

UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Clayton Tosta Martins

**APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DMAIC
NO PROJETO DE FIXAÇÃO DE ENGRENAGENS**

Taubaté – SP

2019

Clayton Tosta Martins

**APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DMAIC
NO PROJETO DE FIXAÇÃO DE ENGRENAGENS**

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

Área de Concentração: Energia e Materiais
Orientador: Prof. Dr. Evandro Luis Nohara

Taubaté – SP

2019

SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas / UNITAU

M386a Martins, Clayton Tosta
Aplicação da metodologia DMAIC no projeto de fixação de engrenagens /
Clayton Tosta Martins. -- 2019.
59 f. : il.

Dissertação (Mestrado) – Universidade de Taubaté, Departamento de
Engenharia Mecânica e Elétrica, 2019.
Orientação: Prof. Dr. Evandro Luis Nohara, Departamento de Engenharia
Elétrica.

1. DMAIC. 2. Shaper. 3. Qualidade. I. Título. II. Mestrado em
Engenharia Mecânica.

CDD – 658.5

Clayton Tosta Martins

**APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DMAIC
NO PROJETO DE FIXAÇÃO DE ENGRENAGENS**

Dissertação apresentada para obtenção do
Título de Mestre no Curso Mestrado
Profissional em Engenharia Mecânica do
Departamento de Engenharia Mecânica da
Universidade de Taubaté.
Área de Concentração: Energia e Materiais

Data:

Resultado: _____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Evandro Luís Nohara

Universidade de Taubaté

Assinatura: _____

Prof. Dr. Roque Antonio de Moura

FATEC São José dos Campos

Assinatura: _____

Prof. Dr. Mauro Pedro Peres

Universidade de Taubaté

Assinatura: _____

*Dedico este trabalho à Tânia Matreiro Vale
Martins, minha esposa e parceira na vida.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, sem ele não estaria aqui nessa etapa conseguindo finalizar o programa de mestrado, obrigado pela direção Senhor.

Aos meus amigos que sempre me deram apoio e me animaram nos dias difíceis, ajudando sempre que era necessário.

Aos meus familiares e minha mulher querida por todo o apoio, paciência e carinho durante esse processo, muito obrigado.

Ao professor Dr. Evandro Luis Nohara pela impecável orientação e confiança atribuído ao desenvolvimento desta dissertação.

Ao professor Dr. Carlos Alberto Chaves pelo incentivo atribuído ao desenvolvimento desta dissertação.

Aos colegas da Turma 34 que estiveram comigo nesta caminhada.

À secretária Raquel Moraes pela atenção, respeito e incentivo.

Ao Professor Mestre Ivair Santos, por me ensinar o valor da tranquilidade, persistência e dedicação para chegar ao objetivo dos estudos.

A todas as pessoas que gentilmente colaboraram e tornaram possível a conclusão deste trabalho.

À Universidade de Taubaté e Professores, que forneceram todos os recursos e conhecimentos necessários para a minha formação e para realização deste trabalho.

“Não se gerencia o que não se mede, não se mede o que não se define, não se define o que não se entende, e não há sucesso no que não se gerencia.”

William Edwards Deming.

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo aplicar a metodologia Seis Sigma DMAIC (Definir-Medir-Analisar-Melhorar-Controlar) para melhorar o processo do corte de engrenagens pelo método *Shaper*. O parâmetro da peça estudado pelo DMAIC foi a excentricidade no diâmetro primitivo de uma engrenagem. As engrenagens estudadas são aplicáveis em caixas redutoras de velocidade e em transmissões para tratores, caminhões e outros equipamentos. Esses equipamentos precisam ser eficientes e silenciosos, e para isso a excentricidade do diâmetro primitivo da engrenagem deve ser próxima de zero. A metodologia adotada no trabalho envolveu uma consulta aos especialistas de diferentes áreas de fabricação de engrenagens sobre a causas de variabilidade da excentricidade nas engrenagens em forma de eixos, e análise dos fatores de influência que afetam o processo de corte (máquina, material, ferramenta, mão-de-obra e sistemas de medição), os quais podem provocar o aumento da variabilidade. Posteriormente foram aplicadas ferramentas de gestão da qualidade FMEA, Gráfico de Pareto, Espinha de Peixe e *software* especializado para cálculos estatísticos. Os resultados obtidos demonstram que foi possível reduzir a variabilidade da excentricidade no diâmetro primitivo por meio da melhoria na configuração de fixação da engrenagem no processo *Shaper*. O nível Sigma passou de três para seis, o que indica que o índice de defeitos por milhão (PPM) reduziu de 2700 para menos de um.

Palavras-chave: DMAIC, *Shaper*, Qualidade.

ABSTRACT

The research presented in this thesis aims to apply the Six Sigma DMAIC (Define-Measure-Analyze-Improve-Control) methodology to improve the gear shaping cutting process. The parameter that has studied by the DMAIC was a runout over the gear pitch circle. The gear shaft that was studied on that thesis, is applied in redactor gearboxes and also in transmissions speed for tractors, trucks and other vehicles. Those equipment needs to be efficient and quiet, and for this the runout over the pitch circle generated by the process must be close the zero. The methodology that has adopted on this job involves the consulting of gear specialists from different areas of gear application and they have contributed making their appointment about root causes of variation in runout over the pitch circle from gear shafts, and the analysis of influence factors that affect the cutting process (machine, material, tools, labor and measuring systems), which can increase the variability. After that, were applied quality tools management like FMEA, Pareto Chart, Fishbone and one specialized statistical software. The results achieved with the application of DMAIC shows that it is possible to reduces de variability of gear runout over pitch circle by means of adjusting the gear clamping configuration in the Shaper Process. The Sigma level went from three to six, which indicates that the defect rate per million (PPM) has decreased from 2700 to less than one.

Keywords: DMAIC, Shaper, Quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. As Cinco Fases do DMAIC.....	18
Figura 2. Processo de corte <i>Shaper</i>	23
Figura 3. Engrenagens fabricadas pelo processo <i>Shaper</i>	24
Figura 4. Processo <i>Shaper</i> em execução.....	24
Figura 5. Máquina cortadora de engrenagens <i>Shaper</i>	26
Figura 6. Disposição dos eixos em uma máquina <i>Shaper</i>	26
Figura 7. Como medir a excentricidade em engrenagens cilíndricas	28
Figura 8. Senóide gerada após medir a excentricidade	29
Figura 9. Número de incerteza e número de dados associados	31
Figura 10. Diagrama de trabalho das ferramentas <i>Shaper</i>	31
Figura 11. Movimentos da ferramenta <i>Shaper</i> em trabalho	31
Figura 12. Histograma com excentricidade acima de 22 microns	43
Figura 13. Fixação da peça com contra ponto superior	37
Figura 14. Valores medidos no engrenômetro	37
Figura 15. Questionário “A” sobre a causa de variabilidade na excentricidade	38
Figura 16. Matriz de priorização baseada no questionário “A”	39
Figura 17. Questionário “B” sobre a causa de baixa rigidez de fixação	40
Figura 18. Matriz de priorização baseada em questionário “B”	45
Figura 19. Fixação da peça com flange	45
Figura 20. Apresentação da fase Definir	45
Figura 21. Apresentação da fase Medir	45
Figura 22. Capabilidade da fase Medir com fixação entre pontas	45
Figura 23. Relação entre Cp, Cpk, Nível Sigma e PPM	46
Figura 24. Apresentação da fase Analisar	47
Figura 25. Formulário do FMEA – Preenchimento inicial	48
Figura 26. Apresentação da fase melhorar com a capacidade curta.....	49
Figura 27. Capabilidade longo termo da faser Melhorar	50
Figura 28. Formulário do FMEA – Preenchimento final.....	51
Figura 29. Folha de <i>check list</i> de preparação da máquina.....	53

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 Objetivos	13
1.1.1 Objetivo geral	13
1.1.2 Objetivos específicos.....	13
1.2 Justificativa.....	13
1.3 Estrutura do trabalho.....	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1 Gestão da Qualidade.....	15
2.2 A Metodologia Seis Sigma DMAIC.....	17
2.2.1 Fase Definir	19
2.2.2 Fase Medir	19
2.2.3 Fase Analisar	20
2.2.4 Fase Melhorar	21
2.2.5 Fase Controlar.....	21
2.3 O Processo <i>Shaper</i>	22
2.3.1 A máquina <i>Shaper</i>	25
2.3.2 O dispositivo de fixação das peças	27
2.3.3 A verificação das peças.....	28
2.3.4 As forças e os movimentos presentes no processo <i>Shaper</i>	30
2.3.5 A Ferramenta <i>Shaper</i>	32
2.3.6 Manutenção.....	33
2.3.7 Preparação da máquina	33
2.3.8 Planejamento estratégico na produção.....	34
2.3.9 Planejamento para a realização de capacidade.....	35
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
3.1 Materiais e equipamentos	36
3.2 Metodologia.....	36
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
4.1 Aplicação da Fase Definir.....	43
4.2 Aplicação da Fase Medir	44

4.3 Aplicação da Fase Analisar	47
4.4 Aplicação da Fase Melhorar	49
4.5 Aplicação da Fase Controlar	52
5 CONCLUSÃO.....	54
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	56
REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

Com a crescente concorrência na indústria metal mecânica e uma maior exigência dos consumidores, tem sido constante a demanda para a execução de aperfeiçoamentos dos processo produtivos. As equipes de trabalho dessas empresas têm concentrado seus esforços para encontrar dentre os 6M (máquina, método, forma de medir, meio ambiente, matéria prima e mão de obra), em qual ação se consegue um melhor resultado e onde focar os recursos para aumentar a competitividade. Nesse sentido, a execução de metodologias de apoio que indiquem as etapas para se chegar a um objetivo é essencial. A estrutura DMAIC é uma ferramenta de ampla aplicação nas empresas e se encaixa perfeitamente no contexto da melhoria de resultados para tornar o negócio mais competitivo.

Conforme Rotondaro (2002), o DMAIC é uma metodologia que agrupa a aplicação do Seis Sigma e apresenta o intento de melhoria dos processos já existentes. Sua proposta é eficaz no aumento da produtividade, redução de custos, melhoria em processos industriais, administrativos e outros. O Seis Sigma concentra-se na diminuição ou eliminação da incidência de erros, defeitos e falhas em um processo (ANDRIETTA e MIGUEL, 2002).

A aplicação do DMAIC proposta nesse estudo se aplica na fabricação de engrenagens que podem ser utilizadas como componentes de redutores de velocidade e transmissões para tratores, caminhões e outros equipamentos.

As engrenagens passam por diferentes etapas na manufatura até serem concluídas. Dentre essas etapas, o corte dos dentes com ferramenta *Shaper* é uma operação que remove um volume maior de material e atribui características geométricas importantes nos flancos dos dentes.

Este trabalho justifica-se por permitir um aperfeiçoamento na fabricação de engrenagens, contribuindo para uma melhor qualidade e aumento do conforto acústico do usuário ao dirigir ou operar o equipamento.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho busca aplicar a metodologia DMAIC no projeto de fixação de engrenagens para redução da variabilidade da excentricidade do diâmetro primitivo.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos envolvem:

- identificar as necessidades e expectativas técnicas do processo de corte de dentes de engrenagens (*Shaper*);
- levantar as características do processo de corte que influenciam na excentricidade do diâmetro primitivo da engrenagem;
- estudar um dispositivo de fixação capaz de gerar menor erro na excentricidade da engrenagem e avaliação do seu custo-benefício;
- realizar testes e medições do novo dispositivo de fixação;
- elaborar um procedimento de preparação de máquina adequando a fixação da peça no processo de corte.

1.2 Justificativa

Este trabalho justifica-se por permitir a inserção de um sistema de aperfeiçoamento da produção para melhorar o indicador de satisfação do cliente.

1.3 Estrutura do trabalho

A dissertação está estruturada em seis capítulos, conforme apresentado a seguir:

No capítulo um encontra-se a introdução a qual inclui informações sobre o gênero de pesquisa e objetivos.

No capítulo dois está a revisão bibliográfica com a abordagem sobre a aplicação da metodologia Seis Sigma DMAIC, detalhando suas definições e as etapas para a construção do projeto, bem como seus desdobramentos.

O capítulo três aborda a aplicação dos materiais e métodos utilizados, como foram reunidos os dados e de que forma foi realizada a pesquisa.

No capítulo quatro são apresentados os resultados e discussão propostos pelo sistema DMAIC e seus respectivos resultados, do mesmo modo que o estudo dos resultados.

O capítulo cinco apresenta as conclusões.

No capítulo seis são abordadas as sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, são apresentadas as referências utilizadas neste trabalho e seus anexos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O DMAIC fornece dados estatísticos de cada uma das ações que são realizadas em um processo, contribuindo com uma tomada de decisões mais eficiente, se transformando em uma metodologia que orienta empresas a tomarem o caminho correto quanto à qualidade e a produtividade (DAMBHARE *et al.*, 2013 p.14).

2.1 Gestão da Qualidade

“Os processos e modelos que fazem parte do universo da gestão da qualidade possibilitam o incessante aprimoramento das empresas, que a todo instante são impelidas a alterar suas sistemáticas e procedimentos na tentativa de obter maiores níveis de competitividade” (MARSHALL JR. *et al.*, 2006, p. 15).

Devido a uma forte competição global, as empresas no mundo todo têm enfrentado o desafio de melhorar constantemente sua produtividade e desempenho com qualidade.

Segundo Oliveira *et al.* (2004), a Administração da Qualidade antevê a anulação ou descomplicação de processos que não inserem valorização ao produto. Através deste contexto e exigências do mercado, que as empresas precisam fazer mais com menos e com melhor desempenho, ou seja, entregar produtos que atendam as primordialidades dos consumidores é um pré-requisito e não um diferencial. Entretanto, essa característica é atribuída por um qualificador que, segundo seus conhecimentos, princípios e critérios, distingue ou não determinadas mercadorias e infraestruturas. São empresas isentas e altamente capacitadas que avaliam as empresas e, ao final, outorgam um certificado comprovando que a empresa está em conformidade com os padrões internacionais de conformidade. Um desses certificados é o sistema ISO (*International Organization for Standardization*).

A ISO nasceu nas indústrias de produção seriada e massificada pela necessidade de manter a perfeita padronização das peças, intermediárias e finais, fabricadas, evitando assim o retrabalho e maiores custos de produção. Portanto, passou-se a utilizar o termo conformidade como sendo a certificação de que determinado processo, cumpriu completamente as fases de fabricação e sofreu

todas as alterações e modificações do mesmo modo e forma que os demais produtos da linha de produção. Por isso, o entendimento sobre a qualidade está associado ao perfeito cumprimento das especificações técnicas. Foram criados os Certificados ISO, com as suas variações abrangendo os segmentos industriais, comerciais e de serviços, regulamentando-se por intermédio de normas e critérios para sua obtenção.

