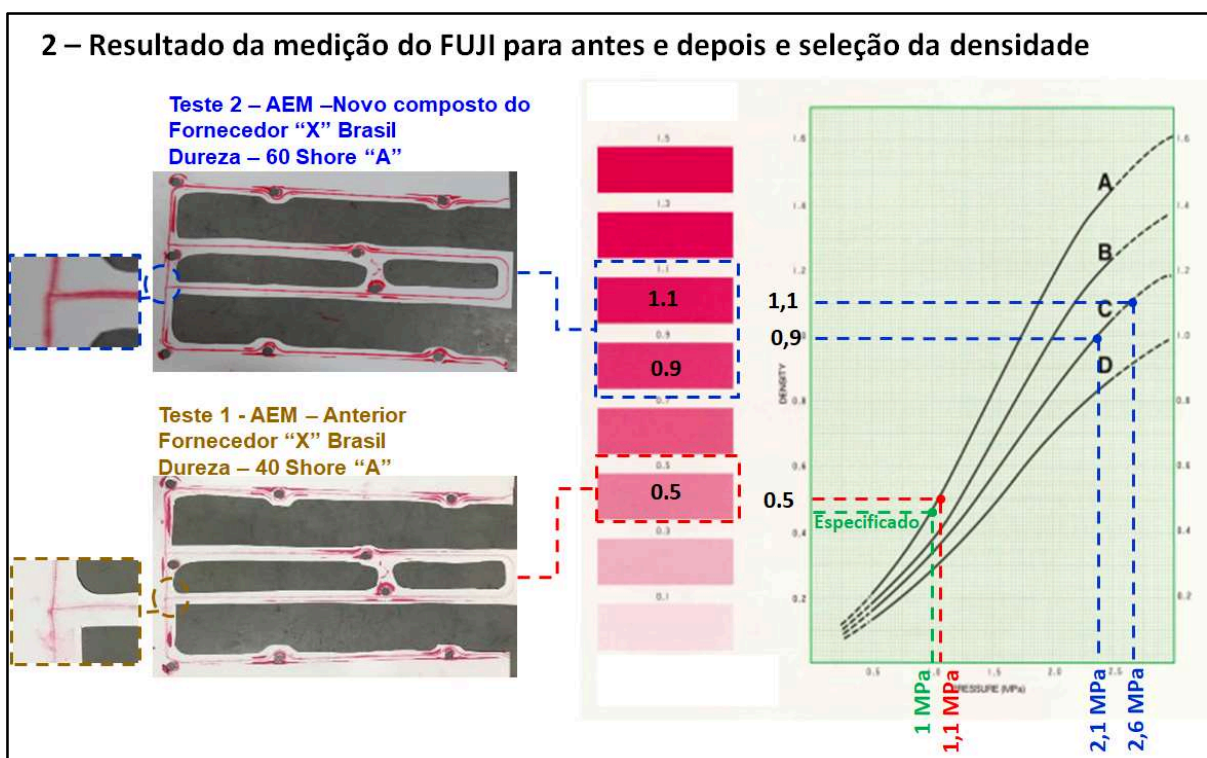
A Figura 42 ilustra a seleção da curva de pressão para o teste com composto anterior de dureza 40 *Shore 'A'* e para o teste com o novo composto de dureza de 60 *Shore 'A'*.

Figura 42 – Seleção da curva de pressão para os testes com o composto anterior e composto novo



A Figura 43 ilustra o resultado do FUJI e o comparativo do resultado da pressão entre os conjuntos com a junta de dureza de 40 Shore 'A' que gerou uma pressão de 1,1 MPa, e com a junta de 60 Shore 'A' que gerou uma pressão entre 2,1 MPa e 2,6 MPa.

Figura 43 – Revelação do teste Fuji e comparativo de intensidade de cor e pressão entre juntas com composto novo e composto anterior



Foi seguido todos os passos para a medição da junta descrito na fase analisar e o resultado da medição da junta acordado com o time de especialistas e fornecedor está entre 2,1 MPa a 2,6 MPa, o que corresponde a uma melhoria entre 91% a 136% e também uma condição próxima e melhor que a junta do fornecedor 'X' da China.

4.6. Fase Controlar

Na fase controlar foram implementados os controles necessários para que as melhorias implementadas na fase Melhorar com relação ao 'X1' e ao 'X2' se mantenham ao longo do tempo e não voltem mais a ocorrer.

- **X1. Temperatura de injeção abaixo do especificado**

Para garantir que a temperatura opere dentro da faixa correta foram treinados todos operadores e implementado uma folha de registro conforme ilustra a Figura 44 para controlar os parâmetros críticos de injeção em todo início de produção e retorno após alguma parada ou intervenção na máquina. Essa folha de registro é auditada pela área de qualidade.

