

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
ESPECIALIZAÇÃO EM LEAN SIX SIGMA**

GUILHERME BENATO

**REDUÇÃO DE CUSTOS EM FERRAMENTAS DE CORTE A PARTIR
DE ANÁLISE DE EXPERIMENTOS: UM ESTUDO DE CASO
APLICADO À INDÚSTRIA AUTOMOTIVA**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

**CURITIBA
2021**

GUILHERME BENATO

**REDUÇÃO DE CUSTOS EM FERRAMENTAS DE CORTE A PARTIR
DE ANÁLISE DE EXPERIMENTOS: UM ESTUDO DE CASO
APLICADO À INDÚSTRIA AUTOMOTIVA**

Monografia apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Lean Six Sigma, do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Orientador: Prof. Wanderson Paris

CURITIBA

2021

TERMO DE APROVAÇÃO

REDUÇÃO DE CUSTOS EM FERRAMENTAS DE CORTE A PARTIR DE ANÁLISE DE EXPERIMENTOS: UM ESTUDO DE CASO APLICADO À INDÚSTRIA AUTOMOTIVA

por

GUILHERME BENATO

Esta monografia foi apresentada em 15 de maio de 2021, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Lean Six Sigma, outorgado pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guilherme Benato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Wanderson Paris, MSc. Eng.
Professor Orientador - UTFPR

Emerson Rigoni, Dr. Eng.
Membro Titular da Banca - UTFPR

Marcelo Rodrigues, Dr. Edu.
Membro Titular da Banca - UTFPR

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

RESUMO

BENATO, Guilherme. **Redução de custos em ferramenta de corte a partir de análise de experimentos: um estudo de caso aplicado à indústria automotiva.**

2021. 54 folhas. Monografia (Especialização em Lean Sigma) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2021.

O presente trabalho apresenta um estudo de caso com a aplicação de uma ferramenta estatística de delineamento de experimentos (DOE) no processo de usinagem do Virabrequim, com o objetivo de reduzir em 50% os custos de usinagem de uma operação de torneamento. Para se chegar neste objetivo, foi realizada uma pesquisa de mercado com as novas tecnologias de usinagem disponíveis para esta aplicação, pois a ferramenta atual tem um alto custo agregado. Além disso, foram realizados diversos ensaios com a alteração de parâmetros de corte como a velocidade de avanço e rotação do motor da máquina a fim de obter a melhor combinação entre esses fatores para que resultem no menor desgaste da aresta de corte e maior vida da ferramenta. Os resultados iniciais e as otimizações dos testes foram analisados através do software Minitab. Como resultado, obteve-se a redução de 83% do custo de usinagem por peça, superando as expectativas iniciais do projeto, além da manutenção do tempo de ciclo desta operação, que era um dos principais problemas a serem enfrentados devido às alterações de parâmetros e classe do inserto. Concluiu-se que a rotação do motor tem a maior influência no desgaste do inserto, seguido pela velocidade de avanço que também é significativamente influente. Já a presença ou não de quebra cavaco nos insertos de metal duro não interfere no desgaste.

Palavras-chave: Delineamento de experimentos. Parâmetros de corte. Ferramentas de corte. Desgaste.

ABSTRACT

BENATO, Guilherme. **Redução de custos em ferramenta de corte a partir de análise de experimentos: um estudo de caso aplicado à indústria automotiva.**

2021. 54 folhas. Monografia (Especialização em Lean Sigma) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2021.

The paper presents a case study with the application of statistical tool of design of experiments (DOE) in the crankshaft machining process, in order to reduce by 50% the machining costs of a turning operation. To reach this goal, a market research was carried out with the new machining technologies available for this application, as the current tool has a high added cost. In addition, several tests were carried out with the alteration of cutting parameters such as forward speed and motor rotation in order to obtain the best combination between these factors, resulting in less wear on the cutting edge and longer tool life. Initial test results and optimizations were analyzed using Minitab software. As a result, there was a reduction of 83% in the machining cost per part, exceeding the initial expectations of the project, in addition to maintaining the cycle time of this operation, which was one of the main problems to be faced due to the parameter and class changes of the insert. It was concluded that motor rotation has the greatest influence on insert wear, followed by forward speed, which is also significantly influential. The presence or absence of chip breaking in carbide inserts does not interfere with wear.

Keywords: Design of experiments. Cutting parameters. Cutting tools. Wear.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Inseto de CBN com duas arestas	11
Figura 2 - Radar Chart Equipe do Projeto	16
Figura 3 - Fluxograma das atividades do projeto	17
Figura 4 - Cronograma do Projeto	17
Figura 5 - Eixo Virabrequim	19
Figura 6 - Layout linha do Virabrequim	20
Figura 7 - Linha Transfer	20
Figura 8 - Etapas do processo usinagem Op. 80/5L	22
Figura 9 - Torneamento cilíndrico	22
Figura 10 - Torneamento radial de faceamento	23
Figura 11 - Porta ferramentas Capto	24
Figura 12 - Fixação das ferramentas na máquina	24
Figura 13 - Ilustração Velocidade de corte	26
Figura 14 - Desgaste de flanco	28
Figura 15 - Craterização	28
Figura 16 - Desgaste tipo entalhe	29
Figura 17 - Máquina óptica Hexagon	29
Figura 18 - Rota de qualidade	30
Figura 19 - As bases do Six Sigma	31
Figura 20 - Tradução do nível de qualidade na forma financeira	32
Figura 21 - Estrutura DMAIC	32
Figura 22 - Correlação PDCA x DMAIC	33
Figura 23 - Exemplos de desperdícios	34
Figura 24 - Estrutura básica para implementação LSS	34
Figura 25 - Modelo DOE	35
Figura 26 - Tipos de Delineamento de experimentos pt. 1	36
Figura 27 - Tipos de Delineamento de experimentos pt. 2	37
Figura 28 - Experimento fatorial sem interação	37
Figura 29 - Experimento fatorial com interação	38
Figura 30 - Entradas e saídas do processo	40
Figura 31 - Classes de insertos	41
Figura 32 - Fatores e níveis do DOE	42