Quando uma empresa busca a obtenção do Certificado, deve-se elaborar documentação minuciosa e detalhada dos processos e serviços, por meio de especificações técnicas ou métodos e procedimentos padronizados adotados na cadeia produtiva. A certificação ISO atesta que determinado bem ou serviço obedece rigorosamente às normas e procedimentos de padronização. Isso significa que os bens ou serviços de determinada linha de produção são exatamente iguais, e mostra ao mercado que a empresa em questão acondiciona uma metodologia de Garantia da Qualidade, o que significa que seus bens ou serviços carregam um nível muito baixo de risco associado com a não-qualidade, relativamente às especificações técnicas.

A qualidade não está presente somente na funcionalidade do produto, mas também em toda cadeia que o cerca, desde de os processos administrativos de compras, vendas, logística, assistência técnica e controle de custos. As indústrias de usinagem de metais (dentro do total dos custos) abrangem despesas com ferramentas, dispositivos de fixação, máquinas, energia elétrica, água, treinamento e outros, além da mão de obra. Todos influenciam decisivamente nos custos totais e nos balanços anuais das empresas, demonstrando se as mesmas estão andando na direção correta. Para ajudar nesse trabalho, a Gestão de Qualidade indica o emprego de ferramentas como o PDCA (*Plan, Do, Check, Act* ou Planejar, Fazer, Verificar e Agir) e outra similar, porém atrelada ao Seis Sigma: DMAIC. Ambos, PDCA e DMAIC atuam em rotinas de melhorias baseadas em identificação de causas de problemas e planejamento para a sua eliminação.

Com o intuito por soluções e respostas otimizadas, as empresas passaram a reconsiderar seus arranjos organizacionais, resultando em reengenharia organizacional com base em agrupamentos de atividades (SORDI, 2008).

Conforme indicado por Rout *et al.* (2014), alguns fatores acarretaram grandes impactos nas indústrias de manufatura: diminuição do período de espera, rapidez evolutiva das conjunturas financeiras, contínua redução da margem de

lucratividade, busca dos consumidores por bens com elevada qualidade e por diferentes opções de modelos de produtos. Diante disso, concerniu às empresas trabalhar gradualmente em ferramentas de gestão que possam ter um retorno rápido na melhoria de seus processos.

Segundo Rocha (2006), para obtenção das metas organizacionais, é relevante que indústrias manufatureiras nivelem suas táticas/planos com colaboradores e os processos. Por esse enfoque, quanto mais pessoas dentro das empresas forem qualificadas para o uso do DMAIC, mais oportunidades serão levantadas e diversos projetos serão conduzidos e implementados trazendo benefícios para o negócio.

Tem-se observado no mercado um crescente incentivo das empresas para que seus colaboradores tenham a compreensão e explorem a ferramenta DMAIC e a executam no cotidiano, principalmente nas rotinas de escritórios onde Engenheiros e Analistas estão sempre em busca de projetos que visam economizar dinheiro no processamento das peças.

2.2 A Metodologia Seis Sigma DMAIC

Segundo Harry e Schroeder (2001), o advento da metodologia DMAIC ocorreu na década de 80 com intuito de medir a capacidade do processo com baixa ou alta complexidade, mediante um padrão internacional de qualidade. A metodologia DMAIC é cíclica como o PDCA e seus desdobramentos. Promove padronização e melhoria de bens, serviços e processos, através da participação e engajamento dos colaboradores, mediante a inclusão de métodos de melhoramento contínuo com a finalidade de satisfazer e superar as expectativas de todos envolvidos no processo: colaboradores, fornecedores, acionistas, clientes, sociedade (MARSHALL JR. *et al.*, 2006, p. 88 a 93 e 129).

Pesquisas ressaltam que as empresas que adotaram a metodologia DMAIC em seu cotidiano, alcançaram uma maior competitividade frente aos seus concorrentes (HARRY E SCHROEDER, 2000). Hoerl (2001) resalta que as grandes organizações do mercado têm aplicado de forma bem sucedida à metodologia DMAIC, por consequência, sua progressiva notoriedade. Há saber, empresas como GE – General Eletric e a Motorola.

O DMAIC é um mecanismo imprescindível da metodologia Seis Sigma. A etapa que mais se trabalha é a fase "Medir", pois é nesta fase que a investigação e a descoberta dos problemas apontados pelo cliente aparecem. Também nesta etapa se consegue elaborar as ações necessárias para a solução do problema proposto.

DMAIC emprega uma medição estatística que é a escala Sigma. Esta quantifica a variação presente entre cada processo ou procedimento e é utilizada para a medição do nível de qualidade correlacionado a um processo, convertendo a quantidade de defeitos por milhão (WERKEMA, 2013).

“[...] Como essa melhoria é um dos ingredientes da gestão pela qualidade total (GQT), muitas empresas consideram que adicionar uma perspectiva Seis Sigma em seus negócios lhes dá todos ou quase todos os elementos da GQT” (MARSHALL JR. *et al.*, 2006, p. 122-123).

Dapper *et al.* (2014) indica que o DMAIC se aplica na resolução de problemas, com um objetivo de melhorar os processos. Todos os processos oferecem condições de melhoria observadas a partir de causas comuns, nas quais, são possíveis de acompanhamento e após medir os resultados de forma efetiva. A aplicação do DMAIC e suas ferramentas na observação das causas comuns oferecem a oportunidade para reduzir a variabilidade do processo e melhorar a competitividade. Segundo Scatolin (2005), a aplicação eficaz da metodologia DMAIC pode gerar um retorno maior que os investimentos necessários na sua implementação. A Figura 1 apresenta as cinco fases do DMAIC e a sua seqüência de trabalho.

Figura 1- As Cinco Fases do DMAIC



Fonte: SANTOS (2013)

De acordo com Banuelas (2011), os Seis Sigmas acentuam os retornos financeiros para que haja um balanço das contas da organização. Através da prática do DMAIC, as empresas metalúrgicas têm alcançado resultados significativos em termos de competitividade. Esse é um procedimento que ajuda na análise de falhas em qualquer área da empresa e de forma metódica, auxilia na priorização e na identificação das ações necessárias para resolver problemas gerados por causas comuns.

2.2.1 Fase Definir

Após a introdução da metodologia DMAIC, é estabelecida a distribuição de responsabilidades entre todos os participantes. Depois de capacitada e organizada a equipe, ela será responsável por dar início ao projeto de melhoria de forma colaborativa. Inicializa-se a fase Definir para identificar quem são os clientes e para descrever suas necessidades e expectativas. Nesta fase, o time irá se organizar, determinar os papéis e responsabilidades, estabelecer objetivos e datas, e rever as etapas do processo.

Os resultados das atividades da fase Definir são documentados no Documento do Projeto quando são finalizadas. Na conclusão da fase Definir, o documento do projeto é atualizado e publicado. A fase Definir começa com a descrição do assunto e termina com a revisão da documentação do projeto.

2.2.2 Fase Medir

Nesta etapa são encontradas oportunidades de forma bastante clara, indicando a primordialidade de realimentação do sistema. Uma fase importante é a coleta de dados, que é fundamental para validar e quantificar o problema, objetivando a definição de prioridades e a tomada de decisão sobre os critérios que são necessários.

Lin *et al.* (2013), ressalta que a finalidade desta etapa é determinar técnicas para a coleta de dados acerca da atividade atual do campo em observação. As informações apuradas carecem portar informações que evidenciem as chances de melhorias. Mediante uma evolução do processo, desperta o entendimento por parte

do grupo de trabalho sobre as adversidades que irão encarar e a percepção das possibilidades de melhoria. Os passos do modelo DMAIC não ocorrem em uma seqüência linear, sendo que, algumas vezes, retorna-se às fases anteriores.

2.2.3 Fase Analisar

Na fase analisar, as informações tratadas atravessam um processo e são modificados em dados importantes para estudo do procedimento. Esses dados são empregados na identificação das adversidades presentes e que são pertinentes. Também pode suceder a necessidade de verificação de outros conceitos que não foram entendidos como significativos no início. Trata-se do período que executa o reconhecimento de variáveis que afetam o processo, sendo necessário encontrar as causas do problema para aprofundamento dos detalhes.

A fase Analisar permite que os participantes enfoquem nas ocasiões de aperfeiçoamentos, visualizando os dados coletados na fase melhorar. A competência de desempenho inicial fixa o estágio para maior refinamento e verificação dos fatos e mergulho no detalhe.

Ainda nessa fase, determina-se o nível Sigma inicial observado. Na seqüência, o time de projeto seleciona as ferramentas de análise gráfica e as aplica na verificação dos fatos coletados durante a fase medir. É possível também, consultar o FMEA (*Failure Mode and Effect Analysis*, ou Modo de Falha e Análise de Efeito) da operação para observar qual o NPR (Número de Prioridade de Risco). A partir dessa análise, estudar o que concerne ser melhorado no processo para reduzir a severidade e a ocorrência, bem como melhorar a detecção do problema de um processo.

Um FMEA perfeitamente executado é capaz de conter ameaça da ocorrência de contratempos em processos, serviços e também em projetos (STAMATIS, 2003). A fase analisar termina quando a equipe de participantes do projeto apresenta uma capacidade de focar agrupamentos de melhorias potenciais para a ação na fase melhorar.

2.2.4 Fase Melhorar

Após a finalização da investigação das informações e identificado de forma detalhada o problema em observação, a equipe precisa realizar as ações que permitam mitigar ou eliminar as causas. Os motivos que impactam no desempenho do processo são os geradores de idéias sobre como introduzir melhorias. Lin *et al.* (2013) salienta que pode ser indispensável desenvolver projetos pilotos para a implementação das técnicas de melhorias.

O propósito da fase melhorar é permitir que a equipe de participantes do projeto melhore, implemente e valide as alternativas de melhorias que irão resultar nos níveis de desempenho definidos. A fase melhorar começa com uma reunião de idéias em mente dos participantes para gerar alternativas de melhoria. Uma vez que a equipe indica várias alternativas e seleciona a melhor, se apresentará uma visão de uma Matriz Causa e Efeito que ilustrará um novo fluxo de processo, e então, conduzirá a um FMEA e Análise de Custo e Benefício para assegurar que o potencial de melhoria seja viável.

A equipe de projeto testa, na seqüência, a solução proposta usando um piloto do processo e valida a melhoria. A fase melhorar é concluída quando a equipe de projeto realiza uma segunda análise de capacidade do novo processo e demonstra melhorias válidas.

2.2.5 Fase Controlar

Os processos passam a ocorrer de aspecto renovado sem repetir as rotinas anteriores e como conseqüência, podem apresentar variações que podem necessitar de novos ajustes antes de alcançar o resultado final desejado. Essa fase pode apontar a demanda de uma necessidade por planos e procedimentos robustos para monitorar e controlar as melhorias implementadas no processo. Para a manutenção do sucesso do projeto, é preciso elaborar formas para controlar as melhorias de maneira sistêmica, com um plano de controle robusto e auditorias constantes.

Conforme Matos (2003), o sucesso do projeto é controlado por meio do trabalho padronizado que garante que todos façam e controlem da mesma maneira. Nesta fase é recomendada a implementação de Controle Estatístico do Processo

(CEP), relatórios de coletas de dados que representam a posição atual do processo (SATOLO, 2009) e o estabelecimento de check list na operação. A Fase Controlar é significativa para manter a melhoria pela eliminação da oportunidade de defeitos ou monitoração do desempenho do processo. A equipe deve desenvolver uma estratégia de controle baseada nos resultados das quatro fases anteriores. Na seqüência, será proposto um plano de controle que incorpore mudanças no procedimento de maneira oportuna e atualizada com um plano de treinamento, para documentar as mudanças e melhorias.

Enquanto as medidas de controle permanecem instaladas de forma contínua, a fase controlar será considerada completada, uma vez que o plano de ação seja implementado, tal como as instruções de trabalho padrão atualizados e o treinamento tenha sido executado. Após terminar a fase controlar, a equipe entregará o controle de procedimento aos usuários do processo na operação.

2.3 O Processo *Shaper*

O Processo *Shaper* consiste em um método que utiliza uma ferramenta semelhante a uma engrenagem e é utilizada em uma máquina especial, conhecida como talhadeira ou máquina *Shaper*. Este processo reproduz os dentes de engrenagens por fresagem, em peças que dispõem de pouco ou nenhum espaço suficiente para a saída de uma ferramenta cilíndrica convencional. O Processo *Shaper* remove grandes quantidades de material e proporciona um bom acabamento superficial.

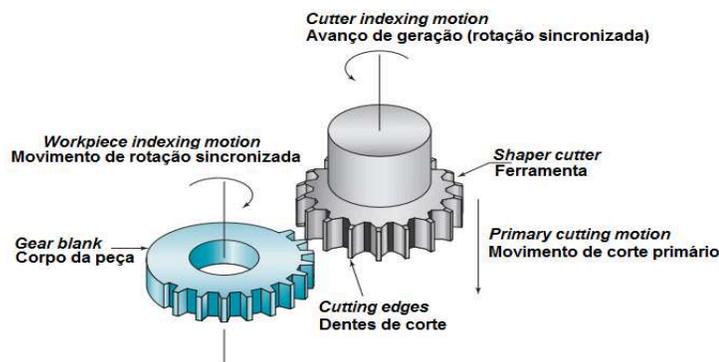
Para realizar o Processo *Shaper* com qualidade, é necessário um agrupamento de itens que são indispensáveis. A primeira é uma máquina com robustez suficiente e potência de corte necessária para cisalhar o cavaco e prover a retirada do material de forma estável e contínua. Também são necessárias ferramentas de corte adequadas com qualidade, materiais diferenciados que permitam o escoamento e corte do cavaco com facilidade e que sejam resistentes ao trabalho em altas temperaturas.

A exposição das ferramentas a altas temperaturas é uma condição natural na operação de usinagem. A refrigeração da ferramenta aplicada também é importante para manter um bom custo benefício quanto ao desempenho da ferramenta e também quanto ao acabamento das peças produzidas. Outro fator importante para o

bom resultado em qualquer processo é o conhecimento técnico do operador quanto aos recursos da máquina e as informações do plano de controle do processo.

Por fim, o modelo de fixação da peça empregado no processo deve ser adequado para prendê-la de forma estável e rígida sem gerar distorções que afetem a qualidade. O processo *Shaper* requer que a peça, ao ser fixada, permaneça bem posicionada e estável para que a ferramenta reproduza sua trajetória contínua e cíclica gerando os dentes de engrenagem, como demonstra a Figura 2.

