

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
ESPECIALIZAÇÃO EM LEAN SIX SIGMA - CERTIFICAÇÃO BLACK BELT**

WILSON DA TRINDADE

**REDUÇÃO DO CUSTO DA NÃO QUALIDADE NA LINHA DE PRODUÇÃO
DO PISTÃO 6CVC: MAPEAMENTO E CONTROLE DOS PARAMETROS
DE PROCESSO LIGADOS A TEMPERATURA**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA

2021

WILSON DA TRINDADE

**REDUÇÃO DO CUSTO DA NÃO QUALIDADE NA LINHA DE PRODUÇÃO
DO PISTÃO 6CVC: MAPEAMENTO E CONTROLE DOS PARAMETROS
DE PROCESSO LIGADOS A TEMPERATURA**

Monografia apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Especialista em Lean Six Sigma - Certificação Black Belt, do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Wanderson Stael Paris, M.Sc.

CURITIBA

2021



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Curitiba
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Departamento Acadêmico de Eletrotécnica
Especialização em Lean Six Sigma - Certificação Black Belt



TERMO DE APROVAÇÃO

REDUÇÃO DO CUSTO DA NÃO QUALIDADE NA LINHA DE PRODUÇÃO DO PISTÃO 6CVC: MAPEAMENTO E CONTROLE DOS PARAMETROS DE PROCESSO LIGADOS A TEMPERATURA

por

WILSON DA TRINDADE

Esta monografia foi apresentada em 04 de dezembro de 2021, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Lean Six Sigma - Certificação Black Belt, outorgado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O aluno foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Wanderson Stael Paris, M.Sc.

Professor Orientador - UTFPR

Prof. Emerson Rigoni, Dr. Eng.

Membro Titular da Banca - UTFPR

Prof. Marcelo Rodrigues Dr.

Membro Titular da Banca - UTFPR

O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso.

Dedico este trabalho a Deus que deu forças e iluminou o caminho durante períodos tão obscuros pelos quais passamos durante grande parte do percurso desta pesquisa, sem ele não teríamos a serenidade para prevalecer diante de tantas provações.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por permitir o acontecimento de tudo isto.

Agradeço ao meu orientador, Wanderson Paris, pelas incansáveis horas de treinamento e dicas de boas práticas passadas.

À minha esposa pela paciência e suporte durante estes longos dias divididos entre pesquisas e análises.

Aos meus colegas de curso pela diversidade de experiências trocadas durante nosso período acadêmico.

e simulações no processo produtivo e por apostar nos resultados deste projeto.

Aos meus mestres dentro da organização pela bravura de acreditarem no projeto incondicionalmente e direcionarem todos os esforços para a conclusão dos resultados.

RESUMO

DA TRINDADE, Wilson. **Redução do custo da não qualidade na linha de produção do pistão 6CVC**: Mapeamento e controle dos parâmetros de processo ligados à temperatura. 2021. 72 folhas. Monografia (Especialização em Lean Six Sigma - Certificação Black Belt) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2021

Os negócios nos dias atuais têm sido cada vez mais competitivos e a velocidade de mudanças impõem cada vez mais uma crescente pressão. Também há a necessidade de operar com processos cada vez mais enxutos, que satisfaçam às necessidades dos clientes e, ao mesmo tempo, tragam retorno aos diversos segmentos de partes interessadas. Retorno financeiro, intelectual e de moral ou satisfação da equipe. As ferramentas do método DMAIC estruturado, agregando ferramentas de experimentação estatística seis sigma, apresentam uma condição perene na busca incessante destes resultados. O presente trabalho propõe a implantação desta estratégia na manufatura de pistões para a indústria automotiva no segmento de ar condicionado em uma empresa de médio porte da região metropolitana de Curitiba e que atende o mercado global. Um *Project Charter* foi submetido ao corpo diretivo da organização com todas as premissas, restrições e escopo do projeto. Estes dados foram focados principalmente na voz do cliente com retorno previsto no custo da não qualidade e ganho de produtividade atrelado à elevação do *mindset* corporativo. Foram feitas experimentações e determinada a equação otimizada do processo. Um plano de ação foi implantado, coletados resultados em escala de protótipo e, posteriormente, parcialmente implantados no processo. Os resultados econômicos, FTQ maior que 99% e acréscimo de vendas projetadas acima de R\$ 1.000.000,00 ao ano, foram obtidos ao longo deste projeto e validados durante a fase *control*.

Palavras-chaves: DMAIC. Seis Sigma. Manufatura Enxuta.

ABSTRACT

DA TRINDADE, Wilson. **Non quality cost reduction in the 6CVC platters:**

Temperature process parameters mapping and control. 2021. 72 pages. Monography (Lean Six Sigma Post-Graduation – Black Belt Certification) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2021.

Business today have faced increasing competition and the high velocity of change imposed increasing pressure as well. That said, there is a need to operate processes in a lean and six sigma environments, which fulfil customer needs, and at the same time, assure good results for all business stakeholders. Results based on ROI (return of investment), intellectual, team moral and team satisfaction. The structured DMAIC method with the tooling, combining the lean manufacturing tools and six sigma tools assure a long-term condition when searching for increasing results and profitability. These Project presents the implementation of a design of experiment based on the lean six sigma strategy in the production of aluminum platters to the automotive industry which are dedicated to the air condition systems in a medium size automotive company situated at Curitiba metro area which supply components in the global market. A Project Charter was built and submitted to the board of directors with all premises, restrictions and project scope. The data focused mainly at the voice of the customer and with planned return of non-quality cost and productivity gain chained with the corporate mindset elevation to a higher level. A set of design of experiments were run and optimized process equation obtained. An action plan was implemented and results collected in prototype scale which were, afterwards, implemented in the process. Economic results, FTQ over 99% and additional sales over R\$ 1,000,000.00 projected yearly, were obtained during the course of these Project and validated along the control step.

Key words: DMAIC. Six Sigma. Lean Manufacturing.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2 - Método DMAIC estruturado	21
Figura 3 - ENGC usada para experimentação em escala piloto	24
Figura 4 - Linha Transfer que será usada como alternativa de teste	26
Figura 5 - DMAIC.....	31
Figura 6 - Diagrama IPO	32
Figura 7 - SIPOC	33
Figura 8 - Project Charter (Carta de Projeto)	35
Figura 9 - Diagrama de Causa e Efeito.....	36
Figura 10 - Gráfico de Pareto	36
Figura 11 - Carta de Controle.....	38
Figura 12 - Análise de Regressão	39
Figura 13 - Mapa Mental	41
Figura 14 - DOE (Identificação de tipos de fatores).....	42
Figura 15 - Ciclo PDCA	43
Figura 16 - Mapa de Raciocínio do Projeto	46
Figura 17 - Business Case do Projeto (Fase Define)	47
Figura 18 - Project Chart do Projeto.....	48
Figura 19 - Dados iniciais do processo (Pareto de priorização).....	49
Figura 20 - Dados econômicos e projeções (Fase Define).....	50
Figura 21 - Estudo de capacidade representativo do estado atual (Measure)	51
Figura 22 - Estudo de Cg/ Cgk do instrumento usado no processo	52
Figura 23 - Estudos de linearidade do instrumento usado no processo	52
Figura 24 - Estudo de R&R do instrumento usado no processo	53
Figura 25 - SIPOC do Processo.....	54
Figura 26 - Diagrama Causa e Efeito do Processo.....	55
Figura 27 - Análise de 5 Porquês na máquina.....	55
Figura 28 - Análise inicial de DOE (Taguchi) efeito das médias	56
Figura 29 - Análise inicial de DOE (método Taguchi), análise do sinal- ruído e resumo	56
Figura 30 - Análise inicial DOE (método Taguchi) equação de regressão e análise gráfica dos dados	57
Figura 31 - Análise fatorial fracionada de todos os fatores.....	58
Figura 32 - Fatorial fracionado final nos parâmetros de maior influência	59
Figura 33 - Plano de Ação 5W2H, implantação das soluções e planejamento para uma etapa adicional.....	60
Figura 34 - Reprojetado do barramento com saída de cavaco.....	60
Figura 35 - Carta de Controle com parâmetros otimizados	61
Figura 36 - Análise de capacidade com os parâmetros otimizados	61
Figura 37 - Apresentação dos resultados de FTQ e incremento de vendas	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Cronograma macro do trabalho proposto.....	18
---	----

LISTA DE SIGLAS

AIAG	<i>Automotive Industry Action Group</i>
ASQ	<i>American Society for Quality</i>
BSC	<i>Balanced Scorecard</i>
Cg	Indicador de capacidade do instrumento de medição
Cgk	Indicador de performance do instrumento de medição
Cp	Indicador de capacidade do processo
Cpk	Indicador de performance de processo
CPM	<i>Critical Path Method</i>
CTQ	<i>Critical to Quality</i>
DFSS	<i>Design for Six Sigma</i>
DPMO	<i>Defects Per Million of Opportunity</i>
DOE	<i>Design of Experiments</i>
EVM	<i>Earned Value Management</i>
FMEA	<i>Failure Mode and Effect Analysis</i>
FTQ	<i>First to quality</i>
IMR	<i>Moving Range Chart</i>
IPO	<i>Input – Process – Output</i>
NPR	Número de priorização de risco
OEE	<i>Overall Equipment Effectiveness</i>
PCD	<i>Polycrystalline Diamond tooling</i>
PDCA	<i>Plan, Do, Check, Act</i>
PPM	<i>Parts per Million of Opportunity</i>
QFD	Quality Function Deployment
R&R medição	Indicador de Repetibilidade e Reproducibilidade do instrumento de
TQM	Total Quality Management
TPM	<i>Total Preventive Maintenance</i>
VOC	<i>Voice of the Customer</i>

VOP	<i>Voice of the Process</i>
VSM	<i>Value Stream Mapping</i>

LISTA DE ACRÔNIMOS

CEP	Controle Estatístico de Processo
DMAIC	<i>Define, Measure, Improve, Control</i>
DMADV	<i>Define, Measure, Analyze, Design, Verify</i>
PERT	<i>Project Evaluation and Review Technique</i>
SIPOC	<i>Supplier, Input, Process, Output, Customer</i>
SMART	Specific, Measurable, Achievable, Relevant, Time bound
SMED	<i>Single Minute Exchange Die</i>
SWOT	<i>Strength, Weak, Opportunity, Threats</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	PREMISSAS E PROBLEMA DE PESQUISA	14
1.2	OBJETIVOS.....	15
1.2.1	Objetivo Geral.....	15
1.2.2	Objetivos Específicos	15
1.3	JUSTIFICATIVA.....	16
1.4	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	18
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	22
2	TEMA DA PESQUISA	23
2.1	ASPECTOS GERAIS.....	23
2.2	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	27
3	REFERENCIAL TEÓRICO	28
3.1	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	44
4	DESENVOLVIMENTO	45
4.1	SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO	63
5	CONCLUSÕES	63
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	65

1 INTRODUÇÃO

Na atual conjuntura econômica em que se vive as companhias têm investido incessantemente na busca da excelência de seus negócios para alcançar a sustentabilidade econômica. Ao mesmo tempo pode-se garantir vida mais longa em um mercado cada vez mais seletivo e competitivo.

As ferramentas de melhoria contínua com a redução de desperdícios e as ferramentas do seis sigma com a redução de variação têm sido cada vez mais desejadas na busca incansável destes patamares de qualidade e plena satisfação dos clientes e anseios dos *stakeholders* do negócio.

O cenário em que se coloca este contexto está cada vez mais competitivo e não é possível conseguir sucesso duradouro no mercado sem uma imersão profunda nas ferramentas, conceitos e culturas extremamente apuradas que as ferramentas *Lean* e Seis Sigma oferecem.

Neste contexto populado de restrições insere-se este estudo para aplicação das metodologias enxutas de produção e do seis sigma. Foi aplicado em um processo de produção de pistões em alumínio de alta liga forjado para a indústria automotiva no segmento de ar condicionado. Usou-se um mapeamento nos moldes DMAIC, com aplicação das técnicas estatísticas para redução e controle de variação, onde o valor agregado é muito alto devido ao alto custo de produção e grande demanda do componente. Foi possível fazer o mapeamento de alto nível do processo tanto usinagem quanto forjaria, aplicar as ferramentas estatísticas de capacidade de processo e produto. Seguiu um delineamento de experimento e planos de ação direcionados para a redução do custo da não qualidade, satisfação do cliente chave do negócio e aumento da disponibilidade no processo de usinagem.

Este processo foi mapeado em trabalho anterior de VSM Qualidade e, após a aplicação de plano de ação nos pontos chave, nasceu a necessidade de aprofundamento estatístico na operação de usinagem do comprimento do pistão devido a grande variação e perdas.

As ferramentas de estatística de processo, simulação e delineamento de experimentos, implantação de planos de ação gerenciais estruturados foram usados

no desenrolar do processo de melhoria para fornecer os estágios de formulação de soluções o que levantou a necessidade de um enfoque DMAIC e aplicação da solução mapeada em um processo redesenhado que atendesse o alto volume de produção e a capacidade do processo.

1.1 PREMISSAS E PROBLEMA DE PESQUISA

O ponto de usinagem no comprimento total do pistão foi mapeado como o principal agressor do processo. Cpk baixo, FTQ baixo, alto índice de perdas e alto nível de inspeção. Esta característica não conseguiu melhora de desempenho no projeto anterior de VSM Qualidade e A3 e pede um aprofundamento estatístico.

Como todas as ferramentas *Lean* e o método seis sigma partem do pressuposto de um trabalho de base sólida, tem-se de antemão a necessidade premente de um bom programa 5S implantado e um bom nível de *mindset* para melhoria contínua por parte de todos os membros da organização desde o chão de fábrica até a alta administração do negócio. Estes pontos foram tratados no delineamento do *Project Charter* do projeto como pré-requisitos para uma boa aderência entre o chão de fábrica e os anseios dos clientes e do quadro diretivo concomitantemente.

Este trabalho tem ainda como restrição aparente a necessidade de o processo em que se está propondo esta intervenção entregar um alto volume de componentes mensais e, tendo assim, poucas janelas de parada para testes, experimentos ou atuação efetiva.

Parte-se ainda do pressuposto de fazer mais com menos, ou seja, aplicar os experimentos no processo atual enquanto a entrega regular para os clientes não é afetada.

A implantação em massa do novo processo redesenhado, durante a evolução do cronograma, é uma restrição considerada. Isto devido ao alto grau de investimento em equipamentos de controle dos parâmetros mapeados e que não estão disponíveis, necessidade de investimento.

Este pressuposto citado e do qual parte este projeto como sendo a necessidade de investimento na implantação com a reestruturação da operação de usinagem no

comprimento do pistão compromete o compromisso de entrega do projeto em termos de retorno de resultado a médio prazo. Pode ainda ser implantado no processo atual com um nível menor de investimento e algum comprometimento de volume de produção e a capacidade do processo, melhoria parcial.

Ainda aqui parte-se do princípio que um programa de TPM deve ser implantado em concorrência como adendo deste processo. Isto para garantir uma linha de base no monitoramento dos parâmetros de processo, os quais são parte do enriquecimento do plano de controle e manutenção dos equipamentos em condições de entregar um nível aceitável de variação.

Partindo dos pressupostos aqui citados tem-se o desafio de conduzir um estudo baseado em análises estatísticas, delineamento de experimentos e padronização do processo redesenhado. Estes estudos devem agregar as atividades de manufatura enxuta necessárias ao desempenho duradouro deste projeto como entrega.

1.2 OBJETIVOS

Está estruturado em objetivo geral de retorno no custo da não qualidade e objetivos específicos cascadeados para suportar o objetivo geral.

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é trazer retorno financeiro no custo da não qualidade através da melhoria do FTQ final do processo com ganho de 160.000 peças por ano no volume de vendas.

1.2.2 Objetivos Específicos

Este trabalho deverá contemplar os seguintes objetivos específicos para o comprimento do seu objetivo geral na integra:

- Aprofundar os estudos das metodologias estatísticas de capacidade, delineamento de experimentos e padronização voltados para parâmetros de processo e produto final;

- Alinhar a voz do Cliente e os custos da não qualidade agregados à voz do processo;
- Monitorar os indicadores de processo de forma evolutiva, CpK, PPM, DPMO, NPR e experimentação de parâmetros em busca da equação otimizada e melhora no Cpk de longo prazo nestas características;
- Avaliar o custo benefício e amortização dos investimentos em no máximo 5 anos, período de vida série deste produto conforme programado com os clientes tanto no mercado nacional quanto no mercado europeu;
- Prever e validar com o quadro diretivo da organização uma linha de investimento no processo de usinagem do comprimento total dos pistões. Fazer também a abrangência para a operação de usinagem do diâmetro do pistão para pleitear projetos futuros com sustentabilidade estatística;
- Elevar o conceito de qualidade da primeira vez e o *mindset* voltado para o processo enxuto dentro da organização, principalmente envolvendo os operadores em todos os estágios do produto e processo.

1.3 JUSTIFICATIVA

Ao longo do tempo foram delineadas muitas estratégias, na sua integralidade, pontuais e superficiais para o desenvolvimento contínuo deste processo na empresa alvo da pesquisa e os indicadores sempre se mostraram instáveis, com altos e baixos, o que sempre trouxe perdas financeiras que somavam 3,7% do volume de vendas em média e de reconhecimento para a organização frente aos seus principais clientes.

Isto se deve basicamente ao fato de os métodos usados serem pouco aderentes e sustentáveis a longo prazo. Metodologias que sempre tratavam os problemas na superficialidade, o que levou a uma incessante cadeia de planos de ação que se frustraram no longo termo. Portanto nos últimos anos estes índices de desempenho do processo têm tido uma crescente e vultuosa demanda de recursos dispendidos no atendimento aos clientes, o que somam R\$ 800.000 ao ano. Inspeções, fretes especiais, pagamentos de garantia por problemas pós montagem, horas extras feitas para recuperação de perdas de produção em razão dos diversos problemas causados pela variabilidade e instabilidade do processo. Acrescenta-se a

isto o pagamento de *penalties* impostos pelos clientes finais e que são comumente transmitidos para a organização deteriorando cada vez mais a liquidez do negócio.

A moral da equipe também fica abalada em diversos aspectos que passam pelo ganho financeiro, prêmios de participação em resultados e culminam na deterioração do senso de satisfação pessoal dos colaboradores que na integralidade anseiam por um ambiente de trabalho desafiador e de prosperidade. Neste contexto o presente trabalho se insere e se justifica contribuindo nos seguintes pontos:

- Delineamento de uma metodologia que propõe uma articulação em várias frentes, estrutura de DMAIC seis sigma que combina com o pensamento da manufatura enxuta;
- Dar maior visibilidade para o negócio a médio e longo termo com possibilidade de reconhecimentos de qualidade e workshop de fornecimento para a cadeia automotiva global;
- Criar uma cultura de manufatura enxuta e seis sigma dentro da organização com o reavivamento dos trabalhos estruturados e multifuncionais. A multifuncionalidade traz aqui uma perspectiva de melhora na satisfação dos colaboradores e aderência deles aos objetivos mais longínquos do negócio;
- Criar um ambiente mapeado e claro para o sequenciamento de outros trabalhos da manutenção (TPM) e do processo (SMED, Kaizen e VSM) com viés de mapeamento do processo para a qualidade;
- Trilhar o caminho para as práticas DMADV com o reprojeto dos processos cruciais em longo prazo, processos de usinagem do comprimento total do pistão e operações de usinagem de precisão no diâmetro externo do pistão. Estes em planejamento como sequência deste projeto, o qual prevê a reestruturação da operação 10 em novos processos *Transfer* de alto volume de produção horária.