Figura 44 - Folha de registro para controle dos parâmetros críticos de injeção e temperatura

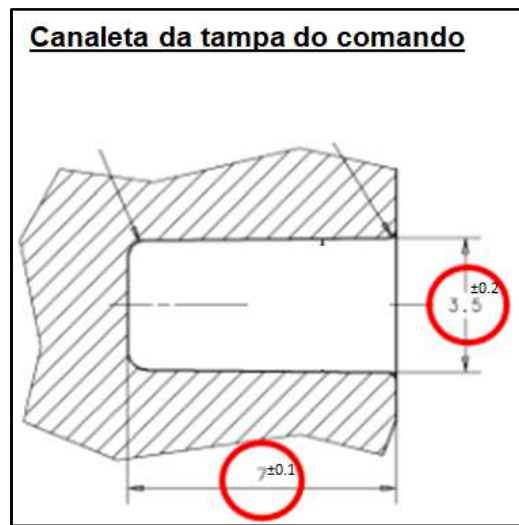
REGISTRO DOS PARÂMETROS DE INJEÇÃO DA BORRACHA						
REGISTRO DEVE SER REALIZADO A CADA 2 HORAS						
DATA	HORA	Temp. Placa Aquec. Fixa 1,2,3	Temp. Placa Aquec. Fixa 1,2,3	Temp. Placa Aquec. Lateral 1,2,3	Registro do Operador	Validação da Qualidade
03/07	20:00	220-215-220	230-230-230	230-230-230	1210	FC
03/07	22:00	220-215-220	230-230-230	230-230-230	1210	FC
04/07	00:00	220-215-220	230-230-230	230-230-230	1091	FC
04/07	02:00	220-215-220	230-230-230	230-230-230	1091	FC
04/07	04:00	220-215-220	230-230-230	230-230-230	1091	FC
04/07	06:00	220-215-220	230-230-230	230-230-230	1091	FC
05/07	14:00	215/210/215	205/205/205	215/220/215	1205	FC
05/07	16:00	215/210/215	205/205/205	215/220/215	1205	FC
05/07	18:00	215/210/215	205/205/205	215/220/215	1205	FC
05/07	20:00	215/210/215	205/205/205	215/220/215	1205	FC

Após a implementação também foram controladas 30 amostras para as características críticas da junta e da canaleta que garantem o ‘*compression set*’, assim como 30 amostras medindo o ‘*compression set*’.

Para a tampa do comando foram controladas a largura e espessura da canaleta, e para junta de borracha foi controlado a altura e espessura, sendo em ambos os casos as medidas foram realizadas em 30 amostras espaçadas durante 16 semanas.

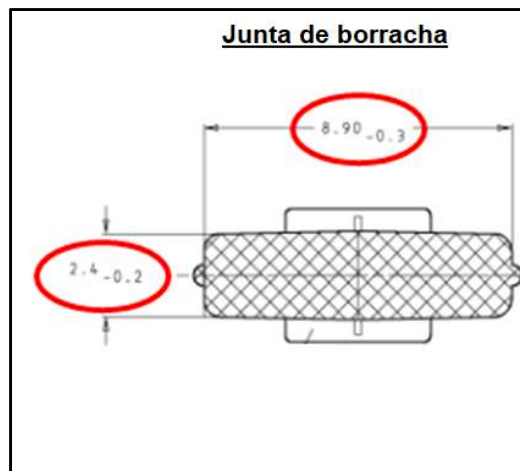
A Figura 45 ilustra as características críticas controladas para a canaleta da tampa do comando.

Figura 45 - Características críticas da tampa do comando



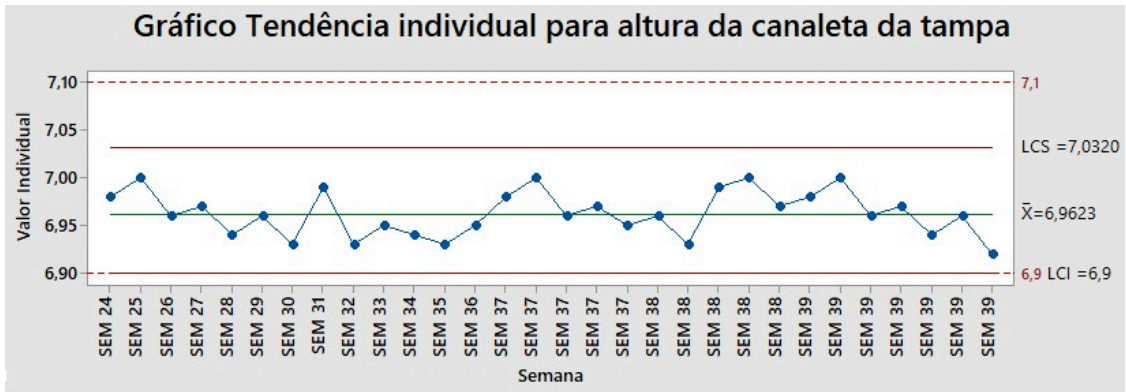
A Figura 46 ilustra as características críticas controladas para a junta de borracha da tampa do comando.

Figura 46 - Características críticas da junta



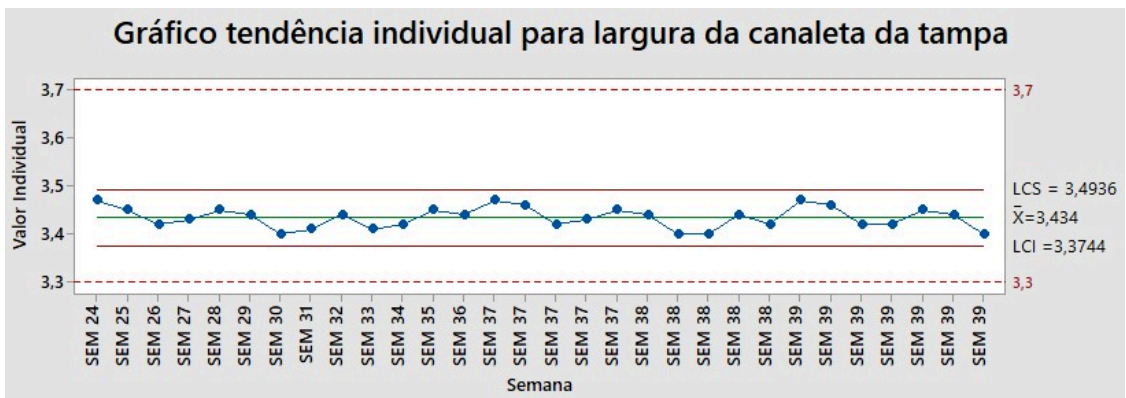
A Figura 47 ilustra a medição da altura da canaleta da tampa do comando considerando 30 amostras espaçadas durante 16 semanas.