Figura 2- Processo de corte *Shaper*

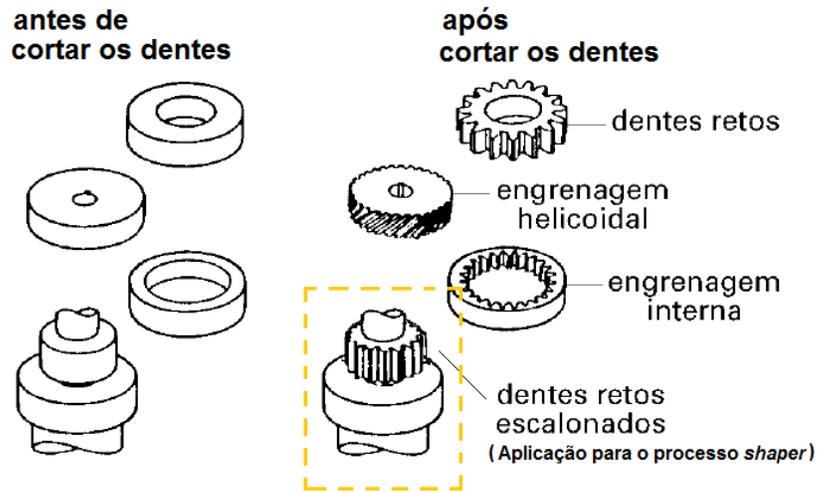


Fonte: GROOVER (2010)

Por ser um processo de remoção de material por múltiplos golpes por minuto, é introduzida na peça ao longo do processo, uma alta abundância de energia através do impacto com a ferramenta e por intermédio do cisalhamento. A rigidez da fixação da peça na máquina e a sua capacidade de reprodutibilidade dimensional é o elemento mais importante em todo processo de usinagem.

Na Figura 3 estão expostas formas de peças fabricadas pelo Processo *Shaper*. Nessa imagem (Figura 3), é demonstrado que o espaço para a saída de uma ferramenta cilíndrica é reduzido. Peças sem saída para ferramentas cilíndricas são casos típicos de aplicação para o Corte *Shaper*.

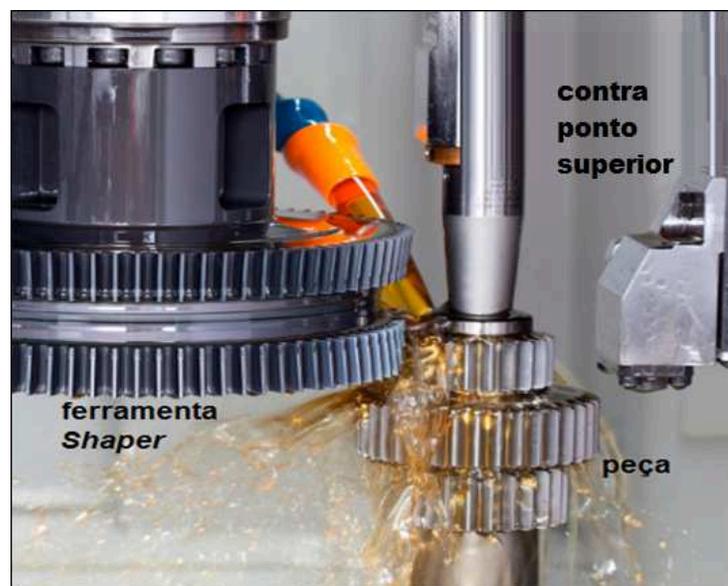
Figura 3. Engrenagens fabricadas pelo Processo *Shaper*



Fonte: MUNHATO (2000)

A peça com contorno tracejado (Figura 3) indica o tipo de peça a ser estudada nesse trabalho. Como não há saída de ferramenta na parte inferior do dentado, peças com essa geometria não são produzidas por outro tipo de processo, a não ser pelo *Shaper*. A Figura 4 apresenta uma foto de um Processo *Shaper* em execução.

Figura 4. Processo *Shaper* em execução



Fonte: LIEBHERR (2011)

Para realizar o Processo *Shaper* com qualidade é necessário o bom controle de variáveis que são indispensáveis. Além de uma boa robustez na fixação, é necessária a disponibilidade de ferramentas afiadas com geometria adequada. As ferramentas devem ter um bom corte, permitir o livre escoamento de cavaco e ser resistente a altas temperaturas. A exposição de ferramentas a altas temperaturas é uma condição natural de usinagem, e a literatura menciona que “as fontes geradoras de calor no processo de usinagem, são a deformação e o cisalhamento do cavaco no plano, o atrito do cavaco com a ferramenta e o atrito da ferramenta com a peça” (COPPINI, 2010).

Outro elemento importante no Processo *Shaper* é a utilização do óleo refrigerante apropriado. Geralmente, se utilizam óleos integrais. Não obstante, os parâmetros de corte também são importantes porque podem super aquecer o processo, caso não sejam adequadamente aplicados. Por último, e também importante, é o treinamento do pessoal envolvido no processo. Pessoas bem treinadas extraem o máximo do processo e isso se traduz em melhores resultados em produtividade e qualidade. Todas as condições satisfeitas permitirão que o procedimento seja realizado com absoluto aproveitamento.

2.3.1 A máquina *Shaper*

A máquina *Shaper* é um tipo de equipamento especial, similar a uma máquina de costura, porém em tamanho e escala maiores. Esta trabalha com um processo cíclico de subida e descida denominado *Stroke* (golpe de penetração no material da engrenagem). Por ser cíclico (subida e descida da ferramenta), esse movimento é dado por um grupamento denominado biela (excêntrico) e manivela (eixo de fixação da ferramenta). Outro componente marcante nesse tipo de máquina é a guia hidrostática que é responsável por direcionar o movimento de hélice da engrenagem. A Figura 5 é apresenta um tipo máquina *Shaper*.

Figura 5- Máquina cortadora de engrenagens *Shaper*

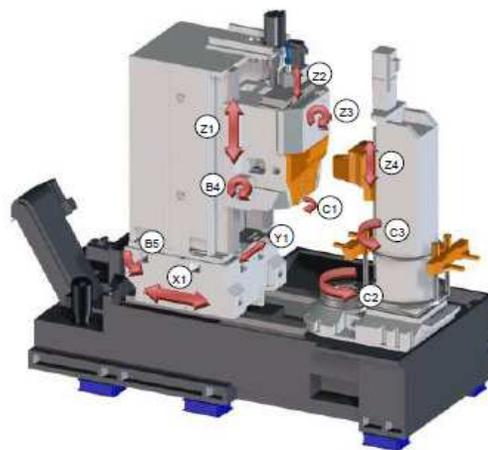


Fonte: LIEBHERR (2011)

A base do funcionamento da máquina é o giro sincronizado entre a ferramenta e a peça simulando um engrenamento. A Figura 6 demonstra a configuração dos eixos da máquina *Shaper*, os quais permitem um conjunto de movimentos que resultam a obtenção do corte dos dentes de engrenagem.

Figura 6- Disposição dos eixos: Máquina *Shaper*

MOVIMENTOS DE UMA MÁQUINA	
X1	EIXO RADIAL
Z1	EIXO AXIAL
Z3	MOVIMENTO DE SUBIDA DA FERRAMENTA
B4	MOVIMENTO RETRÁTIL
C1	EIXO DE ROTAÇÃO DA FERRAMENTA
C2	EIXO DE ROTAÇÃO DA MESA
Z2	AJUSTE DE ALTURA DA FERRAMENTA
Z4	MOVIMENTO DO CONTRA PONTO
C3	ROTAÇÃO DO CARREGAMENTO AUTOMÁTICO
B5	EIXO PIVÔ
Y1	MOVIMENTO HORIZONTAL DA COLUNA



Fonte: LIEBHERR (2011)

É imprescindível para qualidade da operação que os componentes da máquina estejam ajustados e em boas condições de uso. A guia hidrostática desempenha papel essencial na obtenção de boa qualidade e contribui para o corte dos dentes, permitindo a reprodução da micro geometria determinada pelo projeto.

2.3.2 O dispositivo de fixação das peças

Os dispositivos de fixação são componentes rígidos da máquina, responsáveis por prender a peça na posição adequada. Esses dispositivos são intercambiáveis e são trocados para prender peças de diferentes configurações. Por essa razão, os dispositivos estão diretamente relacionados com os programas de redução de tempo de preparação. A troca de modelo de peças não pode tomar muito tempo de máquina parada. Tal estudo, proposto nesse trabalho, está voltado para um dos elementos que compõe as máquinas.

Conforme Coppini (2015) faz-se necessário estudar as máquinas para as quais os tempos de troca das arestas de corte não sejam demorados, por falta de soluções adequadas que tenham recursos de trocas rápidas ou com níveis de automação baixos. Os atuais desenvolvimentos em sistemas de fixação focam-se principalmente nas trocas rápidas de trabalho para aumento da flexibilidade. É essencial na usinagem em máquinas com múltiplos eixos, que as fixações projetadas tenham espaço mínimo necessário para realizar movimentos complexos da ferramenta e da peça.

Manter as ferramentas rígidas para evitar flexão e vibração, frequentemente envolve estratégias de fixação e um bom projeto adequado ao processo. A ferramenta sofre durante a vida útil (entre uma afiação e outra) a perda de corte parcial de sua aresta cortante. Isso amplifica a força sofrida pela peça ao longo dos golpes gerados no processo *Shaper* e requer da fixação uma condição extra de rigidez e precisão.

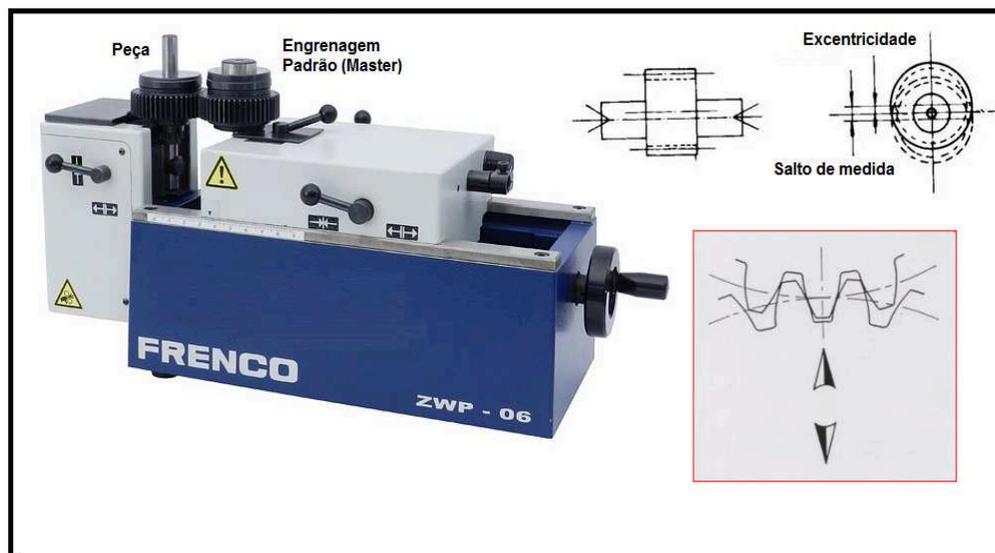
Quando a peça que se deseja cortar na máquina *Shaper* tem o formato de varão ou eixo, a fixação passa a ser um fator crítico. As peças em formato de eixo constituem-se de geometrias complexas e quando não estão corretamente apoiados, deflagram deformação “radial e tangencial”, que afetam o processo. O fator mais crítico na produção dos dentados é a deformação que a peça pode sofrer

durante o contato com a ferramenta. Para todos os processos de usinagem, a estabilidade de corte passa a ocupar um papel decisivo na qualidade da peça, resultado e um melhor processo.

2.3.3 A verificação das peças

Uma das principais características controladas em uma engrenagem durante a sua fabricação é a excentricidade. Ela se obtém por intermédio do giro completo de uma peça rente a uma engrenagem padrão, ou seja, o desvio da peça em relação ao centro de uma circunferência perfeita. A Figura 7 apresenta o aparelho típico para medir excentricidade dos dentes da engrenagem. O aparelho é conhecido como engrenômetro e dispõe de uma engrenagem padrão denominada máster de engrenagem que serve para engrenar com a peça que se deseja medir.

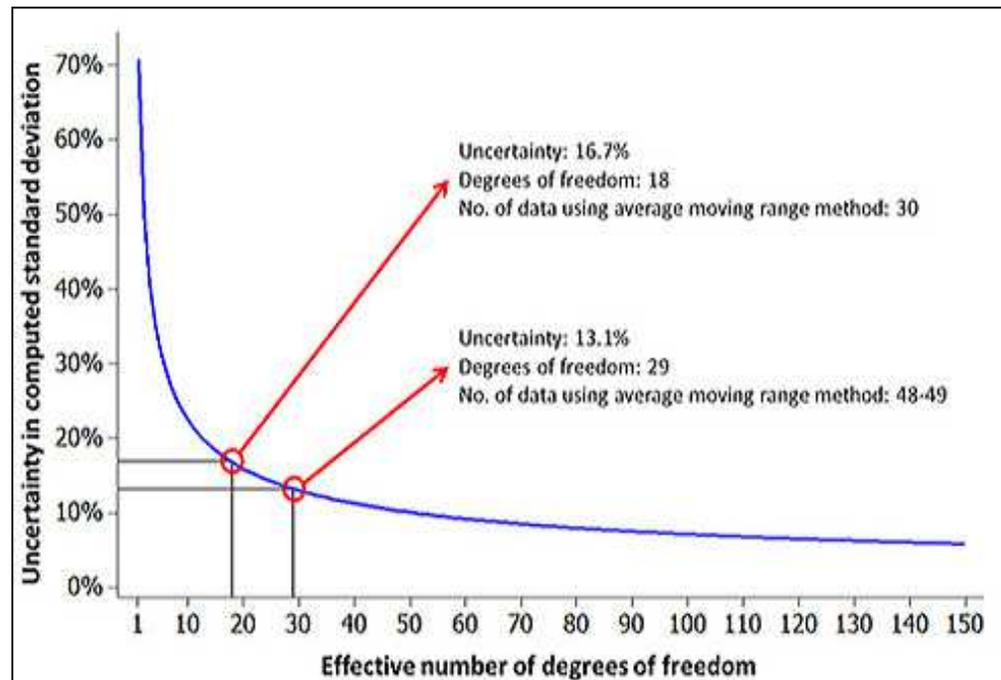
Figura 7- Como medir a excentricidade em engrenagens cilíndricas



Fonte: Frenco (2017)

Ao medir, ocorre o afastamento e a aproximação entre os eixos de ambos, peça e engrenagem master. Essa trajetória é traduzida em uma curva senóide retratada na Figura 8.