Isto tudo trará um alinhamento da corporação com os nortes do plano de negócio traçado pelo corpo diretivo desta companhia. Conseguirá, também, um bom aporte financeiro para aplicação nos processos futuros que são cada vez mais voltados para o bem estar corporativo, classificação de melhores empresas para se trabalhar, melhoria do ambiente de trabalho e sustentabilidade financeira.

Ainda no enfoque financeiro, este processo foi mapeado como o principal agressor na formação da não qualidade. Após uma bem sucedida aplicação de VSM Qualidade no processo como um todo, ficou mapeada a operação de usinagem como ponto do processo onde um trabalho seis sigma estruturado é necessário. Os apontamentos indicaram para um ganho com eliminação de inspeção adicional que monta 250 mil reais ao ano de ganho e um ganho de 160 mil peças adicionais ao ano, o que monta 1,280 milhões de reais ao ano em vendas.

1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este presente trabalho norteia-se pelos procedimentos metodológicos usados explorando a pesquisa bibliográfica em todas as suas nuances de melhoria contínua, seis sigma, ferramentas da qualidade e ferramentas de gestão de projetos. Para o atingimento das metas estabelecidas de melhoria no Cpk e eliminação do muro da qualidade foi definido no *Project Charter* um cronograma de trabalho, tabela 1.

Uma equipe básica de trabalho foi definida com um engenheiro de processo, um engenheiro de qualidade, um técnico de produção e um engenheiro de manutenção. Outros recursos serão alocados junto ao facilitador do projeto sob demanda. Durante o *design* e implantação do novo processo será integrado ao time a equipe de desenvolvimento de processo.

Tabela 1 – Cronograma macro do trabalho proposto

Entregas e Cronograma do Projeto									
Entregas e Marcos	Planejado	Previsto	Real	Status	Oct-20	Nov-20	Mar-21	Set-21	Dec-21
DEFINE	10/10/20	10/10/20	10/10/20	Green					
MEASURE	15/11/20	15/11/20	15/11/20	Green					
ANALYZE	09/03/21	09/03/21	09/03/21	Green					
IMPROVE	30/09/21	30/09/21	10/10/21	Green					
CONTROL	10/12/21	10/12/21	01/12/21	Green					

Segue-se o levantamento de dados para alinhar todos os possíveis problemas e fazer uma viabilidade com a análise do *Project Charter* e validação das intenções de projeto pelos *Stakeholders*, o que passou por análise do conselho diretivo da organização. Este levantamento também focou na consolidação dos dados iniciais, tanto financeiros quanto técnicos. Esta análise foi mapeada e executada dentro das diretrizes pautadas no DMAIC na fase define. Foi possível um amplo levantamento, medição e formulação do estado atual do problema e sua evolução ao longo do tempo.

Para tanto uma janela de 12 meses consecutivos de dados do processo foram compilados e avaliados à luz dos métodos aqui propostos e alinhados com a pesquisa proposta.

Na avaliação do estado atual também foi feito um mapeamento de NPR's, DPMO e CpK dos principais fatores de variação do processo e produto, analisado em gráfico de Pareto e tomado as diretrizes de priorização em cruzamento com a voz do cliente. Dados de capacidade do estado atual desta característica que originou a necessidade e viabilidade desta pesquisa foram traçadas. Uma análise financeira detalhada e estratificada ao longo dos meses também foi conduzida nesta fase.

O levantamento de dados de campo foi conduzido com um mapeamento de alto nível do processo em forma de SIPOC. Foi feito um mapeamento de valor preliminar onde o valor adotado ao longo da pesquisa foi o defeito, VSM Qualidade. Similar ao VSM convencional no VSM Qualidade o termo valor é tido como o oposto do desperdício.

A saída deste mapeamento de alto nível foi a necessidade de desenvolvimento e investigação nos fatores de variação das operações de usinagem do comprimento total do pistão. O levantamento de dados também foi obtido para o estado atual deste processo, após a validação da controladoria, com dados monetários e estratificação de perdas no período de tempo considerado, ano de 2019 e 2020. Neste estágio foram avaliados os pontos de inspeção, geração de defeito, geração de retrabalho e problemas com o indicador qualidade da primeira vez, FTQ.

Todo trabalho foi delineado em forma de pesquisa aplicada desde o levantamento de dados até a investigação de causa e formulação das ações. Foram feitas pesquisas explorativas com um desenvolvimento de causa e efeito e ações imediatas e extensão para a formulação da necessidade de experimentação e capacidade deste ponto do processo, características chave da voz do cliente.

Avaliação dos dados, simulações, implantação em projeto piloto, controle e sistematização na organização e/ou negócio alvo da pesquisa e melhoria proposta seguiram o desenvolvimento do trabalho com o uso das ferramentas propostas nas fases subsequentes do DMAIC.

O material bibliográfico abrange os aspectos delineados no presente trabalho e estão explicitados nos capítulos específicos, os quais acompanham a evolução da pesquisa, aplicação, análise dos resultados e padronização.

Esta pesquisa se norteia pelas práticas e ferramentas de aplicação prática e dirigida à solução de problemas específicos tanto direcionados para a redução de variação, delineamento de experimentos e estudos estatísticos, quanto para a redução dos desperdícios através das técnicas de manufatura enxuta de produção.

No presente trabalho se propõe uma análise aprofundada dos fatores e parâmetros de contribuição com o problema de variação, perdas com custo da não qualidade, insatisfação do cliente e resultados financeiros do negócio.

Assim, o projeto priorizou a voz do processo e a voz do cliente como entradas ora qualitativa, tratamento do defeito e ora quantitativa, monetizando o defeito e modelando-o na ótica da sustentabilidade financeira do negócio e satisfação dos *stakeholders*.

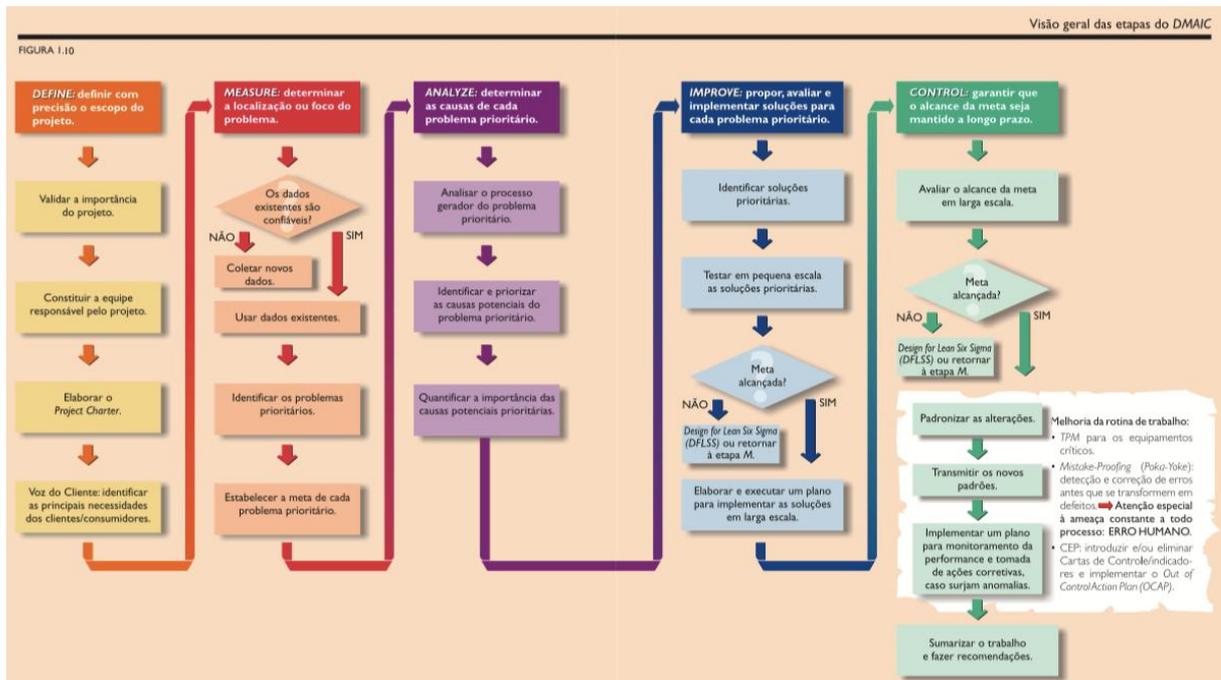
A forma de desenvolvimento adotada foi uma investigação de causa e efeito seguida de um modelo de delineamento de experimentos em todos os principais fatores de variação voltado para a qualidade. Isto trouxe um desdobramento de ferramentas mais pesadas nos pontos de maior impacto e retorno. Seguiu os conceitos e boas práticas dos processos de manufatura enxuta e seis sigma e seguiu os critérios adotados pela ASQ em certificações de projetos de melhoria contínua.

A formatação seguiu as normas recomendadas pela UTFPR.

Do ponto de vista prático e científico o trabalho foi desenvolvido em formato DMAIC (*Design, Measure, Analyze, Improve e Control*) mostrado na figura 2, para a implantação da melhoria em um processo desenhado para atender ao alto volume de demanda atrelado ao alto nível de qualidade neste ponto do pistão.

Foi previsto um trabalho nos parâmetros de processo que agregaram o delineamento de experimentos, DOE, com todos os pontos de melhoria trabalhados em formato de modelamento e implantação de prototipagem, a qual foi seguida ao longo de todas as etapas até a obtenção da equação ideal.

Figura 1 - Método DMAIC estruturado



Fonte: WERKMA 2012

Foi feito um levantamento dos dados financeiros, voz do cliente e voz do processo e tomado como processo piloto a linha de fabricação dos pistões forjados em alumínio de alta liga. Neste processo a relação voz do cliente, voz do processo e retorno de investimento mostrou-se muito forte e com possibilidade de retorno ao redor de R\$1.500.000,00 por ano em custo da não qualidade e perda de oportunidade de negócio. O objetivo final será de trazer o custo da não qualidade global da organização ao redor de 1,00%. Este valor está hoje sendo praticado em valores de 1,44%.

Durante o delineamento do problema, estratificação e previsão de implementação de ações e retorno do esforço os trabalhos foram divididos em dois estágios:

Implementação das ações do estágio 1 de levantamento de causa e efeito e plano de ação imediato na operação de usinagem do comprimento do pistão;

Delineamento de experimentos nos principais fatores de variação que contribuem para o baixo Cpk do processo, instabilidade baixo FTQ em um segundo estágio.

Um ponto relevante na exploração das técnicas utilizadas neste trabalho foram as técnicas de análise de risco e técnicas de análise de falhas quando da decisão por ações do estágio 2 que apresentam grande desafio da parte técnica devido às grandes mudanças do projeto e processo original e com o processo base rodando a todo o vapor.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O capítulo inicial compila o tema envolvido em todas as suas nuances focando nos objetivos do trabalho. Nos capítulos finais tem-se uma síntese das análises e aplicações práticas dos itens levantados na teoria e faz uma avaliação conclusiva dos resultados em várias fontes como: financeira, técnica e humanística.

O capítulo 1 faz uma síntese do tema objeto da pesquisa e delinea todos os passos que justificam e tornam este projeto viável e exequível em uma forma SMART.

O capítulo 2 busca explorar o objeto da pesquisa e posicioná-lo no ponto de conexão dos anseios iniciais do planejamento dando balizamento para o objetivo maior de redução de gastos com custo da não qualidade.

O capítulo 3 procura trazer todo o aporte metodológico das boas práticas de manufatura enxuta e do seis sigma para suportar, como estado da arte, as proposições descritas no *Project Charter* deste projeto.

O capítulo 4 faz um desmembramento entre a aplicação prática do que foi exposto nos capítulos iniciais.

O capítulo 5, finalmente, faz as conclusões dos resultados do projeto e considerações finais. Traz também as verificações e validações do que foi inicialmente proposto e planejado e elenca os possíveis futuros trabalhos, indicando-os como meio de assegurar a longevidade do negócio ao longo prazo e aderir à estratégia já desenhada para 2042 na organização foco do trabalho.

2 TEMA DA PESQUISA

O Capítulo 2 traz os conceitos da manufatura centrada em controle dos parâmetros delineados em experimentação na busca pela equação otimizada que simule o melhor resultado. Todo o conceito teórico na formulação do delineamento de experimentos (DOE), capacidade do processo e levantamento de causa raiz pelo diagrama Causa e Efeito bem como a formulação da configuração otimizada foram sintetizados aqui. Isto para oferecer a base de pesquisa fundamentada necessária para a obtenção dos resultados.

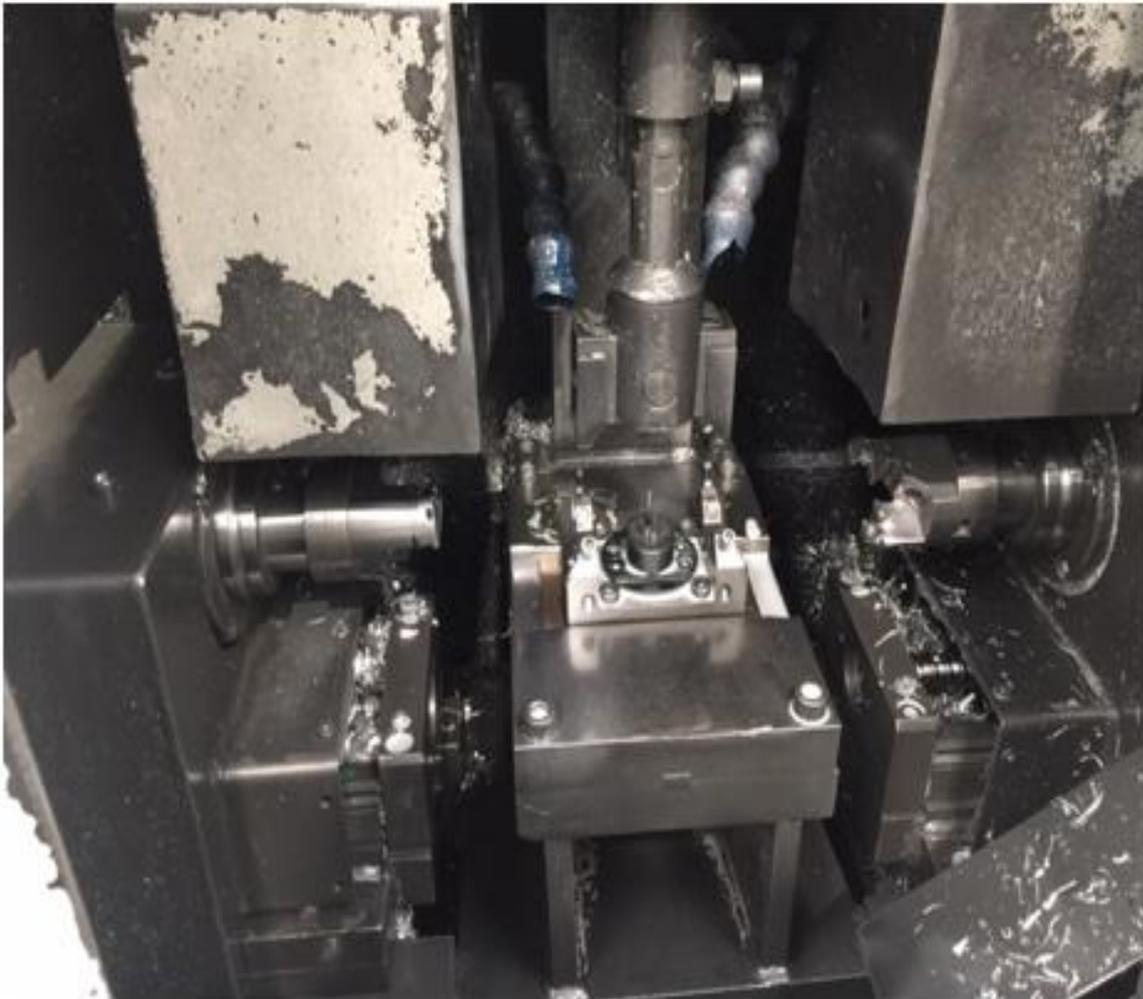
Todos os procedimentos de análise e implantação foram amplamente explorados para possibilitar a implantação na integralidade dos passos, DOE, análise estatística com capacidade do processo em passos evolutivos antes e depois, e aplicação de conceitos de causa e efeito na descoberta da causa raiz e na aplicação definitiva.

A abordagem deste capítulo em linhas gerais está calcada na base de experimentação usando os preceitos de projeto robusto com uma prototipagem dos dados em um processo de vida em série para posterior aplicação em escala de produção no processo melhorado que será desenhado com base na saída dos parâmetros otimizados, objeto desta pesquisa. Isto feito com base sólida na robustez de Cpk em níveis seis sigma e combinação das linhas de trabalho DMAIC na prototipagem atual e no processo futuro.

2.1 ASPECTOS GERAIS

A fase inicial de prototipagem foi feita em uma linha de usinagem do comprimento total do pistão, a qual usa máquinas dedicadas em configuração *Transfer* ENG C, figura 3, com volume de produção de 6.000.000 de pistões de média anual. A máquina ENG C que será usada na fase de testes experimentais iniciais estará, como premissa, com todas as folgas controladas dentro de parâmetros de TPM já estabelecidos. Uma análise preliminar do processo será conduzida para investigar causas de variação ligadas ao equipamento.

Figura 2 - ENGC usada para experimentação em escala piloto



Fonte: O Autor 2021

Este processo conta com uma usinagem em único passo simultâneo nas duas extremidades do pistão feito com ferramenta especial de material PCD. A refrigeração da usinagem é feita com fluido de corte a 6% de concentração volumétrica e o tempo de exposição, tempo efetivo de contato entre a ferramenta e a peça é muito rápido. Do ponto de início da usinagem até a saída da ferramenta tem-se como corte efetivo apenas 10 segundos.

A aplicação do fluido de corte é feita por um método Niágara com pouca pressão de aplicação, volume normal de vazão do fluido e temperatura não controlada. Todos estes fatores que compõe a aplicação de refrigeração durante o corte são elementos controláveis que farão parte do estudo simulado em delineamentos. Os acúmulos de cavaco na área de corte é um fator ruído afetando a troca de calor, a qual não é controlada.