Figura 47: Controle da altura da canaleta da tampa do comando ao longo do tempo.



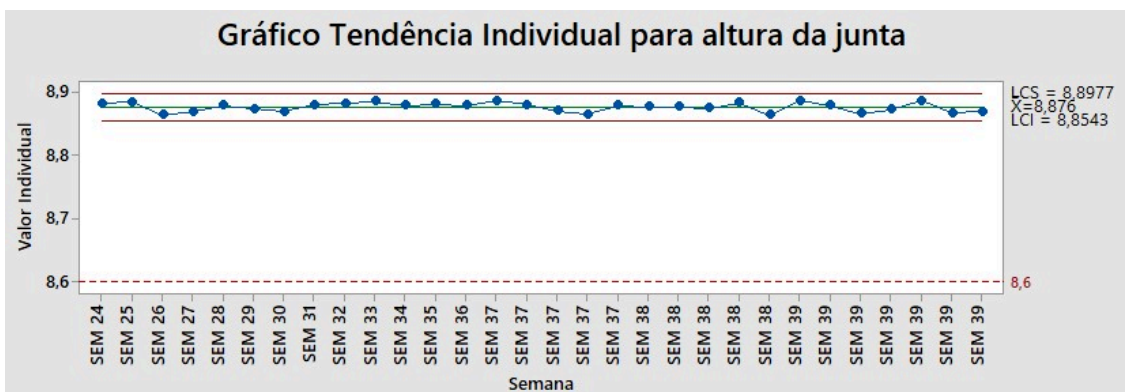
A Figura 48 ilustra a medição da largura da canaleta da tampa do comando considerando 30 amostras espaçadas durante 16 semanas.

Figura 48 - Controle da largura da canaleta da tampa do comando ao longo do tempo



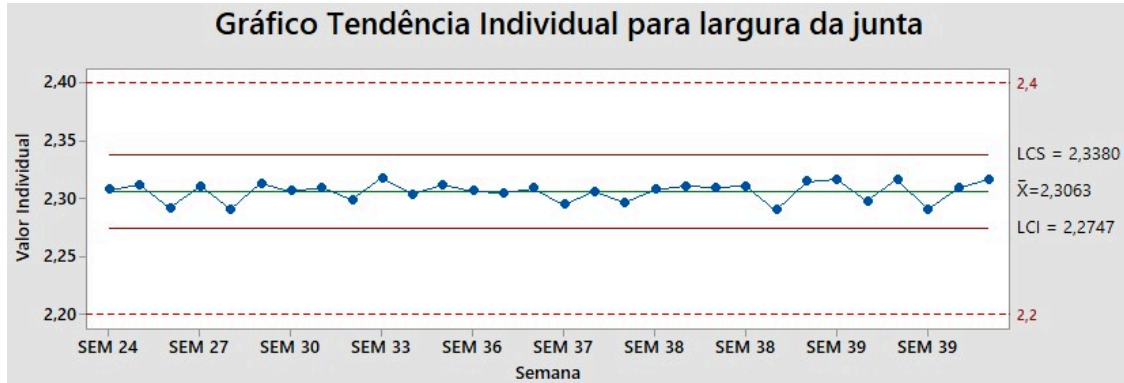
A Figura 49 ilustra a medição da altura da junta considerando 30 amostras durante 16 semanas.

Figura 49 - Controle da espessura da junta ao longo do tempo



A Figura 50 ilustra a medição da espessura da junta considerando 30 amostras durante 16 semanas.

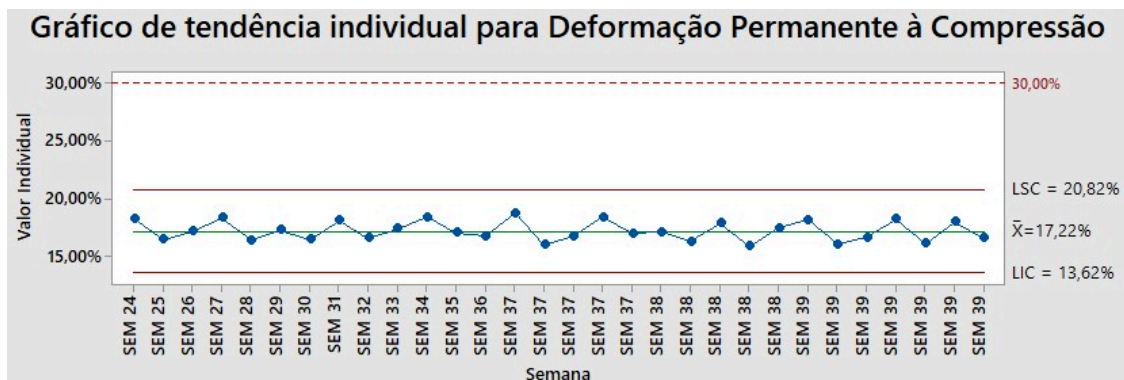
Figura 50 - Controle da largura da junta ao longo do tempo



Como observado nas Figuras 47, 48, 49 e 50 todas as características estão sob controle e dentro das especificações. A Figura 49 mostra um processo tendendo para a máxima da especificação, pois é uma condição melhor para a compressão da junta e acordado com os especialistas de processo e produto.