Figura 9 - Número de incerteza e número de dados associados



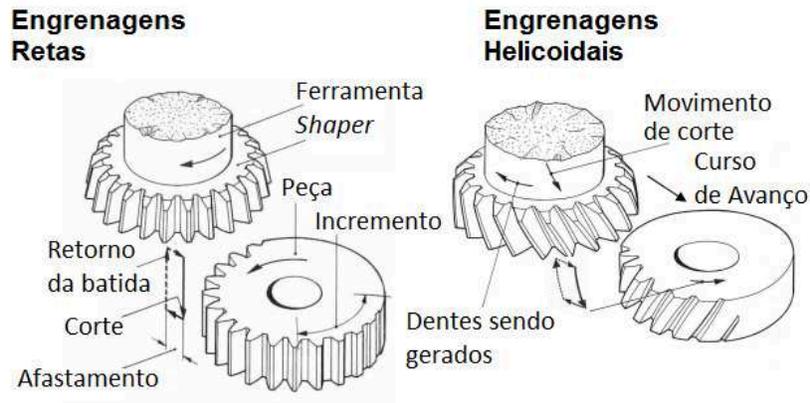
Fonte: HINDLE (2015)

2.3.4 As forças e os movimentos presentes no processo *Shaper*

Os processos de Corte *Shaper* estão sujeitos às ocorrências de forças e momentos fletores que interferem com alguma intensidade na geometria final dos dentes das engrenagens produzidas, especialmente, quando a peça a ser usinada é um eixo. De acordo com Katz (2017, p. 114) o efeito de flambagem entre os eixos da ferramenta e da peça no corte com *Shaper*, gera desvios nos dentes das engrenagens que interferem na sua qualidade.

É importante que o apoio seja apropriado para o dispositivo de fixação da peça e para a robustez no sistema, pois minimiza o impacto das deformações sofridas no decorrer do processo e também na qualidade das peças. A Figura 10 apresenta um diagrama com dois tipos de engrenagens (reta e helicoidal) e seus movimentos.

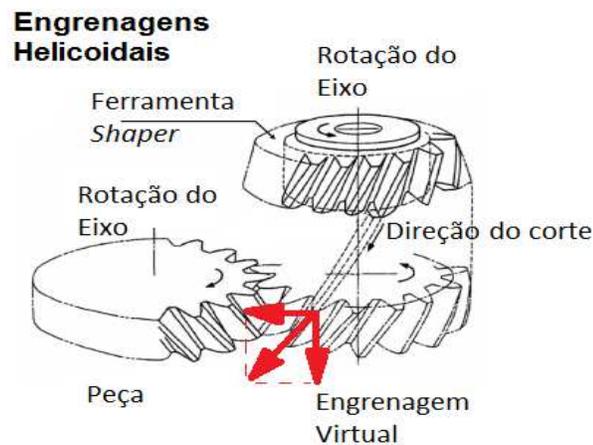
Figura 10 - Diagrama de trabalho das ferramentas *Shaper*



Fonte: Linke (2016)

O movimento da ferramenta envolve o giro contínuo da mesa onde a peça é fixada, o giro contínuo do cabeçote porta ferramenta e também o movimento de giro do passo da hélice base da ferramenta (para descrever a hélice da engrenagem). A Figura 11 descreve a interação dos movimentos no processo de corte de engrenagens com *Shaper*. Adicionalmente aos movimentos descritos, a Ferramenta *Shaper* promove um movimento recíproco na vertical, onde remove material através de múltiplos golpes realizados pelo conjunto de biela manivela que está disposto na máquina.

Figura 11- Movimentos da ferramenta *Shaper* em trabalho



Fonte: MHI (2017)

A componente horizontal da força angular proposta pela hélice da ferramenta causa um esforço sobre o corpo do eixo onde está sendo usinado. Quanto maior a distanciação entre o cabeçote de fixação superior do eixo e o dentado a ser cortado, maior será a área exposta a movimentos de flambagem. Quanto menor for o diâmetro do eixo, maior a deformação de flambagem a ser observada. Quando ocorre a flambagem da peça durante a usinagem, reflete a não estabilidade da fixação e compromete o resultado final da usinagem. À medida que a Ferramenta *Shaper* vai perdendo o corte, a força necessária para a ruptura do cavaco é maior e a flambagem aumenta ainda mais.

2.3.5 A Ferramenta *Shaper*

A Ferramenta *Shaper* de aspecto construtivo semelhante a uma engrenagem, porém, dispõe de geometria específica. São eles que permitem fresar engrenagens com dentes escalonados em um mesmo eixo e em grande escala de produção. Um dos movimentos da fresa é o de rotação, que é dado pelo cabeçote onde se encontra fixado. Além desse movimento, a ferramenta executa também um movimento alternado de sobe e desce que é dado por um grupo de alavancas que trabalham em sincronia com o movimento da mesa. É o movimento de sobe e desce da fresa que executa a fresagem propriamente dita do material.

Ainda há um terceiro movimento efetuado pela fresa, que é dado pelo movimento horizontal do cabeçote porta fresa (movimento responsável pela penetração gradativa da fresa na peça). A entrada da ferramenta na peça aumenta gradativamente devido a um mecanismo de *comes* (perfil excêntrico) conectada ao cabeçote. Este excêntrico funciona fazendo uma entrada progressiva e quanto mais distante se encontra o centro do eixo onde está a ferramenta, maior é a profundidade de corte.

A mesa também executa um movimento horizontal fazendo aproximação com a fresa no momento de descida e afasta (da mesma) no momento de subida. Em outras palavras, não há interação entre peça e ferramenta no momento de subida. Não havendo este contato, não há o risco dos dentes da ferramenta lascar ou quebrar e provocar danos à superfície da peça. Desse modo, o contato entre peça e ferramenta não ocorre porque mesa e fresa trabalham sincronizadas. A sincronia de movimentos entre mesa e ferramenta é o que caracteriza processos

especiais de fresagem, mas no processo *Shaper* há vantagens não encontradas nos processos convencionais de fresagem, que é fresar peças com barreiras.

As Ferramentas *Shaper* normalmente são fabricadas de aço rápido com alto índice de carbono e dureza superior a 64HRC (Dureza Rockwell) para resistirem ao atrito e impacto de corte.

2.3.6 Manutenção

Manter os equipamentos funcionando de forma adequada, com o tempo de ciclo original e boa qualidade das peças (por eles produzidos), é um grande desafio. No que diz respeito ao planejamento de ações de treinamento, manutenções preventivas e preditivas, deve ser feito com propósito principal de parar a máquina para que a mesma não pare.

De acordo com Sato (2014) no processo de usinagem os comportamentos dinâmicos das máquinas e ferramentas, tais como vibração da ferramenta, a vibração da estrutura mecânica e erro de movimento dos eixos influenciam diretamente na quebra de ferramentas. Ao longo do processo podem ocorrer vibrações tanto nos eixos como também na má fixação da peça a ser usinada.

Segundo Dias (1996) a manutenção serve para garantir a disposição dos equipamentos para atender a produção de modo confiável. Essa confiabilidade aumenta as chances de sucesso na utilização do equipamento sem que o mesmo quebre. Existem quatro categorias analisadas dentro da manutenção:

- comportamento adequado;
- condições de uso;
- probabilidade;
- período de uso;

As categorias são consideradas por inteiro dentro de um ciclo de vida do projeto, produto, processo e análise de dados.

2.3.7 Preparação da máquina

A preparação da máquina, conforme Martins e Laugeni (2005) definem que é um trabalho efetuado para deixar as máquinas e ferramentas habilitadas para início de produção. O tempo de preparação é o tempo utilizado do início ao fim da

preparação das máquinas e ferramentas antes de iniciar a produção. A preparação pode ser vista como uma atividade acíclica inserida na rotina de trabalho, pois, ocorre a produção de um lote de peças e não uma única peça, ou seja, o *Setup* (troca de modelo) sucede a cada troca de peça produzida, também tornando necessária a troca de ferramentas e ajuste das máquinas.

Segundo Corrêa *et al.* (2014), o sistema DMAIC em associação com técnicas de trocas rápidas de ferramentas, proporciona ampla atenuação de tempo no momento de preparo das máquinas ao longo da produção. Os motivos que mais influenciaram neste contexto foram os constantes treinamentos, percepções dos grupos de trabalho do sistema DMAIC, as mudanças de culturas e educação.

Na preparação de uma máquina do tipo *Shaper*, normalmente as fixações da peça são substituídas. O mandril porta ferramenta e o cortador também são trocados e os parâmetros de usinagem são ajustados de acordo com o padrão previamente definido. Os parâmetros incluem o curso de usinagem, a rotação da peça e da ferramenta, a quantidade de golpes por minuto do cabeçote porta ferramenta e o avanço de corte por geração.

2.3.8 Planejamento estratégico na produção

Segundo Ribeiro *et al.* (2003), é recomendado à condução das subseqüentes fases para elaborar a Matriz da Qualidade:

- identificar os clientes;
- atentar para a opinião do cliente;
- detalhamento da qualidade solicitada;
- valorizar os pontos da qualidade solicitada;
- ponderar estratégia dos pontos da qualidade solicitada;
- análise competitiva dos pontos da qualidade solicitada;
- a importante correção dos pontos da qualidade solicitada;
- detalhamento dos atributos de qualidade;
- a relação da qualidade com os atributos de qualidade;
- critérios recentes para os atributos de qualidade;
- relevância estratégica dos atributos de qualidade;

- observação da complexidade sobre as atributos de Qualidade;
- observação competitiva dos atributos de qualidade;
- atentar e/ou priorizar correção dos atributos de qualidade;
- conexão através dos atributos de qualidade.

Todas essas fases são fundamentais para obtenção de uma base adequada e um bom resultado do processo.

2.3.9 Planejamento para a realização de capacidade

A capacidade do processo é um evento que serve para validar a capacidade de produção de um determinado processo com um nível de qualidade que satisfaça um procedimento previamente aplicado. Uma das etapas importantes para a realização da capacidade é a separação de amostras para realizar o estudo. Existem dois métodos de capacidade. Um é conhecido com o *Short Term Capability* ou capacidade curta e consiste na coleta de dados de um número menor de amostras, em torno de 30 unidades. A capacidade curta é feita em um curto período de tempo de produção (um turno, um lote de peças, etc). Outro método, é o *Long Term Capability*, ou capacidade de longo termo. O longo termo usa um número maior de amostras, por exemplo 125 unidades. O longo termo fornece mais dados para se verificar a real variação da população, considerando mais entradas do processo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais e Equipamentos

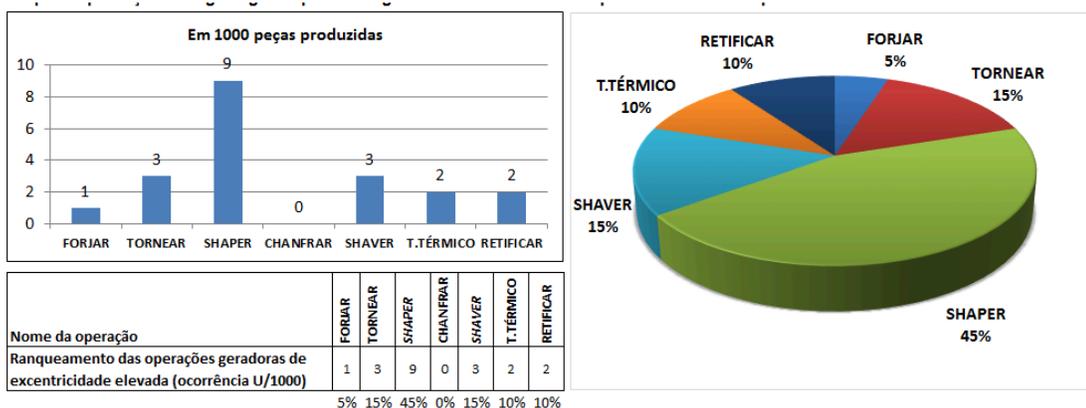
As engrenagens utilizadas foram fabricadas em aço SAE 8620, com tratamento térmico de cementação, que facilita a reprodução de estruturas duras por fora e um núcleo mais macio. A ferramenta utilizada no processo *Shaper* é fabricada em aço ferramenta HSS M35.

A máquina utilizada no processo *Shaper* foi fabricada pela empresa Liebherr, e a norma utilizada foi a DIN ISO 6545 (*Acceptance conditions for gear hobbing machines*) (ISO, 1992). A medição de excentricidade um engrenômetro fabricado pela empresa Frenco, e a norma utilizada foi a DIN 3962 (*Tolerances for Cylindrical Gear Teeth Package*) (ISO, 1978).

3.2 Metodologia

Na fase Definir, foram observados os indicadores do processo e levantada a voz do cliente com os usuários dos equipamentos. As etapas da fabricação da engrenagem foram verificadas e o corte *Shaper* se destacou com maior oportunidade de melhoria por apresentar maior variação na excentricidade no diâmetro primitivo. A Figura 12 apresenta o histograma levantado no processo.

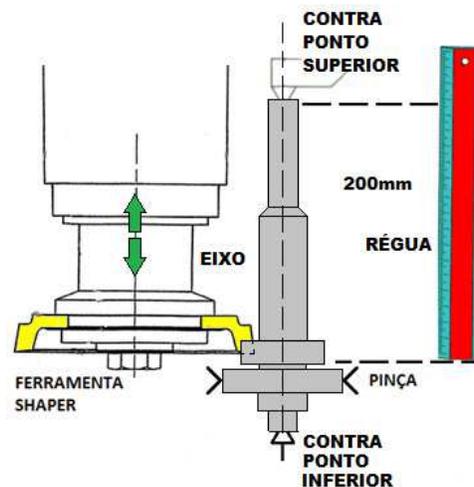
Figura 12 – Histograma com excentricidade acima de 25microns



Fonte: O próprio autor (2019)

Na fase Medir, as amostras produzidas no processo original, apresentado pela Figura 13, foram medidas no engrenômetro que é o dispositivo indicado para o controle da excentricidade no diâmetro primitivo.