Todos estes fatores que permeiam o fluido de corte, aplicação e pressão serão objeto da simulação com estágio inicial da experimentação alvo desta pesquisa. Isto será feito como projeto piloto no processo atual.

O material de composição dos componentes aqui estudados é o alumínio de liga especial 4032 T6, o qual contém alta concentração de silício e magnésio. Este material tem boa performance por ter dureza e resistência muito boa com altíssima resistência à fadiga e ao esforço mecânico e baixo peso quando comparado com os ferrosos.

Contrastando com estas vantagens do alumínio em ligas especiais tem se o gradiente térmico como grande fonte de preocupação na busca de processo robusto. Assim, este estudo deve explorar o comportamento do alumínio em liga 4032 T6 na entrada da usinagem quando avaliado em diferentes condições de temperatura. Isto porque o arranjo da matriz deste material e sua correlação com o gradiente de dilatação térmica é hoje um ruído muito forte na composição da capacidade dos pistões. Atualmente a composição do Cpk no comprimento total e diâmetro do pistão estão abaixo de Cpk 1,00.

Portanto o fator temperatura, principalmente na matéria prima, e sua influência como elemento de variação no produto final é um fator chave. Acrescentando a este parâmetro objeto do estudo, os outros fatores que compõe esta usinagem: temperatura do fluido de corte, concentração do fluido de corte, vazão e pressão do fluido de corte, velocidade de corte, tipo e geometria da ferramenta, batimento de fuso da máquina, temperatura da matéria prima e temperatura do meio de medição serão simulados. O acúmulo de cavaco na região de corte também será objeto de análise.

Como este projeto tem como premissa desenhar uma operação otimizada para fazer abrangência em outras *Transfers* similares, figura 4, e que consiga traduzir através dos parâmetros aqui citados e otimizados uma capacidade a longo prazo em níveis seis sigma, esta fase inicial deverá ser estendida e comprovada em larga escala.

Experimentação de comprovação será aplicada no novo processo desenhado nos moldes de projeto robusto. Este novo conceito trará, além da capacidade de processo em níveis competitivos para a satisfação do cliente e redução do desperdício

com inspeção e perda da oportunidade de negócio, uma maior disponibilidade e menor variação na produtividade.

Figura 3 - Linha Transfer que será usada como alternativa de teste



Fonte: O Autor 2021

Isto porque o projeto opera com 4 máquinas e operadores diferentes e pede uma maior estabilidade de processo para garantir os diversos fatores de variação e certa flexibilidade no atendimento do volume e atendimento ao cliente.

A experimentação em mapeamento DMAIC também trará a possibilidade de eliminar um possível investimento em novo maquinário, previsão inicial desta célula produtiva com custos ao redor de R\$ 3.000.000,00. O controle da temperatura nos 6M's do processo está sendo tomado como premissa de projeto e uma experimentação vai fundamentar a real influência destes fatores e a necessidade particularizada de cada elemento do processo. Isto trará a customização necessária em forma de equação do resultado programado.

2.2 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram tratados os principais conceitos ligados à redução de variação do processo, o que deve culminar no alcance dos objetivos traçados no *Project Charter* do capítulo 1.

Todos os conceitos de delineamento de experimentos e estatística de processo nos fatores de variação, os quais compõe o Cpk atual, vão nortear este trabalho nos passos seguintes para a efetivação dos resultados. Estes conceitos foram aqui mapeados em forma de evolução partindo de um pequeno projeto piloto que devem finalizar em uma implantação de produção em massa, 6 milhões de componente por ano.

No próximo capítulo serão abordados os referenciais teóricos que fundamentam a experimentação, o projeto robusto, a capacidade de processo e o controle estatístico do processo.

Este referencial vai explorar também o estado da arte das metodologias DMAIC e suas ferramentas em todas as suas particularidades.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

O Seis Sigma teve origem na Motorola em 1985 através da inserção da estatística na qualidade. Bill Smith, engenheiro da Motorola, fez as primeiras experimentações trabalhando no conceito da média e do desvio padrão. Em linhas gerais o sigma mede a variação e o número de defeitos é inversamente proporcional ao valor sigma. Quanto maior o sigma menor será o número de defeitos. É um sistema flexível e compreensível, sustentando e maximizando o sucesso do negócio. É direcionado pelo entendimento pleno das necessidades do cliente, Franchetti (2015).

Segundo Basem (2006) Seis Sigma é um programa disciplinado ou uma metodologia para melhorar a qualidade em todos os aspectos de produtos e serviços da organização.

As empresas, na sua grande maioria, operam com quatro sigma em seus processos, isto monta mais que 6.000 defeitos. A meta trazida com a metodologia seis sigma é de 3.4 defeitos por um milhão de oportunidades.

Stamatis (2002) cita que a filosofia Seis Sigma se tornou cada vez mais popular nos ramos da qualidade e especialmente na indústria eletrônica.

O principal objetivo do Seis Sigma é permitir às organizações uma melhora na imagem corporativa, acelerar a habilidade de adaptação a ambientes de negócio cada vez mais competitivos. Também tem como objetivos principais o aumento da competitividade do negócio através da redução do custo operacional e, mais importante, o aumento da satisfação do cliente através da melhoria na qualidade e entrega consistente, Basu (2009).

Segundo Breyfolge (2003) os custos da qualidade podem afetar drasticamente um negócio, problemas importantes ficam frequentemente escondidos. Técnicas Seis Sigma bem aplicadas podem ajudar a entender os problemas que afetam os custos.

Após a origem na Motorola o Seis Sigma foi aperfeiçoado na GE, a qual é a companhia onde a metodologia incubou e se desenvolveu em sua plenitude. Mais recentemente, nos últimos anos, o Seis Sigma tem sido usado na busca da eficiência operacional das companhias.

Alguns fatores fazem com que o Seis Sigma se diferencie das práticas tradicionais, em especial ao TQM, gerenciamento da qualidade total e são:

- Priorização das práticas estatísticas e de medição;
- Plano de treinamento rigoroso em todos os níveis do negócio (do Champion até os *White Belts*);
- Conjunto de ferramentas integradas (DMAIC) para a solução de problemas;
- Reforço dos princípios de Juran (Liderança da alta gestão, educação continuada e plano anual de economia).

Em aplicações recentes os programas Seis Sigma integraram na filosofia *Lean* Seis Sigma. Isto com a integração do Seis Sigma com as ferramentas *Lean*. O *Lean* trata o conceito do valor agregado ao consumidor. Usa o conceito da redução de desperdícios e maximiza a agregação de valor ao cliente final. Os objetivos comuns do Seis Sigma e do *Lean* Sigma são a eliminação de desperdícios e melhoria da capacidade de processo.

Arthur (2007) considera o *Lean* Seis Sigma como um casamento harmonioso óbvio onde o Seis Sigma fica com a incumbência de corrigir processos individuais e o *Lean* ajusta a conexão entre os processos

As Ferramentas de processo do *Lean* complementam os conceitos da estatística de processo do Seis Sigma. A integração destas ferramentas no *Lean* Sigma permite a excelência operacional que compreende a entrega de valor agregado do sistema.

A vertente japonesa trouxe muita contribuição na filosofia tanto *Lean* quanto Seis Sigma e, entre os maiores contribuintes neste processo, pode-se citar Genichi Taguchi e seus métodos.

Taguchi foi o mais importante contribuinte nas técnicas de experimentação que avaliavam o impacto de muitos parâmetros numa saída comum, método Taguchi, visão de controle da qualidade focada na função perda de Taguchi.

O Método Taguchi, em sua essência, melhora a qualidade através dos parâmetros e desenho de tolerâncias e monitora o nível de qualidade usando controle estatístico de processo (CEP).

Taguchi defende uma estratégia da qualidade em três estágios:

- Desenho do sistema, o qual trata o desenvolvimento de um sistema simples que envolve experimentação com material e teste de viabilidade de prototipagem.
- Projeto de parâmetros, o qual estabelece níveis ótimos de fatores de controle. Produtos ou processos menos sensíveis aos efeitos de mudanças das condições.
- O desenho de tolerância com valores numéricos para níveis de serviço nos limites superior e inferior aceitáveis.

Três estágios no desenvolvimento da qualidade são tratados por Taguchi. Sua função de perda determina o nível de qualidade, os desenhos de tolerância e parâmetros melhoram os níveis de qualidade de forma efetiva em relação aos custos e, finalmente, monitora a performance da qualidade usando controle estatístico de processo e *feedbacks*.

Taiichi Ohno, por outro lado, desenvolveu um novo método de manufatura inicialmente chamada produção enxuta.

O *Lean* teve origem na indústria japonesa e, segundo Basu (2009) foi popularizado por Womack et al (1990) no livro *A Máquina Que Mudou o Mundo*. *A Máquina Que Mudou o Mundo* é essencialmente a história do método Toyota de fabricar automóveis. Este método agregou técnicas de manufatura que usavam o *just in time*, ou seja, a produção puxada pela necessidade do cliente e sem estoques. Uso da ferramenta Kanban, a qual permitiu o gerenciamento visual das demandas ao longo do fluxo de processo evitando distúrbios.

Com a prática puxada os lotes ficaram menores e houve a necessidade de mais *setups* o que trouxe a necessidade de trocas cada vez mais rápidas e a adoção do SMED.

Os operadores tiveram que ser treinados para assumirem papéis de maior responsabilidade e tornar os processos auto gerenciáveis. Isto trouxe as técnicas de TPM e 5S.

O procedimento comum para a estruturação do projeto *Lean Seis Sigma* é o DMAIC. O DMAIC é um procedimento estruturado em cinco etapas para solução de

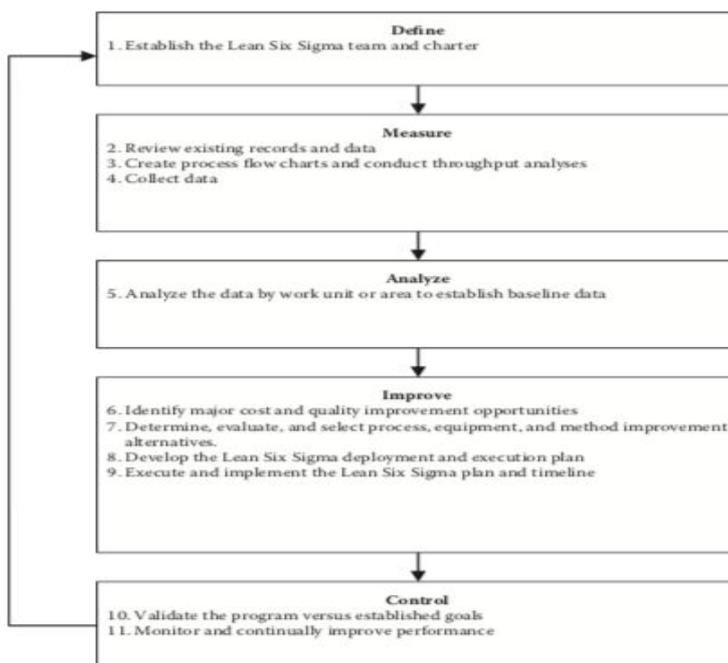
problemas. Pode ser usado na implementação de soluções que são planejadas para resolver causa raiz e problemas de processos. Estabelece também boas práticas para assegurar que as soluções são permanentes e podem ser replicadas em outras operações relevantes do processo.

O DMAIC é, portanto, um conjunto de ferramentas estruturadas para solução de problemas e comumente associada às atividades Seis Sigma, embora possa ser usado em projetos independentes da metodologia Seis Sigma, procedimentos mais generalistas, Basu (2009).

Projetos *Lean* que focam na redução do tempo de ciclo, melhora dos entregáveis e eliminação de desperdícios podem ser conduzidos facilmente e com efetividade através do DMAIC. O DMAIC compõe-se em cinco etapas: *Define, Measure, Analyze, Improve e Control*, figura 05.

Montgomery (2009) destaca o DMAIC como um método estruturado para a solução de problemas largamente usado em processos de melhoria e associado às atividades Seis Sigma.

Figura 4 - DMAIC



Fonte: Franchetti 2015

O DMAIC prioriza o pensamento criativo sobre o problema e suas soluções dentro da definição do produto, processo ou serviço original. Quando, entretanto, há

necessidade de reprojetar a fase *Improve* se transforma em *Design*. Neste caso o DFSS será apropriado.

Uma das premissas que tornam o DMAIC um caso de sucesso é o seu foco em poucas ferramentas, o que o torna prático.

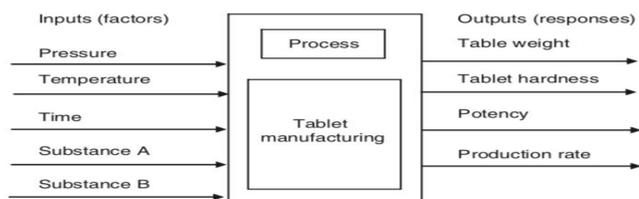
O entendimento do projeto é a parte mais importante em seu ciclo de vida. Cria as bases para a gestão de outros sub-processos do projeto. No contexto de Seis Sigma ou programa de excelência operacional a metodologia DMAIC é tida como base para o ciclo de vida do produto ou processo. O estágio *Define* forma uma base para que os passos subsequentes sigam uma metodologia estruturada e expectativa de padrões de qualidade.

As ferramentas da fase *Define* são preliminares para a coleta de dados que influenciam na gestão do projeto na fase inicial. As ferramentas mais importantes desta fase são o diagrama IPO, o diagrama SIPOC, o fluxo de processo, a carta de projeto e as CTQs.

O diagrama IPO, conhecido como diagrama geral de processo, fornece uma representação visual do processo. Define um processo mostrando as relações entre as entradas e as saídas. As entradas e saídas do IPO são conhecidas como fatores e repostas respectivamente.

O processo IPO é muito utilizado para definir o processo como uma atividade para transformar as entradas a fim de gerar as saídas. É um mapeamento de alto nível que precede os diagramas de fluxo, mapeamento de processo e delineamento de experimentos (DOE) para entender os processos e sub-processos relacionados, figura 06.

Figura 5 - Diagrama IPO



Fonte: Basu 2009

O SIPOC é um mapeamento de alto nível para visualizar a direção da satisfação de requisitos específicos do cliente ao longo da cadeia de fornecimento.

Fornecedor: pessoa ou companhia que provém a entrada do processo (matéria prima, mão de obra, máquinas, etc);

Entrada: o material, mão de obra, máquinas e informações requeridas para o processo;

Processo: os passos internos necessários para transformar as entradas em saídas;

Saídas: o produto (bens ou serviços) entregues ao consumidor;

Consumidor: o receptor do serviço ou produto, pode ser externo ou interno.

O SIPOC é comumente usado durante a etapa de coleta de um projeto na fase *Define* do DMAIC, figura 07.

Figura 6 - SIPOC

SIPOC									
Who are the suppliers for our product or service?		What do the suppliers provide to my process?		What are the start and end point of the process associated with the problem and the major steps in the process?		What product or service does the process deliver to the customer?		Who are the customers for our product or service? What are their requirements for performance?	
Suppliers		Input		Process (high level)		Output		Customers	
1		1		Start point:		1		1	
		2						2	
		3						1	
2		1		Operation or activity		3		2	
		2						1	
		3						2	
3		1		1		4		1	
		2		2				2	
		3		3				1	
4		1		4		5		2	
		2		5				1	
		3		6				2	
				7		6		1	
				8				2	
				9					
				10					
				11					
				End point:					

Fonte: Terra 2016

O fluxo de processo é uma representação visual de todos os passos principais do processo. Ajuda a entender melhor um processo através da identificação do fluxo atual ou da sequência de custos em processo de produto ou serviço, figura 08. Um fluxo de processo varia de acordo com os detalhes requeridos em uma aplicação.

Um diagrama de processo pode ser aplicado para qualquer tipo de processo, qualquer coisa desde desenvolvimento de produto até os passos de venda, serviço e produto.

Permite que o time chegue ao consenso em relação aos passos do processo e na identificação de áreas críticas e problemáticas para implementação de melhorias. Serve, ainda, como meio de treinamento para entender o projeto como um todo.

As características críticas para a qualidade (CTQ's) são um conjunto de características do Seis Sigma que determinam os itens chave de entrega em um processo. Um exemplo pode ser um elemento de um desenho ou um atributo de um serviço que é crítico do ponto de vista do Cliente. As CTQ's são usadas durante a coleta de dados do estágio *Define* em um projeto de melhoria.

Após o estabelecimento do cliente, quem ele é, a equipe de projeto deve determinar as necessidades e requisitos do Cliente. As necessidades do Cliente se traduzem em saída de processo. Os requisitos do Cliente são as características que determinam se o Cliente está satisfeito ou não com uma entrega. Isto constitui as CTQ's e uma árvore de CTQ's ajuda a identificar o que é crítico primordial.

O *Project Charter*, carta de projeto, é um documento de trabalho que define os termos de referência de cada projeto Seis Sigma. Pode assegurar o sucesso de um projeto especificando os recursos necessários e o escopo limitante que irá garantir o sucesso, figura 08.

O estágio *Measure* assegura o direcionamento, roteiro que mostra o caminho, é importante e se inicia na carta de projeto. Mesmo bons roteiros podem se perder caso não haja definição clara de onde se está no momento. Portanto é importante saber o estágio atual com dados fidedignos. As ferramentas de medição têm este papel.

A fase de medição torna as ideias e objetivos da carta de projeto em um projeto estruturado. Nesta fase são desenvolvidas as principais opções de melhoria do projeto. As principais ferramentas que cobrem a fase *Measure* são: folha de verificação, histograma, séries temporais, diagrama de causa e efeito, diagrama de dispersão, gráfico de Pareto, carta de controle, carta de fluxo de processo e capacidade de processo.

Figura 7 - Project Charter (Carta de Projeto)

Exemplo de <i>Project Charter</i> ^{3,4}	
FIGURA 5.2	
Redução das perdas de produção por parada de linha na Fábrica I.	
Descrição do problema	<p>Na Fábrica I, as paradas de linha são apontadas pela área de manufatura como um dos maiores problemas na rotina de trabalho, invalidando o planejamento para as operações diárias.</p> <p>No ano 2011, o valor médio mensal das perdas de produção decorrentes das paradas de linha foi muito alto e, além disso, o problema vem apresentando uma tendência crescente.</p> <p>As principais perdas econômicas resultantes do problema em 2011 foram as perdas de faturamento por produtos não entregues aos clientes no prazo previsto (R\$ 1.100.000,00) e os gastos com horas extras, transporte e alimentação dos funcionários para recuperação da produção (R\$ 335.000,00).</p>
Definição da meta	Reduzir em 50% as perdas de produção por parada de linha na Fábrica I, até 30/12/2012.
Avaliação do histórico do problema	Anexo I
Restrições e suposições	<p>Os membros da equipe de trabalho deverão dedicar 50% de seu tempo ao desenvolvimento do projeto.</p> <p>Será necessário o suporte de um especialista do departamento de manutenção.</p> <p>Os gastos do projeto deverão ser debitados do centro de custo 01/PCP20, após autorização do "Champion" (de acordo com o procedimento WIZ).</p>
Equipe de trabalho	<p><u>Membros da equipe:</u> Axel Mahayana (Black Belt - líder da equipe), Denise Sampaio (montagem), Marlon Oliveira (engenharia industrial), Sandra Barbosa (PCP) e Arthur Santos (manutenção).</p> <p><u>"Champion":</u> Otávio Cerqueira (gerente da Fábrica I)</p> <p><u>Especialistas para suporte técnico:</u> Marcos Siqueira (manutenção) e Victoria Ryan (controladoria).</p>
Responsabilidades dos membros e logística da equipe	Anexo II
Cronograma preliminar	Define: 28/02/2012, Measure: 15/04/2012, Analyze: 30/06/2012, Improve: 30/08/2012 e Control: 30/12/2012.