Com relação a deformação permanente à compressão ‘*Compression set*’ a Figura 51 ilustra a medição de 30 amostras durante 16 semanas.

Figura 51 - Controle da deformação permanente à compressão ao longo do tempo

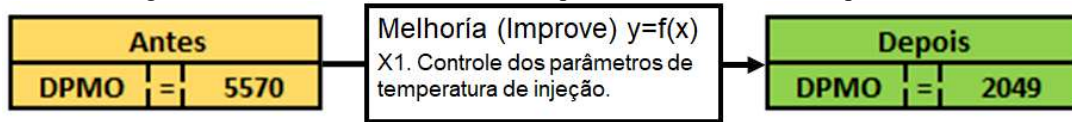


Para a validação da ação foi realizado uma revisão no processo do fornecedor ‘X’ do Brasil, e também calculado o DPMO após a melhoria implementada e comparado com o DPMO inicial.

O DPMO inicial calculado foi de 5570 e o DPMO após a implementação do X1 foi de 2049, o que equivale a uma melhoria de 63,21% na garantia em veículos com até 1 ano em

serviço. A Figura 52 ilustra o DPMO antes e depois para a melhoria implementada dos controles dos parâmetros da temperatura de injeção.

Figura 52 - Cálculo do DPMO antes e depois da melhoria do X1 implementada



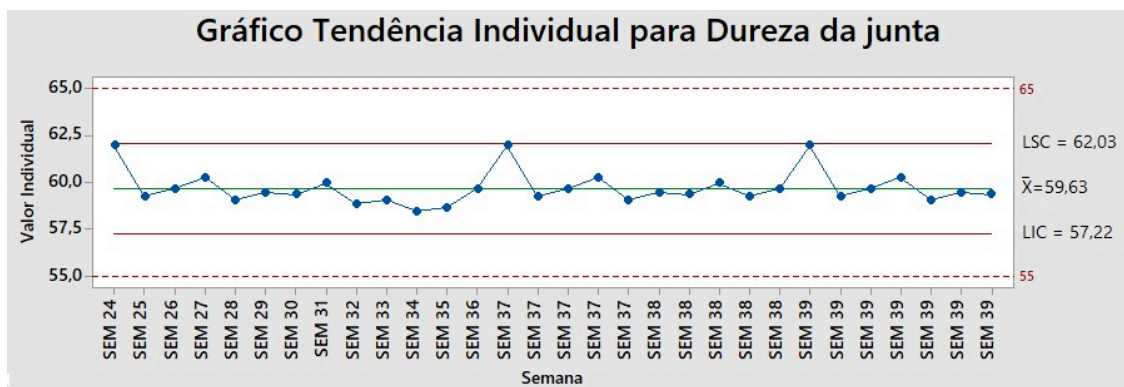
Além desses controles e validações, também foram atualizados os procedimentos operacionais, plano de controle de produção, FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis* – Modo de Falha e Análise do Efeito) para garantir o aprendizado da organização e também para que o problema não volte mais a ocorrer.

- **X2. Composição da matéria prima da borracha**

Com relação a composição da borracha da junta foi efetuado o controle da nova especificação da dureza e atualizado a documentação necessária para que o problema não volte mais a ocorrer.

Para garantir a compressão foi controlada a dureza da junta com a nova especificação de 60 Shore 'A' ± 5 , e foram coletadas 30 amostras ao longo de 16 semanas e constatado processo sob controle e dentro dos limites de especificação. A Figura 53 ilustra a tendência do processo com 30 amostras coletadas ao longo de 16 semanas.

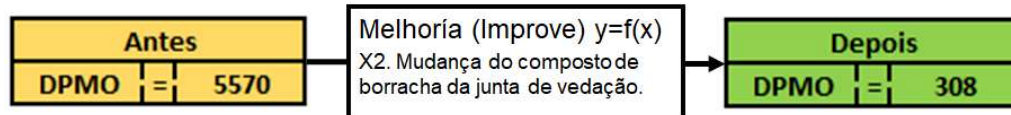
Figura 53 - Controle da dureza ao longo do tempo



Portanto para a validação da melhoria implementada com a dureza da junta de borracha de 60 Shore 'A' para o conjunto da tampa do comando, considerando o DPMO inicial calculado era de 5570 e após a implementação do 'X2' com o DPMO final foi de 308, o que

equivale a uma melhoria de 94,5 % na garantia em veículos com até 1 ano em serviço. A Figura 54 ilustra o DPMO antes e depois para a melhoria implementada dos controles dos parâmetros da temperatura de injeção.