Figura 33 - Experimentos disponíveis Minitab	43
Figura 34 - Ordem dos ensaios	44
Figura 35 - Novo corpo de ferramenta Capto	45
Figura 36 - Substituição da do corpo da ferramenta	45
Figura 37 - Medições dos desgaste dos insertos	46
Figura 38 - Desgaste de flanco da amostra 5	47
Figura 39 - Gráfico de Pareto dos efeitos	47
Figura 40 - Gráfico de efeitos principais para desgaste	48
Figura 41 - Gráfico de Otimização	49
Gráfico 1 - Tempo de Ciclo	11
Gráfico 2 - CPP Usinagem	13
Gráfico 3 - TOP 10 - Perdas Tipo C Usinagem	14
Gráfico 4 - TOP 15 - CPP Insertadas do Virabrequim	14

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

CBN	Cubic Boron Nitride - Nitreto de Boro Cúbico
CPP	Custo Por Peça
DOE	Design of Experiments
Fz	Avanço por aresta de corte
MD	Metal Duro
n	Rotação do motor
Vc	Velocidade de corte
Vf	Velocidade de avanço

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 PREMISSAS E PROBLEMA DE PESQUISA	10
1.2 OBJETIVOS	12
1.2.1 Objetivo Geral	12
1.2.2 Objetivos Específicos	12
1.3 JUSTIFICATIVA	12
1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	15
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2 ÁREA DE APLICAÇÃO	18
2.1 PROCESSO DE USINAGEM DO VIRABREQUIM	19
2.2 USINAGEM OP. 80 EST. 5 L	20
2.3 FERRAMENTA DE USINAGEM OP. 80 5L	23
2.4 PARÂMETROS DE CORTE	24
2.4.1 Velocidade de corte	25
2.4.3 Velocidade de avanço	26
2.4.4 Avanço por aresta de corte	26
2.5 DESGASTES DE FERRAMENTAS DE CORTE	27
2.6 REQUISITOS DE QUALIDADE DO PROCESSO	29
3 REFERENCIAL TEÓRICO	31
3.1 INTRODUÇÃO AO SEIS SIGMA	31
3.2 DMAIC	32
3.3 CONCEITOS LEAN	33
3.4 IMPLEMENTAÇÃO DO LEAN SEIS SIGMA NAS EMPRESAS	34
3.5 DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS	35
4 DESENVOLVIMENTO	39
4.1 MAPEAMENTO DOS FORNECEDORES	39
4.2 DEFINIÇÃO DOS FATORES, NÍVEIS E SAÍDA DO PROCESSO	40
4.3 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO	43
4.4 EXECUÇÃO DOS EXPERIMENTOS	44
4.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS	46
4.6 OTIMIZAÇÃO DOS RESULTADOS	49
4.7 CÁLCULO DOS BENEFÍCIOS OBTIDOS	50
5 CONCLUSÕES	52
5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	53
REFERÊNCIAS	54

1 INTRODUÇÃO

A monografia em questão será aplicada em uma empresa multinacional do ramo automobilístico, com matriz na Europa, que hoje conta com aproximadamente 400 funcionários e fabrica motores a combustão interna. Esta empresa será chamada de: Empresa Y.

O trabalho será focado na área da usinagem desta empresa, aplicando um estudo de caso em ferramentas de corte a fim de otimizar o processo e obter significativos ganhos financeiros, através de uma análise de experimentos. O custo de ferramentas de corte é a maior voz dentre os custos de materiais indiretos da empresa, com um gasto de aproximadamente 4 milhões BRL por ano, o que faz com que esta área seja um importante pilar para a referida atividade empresarial.

1.1 PREMISSAS E PROBLEMA DE PESQUISA

O mercado de ferramentas de corte é muito dinâmico, pois a todo momento surgem novas tecnologias que são desenvolvidas por diversos fornecedores de extrema competência e que estão há muitos anos no mercado, que visam reduzir os custos finais de usinagem. As empresas que não estão atentas às mudanças do mercado acabam ficando para trás, deixando seu produto menos competitivo devido ao preço elevado.

A Empresa Y, em sua essência, deixa claro a importância de estar sempre vislumbrando melhorias, além de estar em contato direto com estes fornecedores. Com isso, a empresa ao longo dos anos tem alcançado ótimos resultados, e os produtos por ela fornecidos se mantêm com preços que satisfazem os clientes.

Paralelo a isso, para saber onde o capital da empresa deve ser aplicado, pois toda nova tecnologia tem seus custos, é de extrema importância ter bem mapeado quais são as suas principais perdas e também quais são seus principais custos.

O problema a ser tratado neste trabalho é o alto custo por peça (CPP) da Op. 80_5LH do Virabrequim, processo de torneamento da face da flange e do cubo, local onde posteriormente na linha de montagem será montado o volante do motor. Para fins de esclarecimento, o CPP nada mais é do que a divisão do valor total gasto em

ferramentas utilizadas em determinada linha, dividido pela quantidade de peças produzidas desta mesma linha.