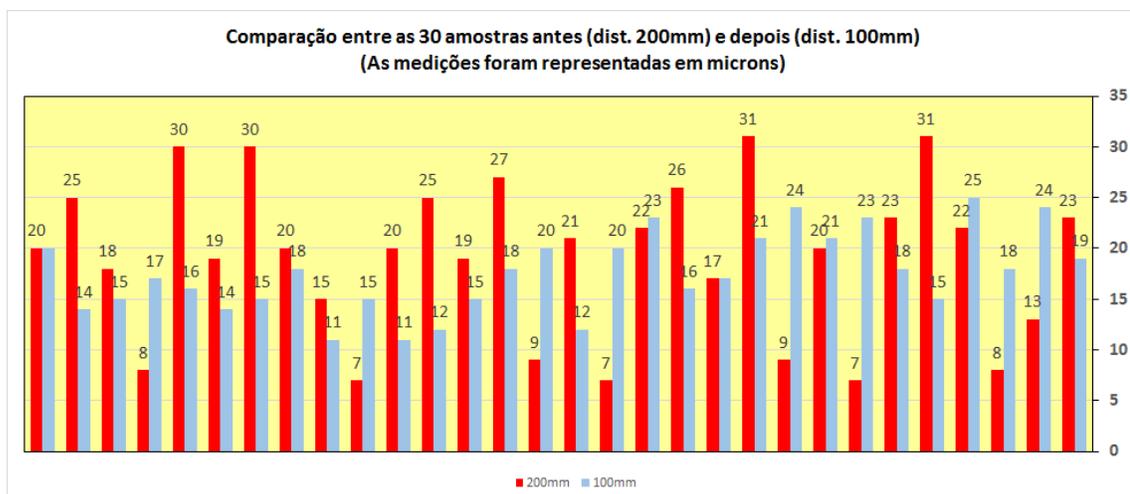
Figura 13 - Fixação da peça com contra ponto superior



Fonte: O próprio autor (2019)

Foi confirmado que o dispositivo utilizado para medir a excentricidade passou por uma calibração anual e estudo de R&R (repetibilidade e reprodutibilidade). Os dados das medições feitas nas amostras ao longo de todas as fases do DMAIC são apresentados na Figura 14.

Figura 14 - Valores medidos no engrenômetro



Fonte: O próprio autor (2019)

Na fase Analisar, foi elaborado um questionário no formato espinha de peixe e submetido aos especialistas para responderem com as possíveis causas do modo de falha denominado como alta variabilidade da excentricidade no diâmetro primitivo, de acordo com seu conhecimento de campo. A Figura 15 apresenta o questionário compartilhado com os especialistas.

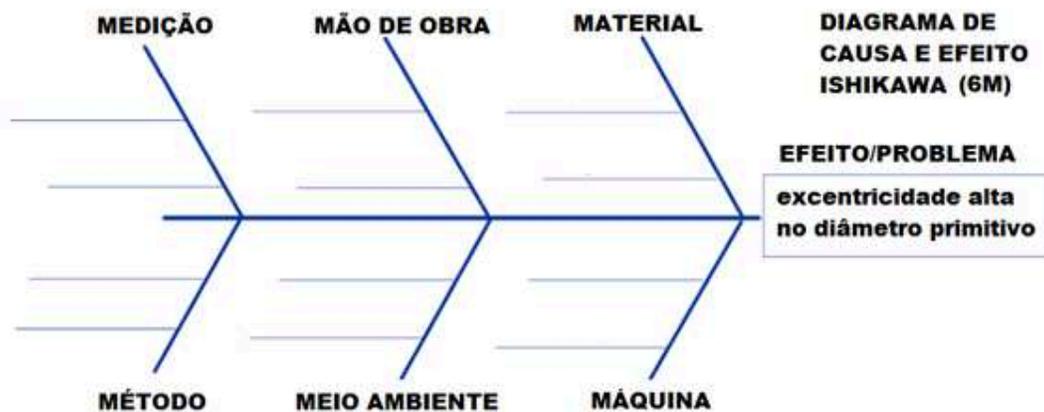
Figura 15 - Questionário “A” sobre a causa da variabilidade na excentricidade

Questionário técnico

Nome: _____

Data: ___ / ___ / ___

01) Na matriz causa&efeito abaixo, indicar quais são os itens que influenciam na causa de excentricidade elevada no corte de engrenagens em operações shaper. Em seguida, indique a relevância de cada um dos itens pontuando-os com: 1 (baixa) 3(média) e 9 (alta) em relação ao modo de falha excentricidade.



Fonte: O próprio autor (2019)

As informações foram tabuladas em uma matriz de priorização, onde os especialistas indicaram com uma pontuação de “1”, “3” ou “9”, que correspondeu a um peso representado respectivamente como baixo, média ou alta. A matriz de priorização elaborada nessa fase pode ser vista na Figura 16.

Figura 16 - Matriz de priorização baseado em questionário “A”

		Matriz Causa & Efeito						
Relação de importância para o cliente (Peso)		9	9	9	9	9		
Característica # Excentricidade no diâmetro primitivo da engrenagem		1	2	3	4	5		
Critérios de pontuação: Baixa = 1 Média = 3 Alta = 9	% Contribuição	Especialista 1	Especialista 2	Especialista 3	Especialista 4	Especialista 5	Total	
	1	FALTA DE ROBUSTEZ NA FIXAÇÃO DA PEÇA	14%	9	3	9	9	9
2	SOBRE METAL EXCESSIVO	10%	3	9	9	3	3	243
3	BLANK (OPERAÇÃO ANTERIOR) COM CARACTERÍSTICAS NOT OK	9%	9	1	3	9	3	225
4	PROJETO DO PRODUTO (GEOMETRIA E MICRO-GEOMETRIA DESFAVORÁVEIS)	8%	9	3	3	3	3	189
5	NÃO UTILIZAÇÃO DOS LIMITES DE VIDA ÚTIL DA FERRAMENTA	8%	9	3	3	3	3	189
6	DESVIOS DE PROCESSO (DIMENSIONAL, ROTEIRO DE FABRICAÇÃO, ETC)	5%	3	3	3	3	3	135
7	MÁQUINAS SHAPER INADEQUADAS (MANUTENÇÃO, COM POUCOS RECURSOS, ETC).	5%	3	3	3	3	3	135
8	CONDIÇÕES DE USINAGENS INADEQUADAS	5%	3	3	3	3	3	135
9	PADRONIZAÇÃO NO PROCESSO SHAPER	5%	3	3	3	3	3	135
10	AFIAÇÃO DA FERRAMENTA SHAPER	5%	3	1	3	3	3	117
11	TREINAMENTO	3%	3	3	1	1	1	81
12	PROJETO DAS FERRAMENTA INADEQUADO	3%	3	3	1	1	1	81
13	USO DE FERRAMENTAS SHAPER COM DIFERENTES VERSÕES DE DESENHO	3%	3	3	1	1	1	81
14	MP COM DUREZA, MICROESTRUTURA E COMPOSIÇÃO QUÍMICA DESFAVORÁVEL	3%	3	3	1	1	1	81
15	POUCOS OPERADORES ESPECIALIZADOS NO PROCESSO	3%	3	3	1	1	1	81
16	VÁRIAS PEÇAS UTILIZANDO A MESMA FERRAMENTA	3%	1	3	1	1	1	63
17	REVESTIMENTO DAS FERRAMENTAS INADEQUADO PARA A APLICAÇÃO	3%	1	3	1	1	1	63
18	BAIXO FLOATING DE FERRAMENTAS	2%	1	1	1	1	1	45
19	POUCAS MÁQUINAS DE MEDIÇÃO DE MICROGEOMETRIA DISPONÍVEIS	2%	1	1	1	1	1	45
20	ARMAZENAMENTO INADEQUADO DA FERRAMENTA	2%	1	1	1	1	1	45
TOTAL			666	504	468	468	414	2520

Fonte: O próprio autor (2019)

A matriz de priorização indicou a falta de robustez na fixação como um fator preponderante na geração de excentricidade alta. Um segundo questionário foi compartilhado com os especialistas, sendo que nessa etapa, a pergunta passou a ser qual a causa raiz que afeta a robustez na fixação. O questionário “B” pode ser visto na Figura 17.

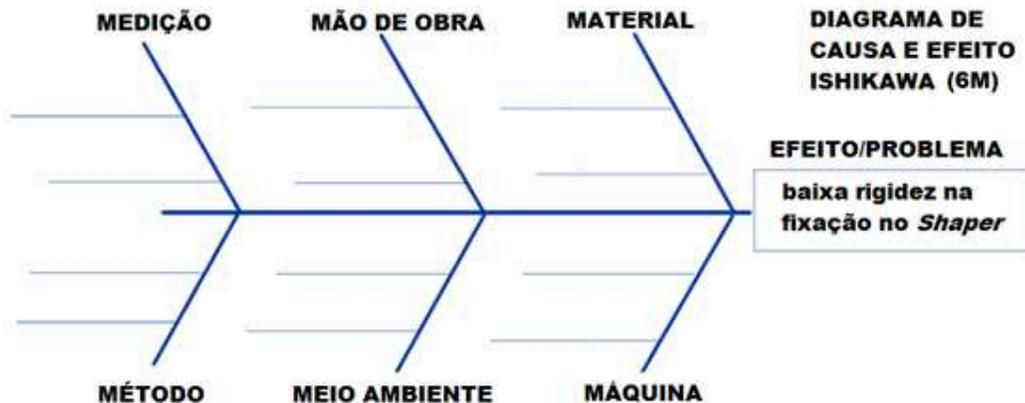
Figura 17 - Questionário “B” sobre a causa de baixa rigidez de fixação

Questionário técnico

Nome: _____

Data: ___ / ___ / ___

02) Na matriz causa&efeito abaixo, indicar quais são os itens que influenciam na causa de baixa rigidez na fixação de engrenagens em operações shaper. Em seguida, indique a relevância de cada um dos itens pontuando-os com: 1 (baixa) 3(média) e 9 (alta) em relação ao modo de falha excentricidade.



Fonte: O próprio autor (2019)

As informações do segundo questionário foram tabuladas em uma nova matriz de priorização e pontuada pelos especialistas. A matriz de priorização dessa etapa pode ser vista na Figura 18.

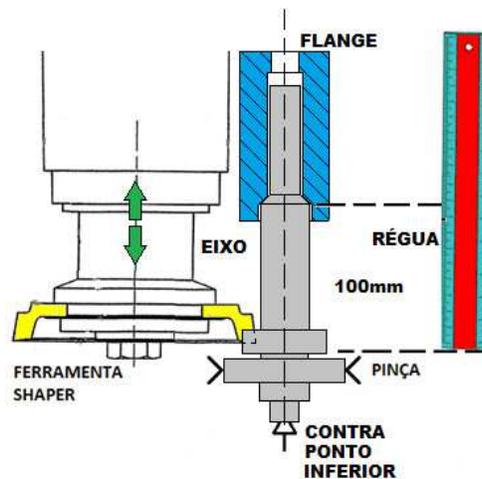
Figura 18 - Matriz de priorização baseado em questionário “B”

		Matriz Causa & Efeito						
Relação de importância para o cliente (Peso)		9	9	9	9	9		
Característica # Causas da falta de rigidez na fixação da peça durante o processo		y = excentricidade acima do especificado f(x) = rigidez na fixação da peça						
Critérios de pontuação: Baixa = 1 Média = 3 Alta = 9		percentual de contribuição	Especialista 1	Especialista 2	Especialista 3	Especialista 4	Especialista 5	Total
1	DISTÂNCIA ENTRE O PONTO DE APOIO DA FIXAÇÃO E A ZONA DE CORTE DA PEÇA	10%	9	9	9	9	9	405
2	BATIMENTO DO BLANK GERADO NA OPERAÇÃO ANTERIOR	9%	3	9	9	9	9	351
3	GEOMETRIA DA PEÇA	8%	3	9	9	3	9	297
4	CENTRALIZAÇÃO DO DISPOSITIVO	8%	3	3	9	9	9	297
5	LIMPEZA DO DISPOSITIVO	8%	3	9	3	9	9	297
6	CONTRA PONTO DO DISPOSITIVO	7%	1	9	3	9	9	279
7	PEGA DA PINÇA	6%	3	9	3	9	3	243
8	FIXAÇÃO DO DISPOSITIVO NA MÁQUINA	6%	3	9	9	3	3	243
9	EXPERIÊNCIA DO OPERADOR/PREPARADOR	6%	3	9	9	3	3	243
10	DESGASTE DO DISPOSITIVO	6%	3	9	3	2	9	234
11	PROJETO DO DISPOSITIVO	6%	3	9	3	1	9	225
12	LUNETAS DE APOIO DA PEÇA	6%	3	9	1	9	3	225
13	PRESSÃO HIDRÁULICA	5%	3	9	3	3	3	189
14	MATERIAL DO DISPOSITIVO	4%	1	3	1	3	9	153
15	TRATAMENTO TÉRMICO DO DISPOSITIVO	3%	1	3	1	3	3	99
16	MOLAS DO DISPOSITIVO	3%	1	1	3	3	3	99
17	MANGUEIRAS E DUTOS DO DISPOSITIVO	2%	1	1	1	1	3	63
Total			423	1071	711	792	945	3942

Fonte: O próprio autor (2019)

Na fase Melhorar, foi utilizada a informação da matriz de priorização para verificar o que deveria ser melhorado no processo. Nesse caso, foi utilizado um flange na parte superior da fixação para aproximar o ponto de apoio da peça da zona de corte. A Figura 19 apresenta o diagrama da operação com o uso do flange na parte superior.

Figura 19 - Fixação da peça com contra ponto superior



Fonte: O próprio autor (2019)

Foram produzidas trinta amostras e os dados foram processados no Minitab, seguindo o mesmo método aplicado na fase Medir. Após o estudo de capacidade com trinta amostras da fase Melhorar, um outro grupo de peças foi fabricado, porém com 125 amostras, para confirmar o resultado inicial com a aplicação do flange.