Figura 54 - Cálculo do DPMO antes e depois da melhoria do X2 implementada



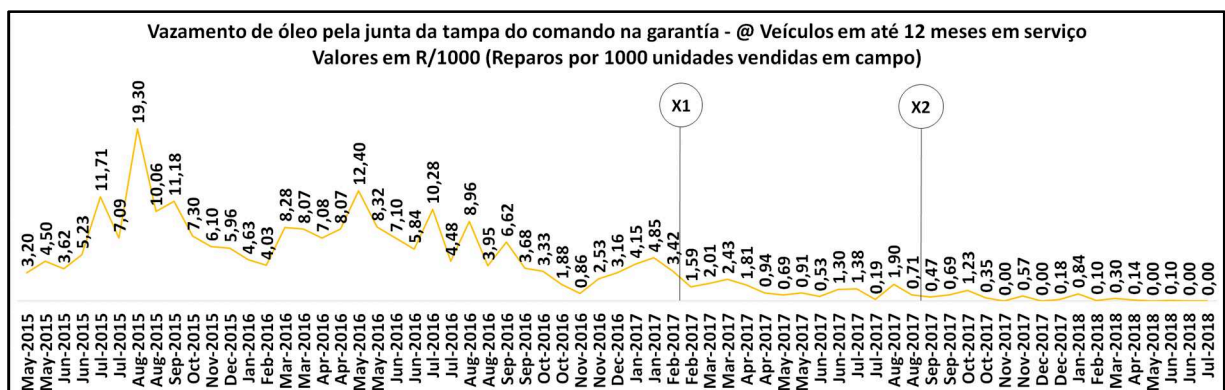
Com relação a documentação foram atualizados o desenho do produto com a especificação do novo material e também com a faixa de dureza que deve apresentar, e também foram atualizados FMEA e adicionado no plano de controle uma auditoria com *FUJI Film* a cada 6 meses para garantir a compressão da junta.

- **Validação X1 e X2**

Com relação a melhoria foi visto na fase que o DPMO final foi de 308, o que corresponde a uma melhoria de 94,5% com relação ao DPMO inicial de 5570.

Com relação ao resultado foi acompanhado a garantia dos veículos equipados com a família de motores do Brasil após a implementação do ‘X1’ em Fevereiro de 2017 e do ‘X2’ em Agosto de 2017. Os dados maturados para veículos em até 2 meses em serviço é até Junho de 2018, e pode-se observar na Figura 55 após a implementa da melhoria do ‘X1’ para controle de temperatura o resultado em R/1000 saiu da faixa de acima de ‘3 R/1000’ para uma faixa em torno de ‘1 R/1000’, e após a implementação do ‘X2’ o resultado de R/1000 passou para faixa abaixo de ‘1 R/1000’ chegando alguns meses a zero reparo ou ‘0 R/1000’.

Figura 55 – Acompanhamento da tendência de reparo por vazamento de óleo pela tampa do comando na garantia para veículos em até 12 meses em serviço



5. CONCLUSÕES

Este trabalho demonstra como aplicar a filosofia 6-Sigma DMAIC junto as técnicas de ‘*Compression set*’ e ‘*Fuji Test*’ para caracterizar o defeito com base nas saídas definidas pelo time para solução do problema de vazamento de óleo pela junta da tampa do comando que foi o maior problema em campo.

O trabalho em equipe foi a base para o sucesso desse projeto, pois dentro da equipe 6-Sigma foram escolhidas pessoas certas que possuíam o conhecimento específico em cada área do negócio, e que ajudaram a agregar valor e a exceder o objetivo de melhoria de 70% atingindo um valor de 94,5% de melhoria quando comparado o DPMO inicial com o DPMO final. A área de manufatura liderou e forneceu recursos para o andamento do projeto desde o início ao fim, a área de serviços suportou junto aos concessionários a separação das peças defeituosas de vazamento para análise e caracterização, o time de produtos e produtos global suportaram no entendimento das especificações e na definição das saídas corretas ‘Y1’ e ‘Y2’ para medição e caracterização do problema, a área de qualidade suportou com os indicadores e dados de garantia, e a área de assistência técnica ao fornecedor suportou com o envolvimento e tomada de ações pelo fornecedor. Também vale destacar a importância do papel da liderança, pois definiram como prioridade o assunto a todo time da organização, forneceram recursos necessários e ajudaram a quebrar as barreiras em cada fase do projeto quando necessário.

Como resultado pode se concluir:

- ✓ ‘*Compression set*’ foi a base para caracterizar e validar o defeito relacionado ao ‘X1’ – Temperatura de Injeção Abaixo do Especificado;
- ✓ ‘*Fuji test*’ foi uma novidade para a equipe e demonstrou uma ferramenta chave para a caracterização do ‘X2’ – Composição da matéria prima da borracha;
- ✓ Demonstrou a eficiência da metodologia DMAIC para solução do problema de forma organizada junto a diferentes técnicas dentro da fase correta;
- ✓ A Melhoria em DPMO foi de 94,5%;
- ✓ O custo por unidade ‘CPU’ era de 0,61 e passou para 0,02, o que corresponde a uma melhoria em custo de 96,7%;
- ✓ O índice de reparo a cada mil unidades produzidas ‘R/1000’ era de 6,88 e passou para 0,31, o que corresponde a uma melhoria em R/1000 de 95,5%;
- ✓ Melhoría da competitividade interna com relação as fabricas de motores irmãs, assim aumentando a confiabilidade para investimentos futuros;

- ✓ Aumento da satisfação da equipe;
- ✓ Trabalho em equipe foi a base para o sucesso do projeto;
- ✓ Melhoria da percepção do cliente final.