Este processo utiliza uma ferramenta com inserto de Nitreto de Boro Cúbico (CBN), conforme figura 1, que devido ao seu material mais resistente tem um custo elevado.

Figura 1 - Inserto de CBN com duas arestas

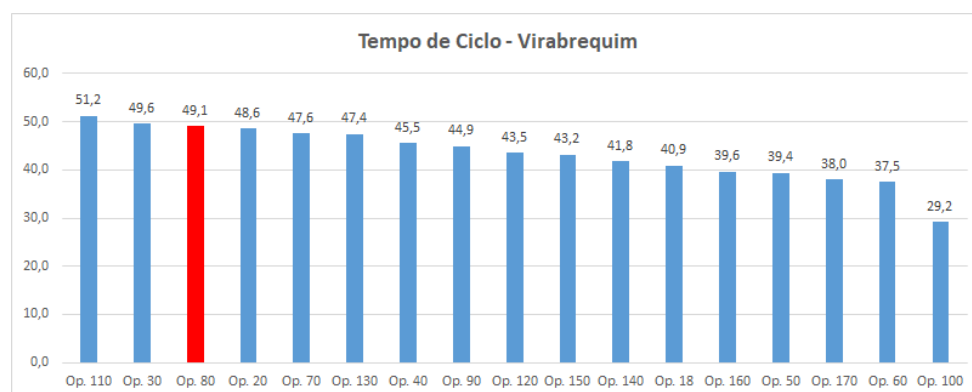


Fonte: do próprio autor

Diversas tentativas de melhoria já foram aplicadas neste processo com objetivo de aumentar a vida do inserto, mas ambas não obtiveram sucesso devido a ferramenta não se comportar bem com a alteração das variáveis de processo. Uma nova alternativa a ser estudada é a substituição do material do inserto

Porém, um risco que deve ser analisado antes da implementação de um projeto na Op. 80_5LH do Virabrequim é o tempo de ciclo da máquina, que é o período total desde o início até o fim do ciclo produtivo para execução de uma peça. Atualmente a Op. 80 do Virabrequim tem um tempo de ciclo de aproximadamente 49 segundos, um dos mais altos tempos da linha, conforme pode ser visto no gráfico 1.

Gráfico 1 - Tempo de Ciclo - Virabrequim



Fonte: do próprio autor

Para atingir os melhores resultados de quantidade de peças produzidas por ferramenta será necessário a modificação dos parâmetros de processo. Assim, é de suma importância avaliar o impacto no tempo de ciclo no final de cada teste.

A dificuldade a ser enfrentada neste projeto é que devido a possível mudança do material do inserto, tende-se aos parâmetros atuais de processo não atenderem mais as características de produto e processo. Isto porque cada material se comporta de formas diferentes, então será necessário aplicar uma análise de experimentos (DOE) para obter o melhor conjunto de parâmetros que atendam às novas especificações do processo.

Sendo assim, será possível substituir o material do inserto, garantindo a qualidade do produto, mantendo o tempo de ciclo da máquina e reduzindo o CPP do processo?

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos propostos estão descritos a seguir.

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo principal deste trabalho é buscar uma solução viável para reduzir em pelo menos 50% o CPP da Op. 80_5LH da linha do Virabrequim.

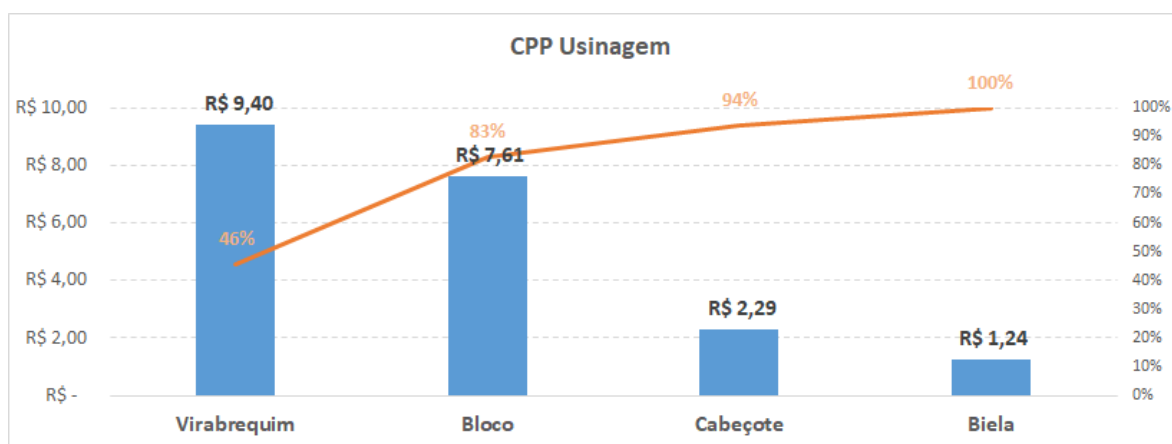
1.2.2 Objetivos Específicos

- Trabalhar no desenvolvimento de um novo inserto;
- Identificar novos parâmetros para o novo inserto;
- Desenvolver um plano de experimentos;
- Manter ou diminuir o tempo de ciclo da máquina;
- Analisar os resultados obtidos na aplicação prática.