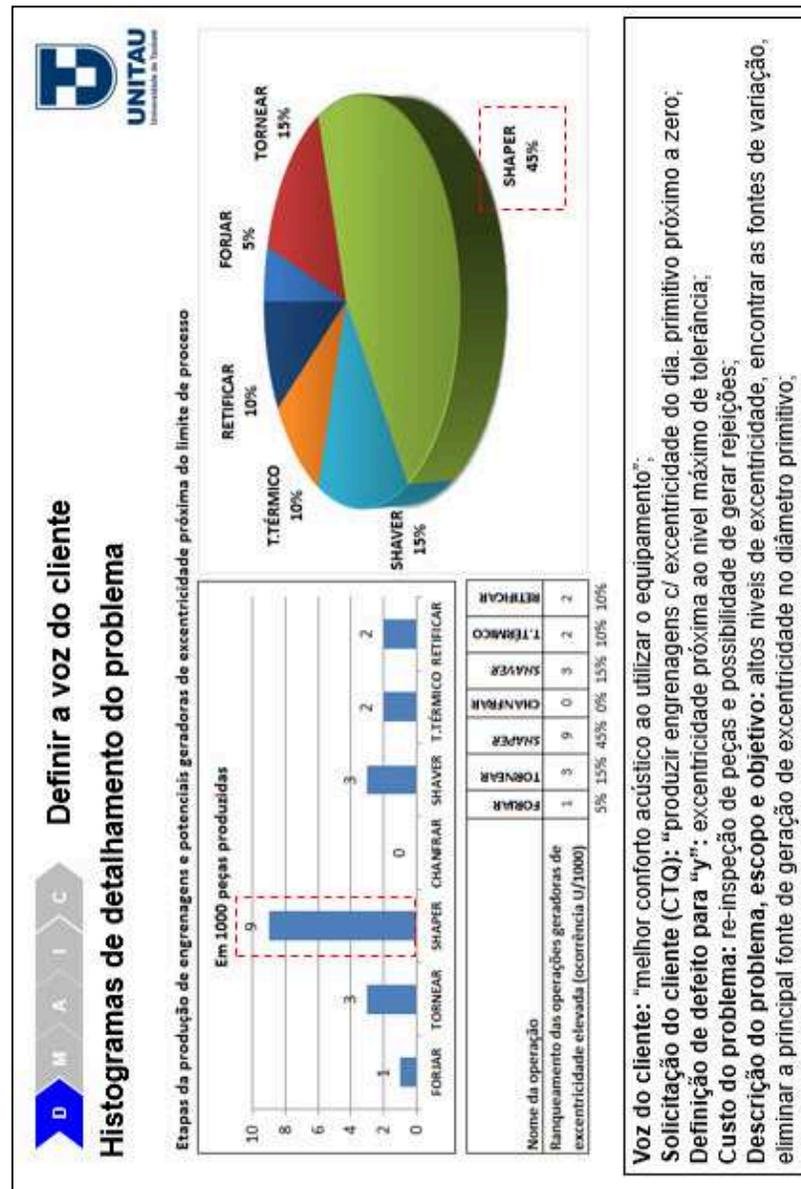
Na fase Controlar, as lições aprendidas foram implementadas no FMEA do processo. Foi elaborado um check list para servir de guia pelo preparador da máquina Shaper. O check list inclui o número do dispositivo que contém o flange de fixação superior. Esse método serviu para assegurar que não se utilize o dispositivo antigo no processo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Aplicação da Fase Definir

A Figura 20 é referente à fase Definir e inclui um histograma, a voz do cliente e o ranqueamento das operações que apresentam excentricidade acima de 22microns. As informações contribuíram para iniciar o estudo do processo *Shaper*.

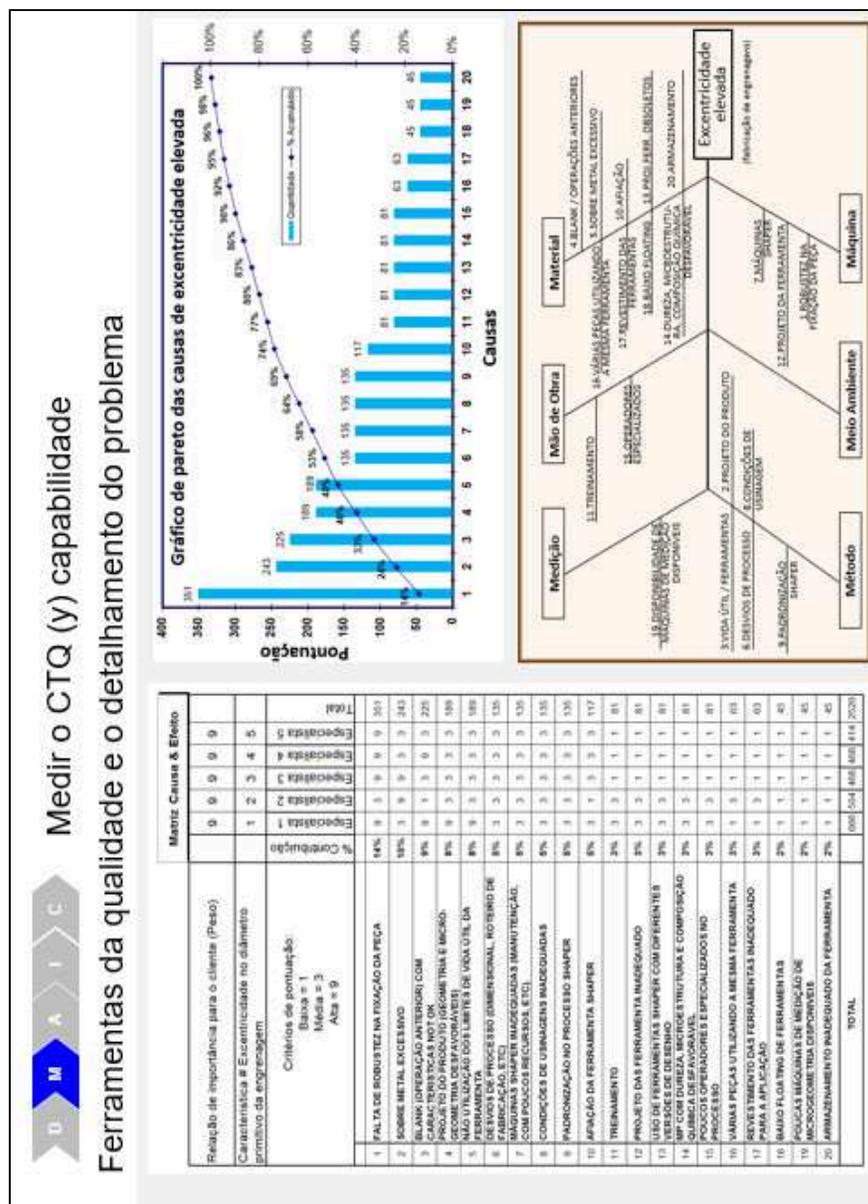
Figura 20 - Apresentação da fase Definir



4.2 Aplicação da Fase Medir

A fase Medir é representada pela Figura 21. Nessa fase inclui a matriz de priorização, o gráfico de Pareto e a espinha de peixe.

Figura 21 - Apresentação da fase Medir

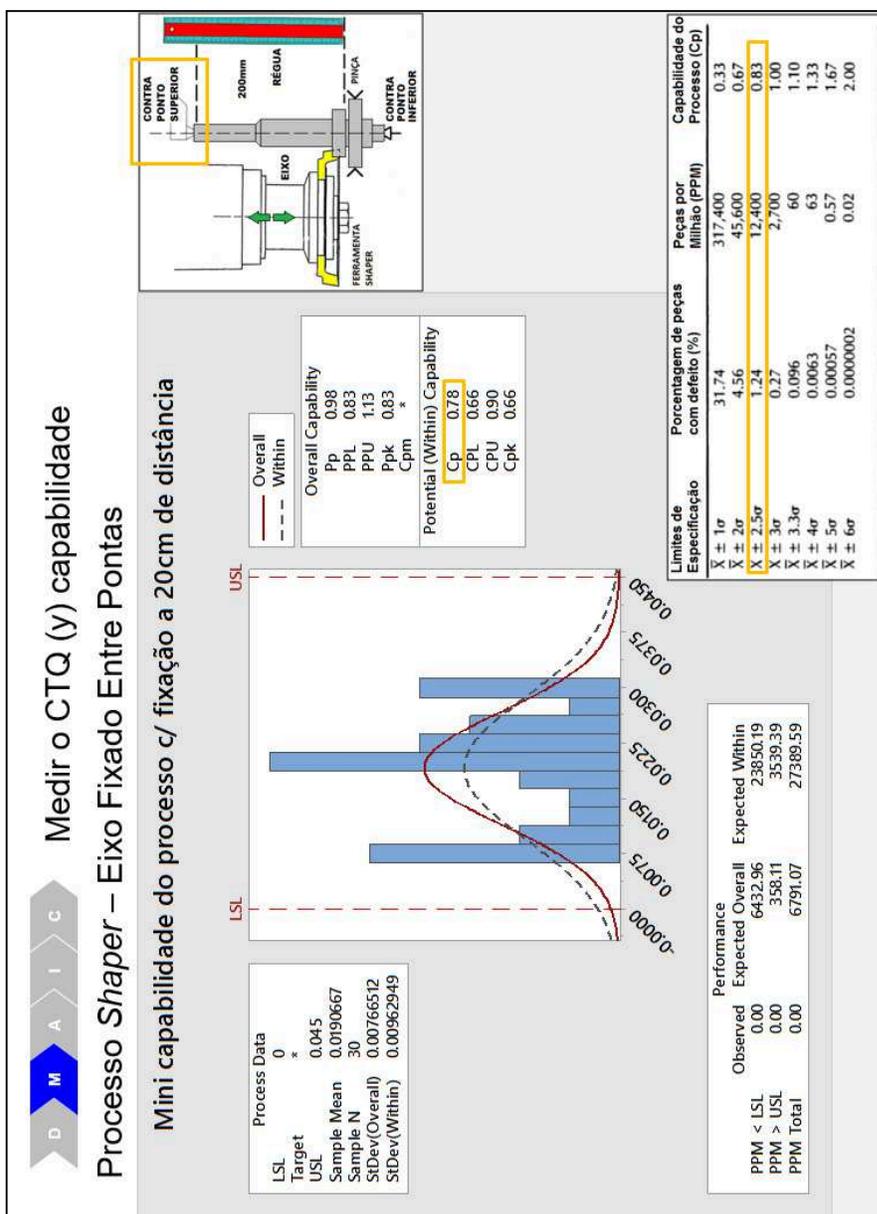


Fonte: O próprio autor (2019)

Na matriz de priorização, observa-se que a falta de robustez na fixação da peça durante o corte pelo processo Shaper é o fator que contribui em maior grau

para o modo de falha. Os dados levantados indicam que os pontos de fixação da peça no dispositivo devem ser definidos de forma que não ocorra batimento e flambagem ao longo do processo de corte de eixos. Isso resolve o problema da falta de robustez de fixação. A Figura 22 apresenta o estudo de capacidade realizado com os dados das trinta amostras fixadas entre pontas na máquina. Observa-se um valor de capacidade de processo (Cp) equivalente a um índice de 0,78, o que indica não ser um método de fixação favorável.

Figura 22 – Capacidade da fase Medir com fixação entre pontas



Fonte: O próprio autor (2019)

Peças em formato alongado (tipo eixos), são geralmente fixados entre pontas por furos de centro localizados nas extremidades das faces. Como o presente estudo trata do processo de corte de dentados em eixos, quanto maior a distância entre os pontos de fixação da peça no dispositivo, pior é a qualidade resultante da peça ao final do processo. A Figura 23 demonstra que para índices de Cp abaixo de 1,0 ocorrem mais de 2700 defeitos por milhão de unidades produzidas. A medição PPM (partes por milhão) é uma forma universal de indicar a quantidade de defeitos ocorridos na mesma base. Dessa forma, o índice padroniza a análise e ajuda os gestores a traçar uma meta de redução que esteja focada e reduzir ou eliminar o nível dos defeitos em partes por milhão de unidades produzidas.

Figura 23 - Relação entre Cp, Cpk, Nível Seis Sigma e PPM

Limites de Especificação	Porcentagem de peças com defeito (%)	Peças por Milhão (PPM)	Capabilidade do Processo (Cp)
$\bar{X} \pm 1\sigma$	31.74	317,400	0.33
$\bar{X} \pm 2\sigma$	4.56	45,600	0.67
$\bar{X} \pm 2.5\sigma$	1.24	12,400	0.83
$\bar{X} \pm 3\sigma$	0.27	2,700	1.00
$\bar{X} \pm 3.3\sigma$	0.096	60	1.10
$\bar{X} \pm 4\sigma$	0.0063	63	1.33
$\bar{X} \pm 5\sigma$	0.00057	0.57	1.67
$\bar{X} \pm 6\sigma$	0.000002	0.02	2.00

Fonte: BHOTE (2002)

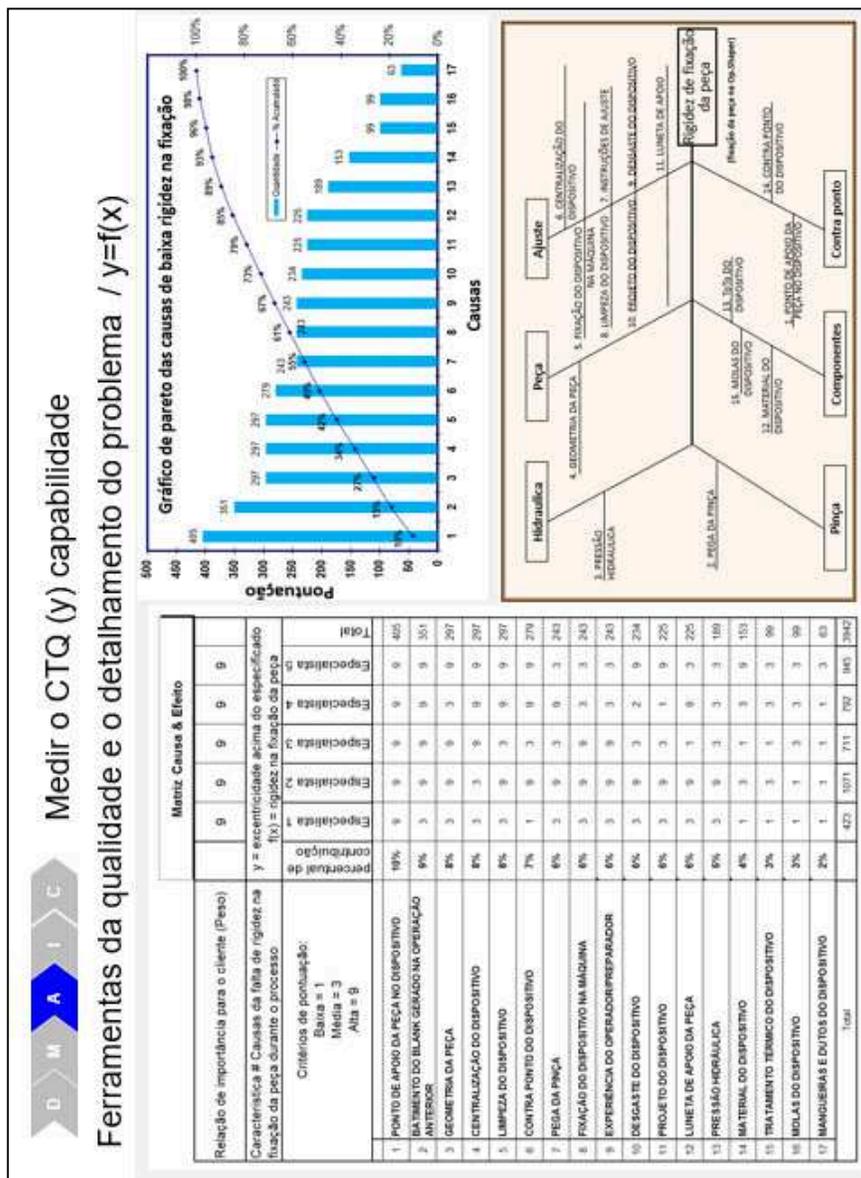
Ainda na fase medir, com os dados obtidos na voz do cliente, o estudo de capacidade, as informações dos especialistas sobre o que pode gerar alta excentricidade e as ferramentas de qualidade que confirmaram o modo de falha pela matriz de priorização, seguiu-se com o estudo sobre o que fazer para melhorar a rigidez do sistema de fixação da peça.