Portanto esse trabalho demonstra a eficiência para resolução de problemas utilizando o DMAIC junto as metodologias de '*Compression set*' e '*Fuji test*', porém há oportunidades para trabalhos futuros, pois a análise do '*Fuji test*' pode ser realizada através de software que fornecem maior precisão e conseguem comprovar a variação da pressão ao redor da junta de vedação de borracha.

REFERÊNCIAS

- APPOLINÁRIO, F. **Metodologia da ciência – filosofia e prática da pesquisa**. São Paulo: Editora Pioneira Thomson Learning, 2006.
- ALMEIDA, O. D. S. **Process Mapping for Forward Models Quality**. SAE Technical Paper Series, 2017.
- ALIZADEH, E., GHADIMI, M., BARZEGARI, M.M. *et al.* **Development of contact pressure distribution of PEM fuel cell's MEA using novel clamping mechanism**. Energy, v. 131, p. 92-97, 2017.
- APPLE RUBBER. Investigating the compression set of rubber compounds. **applerubber.com**, 2018. Disponível em: <<https://www.applerubber.com/hot-topics-for-engineers/investigating-the-compression-set-of-rubber-compounds/>>. Acesso em: 23 dez. 2018.
- ARMENTANI, E., DE STEFANIS, D., ESPOSITO, R. *et al.* **Valve Cover's Numerical Vibro-Acoustic Analysis And Experimental Correlation**. SAE Technical Paper Series, 2010.
- ARVANITIS, A., ORZECZOWSKI, J., TOUSIGNANT, T. *et al.* **Automobile Powertrain Sound Quality Development Using a Design for Six Sigma (DFSS) Approach**. SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems, v. 8, n. 3, 2015.
- BALKUNDI, P., KILDUFF, M. **The ties that lead: A social network approach to leadership**. The Leadership Quarterly, v. 17, n. 4, p. 419-439, 2006.
- BASTÍAS, P., GRAFL, D., WAGNER, J., CALOGHERO, D. *et al.* **Air/Oil Separation in Cylinder Head Covers**. SAE Technical Paper Series, 2004.
- BENDL, K., KLUMP, U., HORNIG, R., KUCINSKI, E. *et al.* **Finite Element Analysis of Modules made of Thermoplastic Materials and Elastomeric Gaskets for Powertrain Applications**. SAE Technical Paper 2004-01-0011, 2004.
- CACCESE, V., BERUBE, K. A., FERNANDEZ, M. *et al.* **Influence of stress relaxation on clamp-up force in hybrid composite-to-metal bolted joints**. Composite Structures, v. 89, n. 2, p. 285-293, 2009.
- CARMONA, L. A. P. **Regression Analysis: A Geometric Perspective**. SAE Technical Paper Series, 2017.
- CHO, S. -S., SHIN, C. S. LEE, C. S. *et al.* **Assessment of an engine cylinder head-block joint using finite element analysis**. International Journal of Automotive Technology, v. 11, n. 1, p. 75-80, 2010.
- CORONADO, R. B.; ANTONY, J. **Critical success factors for the successful implementation of six sigma projects in organizations**. The TQM Magazine v. 14, n. 2, p. 92-99, 2002.

- FUJIFILM GLOBAL. Prescale. **fujifilm.com**, [2018]. Disponível em: <<http://www.fujifilm.com/products/prescale/prescalefilm/#overview/>>. Acesso em: 18 dez. 2018.
- FUJIKI, R., HATANAKA, S., NAOKI, M. **Compressive pressure distribution on end face of concrete specimens and its influence on measured strain distribution**. Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), v. 83, n. 749, p. 935-942, 2018.
- FURTERER, S. L. **Lean six sigma case studies in the healthcare enterprise**. Tradução . [Place of publication not identified]: SPRINGER LONDON LTD, 2014.
- GARLAND, R.. **Six sigma project to improve a management of change process**. Process Safety Progress, p. n/a-n/a, 2010.
- GE, X., CORCORAN, J., GAMBLE, P. **Design for 6 Sigma Application in Engine System Integration**. SAE Technical Paper Series, 2015.
- GEORGE, M.L., ROWLANDS, D., PRICE, M., MACEY, K. **The lean six sigma pocket tool book**. New York: Editora: McGraw-Hill, 2005.
- GIRDLER, S. J., GLEZOS, C.D., LINK, T.M. *et al.* **The Science of Quality Improvement**. JBJS Reviews v. 4, n. 8, p. 1 , 2016.
- GOKTEN, M., KURNAZ, G., ERGEN, O. R. *et al.* **The Development of High Efficiency Crankcase Ventilation and Oil Mist Separator for a Heavy-Duty Diesel Application**. SAE Technical Paper Series, 2008.
- GUTIERREZ, L. G., BARRALES-MOLINA, V., TAMAYO-TORRES, J. **The knowledge transfer process in Six Sigma subsidiary firms**. Total Quality Management & Business Excellence, v. 27, n. 5-6, p. 613-627, 2016.
- HAUSCH, E. **Sistemática de desenvolvimento para projeto de produtos com qualidade dimensional na indústria automobilística**. Mestre – Universidade de São Paulo, 2009.
- HENDERSON, K. M., EVANS, J. R. **Successful implementation of Six Sigma: benchmarking General Electric Company**. Benchmarking: An International Journal v. 7, n. 4, p. 260-282, 2000.
- HWANG, G. H., LEE, K. C.; SEO, Y. W. **How does Six Sigma influence creativity and corporate performance through exploration and exploitation?**. Total Quality Management & Business Excellence v. 29, n. 13-14, p. 1668-1684, 2017.
- JEONG, B., KWAK, S. D., KIM, C. K. **Optimization for Brake Feeling in Vehicle without Brake Noise**. SAE Technical Paper Series, 2016.
- JI, Z., MA, J., QIN, X. *et al.* **Improved dimensional stability of styrene butadiene rubber/ethylene vinyl acetate composite foams with skeleton support structure based on alternately cross-linking process**. Polymer, v. 157, p. 103-110, 2018.