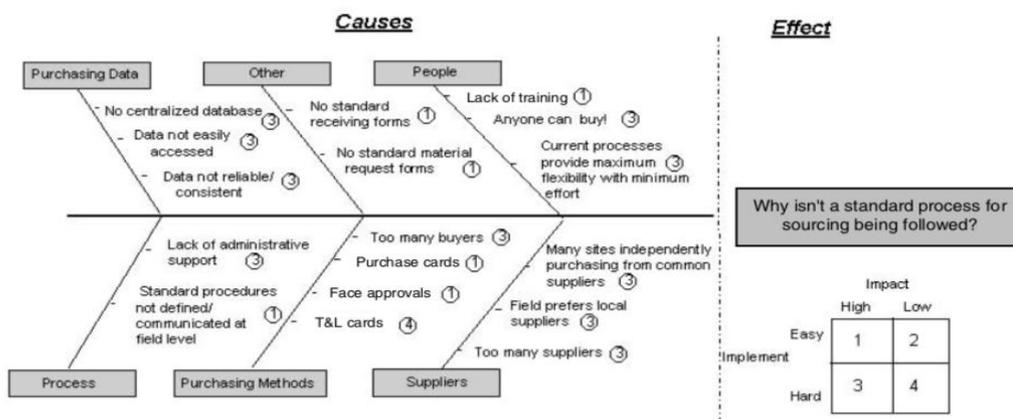
Fonte: Werkema 2012

As séries temporais tem um range extenso de aplicação para detectar tendências, variações ou ciclos. Permite fazer comparação de performance de um

processo antes e depois da implantação da solução. As aplicações incluem análise de vendas, relatório de desempenho e análise de sazonalidade.

O diagrama de causa e efeito é uma representação gráfica de potenciais causas por um dado efeito. Foi primeiramente usado por Ishikawa e daí ganhou seu nome. O principal objetivo deste diagrama é dar assistência ao *brainstorming* e possibilitar uma representação gráfica em detalhes da causa raiz do problema, figura 09.

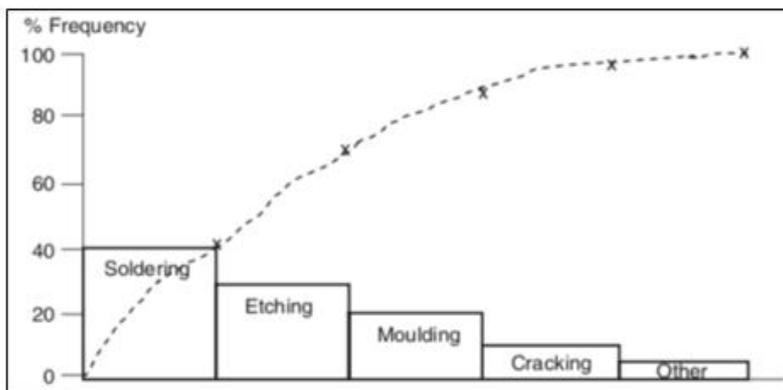
Figura 8 - Diagrama de Causa e Efeito



Fonte: Breyfolge 2003

O gráfico de Pareto é uma forma de gráfico de barras que ordena as barras do maior para o menor para priorizar os problemas. A premissa do Pareto é que 80% dos efeitos são originados em 20% das causas, figura 10.

Figura 9 - Gráfico de Pareto



Fonte: Basu 2009

As cartas de controle consistem de um gráfico com escala de tempo no eixo horizontal e as medições (médias ou amplitude) no eixo vertical. É uma ferramenta

gráfica base do CEP para determinar se um processo é estável ou não. Mostra e distingue causas comuns e causas especiais. Determina, ainda, os limites de controle inferior, média e limite superior, figura 11. As cartas podem ser atributivas ou cartas por variável.

As cartas de controle vêm da necessidade de controlar e monitorar processo para que entregue produtos com as características desejadas de forma consistente, prevenindo a entrega de defeitos.

De modo geral um processo recebe as entradas (matéria prima, informações, documentação), processa e entrega a saída demandada pelo cliente. O processo distribuído nos passos necessários é composto por parâmetros como velocidade, alimentação, temperatura, pressão, etc. Estes são os parâmetros de processo, os quais devem ser determinados em intervalos de variação ótimos para maximizar o resultado (DOE).

Uma vez determinados os limites nos parâmetros chaves, estes devem ser monitorados sob controle dentro de níveis desejados (CEP). Desta forma o controle de processo é determinado em dois estágios:

- Seleção dos parâmetros de processo através do planejamento de experimentos, e;
- Controle dos parâmetros de processo usando as cartas de controle.

As cartas de controle são também usadas para monitorar a entrega de um processo com consistência e repetição.

A carta \bar{X} (carta das médias) é a mais popular e controla a média e a variabilidade do processo. Trabalha com amostragem de 4 ou 5 amostras por coleta, as quais são retiradas em intervalos regulares. Os limites de controle neste modelo de carta são alocados com três desvios padrão para baixo e três desvios padrão para cima do nominal.

A carta R mede a consistência na variabilidade do processo ao longo do tempo. A carta \bar{X} mede a consistência das médias do processo ao longo do tempo.

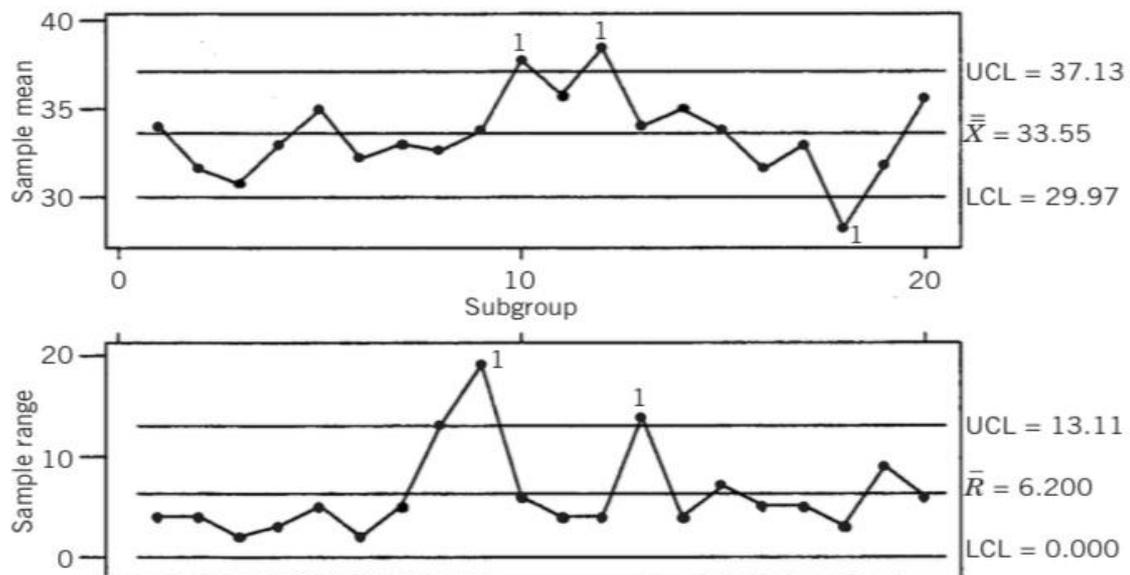
Se os valores \bar{X} e R estiverem dentro dos limites, então, os limites estabelecidos podem ser usados para controle futuro. Se estes valores não estiverem dentro dos

limites, então os valores de $\bar{X} - R$ que estiverem fora dos limites podem ser removidos. Isto após as causas responsáveis por este desvio serem identificadas e eliminadas. Então novos limites devem ser calculados com os dados remanescentes Kirsh (2018)

A carta \bar{X} -s é outro tipo de carta para variáveis onde o tamanho de amostras é maior que 8 ou 10 peças por subgrupo. O desvio padrão de cada subgrupo é usado para indicar a variação do processo ao invés da amplitude usada na carta $\bar{X} - R$. Isto porque o desvio padrão é uma medida melhor quando o tamanho de amostras é maior.

A Carta de amplitude móvel individual IMR, outro modelo de carta por variável largamente usado, é útil quando a coleta de dados é mais custosa e ocorre com frequência muito baixa, o que tomaria muito tempo e recurso para obter dados com amostragem significativa, Kubiak (2014).

Figura 10 - Carta de Controle



Fonte: Breyfolge 2003

A medição da capacidade de processo estima a reprodutibilidade inerente de uma saída de um processo. Uma medida comum da capacidade do processo é dada pelo índice de capacidade (C_p).

Depois do entendimento e definição do processo feita na fase *Define* e depois que a linha base do desempenho foi documentada e validada na fase *Measure* é, então, feita uma análise profunda do processo através da etapa *Analyze*.

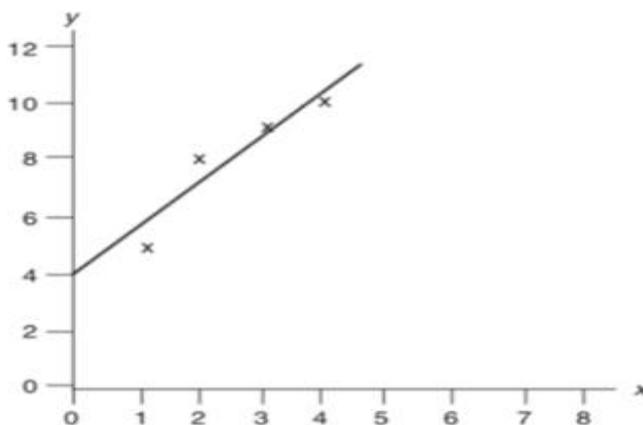
Nesta etapa as ferramentas e técnicas são aplicadas para determinar e validar a causa raiz. O objetivo é determinar todas as fontes de variação e diferenciar entre causas comuns e causas especiais.

Os dados coletados na fase *Measure* são examinados para priorizar e gerar uma lista de fontes de variação. As principais entregas da fase *Analyze* são: Uma lista priorizada de variáveis, importantes fontes de variação e causas especiais em particular; oportunidades financeiras quantificadas, os benefícios financeiros esperados pela conclusão do trabalho. Para desenvolver esta etapa são comumente usados, entre outras, o mapeamento de processo, análise de regressão, análise de SWOT, análise de cinco porquês, diagrama de interrelação e OEE.

Algumas ferramentas das etapas anteriores, *Define* e *Measure*, são aqui revisitadas (diagrama de dispersão, diagrama de causa e efeito, Pareto e carta de controle). A fase *Analyze* também depende de técnicas avançadas incluindo o CEP, FMEA e DOE.

A análise de regressão é uma ferramenta usada para estabelecer o melhor ajuste linear relacionando duas variáveis. É também usada para prever base de previsão de uma variável em função de determinado parâmetro de processo, figura 12.

Figura 11 - Análise de Regressão



Fonte: Basu 2009

A técnica dos cinco porquês faz cinco perguntas sucessivamente com o intuito de investigar a causa do problema em profundidade. É largamente usada para

analisar problemas na manufatura e em serviços. O objetivo principal é tomar ação na causa raiz ao invés de tratar os efeitos.

As fases do projeto, particularmente a fase *Analyze*, apontam as áreas para melhoria. Durante a fase *Improve* as ideias e soluções são postas em prática. Várias opções são comparadas para determinar a solução que maximize o resultado. Alguns experimentos e protótipos são requeridos para validar a melhor solução. Finalmente a solução escolhida será aplicada em um piloto de pequena escala no ambiente de negócio.

Os objetivos das ferramentas da fase *Improve* são de ajudar o time a desenvolver uma solução para melhorar o desempenho do processo e confirmar que a solução proposta irá atender ou superar as metas de melhoria da qualidade.

As entregas principais da fase *Improve* são a solução proposta, solução para reduzir variação ou eliminar as causas especiais de um problema no processo. Validar a solução, melhorar o processo que foi pilotado em um ambiente real do negócio.

As ferramentas mais importantes da fase *Improve* são: diagrama de afinidade, SMED, cinco S, poka yoke, VSM, *Brainstorming*, mapa mental e diagrama de campo de forças. Outras ferramentas avançadas como DOE, QFD e FMEA podem ser usadas.

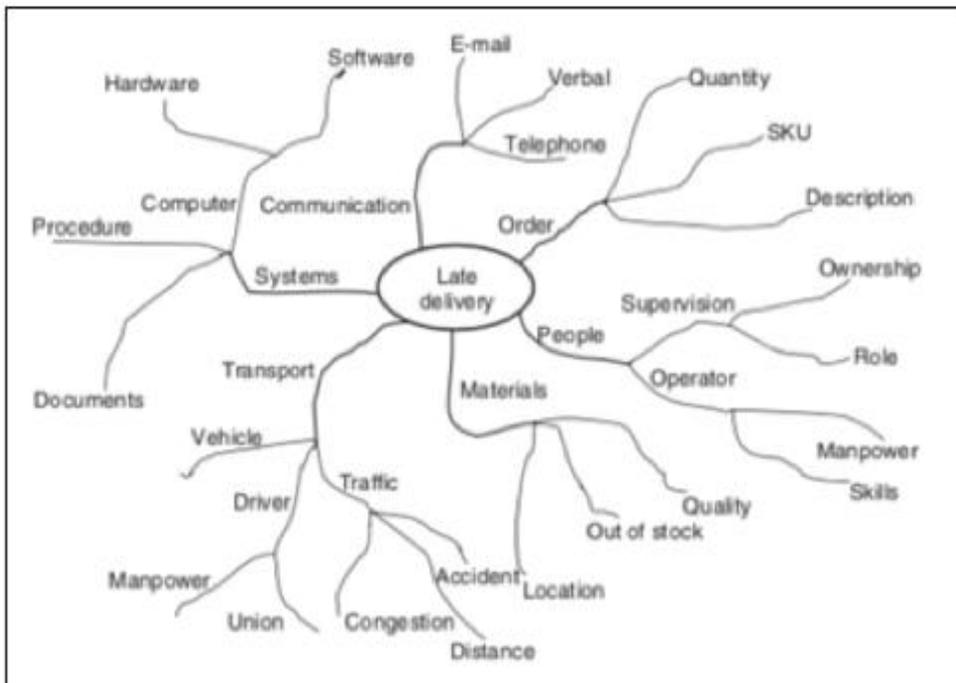
O VSM (mapa de fluxo de valor) é uma ilustração visual de todas as atividades requeridas para fazer um produto ou serviço desde a matéria prima até o cliente. Mapeamento do processo com o tempo de ciclo, paradas, estoque em processo, em uma forma gráfica que ajuda a visualizar o estágio atual de um processo e guia as futuras melhorias.

Brainstorming é uma ferramenta para gerar alto volume de ideias de forma criativa e eficiente, encorajando o time a pensar livremente. É aplicado quando uma solução de problema não pode ser encontrada pelos métodos quantitativos ou ferramentas lógicas. Funciona bem estimulando a sinergia do grupo. Uma ideia dispara outras ideias em cascata. É usada como um primeiro passo para disparar ideias e explorar opções.

O mapa mental é uma ferramenta de aprendizagem usada para ordenar e estruturar o pensamento individual ou coletivo em um tema específico. É comparado

com o diagrama de causa e efeito onde o efeito representa a imagem central, cada ramo representa as causas, figura 13.

Figura 12 - Mapa Mental



Fonte: Basu 2009

O DOE usado como ferramenta de simulação, principalmente nesta fase do DMAIC, pode ser tido como ferramenta de interrogação do processo enquanto outras técnicas avançadas como o CEP escutam o processo. O DOE tornou-se uma das mais importantes técnicas em um processo seis sigma. Sua origem data da década de 20 quando R. Fischer aplicou análises estatísticas complexas na pesquisa agropecuária.

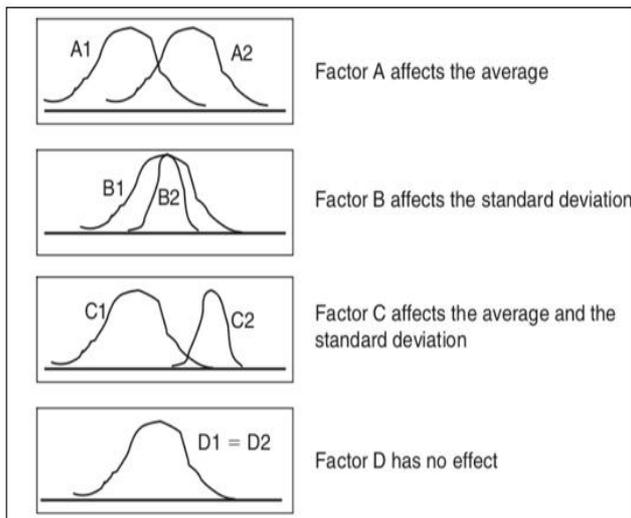
Os trabalhos de Genichi Taguchi em projeto experimental durante os anos 70 são tidos como a base para o planejamento de experimentos como é atualmente. Taguchi considera o projeto sob três perspectivas: projeto do sistema, projeto dos parâmetros e projeto das tolerâncias, Basu (2009).

O DOE é uma série de técnicas que envolve a identificação e controle de parâmetros ou técnicas que têm impacto potencial na resposta de um processo. Tem como objetivo a otimização de um desenho ou processo. O experimento compreende a seleção de dois ou mais níveis de cada variável e, então, a simulação do processo

com estes níveis. Como um componente essencial de um projeto seis sigma avançado e, em particular, nos projetos DFSS (*Design for Six Sigma*) ajuda a identificar os efeitos de vários tipos de fatores, figura 14.

Staudter (2013) menciona a experimentação clássica com análise de valores médios e avaliação da variância da resposta. Desta forma os fatores responsáveis pela variação podem ser reconhecidos e reduzidos significativamente a sua variação.

Figura 13 - DOE (Identificação de tipos de fatores)



Fonte: Basu 2009

A Fase *Control* tem como objetivo a implantação da solução, assegurar que a solução é perene e dissimular as lições aprendidas dos projetos de melhoria por toda a organização.

Com este enfoque os projetos criam bons resultados. As melhores práticas de uma parte da organização são rapidamente dissimuladas em projetos conduzidos em outras partes da organização.