1.3 JUSTIFICATIVA

Após análise dos dados, foi definido que a monografia em questão será aplicada na linha de usinagem do Virabrequim, pois conforme pode ser visto no gráfico 2, dentre as quatro linhas de usinagem da Empresa Y, esta linha tem o maior CPP, correspondendo a 46% do custo total de ferramentas de corte.

Gráfico 2 - CPP Usinagem



Fonte: do próprio autor

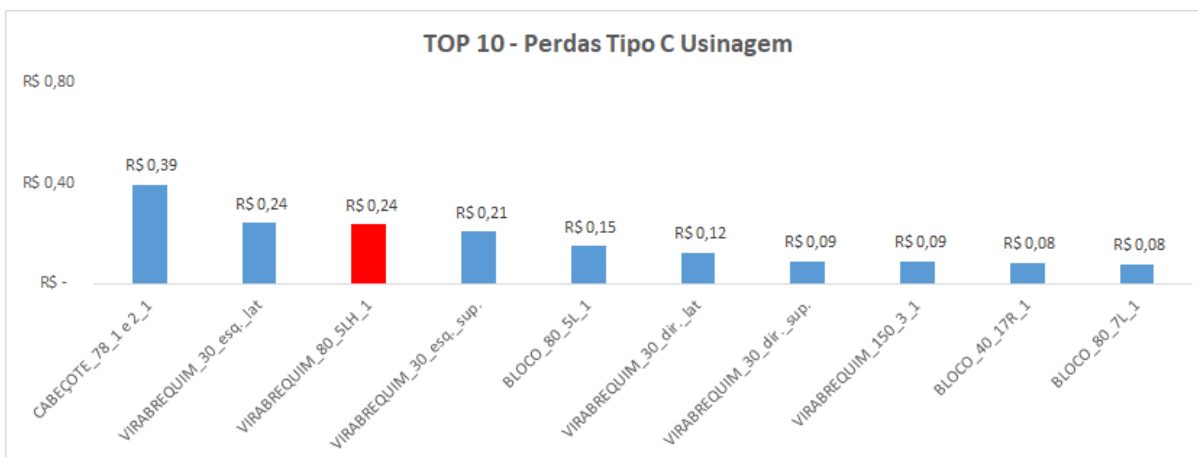
Após definida a linha de usinagem a ser aplicado o projeto, é necessário definir qual o processo específico a ser tratado. Como informado anteriormente, além de se analisar qual o maior CPP por ferramenta, é importante verificar quais as principais perdas em cada ferramenta de corte, pois em dados momentos, já tendo a melhor tecnologia disponível aplicada em uma ferramenta, torna-se difícil reduzir o CPP dela, sendo necessário atuar possivelmente em outras ferramentas com CPP mais baixo.

Na empresa Y, as perdas são divididas em três tipos: A, B e C. Perdas Tipo A são referentes ao não atingimento da vida programada, ou seja, quando a ferramenta deixa de atingir o que previamente foi proposto. Este tipo de perda deve ser rapidamente atacado, pois trata-se de restabelecer a condição normal do processo, que está sendo interferido por alguma variável a ser analisada. Perdas Tipo B são referentes a um possível ganho de vida útil da ferramenta atual, alterando parâmetros de processo ou atuando em outras variáveis do processo, porém mantendo a mesma ferramenta. Neste caso, pode-se deduzir que não está sendo utilizado todo o potencial que esta ferramenta tem. E por fim, perdas Tipo C são aquelas onde são aplicadas novas tecnologias, ou seja, a ferramenta atual é substituída por uma outra a fim de obter ganhos produtivos.

Este problema tem dois inputs. Primeiramente, ele é priorizado por ser a quinta maior perda tipo C da empresa, conforme gráfico 3. Esta operação se enquadra como perda tipo C, pois foi oferecida no mercado uma nova tecnologia para usinagem deste processo utilizando insertos de metal duro (MD), a qual tem um

custo mais baixo, porém utilizam parâmetros de processos diferentes devido a diferença entre especificações entre CBN e MD.

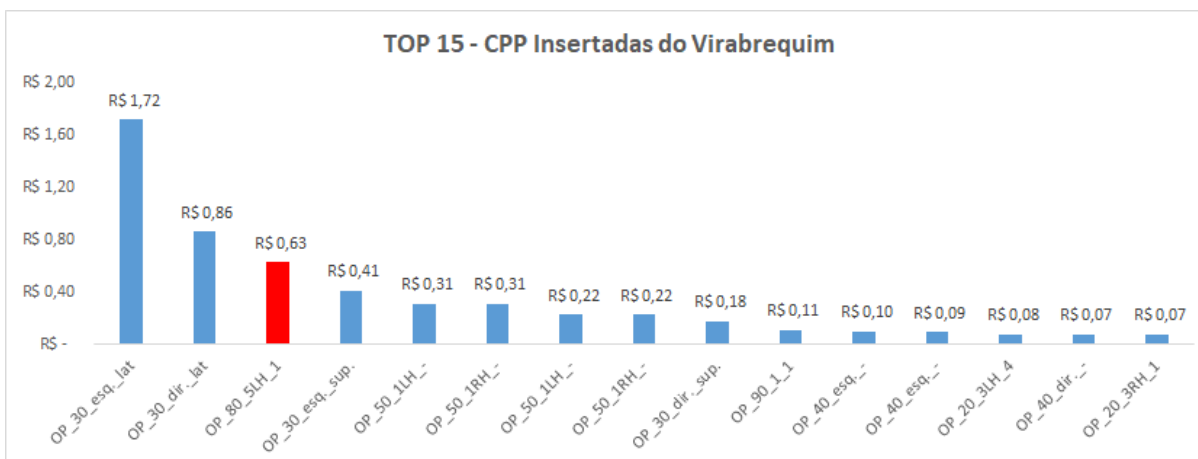
Gráfico 3 - TOP 10 - Perdas Tipo C Usinagem



Fonte: do próprio autor

O segundo input é seu alto CPP, que conforme pode ser verificado no gráfico 4, é o terceiro maior custo dentre as ferramentas insertadas do Virabrequim.