- KAWAKAMI, A., ISHIGAKI, T., SHIRAI, Y. *et al.* **Evaluation method of pavement surface characteristics for rolling resistance.** Road Materials and Pavement Design, v. 18, n. sup2, p. 2-11, 2017.
- KOLHE, V., SHARMA, M., VEERAMANI, K. *et al.* **Development of Advanced Oil Separator to Give Uniform Oil Separation Efficiency across Engine Speed and Load Conditions.** SAE Technical Paper Series, 2012.
- KONDARU, M., TELIKEPALLI, K. P., THIMMALAPURA, S. *et al.* **Generating a Real World Drive Cycle—A Statistical Approach.** SAE Technical Paper Series, 2018.
- KONG, E., YOON, B., NAM, J. *et al.* **Accelerated Aging and Lifetime Prediction of Graphene-Reinforced Natural Rubber Composites.** Macromolecular Research, v. 26, n. 11, p. 998-1003, 2018.
- LEE, J., THO, Y., KIM, J. *et al.* **Study of Sealing Mechanism to Prevent Oil Leakage for the Thermoplastic Cylinder Head Cover.** SAE Technical Paper Series, 2007.
- LEKUE, J., DÖRNER, F., SCHINDLER, C. **Multiscale Finite Element Modeling of Wheel–Rail Rough Normal Contact Measurements Using Pressure Measurement Film.** Tribology Transactions, v. 61, n. 5, p. 972-978, 2018.
- LEKUE, J., DÖRNER, F., SCHINDLER, C. **On the Source of the Systematic Error of the Pressure Measurement Film Applied to Wheel–Rail Normal Contact Measurements.** Journal of Tribology, v. 140, n. 2, p. 024501, 2017.
- LOU, W., ZHANG, W., JIN, T. *et al.* **Stress–thermal oxidative aging behavior of hydrogenated nitrile rubber seals.** Journal of Applied Polymer Science, v. 136, n. 7, p. 47014, 2018.
- LU, Y. C., ANDERSON, M. **On the Use of Spatial Transmissibility to Evaluate the NVH Performance of Engine Cover Assembly.** SAE Technical Paper Series, 2002.
- LU, Y. C. **Effects of Seal Viscoelastic Properties on Engine Exterior Cover Noise and Vibration.** SAE Technical Paper Series, 2007.
- MALI, M., MARATHE, A., MHASKE, S. **Influence of (methacryloxymethyl) methylmethoxysilane on DCP cured EPDM/PP thermoplastic vulcanizates.** Journal of Vinyl and Additive Technology, v. 24, n. 4, p. 304-313, 2017.
- MARTINS, R. A.; MELLO, C.H.P., TURRIONI, J.B. **Guia para elaboração de monografia e TCC em engenharia de produção.** Tradução. Sao Paolo: Editora Atlas S.A., 2014.
- MEYER, D., MAEHLING, P., VARGHESE, T. *et al.* **Calibration Considerations for Six Sigma™ Accuracy and Precision in Combustion Pressure Measurement.** SAE International Journal of Commercial Vehicles, v. 10, n. 2, 2017.
- MIGUEL, P.A.C., FLEURY, A., MELLO, C.H.P. *et al.* **Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações.** 2. Ed. Rio de Janeiro: Elsevier/ABEPRO, 2012.

MINISTÉRIO DA ECONOMIA. Setor Automotivo. **Ministério da Economia - Indústria, Comércio Exterior e Serviços**, [2018]. Disponível em:

<<http://www.mdic.gov.br/index.php/competitividade-industrial/setor-automotivo#footer>>.

Acesso em: 9 dez. 2018.

MURALIDHARAN, K. **Six Sigma for Organizational Excellence**. Tradução. New Delhi: Springer India, 2015.

MURIUKI, M. G, GILBERTSON, L. G., HARNER, C.D. **Characterization of the Performance of a Custom Program for Image Processing of Pressure Sensitive Film**. Journal of Biomechanical Engineering, v. 131, n. 1, p. 014503, 2008.

NAJIPOOR, M., HAROONABADI, L., DASHTI, A. **Assessment of failures of nitrile rubber vulcanizates in rapid gas decompression (RGD) testing: Effect of physico-mechanical properties**. Polymer Testing, v. 72, p. 377-385, 2018.

OLSSON, M., SCHWARTZ, J., FRANSSON, M. **Robustness and Variability Prediction of Seat Vibration Caused by All-Wheel Drive System Imbalance in Vehicle Development**. SAE Technical Paper Series, 2018.

PAN, J., BAI, G., CHEN, W. **Lifetime estimation of nitrile butadiene rubber O-rings under storage conditions using time-varying copula**. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part O: Journal of Risk and Reliability, v. 232, n. 6, p. 635-646, 2018.