Entre as principais entregas da fase *Control* estão a documentação de projeto, relatório detalhado de todos os aspectos primordiais do projeto; nivelamento de boas práticas, transferência dos aspectos primordiais aprendidos e que podem ser adotados em outros projetos. Sustentação da solução, processo completamente implementado e documentado em um plano de controle para assegurar a sustentabilidade ao longo do tempo.

As principais ferramentas da fase *Control* incluem o gráfico de Gannt, diagrama de rede, gráfico de radar, ciclo PDCA e EVM (gestão de valor aprendido). Algumas ferramentas das fases anteriores podem ser implementadas, carta de controle por exemplo. A fim de garantir a sustentabilidade outras técnicas quantitativas como BSC são usadas na fase *Control*.

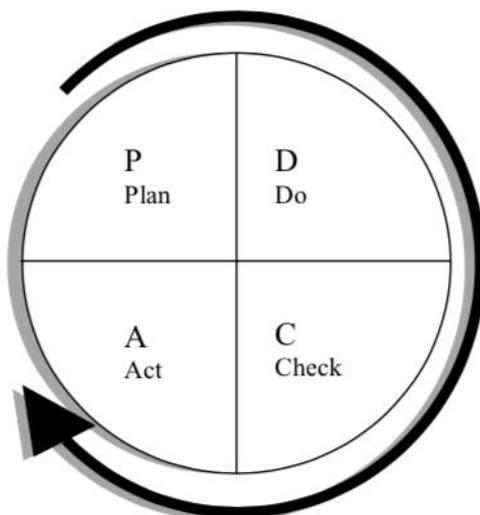
O diagrama de rede é uma ferramenta de controle que determina e monitora o caminho crítico (CPM) e é um cronograma otimizado para a conclusão do projeto.

O diagrama de rede é uma representação gráfica que mostra uma descrição sintetizada de todas as tarefas, sua sequência, expectativa de conclusão e os trabalhos que podem ser feitos em paralelo. É também tratado, com algumas variações, como PERT.

O Ciclo PDCA é efetivamente aplicado tanto na execução de tarefa quanto na gestão de programa. O nível de aplicação do PDCA depende da capacidade de auto gestão dos operadores e o treinamento aumenta esta capacidade de auto gestão.

O PDCA permite dois tipos de correção: temporária e permanente. As ações temporárias trazem resultados através da correção de problemas e as ações permanentes, por outro lado, consistem em investigar e eliminar a causa raiz. Esta traz sustentabilidade e processo de melhoria, figura 15.

Figura 14 - Ciclo PDCA



Fonte: Basem 2006

Esta ferramenta traz sustentabilidade e processo de melhoria.

3.1 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

No capítulo 3 foram abordados de forma funcional e em forma progressiva um projeto seis sigma nos passos DMAIC e apresentado uma breve ideia de cada uma das ferramentas primordiais em cada etapa.

As ferramentas e técnicas mais relevantes para o desenvolvimento deste trabalho foram enfatizadas, com as análises estatísticas do processo, máquina e meio de medição através das cartas de controle e capacidade. Entre as técnicas estatísticas foi enfatizado o planejamento de experimentos como o recurso diretriz no entendimento dos diversos fatores envolvidos e determinantes para o problema aqui em análise.

As análises econômicas, de investigação de causa raiz e de levantamento de dados também tiveram enfoque através das ferramentas de fluxo de processo, 5 porquês, Pareto, histograma e séries temporais.

No próximo capítulo será desenvolvido o projeto na prática com as análises de prototipagem, implantação da solução e planejamento, projeto de parâmetros otimizados para a futura instalação no processo.

4 DESENVOLVIMENTO

Este capítulo apresenta a implantação do método Seis Sigma com as ferramentas de melhoria aplicadas ao longo da metodologia DMAIC utilizando e detalhando todos os principais recursos usados em todas as etapas do projeto de pesquisa conforme proposto no planejamento e amplamente levantado no referencial teórico.

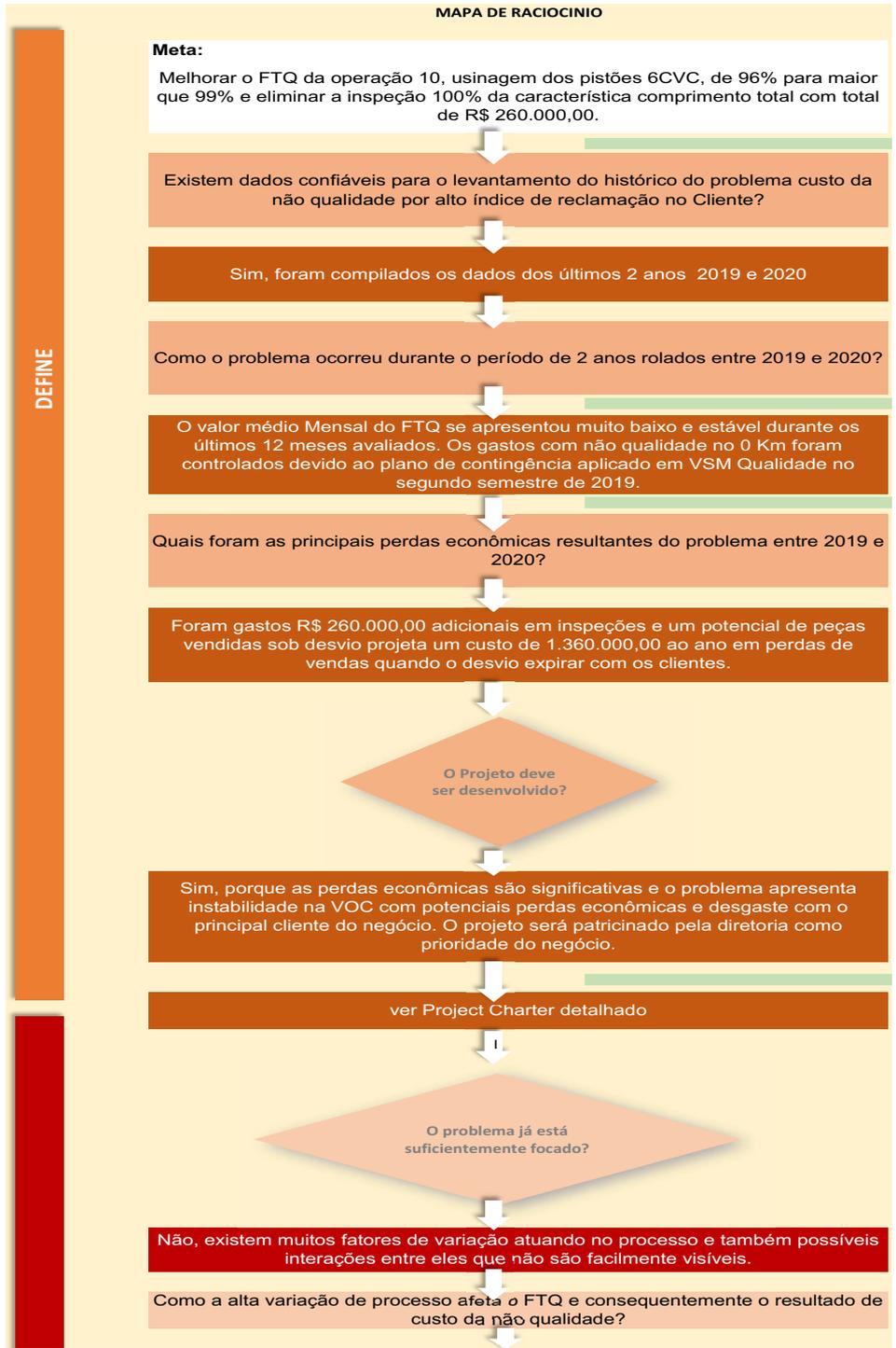
Todos os objetivos desenhados no capítulo 2 que incluíram o levantamento do problema de projeto, tratamento do escopo de trabalho e planejamento dos resultados esperados foram amplamente explorados e delineados na metodologia científica do capítulo 3.

O problema de pesquisa selecionado como objeto de trabalho foi desenrolado e estudado desde a fase *Define* até a fase *Control* da metodologia DMAIC. Tiveram em cada etapa aplicações de diferentes soluções de estatística, planejamento, investigação, implantação de soluções em escala piloto, validação das soluções, implantações de melhoria em escala de produção, validação a longo prazo e controle. Este planejamento e mapeamento dos eventos ao longo do DMAIC foi feito através de Mapa de Raciocínio, figura 16.

O Mapa de Raciocínio abrangeu e atendeu todos os passos de levantamento da oportunidade de projeto, seleção do projeto foco do trabalho dentro da organização, execução dos eventos ao longo de sua progressão, validações necessárias em cada etapa e adoção dos controles. O Mapa foi estruturado em cada fase para fazer o alinhamento das ferramentas e as saídas de cada passo do método DMAIC.

Durante o período de planejamento e levantamento dos dados iniciais deu-se muita ênfase na satisfação do cliente através dos dados de processo. Os indicadores de processo foram amplamente discutidos dentro do grupo de trabalho e compartilhado com a direção da empresa a fim de maximizar os resultados na etapa inicial dos trabalhos. Estes indicadores foram coletados inicialmente com dados históricos de 12 meses para dar base de sustentação e viabilizar o esforço de melhoria.

Figura 15 - Mapa de Raciocínio do Projeto



Fonte: O Autor 2021

Durante a fase *Define* foram feitas as considerações iniciais para seleção, priorização e aporte necessário para o desenvolvimento do projeto. Partiu-se de um *Business Case* de negócio que trouxe a necessidade mais urgente de melhoria e atendimento de um dos principais clientes da organização, figura 17.

Figura 16 - Business Case do Projeto (Fase Define)

PROJETO LEAN SEIS SIGMA - BUSINESS CASE	
Título: Aumento do FTQ da operação 10 nos pistões Mahle	Tipo: <input type="checkbox"/> GB <input checked="" type="checkbox"/> BB
Declaração do problema:	
<p>A empresa tem uma demanda de fornecimento de pistões forjados em alumínio para o mercado nacional e Europa, total de 450.000 peças por mês. Ao longo dos últimos dois anos tivemos perdas na operação 10. Foram contabilizados 160.000 peças rejeitadas no comprimento total que tiveram que ser separadas e vendidas sob desvio. Este total formou um FTQ de 96% nesta operação da usinagem.</p> <p>Outras perdas significativas foram os gastos com inspeção em muro da qualidade desta característica. O desempenho vem se mantendo ao longo do tempo nos patamares de 96% de FTQ, porém o cliente sinalizou que após 1 ano de desvios não aceitará mais as peças fora de medida.</p>	
Meta:	
Aumentar o FTQ para mínimo 99% e atingir Cpk maior que 1.67 em longo termo até 30/09/2021	
Ganhos resultantes do projeto:	
<p>Imediata redução de gasto com custo da não qualidade, R\$260.000/ano com muro da qualidade. Garantia de venda de 160.000 peças/ ano após o fim dos desvios, o que monta R\$1.360.000/ano em vendas diretas. O aumento da satisfação dos clientes será fundamental para que a organização possa manter market share no longo prazo.</p>	
Âmbito e restrições:	
Deverão ser considerados no projeto que os equipamentos para a plena implantação das melhorias da operação 10 estarão disponíveis no primeiro semestre de 2021.	

Fonte: O Autor 2021

Foi montado um *Project Charter* com todos os dados iniciais, premissas, restrições, recursos e previsão de resultados, figura 18. Uma análise dos *Stakeholders* foi desenvolvida dentro do negócio para trazer aderência dos principais influenciadores e, ao mesmo tempo, fazer um alinhamento base com o plano de negócio, missão e valores da companhia.

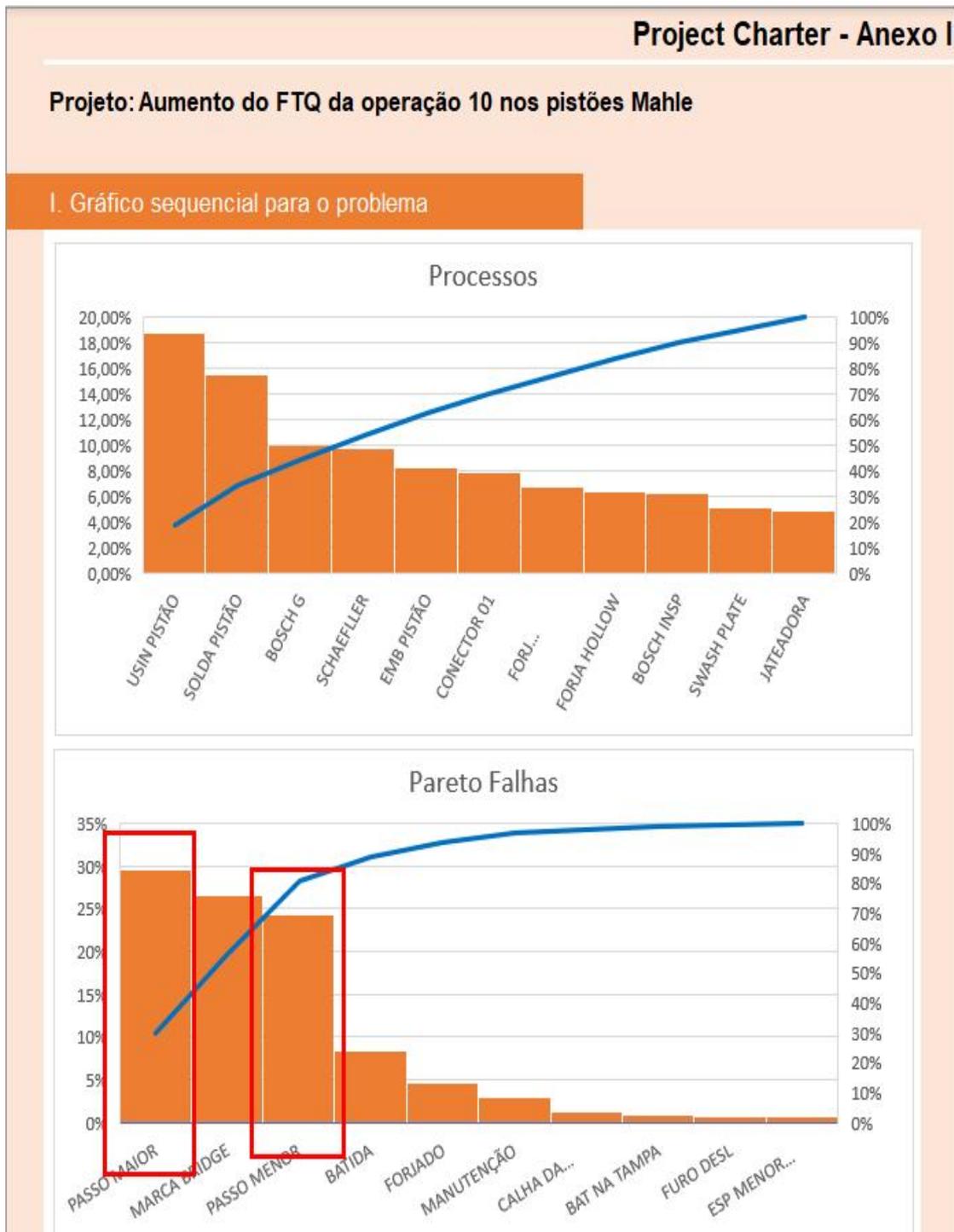
Figura 17 - Project Chart do Projeto

<i>Project Charter</i>					
Título: Aumento do FTQ da operação 10 nos pistões Mahle					
Descrição do Problema	<p>Na linha de forjaria e usinagem dos pistões para refrigeração temos as principais linhas de produtos da organização e onde tivemos as maiores perdas de recurso devido aos custos de não qualidade e todos os gastos a ele agregados na operação do processo. Dentro desta linha de produtos destacamos o 6CVC como o produto mais afetado.</p> <p>No ano de 2019 foram gastos um total de R\$ 680.000,00 com gastos de inspeção na linha de montagem devido a falhas geradas na usinagem nos pontos de operação 10 e 20 e na soldagem por fricção dos pistões. Quando comparado com anos anteriores o problema se mostrou crescente.</p> <p>No acumulado de 2020 foram gastos R\$250.000,00 em inspeções devido a variações na operação 10 que trabalhou com um FTQ de 96% em média durante o ano, houve também uma negociação com o cliente para absorver em lotes especiais sob desvio um total acumulado de 160.000 peças, o que soma um total de R\$ 1.360.000,00 em vendas.</p>				
Definição da Meta	Aumentar o FTQ da operação 10 para mínimo 99%, culminando na redução de custo de inspeção de R\$260.000,00 ao ano e eliminação dos devios que somam R\$1.360.000,00 ao ano, desvio que vale por 12 meses e, a partir da expiração, vai se converter em perda de vendas no montante acima citado.				
Avaliação do histórico do problema	Anexo I				
Restrições e Suposições	<p>Principal restrição para a plena implantação do projeto é a renovação de contrato com o cliente,</p> <p>Suposições: os equipamentos adicionais para reprojeto do processo de usinagem estarão disponíveis no primeiro semestre de 2021 para um re projeto da operação 10.</p>				
Equipe de trabalho	<p>Membros da equipe: Wilson da Trindade (Engenheiro da Qualidade líder da equipe), Gustavo Ramos (Analista de Qualidade - Pistões), Jhonatan (Supervisor de produção - Pistões), Ricardo Ramos (Engenheiro de Manutenção), Cleverson Santos (Engenheiro de Processo), Gustavo Ramos - Engenheiro de Processos).</p> <p>Champion: Clelton Santos (Gerente da Qualidade)</p>				
Responsabilidades dos membros e logística da equipe	Anexo II				
Cronograma preliminar	<p>Define:</p> <table border="0"> <tr> <td>Measure: nov/20</td> <td>Analyze: Dez/2020</td> <td>Improve: mar/21</td> <td>Control: Set/2021</td> </tr> </table>	Measure: nov/20	Analyze: Dez/2020	Improve: mar/21	Control: Set/2021
Measure: nov/20	Analyze: Dez/2020	Improve: mar/21	Control: Set/2021		

Fonte: O Autor 2021

Como elementos base para apresentação e sustentação do Project Charter deste projeto foram feitos os levantamentos do estado atual. Dados da voz do Cliente (VOC) e voz do processo (VOP), figura 19, foram levantados em intervalos de tempo de 12 meses e priorizados em análise de Pareto.

Figura 18 - Dados iniciais do processo (Pareto de priorização)



Fonte: O Autor 2021

Estes dados foram estratificados em dados financeiros, rejeitos e perdas, figura 20, e foi feita uma projeção de ganho com o projeto. Dados de variação de processo, os quais são as fontes da variação de desempenho de negócio também foram levantados.