Ponderando sobre a fase “Medir” pode-se dizer que essa é uma fase que reuniu e quantificou resultados obtidos no presente trabalho, o que permite avançar para a etapa seguinte do DMAIC. Por meio da Espinha de Peixe ou Matriz de Causa e Efeito, foram pontuados os potenciais motivos da geração de peças com excentricidade elevada (no limite da especificação), levando-se em conta, as interpretações obtidas com as amostras estudadas. Dessa forma, foi possível construir os Gráficos de Pareto e neles destacar a porcentagem de contribuição para cada causa do modo de falha levantado.

4.3 Aplicação da Fase Analisar

Conforme demonstrado na Figura 24, iniciou-se o aprofundamento no estudo dos itens do processo na Operação *Shaper*, utilizando as ferramentas da qualidade, que mostraram uma relação com o modo de falha excentricidade elevada. A primeira ação, foi verificar porque ocorre problema de rigidez na fixação do processo de Corte *Shaper* dos eixos dentados.

Figura 24 – Apresentação da fase Analisar



Fonte: O próprio autor (2019)

Observou-se que a distância entre os pontos de apoio na peça estavam desfavorecendo o bom acentamento da mesma durante o corte. A análise mostrou que ao ser golpeada pela Ferramenta *Shaper*, a peça sofria uma flambagem que gerava instabilidade no processo. Uma vez apontada a rigidez da fixação da peça como uma causa potencial de instabilidade de peça durante o corte, e conseqüentemente, a geração de alta excentricidade no diâmetro primitivo, o dispositivo de fixação e todo o sistema passou a ser rigorosamente estudado e compreendido.

A cinemática do processo apontou para o uso de contra pontos (na peça em questão), como uma causa impactante no modo de falha. Para reforçar o resultado da análise do modo de falha, um FMEA do projeto do dispositivo foi elaborado e indicou um NPR igual a 315, mostrando a necessidade de ações para melhorar o elemento de fixação e com isso ganhar em qualidade do processo. A Figura 25 apresenta o FMEA elaborado na fase Analisar.

Figura 25 -Formulário do FMEA – Preenchimento inicial

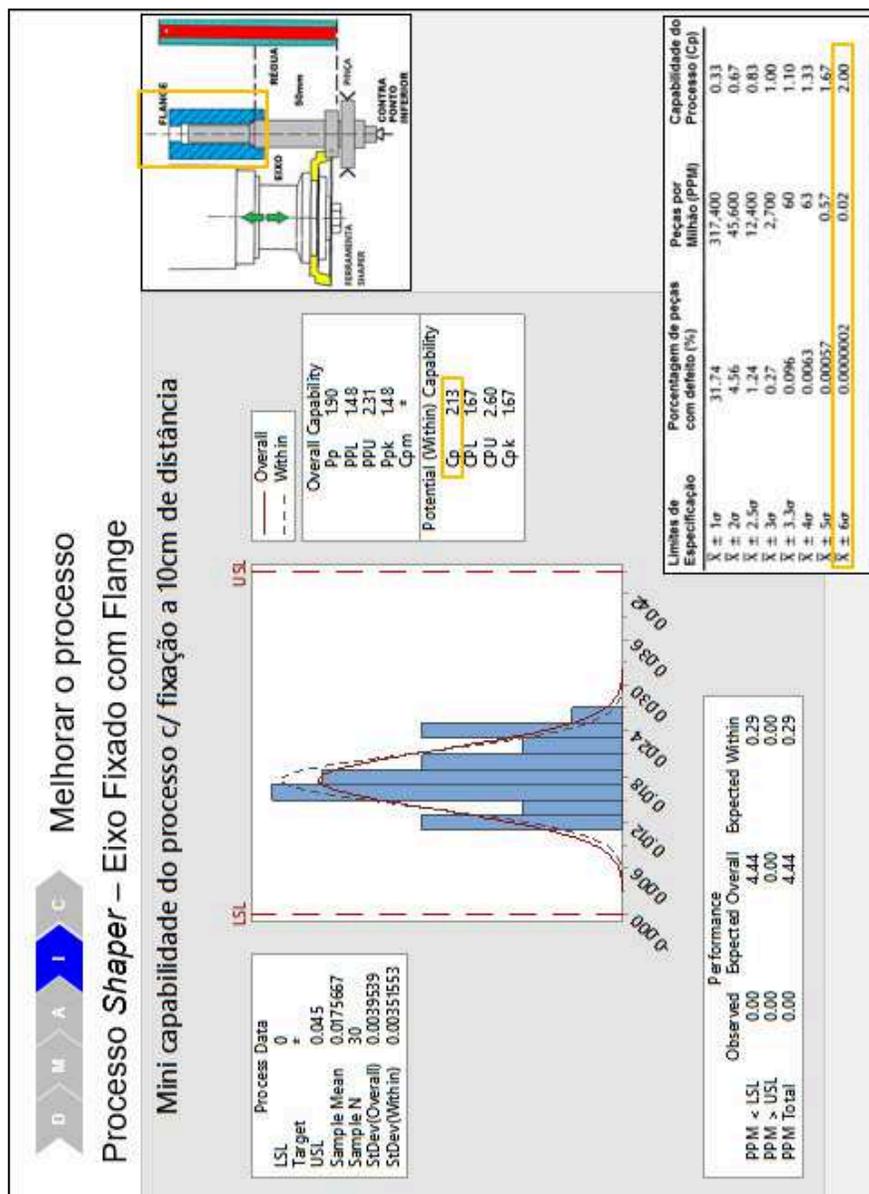
Tipo de FMEA: Projeto do dispositivo de fixação Preparado por: UNITAU	Data do FMEA: 2019 Página 01 de 01 Qde de Páginas 01	NÚMERO DE PRIORIDADE DE RISCO	315	
		DETECÇÃO	9	
		SEVERIDADE	5	
		OCORRÊNCIA	7	
		Método de Detecção	Engrenômetro	
		Causa potencial da Falha	Pontos de fixação da peça distantes da zona de corte dos dentes	
		Efeito potencial da falha	Produção de engrenagens c/excentricidade no diâmetro primitivo acima de 4,5microns	
Mode de falha potencial	Falta na robustez na fixação de engrenagem durante a usinagem			
Sistema / <input checked="" type="checkbox"/> Projeto / <input type="checkbox"/> Processo / <input type="checkbox"/> Função de Serviço	Robustez na fixação de engrenagens no processo shaper			

Fonte: STAMATIS (2003) – Adaptado pelo Autor

4.4 Aplicação da Fase Melhorar

Nessa fase, foi possível melhorar a fixação deixando mais robusto com a substituição de contra ponto superior por um flange. A ação reduziu a distância entre o apoio superior da peça e a zona de corte de 200mm para 100mm. Na Figura 26 é possível observar em azul o flange utilizado. Foram cortadas trinta amostras.

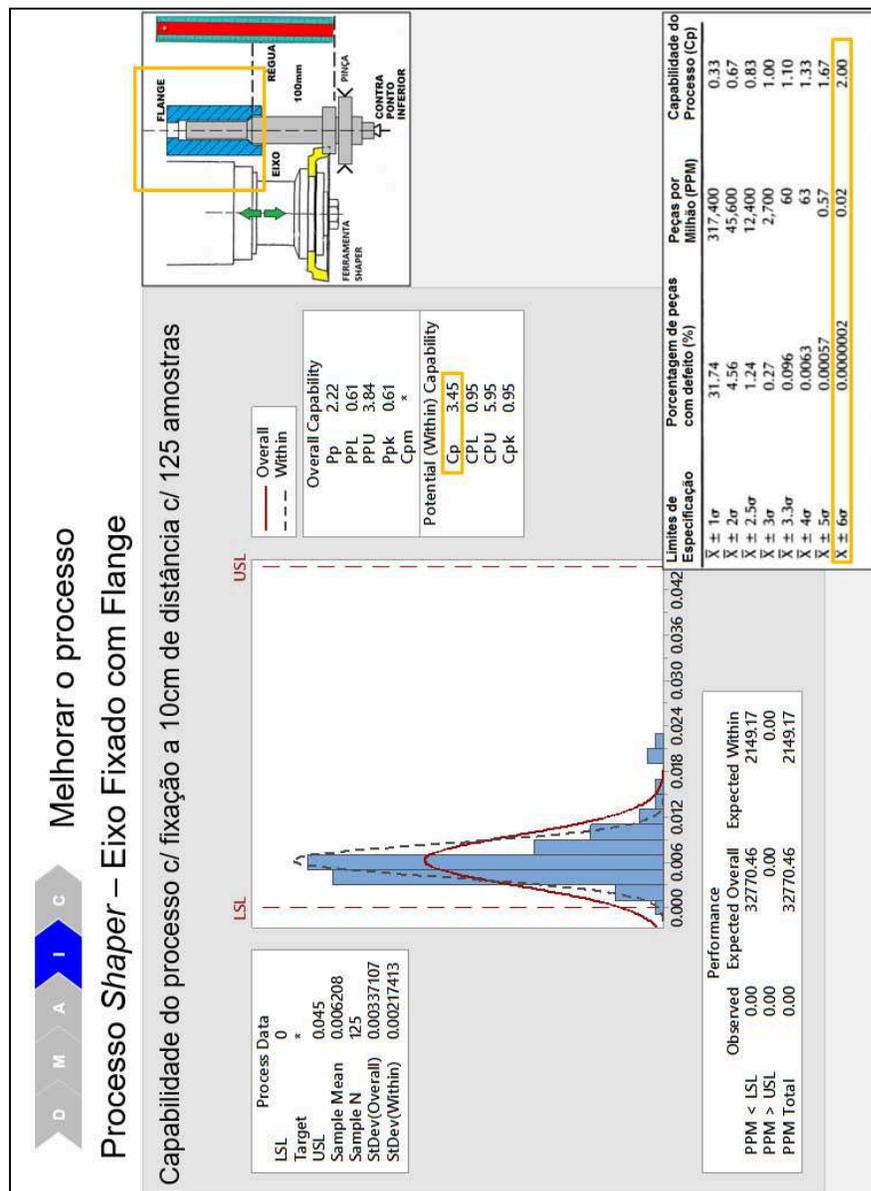
Figura 26- Apresentação da fase Melhorar com a capacidade curta



Fonte: O próprio autor (2019)

Também é possível observar que no novo estudo de capacidade do processo após a implementação da fixação com flange houve um deslocamento do ponto de contato de fixação na peça para mais próximo da zona de corte. Essa mudança reduziu o balanço da peça, inibindo que a mesma possa flambar durante o corte com *Shaper*. A capacidade de process C_p resultante foi de **2,13**. Para confirmar o resultado obtido, outro experimento com 125 amostras, foi realizado e é mostrado na Figura 27. O C_p se manteve acima de 2.0.

Figura 27- Capacidade longo termo da fase Melhorar



Fonte: O próprio autor (2019)

4.5 Aplicação da Fase Controlar

No referido trabalho, observou-se o resultado positivo gerado pelo projeto e ganhos com a implementação das ações que levaram a ganhos consideráveis. Desenvolveu-se com esse projeto um padrão, o que é importante, porque permite a repetição do resultado obtido em análises futuras, de modo igual, como o seu desdobramento no processo. O corte passou a não ser mais o principal gerador de variação na excentricidade do diâmetro primitivo. Com menos variação, menor a possibilidade de gerar peças próximas da máxima tolerância de processo. Seguindo com a idéia do padrão, desenvolveu-se um *Checklist* (lista de verificações) para a confirmação da qualidade da preparação da máquina.

O *Checklist* está demonstrado na Figura 29. Nele são confirmados o número da ferramenta e do dispositivo que foi utilizado, são verificados e anotados os valores de batimento radial e axial encontrados na peça e na ferramenta. Essas informações são preenchidas por um técnico responsável por preparar a máquina. A experiência mostrou que, quando se prende um eixo em duas extremidades e a distância até o ponto de corte é curta, ocorre pouca deformação na peça. Isso resulta em uma boa qualidade final. Porém, quando a geometria da peça oferece um alongamento nessa distância (entre o ponto de apoio superior e a região de corte do dente), são apresentadas distorções relacionadas com movimento de flambagem do corpo da peça, que resultam em uma variação nas características de controle.

A principal característica afetada é a excentricidade no diâmetro primitivo do dente gerado na peça. Para evidenciar a diferença entre peças produzidas nas duas condições, os resultados de amostras medidas foram tabulados e estudados em *Software MiniTab* e o C_p apresentou o equivalente a 2,13 na condição número dois (com fixação superior com flange) contra 0,78 da condição anterior. Tais resultados conseguidos pelo autor foram inspiradores para a execução da pesquisa da presente dissertação. Nesse caso, os fatos que contribuíram para enriquecer a compreensão sobre o processo *Shaper* e ajudar a decidir sobre o modelo ideal de fixação de eixos dentados.