Gráfico 4 - TOP 15 - CPP Insertadas do Virabrequim



Fonte: do próprio autor

Atualmente, gasta-se aproximadamente R\$0,63 em insertos de CBN neste processo para produzir cada virabrequim. Para se chegar neste valor utiliza-se a equação 1 apresentada a seguir.

$$CPP = \frac{\text{Custo Inseto} \times \text{Qtde. Insetos por ferramenta}}{\text{Qtde. arestas por inserto} \times \text{Vida Ferramenta}} \quad (1)$$

onde temos,

Custo do Inseto CBN: R\$ 125,55;

Qtde. Insetos por ferramenta: 1 pç;

Qtde. arestas por inserto: 2;

Vida Ferramenta: 100 pçs.

Fazendo a análise do custo anual desta operação, momento em que são produzidos aproximadamente 140.000 motores/ano, temos um custo total aproximado de R\$ 87.892,00. Como o objetivo geral do projeto é obter uma redução mínima de 50% do custo com a nova tecnologia de inserto, aliada à otimização dos parâmetros de processo, o possível benefício a ser obtido é de aproximadamente R\$ 34.000/ano, o que para uma empresa que já tem seus processos muito bem otimizados é um excelente resultado.

Baseado nas análises financeiras e técnicas feitas até então, justifica-se seguir o projeto.

1.4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A metodologia de pesquisa a ser utilizada nesta monografia será a exploratória. De acordo com Gil (1999), pesquisas exploratórias têm como principal objetivo desenvolver, esclarecer e modificar conceitos e ideias, tendo em vista a formulação de problemas mais precisos ou hipóteses pesquisáveis para estudos posteriores. Habitualmente envolvem levantamento bibliográfico, entrevistas não padronizadas e estudos de caso.

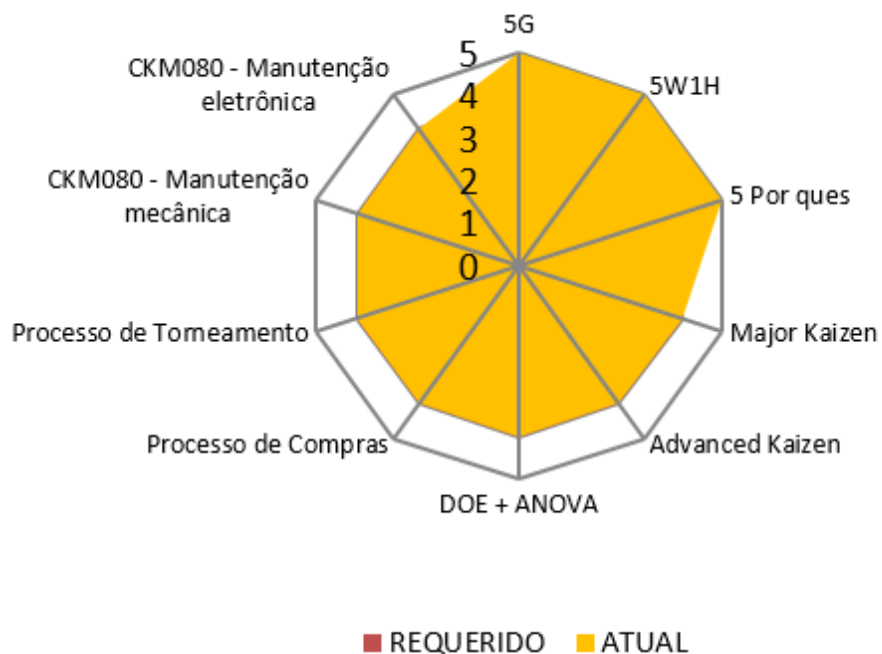
Em relação ao tipo de abordagem da pesquisa, o qual apresenta os resultados obtidos do projeto, trata-se da quantitativa. Segundo Richardson (1999), o método quantitativo, como o próprio nome indica, caracteriza-se pelo emprego da quantificação tanto nas modalidades de coleta de informações, quanto o tratamento delas por meio de técnicas estatísticas, desde as mais simples como percentual, média, desvio-padrão, às mais complexas, como coeficiente de correlação, análise

de regressão etc. Neste caso, serão aplicadas técnicas estatísticas baseadas em números para se chegar nos resultados.

Paralelo a isto, a pesquisa desta monografia será aplicada, com a execução de experimentos na prática com o objetivo de atingir as metas estipuladas de redução de custo em ferramentas de corte.