Figura 19 - Dados econômicos e projeções (Fase Define)

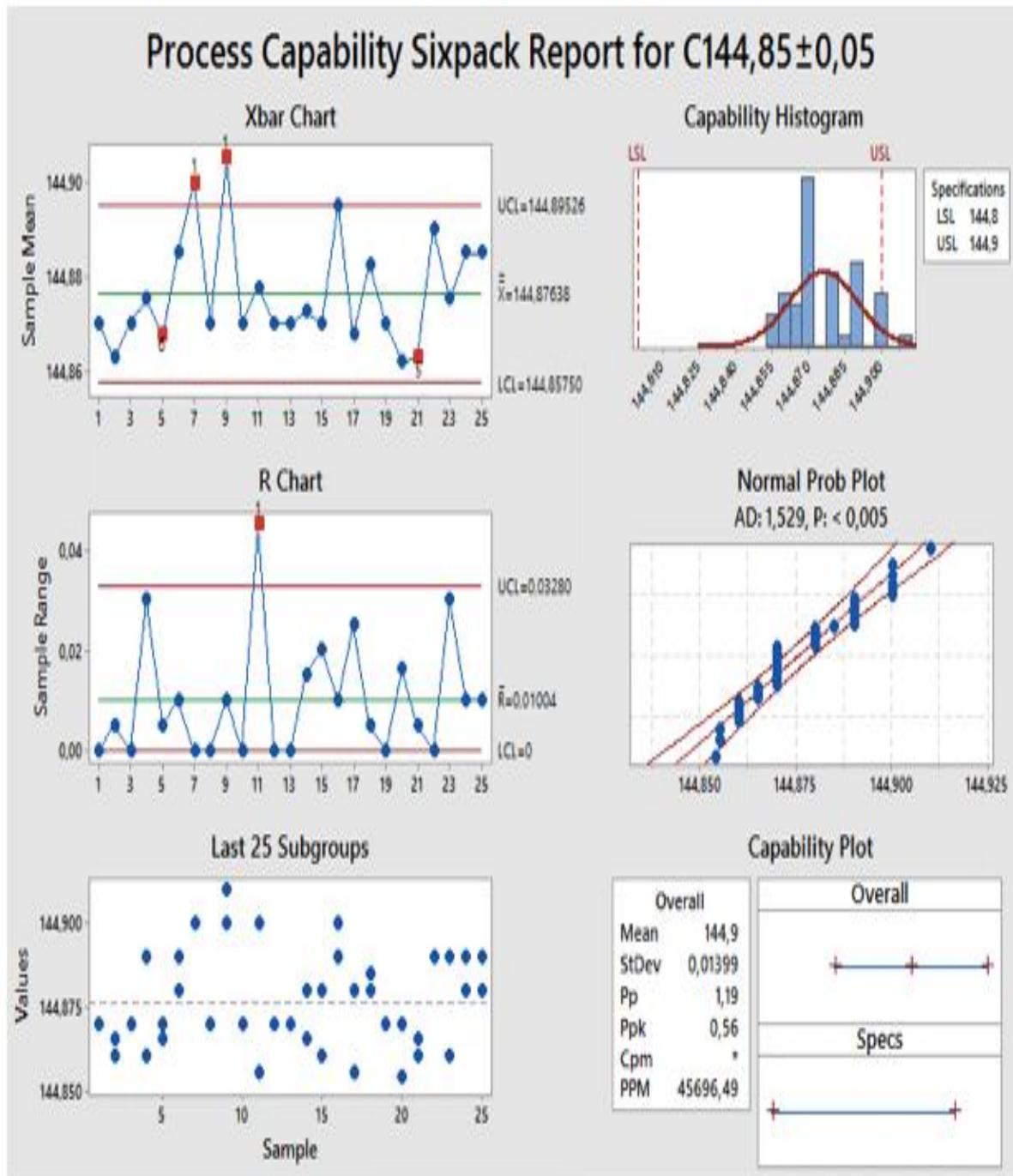


Fonte: O Autor 2021

Com os dados do *Project Charter* levantados e completamente detalhados foi iniciada a fase *Measure* do projeto. Um estudo de capacidade do processo atual foi feito para levantar o Cp e Cpk atual do processo a ser melhorado, figura 21. Foram coletados dados de curto prazo na máquina ENGC durante o mês de março de 2021. O processo se apresentou instável, não normalizado, com Cpk menor que 1,0.

Observou-se grande influência da temperatura de processamento, a qual não foi possível isolar durante o trabalho de capacidade.

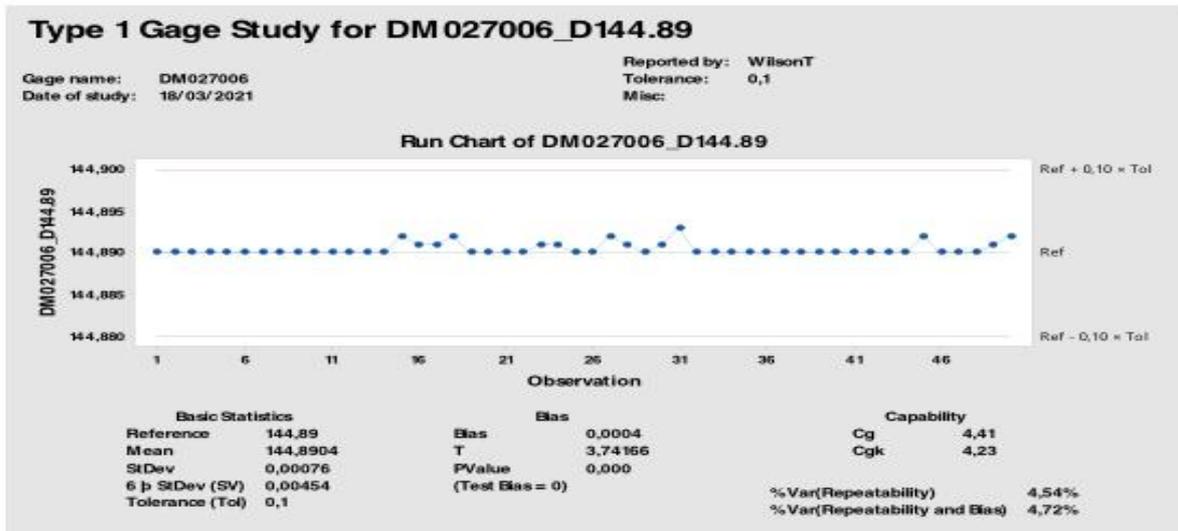
Figura 20 - Estudo de capacidade representativo do estado atual (Measure)



Fonte: O Autor 2021

Um estudo completo do instrumento de medição também foi feito antes da coleta de capacidade. Foram avaliados os estudos de Cgk, R&R e linearidade, figura 22. Estes estudos habilitaram o meio de medição como instrumento de avaliação em condições de operação conforme os padrões estabelecidos pela AIAG. Com os índices de Cg de 4,41 e Cgk de 4,23 foi possível dar sequência nos estudos de capacidade do instrumento de medição.

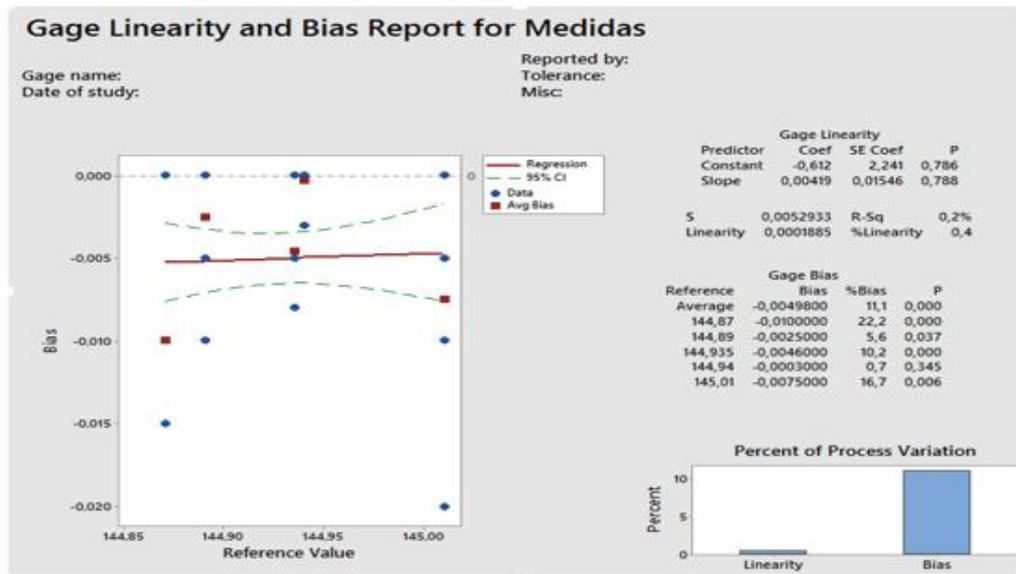
Figura 21 - Estudo de Cg/ Cgk do instrumento usado no processo



Fonte: O Autor 2021

Durante a validação do meio de medição foi avaliado a linearidade do instrumento. Foi obtido um índice de 0,4% na linearidade e um p valor de 0,788 garantiu a aceitação da hipótese nula o que indicou forte tendência de linearidade, figura 23.

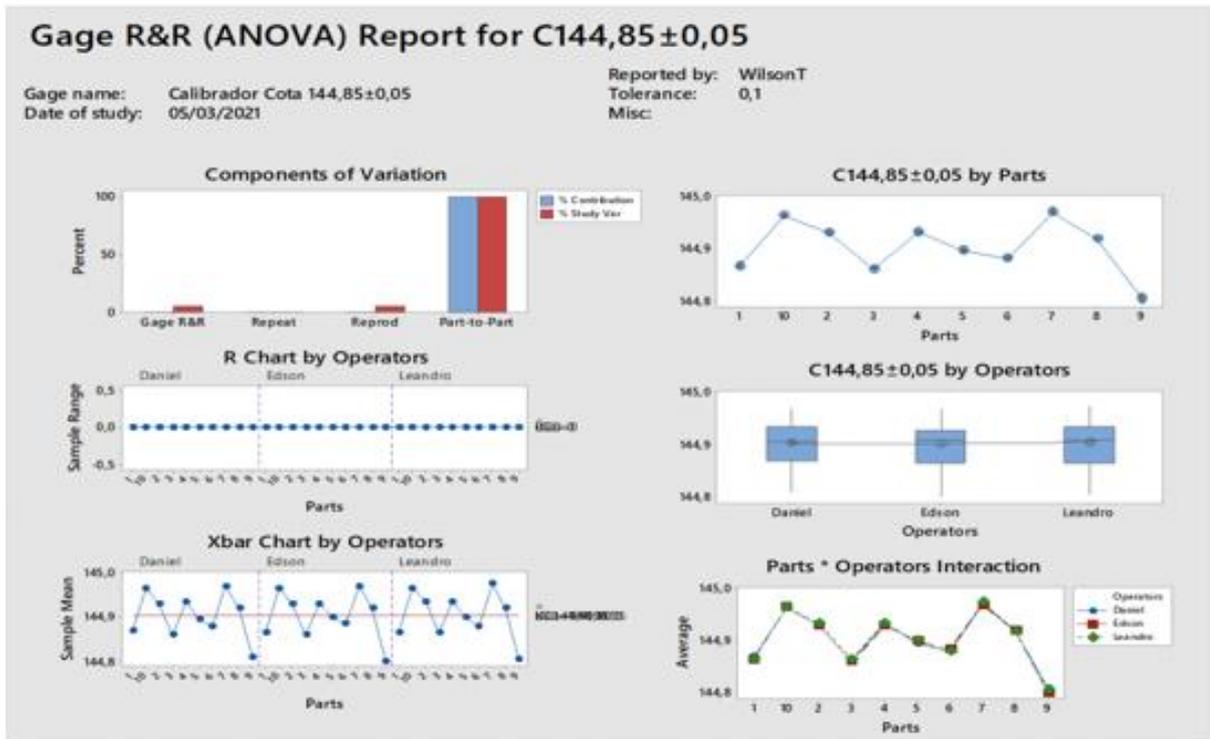
Figura 22 - Estudos de linearidade do instrumento usado no processo



Fonte: O Autor 2021

Foi então feito um estudo de R&R com três operadores representativos do processo atual. Foi obtido um R&R de 5,62% e um número de categorias distintas de 25, bem maior que o limite mínimo aceitável de 5, figura 24.

Figura 23 - Estudo de R&R do instrumento usado no processo



Gage R&R Variance Components

Source	VarComp	Contribution of VarComp
Total Gage R&R	0,0000083	0,32
Repeatability	0	0
Reproducibility	0,0000083	0,32
Operators	0,0000002	0,01
Operators*Parts	0,0000081	0,31
Part-To-Part	0,0026303	99,68
Total Variation	0,0026386	100

Gage Evaluation

Source	StdDev (SD)	Study Var (6 × SD)	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	0,0028868	0,017321	5,62
Repeatability	0	0	0
Reproducibility	0,0028868	0,017321	5,62
Operators	0,0004303	0,002582	0,84
Operators*Parts	0,0028545	0,017127	5,56
Part-To-Part	0,0512862	0,307717	99,84
Total Variation	0,0513674	0,308204	100

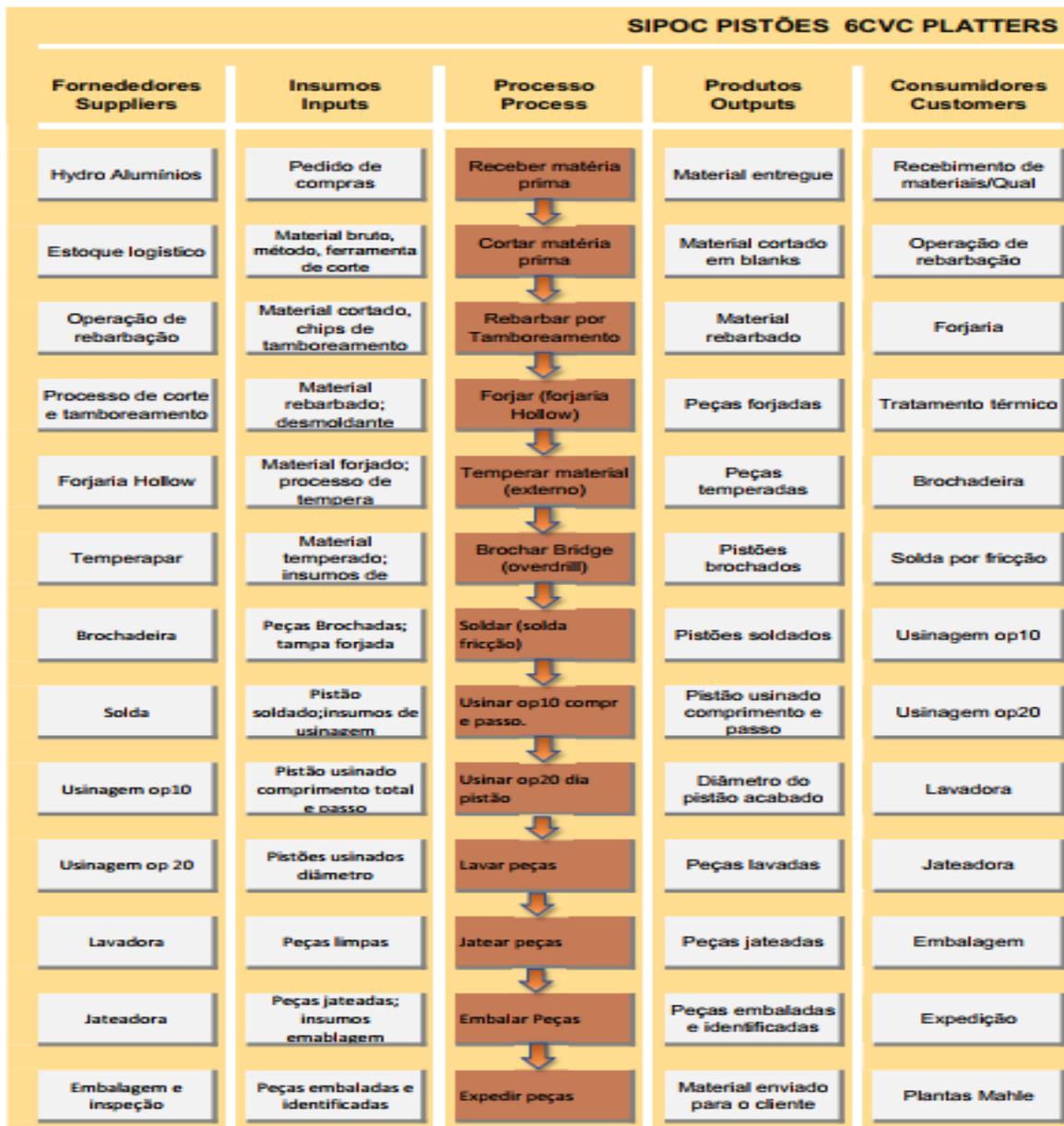
Number of Distinct Categories = 25

Gage R&R for C144,85±0,05

Fonte: O Autor 2021

Com os dados de validação do processo atual, máquina, processo e meio de medição foi feito uma passagem de fase para o estágio *Analyze*. Na fase *Analyze* foram iniciados os estudos para estruturar a melhoria através do mapeamento de alto nível do processo. Um mapeamento de SIPOC foi conduzido e revisado como ponto de partida das análises, figura 25.

Figura 24 - SIPOC do Processo

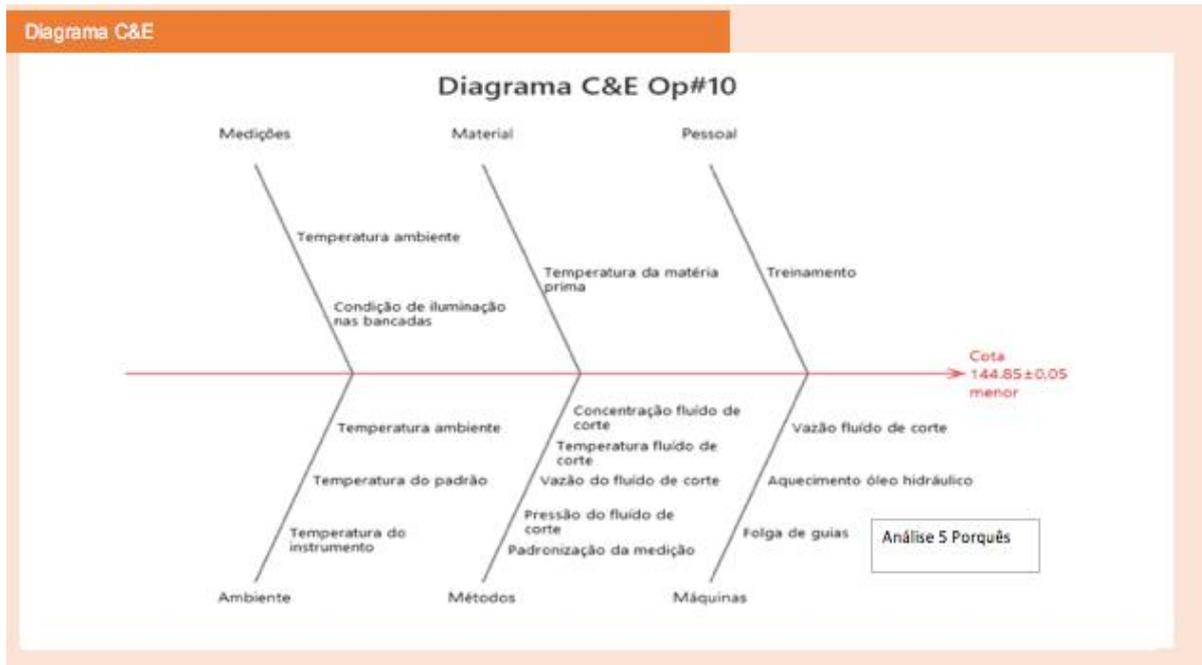


Fonte: O Autor 2021

Após o mapeamento do processo foi iniciado o estudo de causa raiz, foi feita uma análise de causa e efeito com a equipe de trabalho (Diagrama de Causa e Efeito), figura 26. Nesta etapa de investigação do processo foram levantados e priorizados os itens a serem investigados com ferramentas estatísticas e os itens com análise direta de cinco porquês.