Figura 29 – Folha de check list de preparação da máquina

Check-list de atividades de set up em máquinas shaper
FÁBRICA DE ENGENHAGENS E EIXOS DENTADOS

		CHECKLIST					
		PEÇA: _____	LINHA: _____	TURNO: _____	PREPARADOR: _____	DATA: ___/___/___	
		HORA DE INÍCIO: _____		HORA DE TÉRMINO: _____			
ANTES DO SET UP - Atividades Externas							
PREPARADOR	Ferramental	FERRAMENTAL NECESSÁRIO					
		1 <input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não	Foi preenchido o Checklist Geral da linha com o pedido correto do ferramental necessário? Se Sim, preencher o item 3 em diante.				
	2 <input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não	O dispositivo de fixação é com flange na parte superior? Qual é o número do dispositivo?					
	<input type="checkbox"/> Cortador Shaper <input type="checkbox"/> VARÃO <input type="checkbox"/> BUCHA <input type="checkbox"/> DISPOSITIVO DE FIXAÇÃO						
PREPARADOR	Ferramenta / Dispositivo	ANALISE DA FERRAMENTA					
		3 <input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não	O cortador está em boas condições de uso ?				
	4 <input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não	O cone de apoio está em boas condições ?					
	INFORMAÇÕES DA FERRAMENTA / DISPOSITIVOS					Valores do cartão da ferramenta :	
5 <input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não	Há peça escrava para usar ?				SETUP/TROCA	1ª TROCA	2ª TROCA
6 <input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não	Controles de vida OK?				Diam. Externo		
7 <input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não	Foi checado os parâmetros de corte conforme acompanhamento de vida?				Curso Máximo		
8 <input type="checkbox"/> OK <input type="checkbox"/> NOK	Condições dos encostos/ parafusos/ bucha/ conjunto				Curso Mínimo		
PREPARADOR	Aprovação	QUALIDADE					
		9 <input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não	Todos os itens do cartão de aprovação estão dentro das tolerâncias de processo? Se não, _____ Téc Qualidade				
PREPARADOR	Verificação	MEDIÇÃO					
		10 <input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não	O CARTÃO DE APROVAÇÃO está disponível e de acordo com o processo?				COMPARATIVO DE MEDIDAS (E1, E2 e E3)
		11 <input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não	O medidor de excentricidade já foi montado para a peça nova? As cartas estão disponíveis?				Medidor de excentricidade
		12 <input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não	O curso das CANETAS DE MEDIÇÃO foi verificado?				
		13 <input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não	O PADRÃO está correto e sua medida é a mesma do zeramento do medidor?				
		14 <input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não	Bases magnéticas, e outros DISPOSITIVOS DE MEDIÇÃO estão disponíveis?				
15 Avalie a forma em que você recebeu o ferramental:					Obs. Caso a diferença seja maior do que 10 microns, contactar o Téc. De Qualidade responsável.		
		<input type="checkbox"/> Ok, estou satisfeito!	<input type="checkbox"/> Ferramental incorreto	<input type="checkbox"/> Ferramental Sujol/ Contato Metal-Metal			
		<input type="checkbox"/> Material danificado	<input type="checkbox"/> Tempo de Montagem excedido	<input type="checkbox"/> Não disponível no Crib de ferramentas			
ESPECIFIQUE: _____							
DURANTE O SET UP - ATIVIDADES INTERNAS							
<input type="checkbox"/> OK <input type="checkbox"/> NOK Chaveta de travamento OK? <input type="checkbox"/> OK <input type="checkbox"/> NOK Pinça de fixação OK?							
VERIFICAÇÃO NA MÁQUINA: NENHUM BATIMENTO DEVE ULTRAPASSAR 0,020mm							
PREPARADOR	Dispositivo						
PREPARADOR	Peça	16 <input type="checkbox"/> Sim <input type="checkbox"/> Não Peça limpa antes de entrar na máquina?					
		17 <input type="checkbox"/> OK <input type="checkbox"/> NOK A primeira peça saiu dentro do valor de Sobre esferas ?					
		18 <input type="checkbox"/> OK <input type="checkbox"/> NOK Visualmente a peça está aprovada ?					
		Sobre esferas:					
		Máxima	SETUP / TROCA	1ª TROCA	2ª TROCA		
		Mínima					
		Encontrado					

Fonte: O próprio autor (2019)

5 CONCLUSÃO

A aplicação do DMAIC no processo *Shaper* permitiu chegar nas seguintes conclusões:

Na fase Definir verificou-se por meio da voz do cliente (usuário) que o foco do estudo deveria ser o de reduzir o desconforto acústico gerado pelo mecanismo. A excentricidade no diâmetro primitivo da engrenagem é uma característica que contribui para o modo de falha indicado pelo usuário, logo, reduzi-la para próximo de zero, foi determinado como o foco do trabalho.

Na fase Medir, um total de trinta amostras produzidas no processo original (com distância entre apoio de fixação e zona de corte a 200mm) tiveram a excentricidade no diâmetro primitivo medido com engrenômetro, seus dados foram tabulados e estudados no Software Minitab. Na fase Analisar, a capacidade Cp obtida foi de 0,78 e isso indica um nível Três Sigmas. Esse nível Sigma se traduz em um processo que pode gerar mais de 2700 defeitos por milhão.

Ainda na fase Analisar, foi elaborado um questionário e submetido a um grupo de especialistas de diferentes empresas. Foram cinco especialistas que responderam as perguntas, dentre eles, três são considerados Sênior, por terem mais de trinta anos de experiência. Os outros dois, detêm mais de quinze anos de experiência. O formato do questionário foi baseado em uma espinha de peixe e nele os especialistas puderam indicar quais variáveis do processo seriam os principais responsáveis pela variabilidade na excentricidade do diâmetro primitivo. As informações do questionário foram tabuladas em uma matriz de priorização e posteriormente, os especialistas puderam pontuar cada um dos itens.

A matriz de priorização destacou a falta de robustez na fixação, como a causa raiz da variação na excentricidade do diâmetro primitivo. A pontuação desse modo de falha foi de 351 pontos. Com esse dado, uma nova pergunta foi feita aos especialistas. A questão feita nessa etapa passou a ser qual poderia ser a causa principal da falta de robustez na fixação. Novas informações foram levantadas com os especialistas e uma nova matriz de priorização foi elaborada. Nessa segunda matriz, a pontuação obtida foi 405, o que indicou a distância entre o ponto de apoio da peça e a zona de corte, como o principal fator que interfere na robustez da fixação da peça durante o processo. Foi preenchido um FMEA com os dados

disponíveis do processo e a pontuação NPR obtida foi 315, indicando que o processo poderia ser melhorado.

Na fase Melhorar, utilizou-se um flange para mudar a fixação superior no processo. Essa mudança fez com que a distância entre o ponto de apoio da peça e a zona de corte baixasse de 200mm para 100mm. Foram produzidas trinta amostras com a nova configuração da fixação, todas foram medidas no engrenômetro, os dados foram tabulados e estudados no Software Minitab. A capacidade Cp obtida foi de 2,13 e isso indica um nível Seis Sigmas. Esse nível Sigma se traduz em um processo que pode gerar menos de um defeito por milhão. Um novo grupo com 125 amostras foram produzidas, medidas no engrenômetro e analisadas no Minitab. O Cp obtido foi maior que dois e isso confirmou o resultado obtido anteriormente com trinta amostras.

Na fase Controlar, o FMEA foi revisado com os novos dados obtidos após a mudança na fixação da peça. A pontuação NPR baixou para 45 com a utilização do flange e reduziu para 10 pontos com a introdução de uma planilha de *Check List* de *Setup*, que foi implementada para auxiliar o preparador e evitar que o dispositivo de fixação antigo fosse utilizado.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para uma futura pesquisa, pode-se indicar a busca por mais modelos de fixação de peças que favoreçam ainda mais o processo, beneficiando a qualidade das peças produzidas e, ao mesmo tempo, ganhar em redução de tempo o ciclo máquina, tornando o processo mais competitivo.

Entretanto, a experiência de aplicação da ferramenta DMAIC ficou registrada neste trabalho, de forma que o procedimento pode ser seguido por outros setores e em outros seguimentos.

Outra sugestão é a aplicação do DMAIC em atividades de manutenção de veículos: como frotas de caminhões e utilitários. Sempre haverá oportunidade para melhorar algo que possa trazer benefício a todos, mercado, fornecedores, empresas e colaboradores.

REFERÊNCIAS

- ABNT NBR 14724 – **Norma Brasileira / Informação e documentação — Trabalhos acadêmicos** — Apresentação. Segunda edição 30.12.2005. Válida a partir de 30.01.2006, 2005, 9 p.
- ANDRIETTA, J. M.; MIGUEL, P. A. C. **A Importância do Método Seis Sigma na Gestão da Qualidade Analisada sob uma Abordagem Teórica**. Revista de Ciência e Tecnologia, v. 11, n. 20, 2002. p 91-98.
- BANUELAS, R.; ANTONY, J., **Key Ingredients for the Effective Implementation of Six Sigma Program: Measuring Business Excellence**, v. 6, n. 4, 2002. p 20-27.
- BHOTE, K. R., **The Ultimate Six Sigma: Beyond Quality Excellence to Total Business Excellence** – American Management Association, Amacom, New York, USA. 2002.
- COPPINI, N.L.; **Usinagem Enxuta - Gestão do Processo**. São Paulo: Artliber, 2015.
- COPPINI, N.L.; DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 8.ed.São Paulo: Artliber, 2010, 268 p.
- CORRÊA, O. **et al. Investigação do Seis Sigma na Redução do Tempo de Setup: Uma Pesquisa Empírica em uma Empresa do Setor de Polímeros**. Universidade Federal de São Carlos, 2014.
- DAMBHARE, Sunil **et al. Productivity Improvement of a Special Purpose Machine Using DMAIC Principles: A Case Study**. *Journal of Quality and Reliability Engineering*, 2013. 14 f.
- DAPPER, N. **et al. Melhorias no processo produtivo utilizando o método DMAIC. Um estudo de caso desenvolvido em uma fábrica de rações**. IV Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção, Ponta Grossa, 2014
- DIAS, A. **Metodologia para Análise da Confiabilidade em Freios Pneumáticos Automotivos**. 1996. 199p. Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, Campinas, SP, 1996.
- DIN - Deutsches Institut für Normung / ISO - International Organization for Standardization. DIN ISO 6545. **Acceptance conditions for gear hobbing machines**. 1992.
- DIN - Deutsches Institut für Normung. DIN 3962. **Tolerances for Cylindrical Gear Teeth Package**. 1978.
- GIANFRANCO, B. **Rolling gear tester, master gears and other checking equipments. Controls With Rolling Gear Tester**. Disponível em: <http://www.biancogianfranco.com>. Acesso em: 26 de Junho de 2019c, 18:04
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4 ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GROOVER, M. P. ***Fundamentals of Modern Manufacturing – Material, Processes and Systems*** – 4th Edition. United States: Ed. JOHN WILEY & SONS, INC., 2010. 543 p.

HARRY, M. SCHROEDER, R. ***Six Sigma. The Breakthrough Management Strategy Revolutionizing the World's Top Corporations***. Ilustrada. Ed. Currency, 2005. 300 p.

HINDLE, S. A. ***Statistics - Process Capability: How Many Data?*** QualityDigest.com, 2015. Disponível em: <https://www.qualitydigest.com>. Acesso em: 25 Jun. 2019

HOERL, W. R. ***Six Sigma Black Belts: What do they need to know?*** *Journal of Quality Technology - Division of the American Society for Quality and the Section on Physical & Engineering Sciences of the American Statistical Association in Toronto, Ontario, Canada*, Oct. 2001. Disponível em: www.researchgate.net/publication. Acesso em: 25 Jun. 2019

KATZ, A., ***Cutting Mechanics of the Gear Shaping Process***. 2017. 137 f. Master Degree (University of Waterloo) - *Mechanical and Mechatronics Engineering* - Waterloo, Ontario, Canada, 2017.

LIEBHERR GROUP. ***Catalogue of Universal Gear Shaping Machines, 2011***. Disponível em: <https://www.liebherr.com>. Acesso em: 25 Jun. 2019, 06:22.

LIN, C. *et al.* ***Continuous improvement of knowledge management systems using Six Sigma methodology***. *Robotics and Computers-Integrated Manufacturing*, v.29, 2013. 93-103 p.

LINKE, H., ***Cylindrical Gears: Calculation, Materials, Manufacturing***. Science Direct e-books. Hanser Publications, 2016. 848 p.

MARSHALL JR, Isnard *et al.* ***Gestão da Qualidade***. 8 ed. Rio de Janeiro: FGV, 2006. 196 p.

MARTINS, P. G.; LAUGENI, F. P. ***Administração da Produção***. 2 ed. São Paulo: Saraiva, 2005.

MATOS, J. L. ***Implementação de um projeto de melhorias em um processo de reação química em batelada utilizando o método DMAIC***. 2003. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção). Departamento de Engenharia da Produção da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS. 2003.

MUNHATO, S. A.; OLIVEIRA, S. L. M.; FERNANDES, T. W. ***Processos de fabricação – Fresando pelo processo Fellows - Aula 52***. Curso Profissionalizante - São Paulo: Ed. SENAI, [s.n] 2000. 5 p.

OLIVEIRA, J. O. *et al.* ***Gestão da Qualidade. Tópicos Avançados***. Cengage Learning Editores: São Paulo, 2004. 243 p.

RIBEIRO, L. O.; DA SILVA, R. B.; MACHADO, A. R. **A Temperatura na Interface Cavaco-Ferramenta sob Diferentes Condições de Refrigeração/Lubrificação**. In: II CONGRESSO BRASILEIRO DE ENG. DE FABRICAÇÃO. Uberlândia: 2003.

ROCHA, P. **Sincronismo Organizacional: Como alinhar a estratégia, processos e as pessoas**. São Paulo: Saraiva, 2006.

ROTONDARO, R.G. **Seis Sigma: Estratégia Gerencial para a melhoria de processos, produtos e serviços**. São Paulo: Atlas, 2002. 375 p.

ROUT, S. I. *et al. Implementation of Six Sigma Using DMAIC Methodology in Small Scale Industries for Performance Improvement. Journal of Modern Engineer Research*, 2014.

SANTEJANI, H. F. FÁBIO, **Perfil Ideal do Vendedor Industrial na Visão do Cliente**. 2017. 168 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté, SP, 2017.

SANTOS, A. IVAIR, **DMAIC Aplicado à Utilização Racional de Ferramentas para o Setor de Usinagem em Indústria de Grande Porte**. 2013. 104 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté - SP, 2013.

SATOLO, E. G. **Análise da Utilização de Técnicas e Ferramentas no Programa Seis Sigma a Partir de um Levantamento Tipo Survey**. *Produção*, v.19, n.2, 2009. p.400-416

SCATOLIN, A. C. **Aplicação da Metodologia Seis Sigma na Redução das Perdas de um Processo de Manufatura**. São Paulo: [s.n.], 2005.

SORDI, J. O. **Gestão por Processos: Uma Abordagem da Moderna Administração**. 2. ed. rev. e atual. São Paulo: Saraiva, 2008. 270 p.

STAMATIS D.H. **Failure Mode and Effect Analysis: FMEA from Theory to Execution**. 2. ed. Milwaukee, Wisconsin. ASQ Quality Press, 2003. 488 p.

WERKEMA, C. **Métodos PDCA e DMAIC e suas Ferramentas Analíticas** - Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.