No que se refere à formação da equipe do projeto, foi realizado um mapeamento de todas as competências necessárias para execução das atividades. Com base nesse levantamento de informações, foi criada uma equipe multifuncional, com integrantes de diversas áreas da empresa, a fim de cobrir todos os gaps e garantir a eficácia das análises e ações do projeto. Para auxiliar neste quesito, a empresa Y conta com uma ferramenta chamada Radar Chart, onde nela estão mapeadas todas as competências de cada colaborador da empresa e seu nível de conhecimento de cada uma destas competências. Para o andamento deste projeto, a equipe conta com colaboradores das áreas de Engenharia de Processos, Manutenção, *Preset* de Ferramentas, Compras e Manufatura, e todas as competências mapeadas no início estão cobertas, conforme pode ser observado na figura 2.

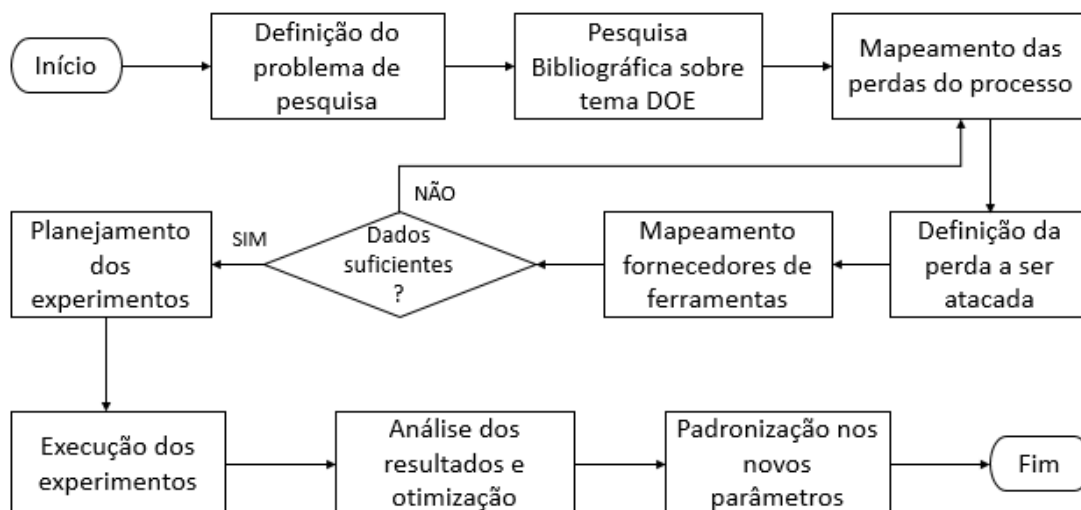
Figura 2 - Radar Chart Equipe do Projeto



Fonte: do próprio autor

A monografia em questão foi conduzida, de forma genérica, conforme pode ser visto na figura 3, onde foram listadas as principais atividades realizadas ao longo do projeto para obtenção dos resultados esperados.

Figura 3 - Fluxograma das atividades do projeto



Fonte: do próprio autor

Para auxiliar no controle do andamento das atividades deste projeto, foi elaborado um cronograma, conforme figura 4.

Figura 4 - Cronograma do Projeto

Nº	Atividade	out/20	nov/20	dez/20	jan/21	fev/21	mar/21	abr/21	mai/21	jun/21				
		S41	S42	S43	S44	S45	S46	S47	S48	S49	S50	S51	S52	S53
1	Disciplinas a serem cursadas na pós graduação													
2	Definição do problema da pesquisa													
3	Estudo sobre delineamento de experimentos													
4	Mapeamento das perdas do processo													
5	Seleção do projeto de DOE a ser desenvolvido													
6	Mapeamento de possíveis fornecedores de ferramentas substitutos													
7	Planejamento dos experimentos													
8	Execução dos experimentos													
9	Otimização do melhor experimento													
10	Análise dos resultados													
11	Padronização dos novos parâmetros													
12	Finalização do documento final da monografia													

Fonte: do próprio autor

Neste cronograma constam as atividades macro e seus respectivos prazos.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O capítulo 1 é referente à definição do problema a ser solucionado, estabelecendo os objetivos e justificando a escolha do mesmo. Após isso, será explanado a forma como o projeto será conduzido, com o devido planejamento das atividades a serem realizadas, a análise dos riscos do projeto e, por fim, a presente estrutura.

No capítulo 2, será apresentado a área onde o projeto será aplicado e suas particularidades. Posteriormente, no capítulo 3 será apresentado todo o referencial teórico que serviu como base para desenvolvimento do projeto.

Por fim, no capítulo 4 serão apresentados todos os resultados do que levantado no referencial teórico aplicado na área escolhida, fechando com as conclusões sobre a monografia no capítulo 5.

2 ÁREA DE APLICAÇÃO

O capítulo 2 tem como objetivo apresentar a área de aplicação do projeto de pesquisa, focado no problema descrito no capítulo 1, descrevendo as principais variáveis que impactam neste processo.

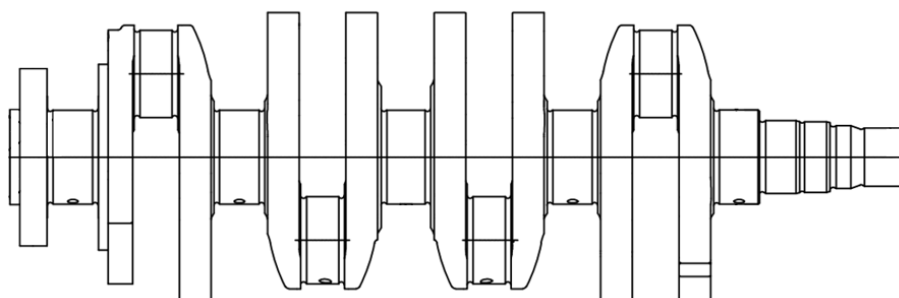
As áreas de usinagem das empresas automobilísticas são responsáveis por uma grande fatia dos custos devido ao alto valor agregado nas ferramentas de corte. Essas ferramentas, em sua grande maioria, são fabricadas fora do país ou tem sua matéria prima vinda do exterior, contribuindo para seu alto custo. Neste contexto, as empresas buscam ferramentas que suportem altos níveis de desgaste, que atendam as características de produto desejadas e apresentem uma alta vida útil, assim, reduzindo o CPP do processo e contribuindo com a melhoria contínua.