Os fatores ligados à matéria prima, fluido de corte e folga do equipamento tiveram relevância direta na causa raiz da variação percebida nos estudos de capacidade e no alto rejeito encontrado na inspeção.

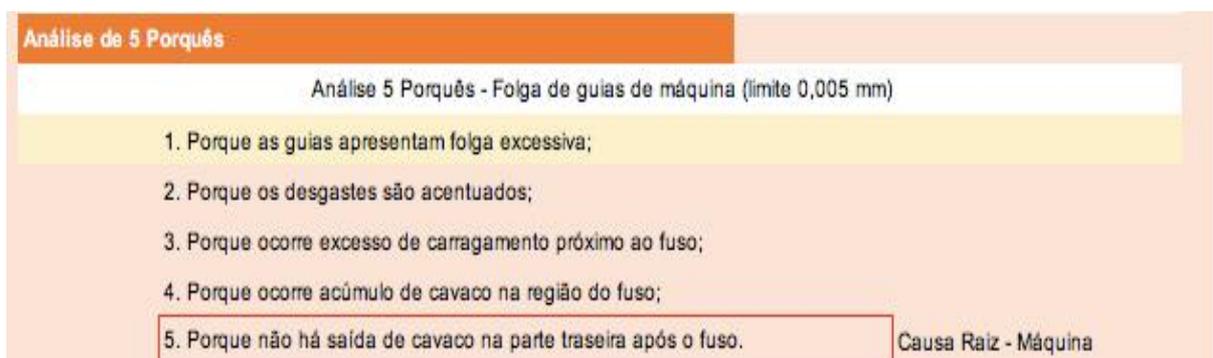
Figura 25 - Diagrama Causa e Efeito do Processo



Fonte: O Autor 2021

Uma análise de Cinco porquês, figura 27, foi feita no equipamento para investigação de causa raiz ligada a folgas no carro principal. Uma das fontes de variação que é ponto de partida para o projeto de melhoria, premissa de projeto, é a rápida deterioração na folga do carro principal. Esta folga influenciou diretamente na deterioração dos índices de processo e aumento no rejeito percebido na inspeção final durante o período histórico avaliado.

Figura 26 - Análise de 5 Porquês na máquina

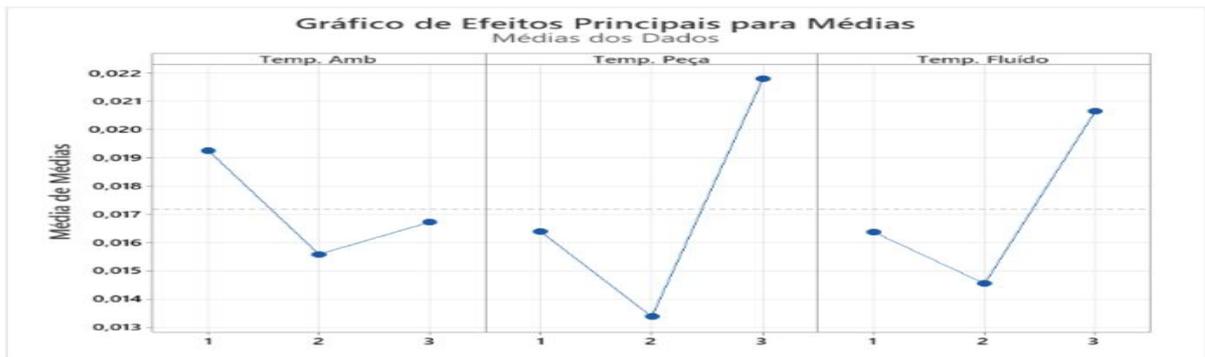


Fonte: O Autor 2021

Os fatores de variação na matéria prima e fluido de corte foram desmembrados em causas raízes fundamentais, temperatura da matéria prima, temperatura do fluido de corte, temperatura do ambiente e vazão do fluido de corte.

Com a definição dos fatores principais de variação em cada um dos elementos influentes deste processo foi definido um estudo estatístico de experimentação e regressão para definir a influência de cada fator na estabilidade de processo e formação do Cpk. Foram feitos vários experimentos para determinar a influência e interação de cada fator. Um experimento Taguchi em três níveis foi feito na fase inicial dos experimentos, figura 28.

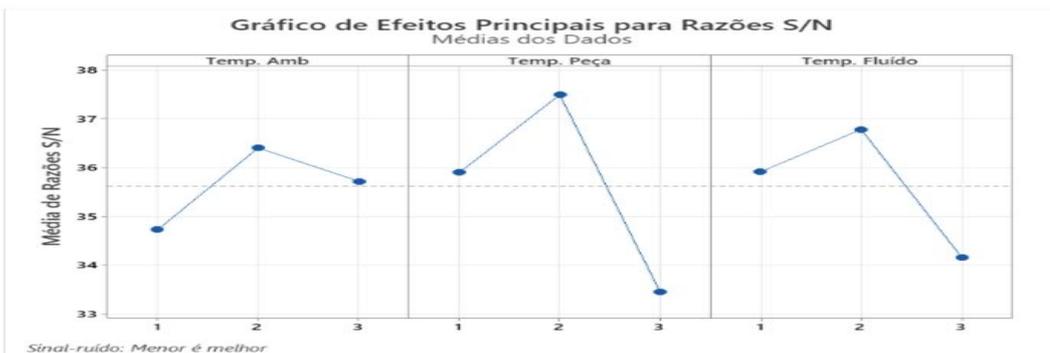
Figura 27 - Análise inicial de DOE (Taguchi) efeito das médias



Fonte: O Autor 2021

A avaliação do sinal ruído foi avaliada durante esta etapa dos estudos no método Taguchi, figura 29.

Figura 28 - Análise inicial de DOE (método Taguchi), análise do sinal- ruído e resumo



Método

Codificação de fator (-1; 0; +1)

Informações dos Fatores

Fator	Tipo	Níveis Valores
Temp. Amb	Fixo	3 1; 2; 3
Temp. Peça	Fixo	3 1; 2; 3
Temp. Fluido	Fixo	3 1; 2; 3

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Temp. Amb	2	0,000021	0,000011	0,67	0,599
Temp. Peça	2	0,000109	0,000055	3,45	0,225
Temp. Fluido	2	0,000059	0,000029	1,86	0,350
Erro	2	0,000032	0,000016		

Fonte: O Autor 2021

Uma análise de regressão completou a primeira rodada de estudos no método Taguchi para avaliação dos dados e do modelo adotado, figura 30.

Figura 29 - Análise inicial DOE (método Taguchi) equação de regressão e análise gráfica dos dados

Sumário do Modelo

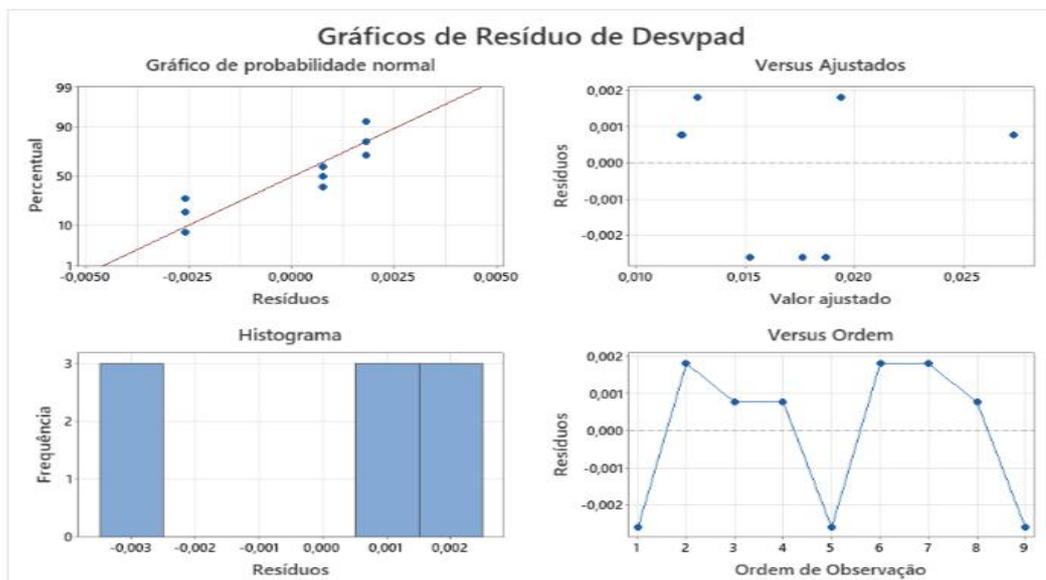
S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,0039792	85,65%	42,61%	0,00%

Coefficientes

Termo	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante	0,01719	0,00133	12,96	0,006	
Temp. Amb					
1	0,00207	0,00188	1,10	0,385	1,33
2	-0,00160	0,00188	-0,85	0,483	1,33
Temp. Peça					
1	-0,00080	0,00188	-0,43	0,712	1,33
2	-0,00381	0,00188	-2,03	0,179	1,33
Temp. Fluido					
1	-0,00082	0,00188	-0,44	0,706	1,33
2	-0,00264	0,00188	-1,41	0,295	1,33

Equação de Regressão

$$\begin{aligned} \text{Desvpad} = & 0,01719 + 0,00207 \text{ Temp. Amb}_1 - 0,00160 \text{ Temp. Amb}_2 - 0,00047 \text{ Temp. Amb}_3 \\ & - 0,00080 \text{ Temp. Peça}_1 - 0,00381 \text{ Temp. Peça}_2 + 0,00461 \text{ Temp. Peça}_3 \\ & - 0,00082 \text{ Temp. Fluido}_1 - 0,00264 \text{ Temp. Fluido}_2 + 0,00346 \text{ Temp. Fluido}_3 \end{aligned}$$



Fonte: O Autor 2021

Com esta análise de Taguchi, experimentação em uma matriz L9, foram determinados os pontos ótimos de temperatura da peça, matéria prima e temperatura do fluido de corte. Através da eliminação do fator temperatura ambiente da análise

tivemos os pontos ótimos na temperatura da matéria prima ao redor de 20°C e estabilidade térmica do material. O fator temperatura do fluido de corte apresentou melhor resultado a 18°C, menor temperatura possível de simulação neste estágio do trabalho.

Não foi conseguida a homocedasticidade necessária neste estudo inicial porque o fator temperatura ambiente foi incluído e se apresentou um parâmetro incontrolável. Foi então removido o fator temperatura ambiente do estudo e feitas análises de Fatorial a dois níveis em dois momentos do processo. Na segunda análise foi feito um fatorial fracionado com todos os parâmetros, temperatura ambiente, temperatura da matéria prima e temperatura do fluido de corte, figura 31. Foi então removido o fator temperatura do ambiente devido à baixa aderência, parâmetro difícil de controlar em ambiente real de processo.

Figura 30 - Análise fatorial fracionada de todos os fatores

Regressão Fatorial: Desvpad versus Temp. Amb; Temp. Material; Temp. Fluido

Os seguintes termos estão totalmente confundidos com outros termos e foram removidos:
Temp. Amb*Temp. Material; Temp. Amb*Temp. Fluido; Temp. Material*Temp. Fluido; Temp. Amb*Temp. Material*Temp. Fluido

Coefficientes Codificados

Termo	Efeito	Coef	EP	de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante		0,01708			*	*	*
Temp. Amb	0,004493	0,002247			*	*	1,00
Temp. Material	0,008292	0,004146			*	*	1,00
Temp. Fluido	0,006358	0,003179			*	*	1,00

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
+	100,00%	+	+

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (A _j)	QM (A _j)	Valor F	Valor-P
Modelo	3	0,000129	0,000043	*	*
Linear	3	0,000129	0,000043	*	*
Temp. Amb	1	0,000020	0,000020	*	*
Temp. Material	1	0,000069	0,000069	*	*
Temp. Fluido	1	0,000040	0,000040	*	*
Erro	0	+	+		
Total	3	0,000129			

Equação de Regressão em Unidades Não codificadas

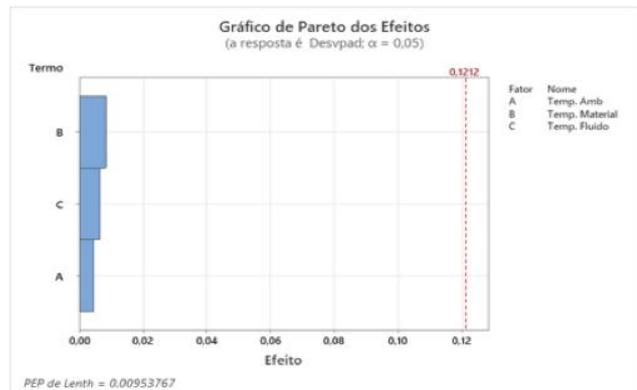
Desvpad = 0,01708 + 0,002247 Temp. Amb + 0,004146 Temp. Material + 0,003179 Temp. Fluido

Estrutura de Aliases

Fator	Nome
A	Temp. Amb
B	Temp. Material
C	Temp. Fluido

Aliases

- I + ABC
- A + BC
- B + AC
- C + AB



Fonte: O Autor 2021

A segunda análise de Fatorial foi feita removendo a temperatura do ambiente. Foi simulado a condição de verão onde as variações no processo real se mostram mais acentuadas, figura 32. Foram estudados os parâmetros temperatura do fluido de corte e temperatura da matéria prima.

Figura 31 - Fatorial fracionado final nos parâmetros de maior influência

Regressão Fatorial: Desvpad versus Temp. Material; Temp. Fluido

Coefficientes Codificados

Termo	Efeito	Coef	EP de Coef	Valor-T	Valor-P	VIF
Constante		0,01708	0,00225	7,60	0,083	
Temp. Material	0,00829	0,00415	0,00225	1,85	0,316	1,00
Temp. Fluido	0,00636	0,00318	0,00225	1,42	0,392	1,00

Sumário do Modelo

S	R2	R2(aj)	R2(pred)
0,0044930	84,40%	53,19%	0,00%

Análise de Variância

Fonte	GL	SQ (Aj.)	QM (Aj.)	Valor F	Valor-P
Modelo	2	0,000109	0,000055	2,70	0,395
Linear	2	0,000109	0,000055	2,70	0,395
Temp. Material	1	0,000069	0,000069	3,41	0,316
Temp. Fluido	1	0,000040	0,000040	2,00	0,392
Erro	1	0,000020	0,000020		
Total	3	0,000129			

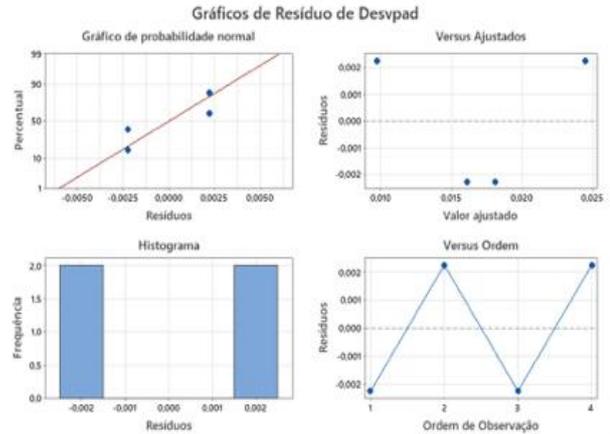
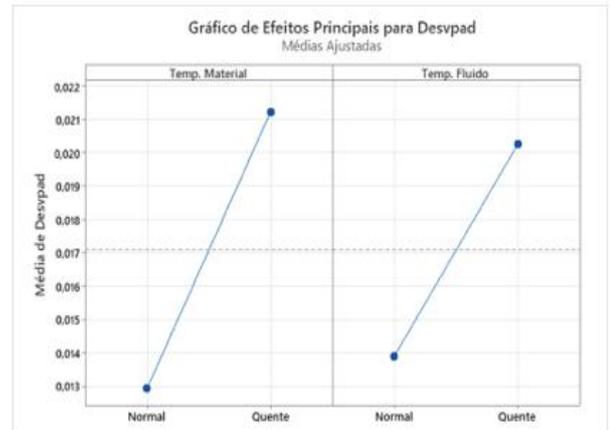
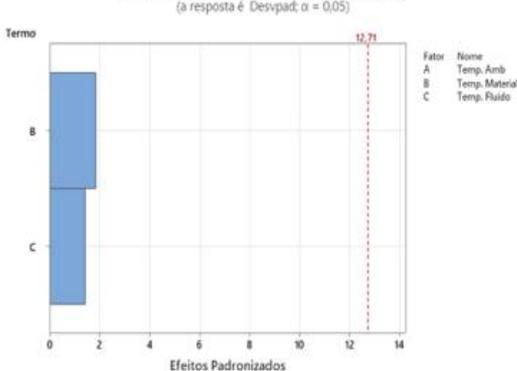


Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados



Fonte: O Autor 2021

Uma análise de regressão também foi conduzida nos dados para uma melhor compreensão da aderência estatística. Como os p valores e R quadrados foram pouco aderentes foi determinado seguir com a etapa de melhoria no primeiro estágio em uma máquina piloto. O plano de melhoria na causa raiz folga do equipamento foi conduzido em todas as máquinas do processo.

Foi também definido nesta fase um plano de experimentação adicional incluindo temperaturas de fluido de corte menores através de implantação de trocador de calor com temperaturas mínimas mais baixas e adição de uma segunda bomba para variar o volume de fluido de corte em razões maiores.

Com este planejamento adicional formulado foi fechada a fase *Analyze* e dado início a fase *Improve* do projeto. Nesta fase foi feito um plano de ação em forma de 5W2H, figura 33.