PANDE, P. S., NEUMAN, R. P., CAVANAGH, R. **Estratégia seis sigma**. Tradução. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2001.

PATEL, M., DESAI, D. A. **Critical review and analysis of measuring the success of Six Sigma implementation in manufacturing sector**. International Journal of Quality & Reliability Management v. 35, n. 8, p. 1519-1545, 2018.

PEARCE, C. L., SIMS JR., H. P. **Vertical versus shared leadership as predictors of the effectiveness of change management teams: An examination of aversive, directive, transactional, transformational, and empowering leader behaviors**. Group Dynamics: Theory, Research, and Practice, v. 6, n. 2, p. 172-197, 2002.

POCHAMPALLY, K. K.; GUPTA, S. M. **Six Sigma Case Studies with Minitab®**. Tradução. Hoboken: CRC Press, 2014.

PYZDEK, T., KELLER, P. **O seis sigma: guia do profissional, um guia completo para Green Belts, Black Belts e gerentes em todos os níveis** – 3. Ed. – Rio de Janeiro, RJ : Alta Books, 2011.

RAMIREZ, B. J., GUPTA, V. **High tear strength polyurea foams with low compression set and shrinkage properties at elevated temperatures**. International Journal of Mechanical Sciences, v. 150, p. 29-34, 2019.

RAMOS, A. W., RIBEIRO, C. O., MIYAKE, D. I., *et al.* **Seis Sigma: estratégia gerencial para a melhoria de processos, produtos e serviços** – 1. Ed. – 6. Reimpr. – São Paulo: Atlas, 2008.

RODRIGUES, M. V. **Entendendo, aprendendo, desenvolvendo qualidade padrão seis sigma: primeiros passos para a metodologia seis sigma** – Rio de Janeiro: Qualitymark, 2006.

SAMBANDAN, S., VALENCIA, M., KHAWAJA, A. *et al.* **HVAC System Bench Test Analysis for TXV Tuning**. SAE Technical Paper Series, 2018.

SENSOR PRODUCTS INC. Fuji Paper Test. **sensorprod.com**, [2018]. Disponível em: <<https://www.sensorprod.com/glossary/fuji-paper-test/fuji-paper-test.php>>. Acesso em: 18 Dezembro 2018.

SHANKARANARAYANA, R. **Application of Six Sigma Methodology to Improve Product Quality in Injection Molded Parts at Supplier End in Motorcycle Industry**. SAE Technical Paper Series, 2017.

SHANMUGAM, M., KHARATMAL, R., SATPUTE, S. **Rapid Design and Development of Noise Radiating Engine Components**. SAE Technical Paper Series, 2014.

STOCKWELL ELASTOMERICS. Compression Set of Elastomeric Materials. **stockwell.com**, 2018. Disponível em: <<https://www.stockwell.com/compression-set-testing/>>. Acesso em: 23 dez. 2018.

TIKOLIYA, JHAM KUNWAR, SINGH, RAM KRISHNA KUMARKUMAR, RAMESH *et al.* **Design, Development and Validation of New Engine Head Cover with Advanced Sealing System by using Simulation Tools**. SAE Technical Paper Series, 2016.

TRINDADE, W. **Optimization of the wall thickness of a plastic valve cover**. SAE Technical Paper Series, 2009.

TRIOLA, M. F. **Introdução à estatística: atualização da tecnologia**. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2013.

UPADHYAY, G., MADANE, V., SANE, S. **NVH Improvement for Three Wheeler**. SAE Technical Paper Series, 2011.

UY, D., STOREY, J., SLUDER C. *et al.* **U. Effects of Oil Formulation, Oil Separator, and Engine Speed and Load on the Particle Size, Chemistry, and Morphology of Diesel Crankcase Aerosols**. SAE International Journal of Fuels and Lubricants, v. 9, n. 1, p. 224-238, 2016.

WESTGARD, S., BAYAT, H., WESTGARD, J. O. **Analytical Sigma metrics: A review of Six Sigma implementation tools for medical laboratories**. Biochemia Medica v. 28, n. 2, 2018.

WITT, P. W., BAKER, T. **Personality characteristics and Six Sigma: a review**. International Journal of Quality & Reliability Management v. 35, n. 3, p. 729-761, 2018.

WU, K., YANG, L., CHIANG, I. **Leadership and Six Sigma project success: the role of member cohesiveness and resource management.** *Production Planning & Control*, v. 23, n. 9, p. 707-717, 2012.

ZHANG, W., LIKICH, M., BUTLER, B. **Development of a Robust AIS Parametric Model for V8 Engines Using Design for Six Sigma Approach.** SAE Technical Paper Series, 2018.

ZHAO, S., XIE, S., LIU, X. *et al.* **Covalent hybrid of graphene and silicon dioxide and reinforcing effect in rubber composites.** *Journal of Polymer Research*, v. 25, n. 10, 2018.

ZOU, X.P.T., LEE, W.B. **A study of knowledge flow in Six Sigma teams in a Chinese manufacturing enterprise.** *VINE*, v. 40, n. 3/4, p. 30-403, 2010.

Autorizo a cópia total ou parcial desta obra apenas para fins acadêmicos e pesquisa com a devida citação, sendo expressamente vedado qualquer tipo de reprodução para fins comerciais sem a devida autorização do autor.

Wilson Barros de Camargo

Taubaté, 04 de setembro de 2019.