A usinagem pode ser entendida como processo de fabricação com remoção de cavaco de uma peça, conferindo-lhe forma, dimensões e acabamento (FERRARESI, 1977). Ainda segundo Ferraresi, o cavaco pode ser entendido como a porção de material retirada da peça pela ferramenta e caracterizada por apresentar forma geométrica irregular.

2.1 PROCESSO DE USINAGEM DO VIRABREQUIM

Após mapeamento das principais perdas do processo de usinagem na Empresa Y, a linha escolhida para aplicação do projeto de monografia foi a do Virabrequim (figura 5), também conhecida como Girabrequim ou Árvore de Manivelas. Conceitualmente falando, trata-se de uma das peças mais importantes do motor de combustão interna, pois é responsável por converter o movimento linear do pistão em movimento rotativo no volante.

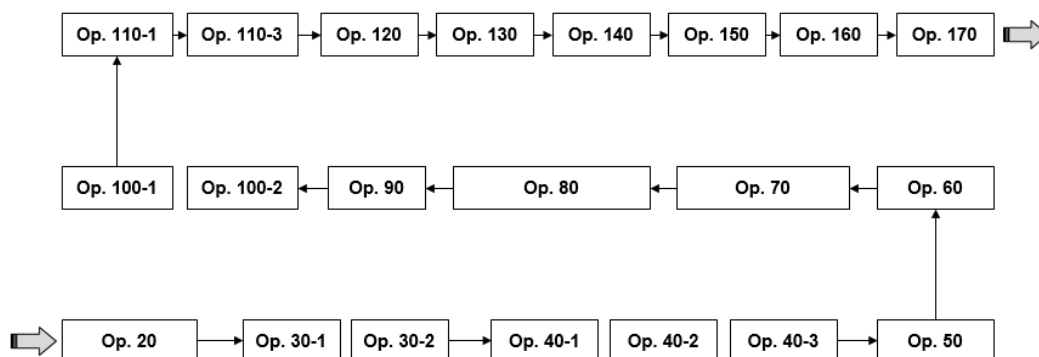
Figura 5 - Eixo Virabrequim



Fonte: do próprio autor

Na empresa Y, a linha de usinagem do Virabrequim é disposta conforme layout da figura 6.

Figura 6 - Layout linha do Virabrequim

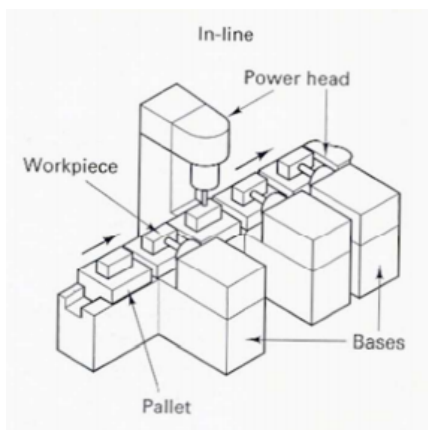


Fonte: do próprio autor

A linha segue uma ordem de operações, nomeadas de forma numérica crescente, onde o abastecimento de peças brutas é feito na Op. 20, até a saída da peça acabada para a linha da montagem na Op. 170. Cada operação é composta por diversas estações diferentes, e cada estação é responsável por fazer um processo de usinagem diferente.

Esta linha é caracterizada por a sua automação rígida, onde não é possível readequar a produção para criar produtos diferenciados, ao contrário das linhas flexíveis, que podem ter suas configurações alteradas de acordo com a demanda. Trata-se de uma linha transfer, onde os equipamentos são projetados para executar objetivos limitados. Na figura 7, pode ser visto um exemplo que ilustra como é o funcionamento de uma linha transfer.

Figura 7 - Linha Transfer



Fonte: Moraes (2001)

Por se tratar de uma linha transfer, alguns cuidados devem ser tomados na condução do projeto para que não surjam problemas posteriores. Ao variar parâmetros de corte, um dos fatores diretamente impactados é o tempo de ciclo da máquina, seja positivamente ou negativamente. Como cada estação é destinada a realizar a sua usinagem em específico, uma alteração de parâmetro que acarrete em um aumento do tempo de ciclo desta operação, pode acabar influenciando na linha como um todo.