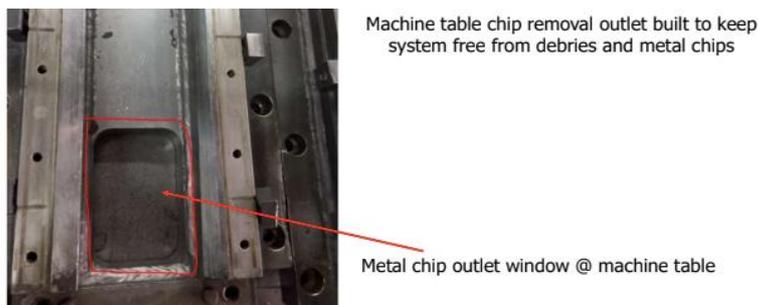
Figura 32 - Plano de Ação 5W2H, implantação das soluções e planejamento para uma etapa adicional

5W2H						
Medida WHAT	Responsável WHO	Prazo WHEN	Local WHERE	Razão WHY	Procedimento HOW	CUSTO HOW MUCH
1. Fazer saída de cavaco no barramento	Andrews	05/06/21	ENGCS	Para facilitar a saída de cavaco da área de movimentação dos eixos guias	Usinagem externa da mesa, fresamento de janela de saída de cavaco	R\$ 500,00 por máquina, custo de usinagem
2. Fazer adaptação de fluido de corte adicional, dois bicos de aplicação por máquina	Andrews	30/07/21	ENG2	Ampliar a troca de calor na região de corte para simulação	Reprojeto da bomba de tubulação de fluido de corte	R\$ 1000,00 por máquina (material e mão de obra)
3. Fazer abrangência, aquisição de trocador de calor para as 4 máquinas	Jonas	15/12/21	Operação 10	Manter a temperatura de usinagem constante	Compra e adaptação no equipamento atual	R\$ 400.000,00 (Nota: com implantação será economizado a compra de um equipamento novo no total de US 700.000,00)

Fonte: O Autor 2021

Nesta fase foi feito a implantação de melhoria na saída de cavacos e limpeza de barramento de máquina, figura 34, e abrangido para todas as máquinas do processo.

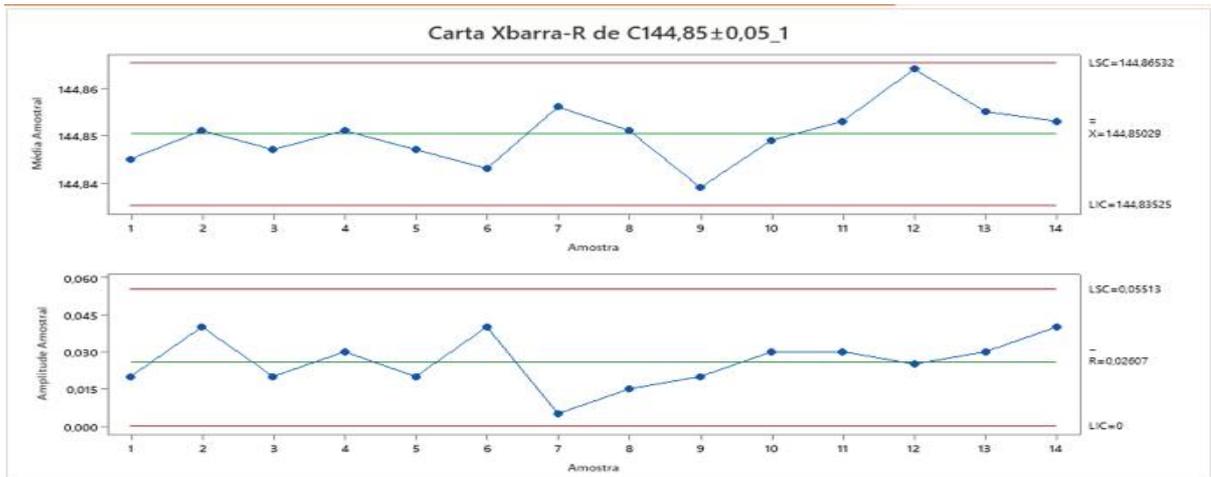
Figura 33 - Reprojeto do barramento com saída de cavaco



Fonte: O Autor 2021

Foi montado um piloto com as temperaturas de controle nos fatores levantados na experimentação. Um processo foi simulado na máquina ENG C 4 com a implantação da melhoria de barramento, temperatura de fluido de corte em 18⁰ C, temperatura da matéria prima em aprox. 20⁰ C e min 8 horas de estabilização. Foi feito então uma carta de controle com coletas de hora em hora ao longo do dia nestas condições de controle, figura 35.

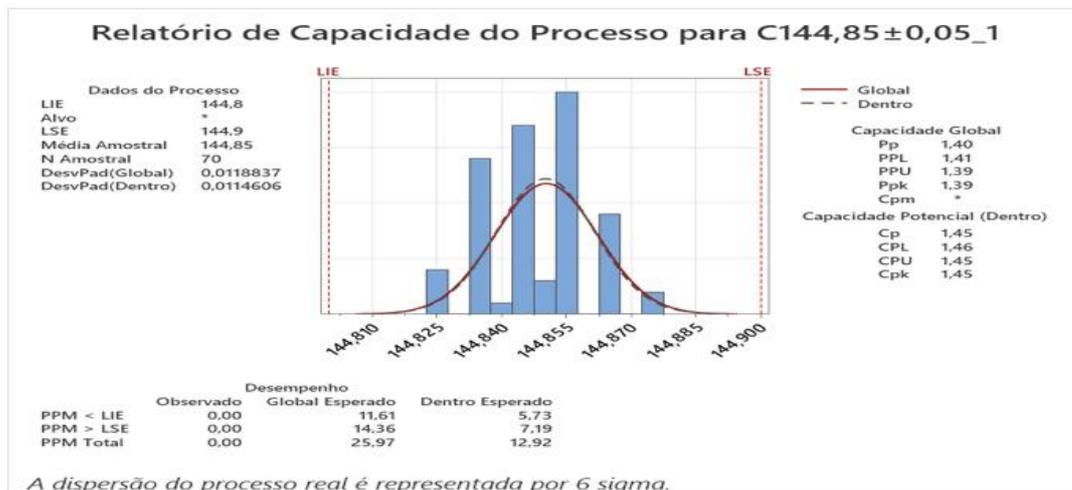
Figura 34 - Carta de Controle com parâmetros otimizados



Fonte: O Autor 2021

O resultado desta simulação forneceu uma previsão do que será o processo implantado com as soluções estudadas. Um cpk de 1,45 e processo estável, figura 36.

Figura 35 - Análise de capacidade com os parâmetros otimizados

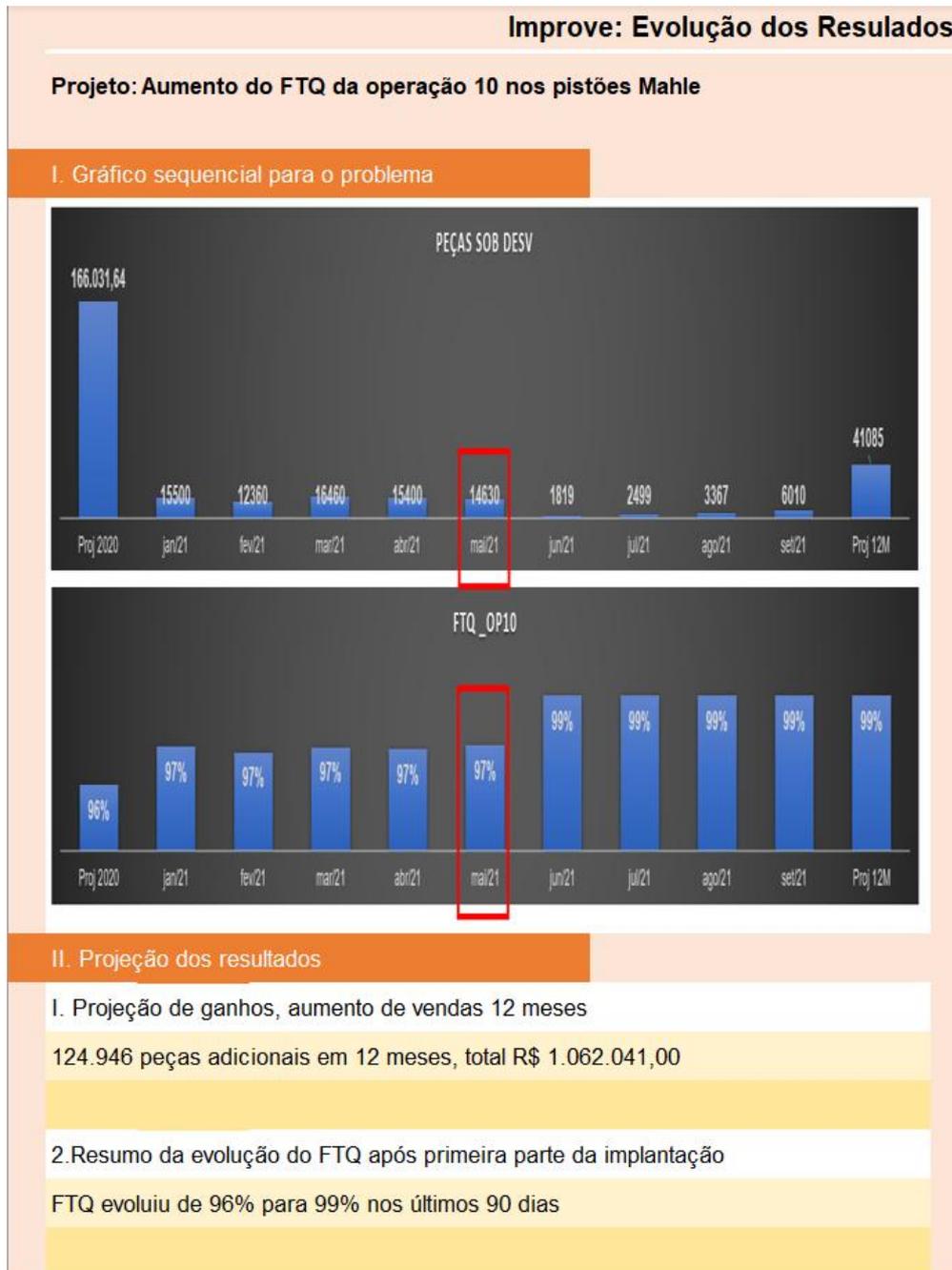


Conclusão: Processo estável e com capacidade Cp 1,45 em projeto piloto com a equação otimizada pelo experimento.

Fonte: O Autor 2021

Um levantamento dos indicadores de FTQ foi compilado com resultados antes do plano de ação de melhoria do equipamento e depois da melhoria, figura 37. Os resultados tiveram uma melhora significativa de FTQ, o qual chegou aos índices superiores a 99%. Este era uma das entregas do projeto que foram atingidas. Rejeitos melhoraram de 3,7% antes para 1% depois.

Figura 36 - Apresentação dos resultados de FTQ e incremento de vendas



Fonte: O Autor 2021

Foi atingido com sucesso o primeiro propósito de FTQ maior que 99% o que garantiu um acréscimo de vendas projetadas em R\$ 1.062.041,00 em 12 meses de fornecimento. O segundo propósito de atingir Cpk maior que 1,67 e eliminação da inspeção final será alcançado em uma segunda etapa de experimentos para validação e implantação de trocador de calor na matéria prima e fluido de corte e aumento da vazão de fluido de corte.

Com o fechamento dos indicadores de FTQ e planejamento de estudos adicionais no processo, fluído de corte, foi finalizado a fase *Improve* deste projeto e iniciado a fase *Control*.

Na fase *Control* foi feito um trabalho de atualização de FMEA. Os fatores foram incluídos no FMEA do processo para documentação das melhorias. O plano de manutenção preventiva da operação 10 também foi atualizado contemplando as melhorias de barramento na remoção de cavado da área de trabalho. Os controles de preventiva foram adequados às necessidades de sustentação dos índices de qualidade apresentados neste trabalho de projeto.

4.1 SÍNTESE E CONCLUSÃO DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os trabalhos de planejamento, desenvolvimento, aplicações, monitoramento e documentação do projeto em todas as fases do DMAIC.

Uma base de medição e análise de dados históricos, econômicos e de índices de processo deu base para o planejamento inicial. As atividades de análise e medições direcionaram estudos estatísticos e de investigação de causa para direcionar o plano de ação. Um plano de ação foi implantado e medido a eficácia ao longo do tempo, o que provou o sucesso da operação.

No próximo capítulo será feita uma conclusão do trabalho. Todos os passos sequenciados do DMAIC tratados aqui serão concluídos. Será feita uma síntese dos resultados obtidos no presente capítulo e uma apresentação sucinta das dificuldades de projeto e suas soluções aqui aplicadas bem como os benefícios obtidos para a empresa.

5 CONCLUSÕES

Neste capítulo apresentou-se uma sintetização do processo DMAIC com auxílio de ferramentas estatísticas avançadas ao processo de usinagem de pistões em ligas de alumínio.

Os resultados foram mapeados e apresentados em cada etapa do DMAIC conforme detalhamento do capítulo 4. Desta forma a fase *Define* deu toda a base de planejamento, levantamento de dados, projeção de estado futuro e suporte da organização.

A fase *Measure* faz uma síntese dos fatores influentes no processo atual e o comportamento de cada uma ao longo do tempo. A fase *Analyze* fez uma avaliação e estudo de causa avançado dos fatores predominantes no desvio de processo objeto do estudo.

A fase *Improve* fez a implantação das propostas desenvolvidas na fase *Analyze*, isto em forma de protótipo.

A fase *Control* fechou o ciclo DMAIC com a padronização e documentação das melhorias.

Durante o percurso deste trabalho tiveram vários problemas que trouxeram dificuldades no desenvolvimento. No princípio havia, nos capítulos 1 e 2, uma grande incerteza do caminho do negócio e qual estratégia adotar. Isto se deu pelo momento econômico e social em que se situou esta etapa que compreendeu toda a parte inicial de levantamento de cenário e estado atual.

Uma vez superada esta fase e tido uma visão mais previsível, até certo ponto, do cenário, enfrentaram-se os problemas de definição de qual estratégia tomar para maximizar os resultados daquele processo. Isto porque outras soluções já tinham sido aplicadas e sem o resultado esperado pela direção. Isto trazia à tona o fator falta de credibilidade pelo novo.

Na fase de implantação das escolhas de projeto obteve-se grandes desafios para simular e apresentar os resultados com um orçamento de projeto limitado. Os recursos alocados para experimentação foram muito restritos e os resultados tiveram que ser apresentados em etapas. Houve uma etapa de convencimento da direção que durou grande parte da fase de implantação. Uma vez convencidos dos resultados, vislumbrou-se uma melhor aderência da gestão e maior alocação de recursos.

Na fase de maior restrição deste projeto, a qual compreendeu todo o período de implantação foi tomada uma estratégia de fazer pequenas propostas de melhoria

e apresentar os resultados. Foi priorizada a exposição das projeções futuras, tanto econômicas quanto sociais e técnicas das melhorias.

A cada etapa que era apresentada, fortalecia-se a confiança e o dispêndio dos recursos tão necessários ao sucesso deste projeto.

O empenhamento das pessoas envolvidas no projeto foi outra estratégia para gerar interesse, conceito de dono e prosperidade para o negócio através dos bons resultados.

Em linhas gerais foi delineado e aplicado a proposta principal do projeto como planejado na fase *Define*. Os resultados foram muito expressivos porque todas as ferramentas aplicadas tiveram boa aderência e provaram na prática a aplicação de toda teoria estudada neste período. O objetivo geral do projeto de elevação do FTQ maior que 99% e incremento de 160.000 peças vendáveis ao ano.

Durante o desenvolvimento deste projeto os objetivos específicos foram alcançados com grandes avanços de *mindset* dentro da organização com o conceito qualidade da primeira vez. Foi muito comum no dia a dia a introdução e disseminação dos conceitos *lean* e seis sigma. Isto trouxe interesse em todas as áreas, em especial as áreas técnicas como engenharia, manutenção, qualidade, produção e inovação.

Foi atingido um nível de controle de índices de processo com Cpk maior que 1,33 nos controles de longo prazo e aprofundamento do uso de técnicas de experimentação com delineamento de experimentos disseminado na organização.

Outro ganho expressivo para a companhia foi o fortalecimento da voz do cliente, todos os clientes atendidos pelo processo foco deste trabalho tem hoje um *scorecard* maior que 97%. Isto trouxe muito aporte econômico conforme apresentado no capítulo 4. Como custo-benefício do investimento trouxe credibilidade no mercado europeu para novos desafios neste momento em que o mercado faz um ponto de inflexão dos fósseis para elétricos e têm cada vez mais uma pegada sustentável.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com a implantação deste projeto no processo atual, sugere-se uma segunda etapa de experimentos adicionais mais aprofundados em temperaturas menores no

parâmetro fluído de corte. Deve ser usado um trocador de calor para reduzir a variação ligada ao gradiente de temperatura no processo de corte conforme citado na conclusão do capítulo 4.

REFERÊNCIAS

ARTHUR, Jay, **Lean Six Sigma Demistified: Hard Stuff made easy** 2nd Ed., New York: McGraw-Hill, 2007

BASEM, El-Haik; RAID, Al- Amoar. **Simulation-based lean six-sigma and design for six-sigma.** 1st Ed. New Jersey: John Wiley, 2006

BASU, R. **Implementing Six Sigma and Lean: A Practical Guide to Tools and Techniques.** 1st Ed. Oxford: Linacre House, 2009.

BREYFOGLE, Forrest H., **Implementing Six Sigma: Smarter Solution Using Statistical Method.** 2nd Ed. Austin: Willey, 2003.

FRANCHETTI, Matthew John, **Lean Six Sigma for Engineers and Managers: With Applied Case Studies.** 1st Ed. Boca Raton: CRC Press 2015.

KRISHNAMOORTHY, K. S.; KRISHNAMOORTHY, V. R.; PENNATHUR, A. **A First Course in Quality Engineering: Integrating Statistical and Management Methods of Quality.** 3th.Ed. Boca Raton: CRC Press, 2018.

KUBIAK, T. M.; BENBOW D. W. **The Certified Six Sigma Black Belt Handbook.** 2nd.Ed. Milwaukee, Wisconsin: ASQ Quality Press, 2009.

MONTGOMERY, Douglas C. **Introduction to Statistical Quality Control,** 6th Ed. Arizona: Wiley, 2009.

STAMATIS, D.H., **Six Sigma and Beyond: Design for Six Sigma,** 1st Ed. Boca Raton: CRC Press, 2002.

STAUDTER, C.; Von HUGO, C.; BOSSELMANN, P.; MOLLENHAUER, J. P.; MERAN, R.; ROENPAGE, O. **Design For Six Sigma Toolset: Mindset For Successful Innovation,** 2nd Ed. Frankfurt: Springer, 2013.

TERRA, V.S.; **Lean Six Sigma: International Standards and Global Guidelines.** 2nd ED. Boca Raton: CRC Press, 2016.

WERKMA, Cristina. **Criando a Cultura Lean Six Sigma**, Vol 2, Rio de Janeiro: Campus, 2012.