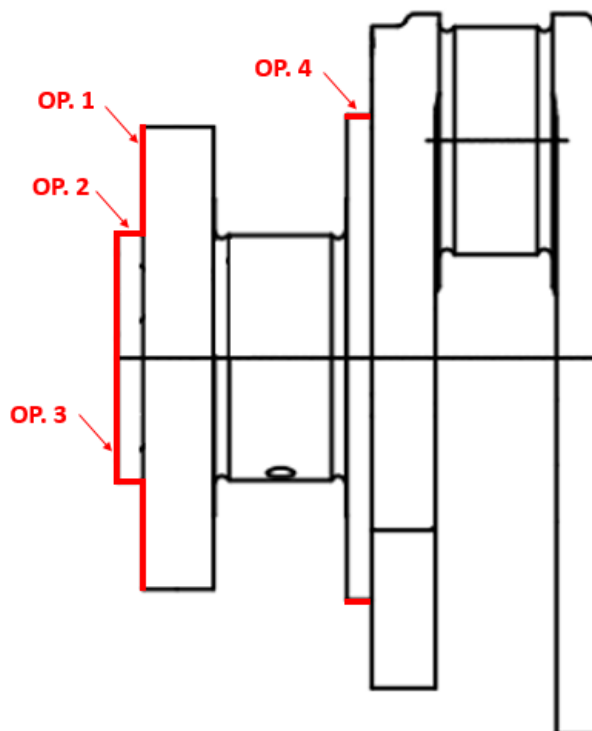
2.2 USINAGEM OP. 80 EST. 5 L

A operação escolhida para a aplicação do delineamento de experimentos é a Op. 80, estação 5L do Virabrequim. Os inputs para a escolha desta operação foram o alto CPP, sendo o terceiro maior custo dentre as ferramentas insertadas do virabrequim, e também por ser a terceira maior perda tipo C da empresa.

A operação 80/5L é responsável pela usinagem do alojamento do volante do motor, e também do alojamento da engrenagem de sincronismo do virabrequim.

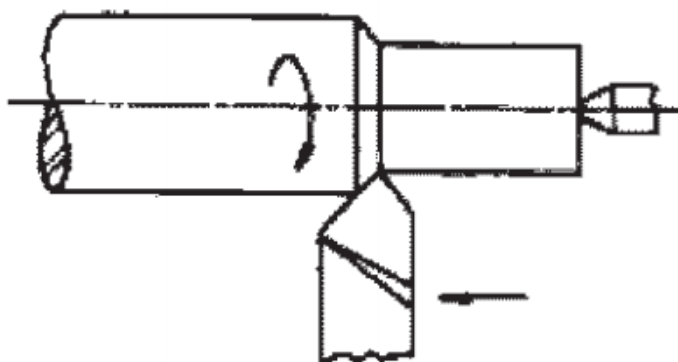
Trata-se de uma usinagem de torneamento, que é um processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies de revolução de uma ou mais ferramentas monocortantes. Para tanto, a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar com o referido eixo (FERRARESI, 1977).

Conforme pode ser visto na figura 8, a usinagem da Op. 80/5L é dividida em quatro etapas, sendo a primeira, Op. 1, a usinagem de faceamento da face da flange, onde posteriormente serão feitos os furos de acoplamento do volante. A Op.2 é a usinagem do diâmetro do cubo, seguido da Op. 3, que realiza o faceamento da face do cubo. O cubo serve como referência para a montabilidade do volante. Por fim, a Op. 4 realiza a usinagem do diâmetro de alojamento da engrenagem de sincronismo do Virabrequim.

Figura 8 - Etapas do processo usinagem Op. 80/5L

Fonte: do próprio autor

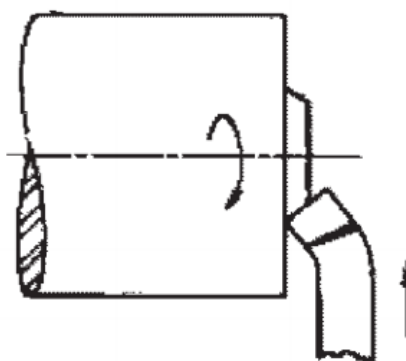
Neste caso, são realizados dois tipos de torneamento diferentes. As operações 2 e 4 da figura 8 realizam o processo de torneamento cilíndrico externo, enquanto as operações 1 e 3 realizam o torneamento radial. Torneamento cilíndrico (Figura 9) é o processo no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória paralela ao eixo principal de rotação da máquina.

Figura 9 - Torneamento cilíndrico

Fonte: FERRARESI, 1977

Já o torneamento radial (figura 10) é o processo em que a ferramenta se desloca segundo uma trajetória retilínea, perpendicular ao eixo principal da máquina (FERRARESI, 1977).

Figura 10 - Torneamento radial de faceamento



Fonte: FERRARESI, 1977

É de extrema importância conhecer o tipo de processo para definir qual o melhor tipo de ferramenta a ser utilizada nele.

2.3 FERRAMENTA DE USINAGEM OP. 80 5L

Para usinagem de torneamento desta operação, utiliza-se um porta ferramentas com o conceito Capto, que é uma ferramenta modular de troca rápida, que propicia uma alta precisão de usinagem e um tempo de setup reduzido.

Conforme pode ser visto na Figura 11, o capto utiliza um inserto de CBN com duas arestas de corte.

Figura 11 - Porta ferramentas Capto



Fonte: do próprio autor

Este Capto é acoplado no fuso da máquina, que tem a possibilidade de utilizar 7 porta ferramentas simultaneamente, conforme pode ser visto na figura 12. Esta funcionalidade é de extrema importância pois, devido a vida desta ferramenta ser baixa, em torno de 100 peças por aresta, teriam de ser realizadas diversas trocas de ferramenta durante um turno produtivo, impactando diretamente no tempo de ciclo da máquina. Com esta opção de montabilidade de 7 portas ferramenta simultaneamente, a máquina, após o fim de vida de um inserto, faz a alteração para a outra posição de ferramenta automaticamente, reduzindo em 7 vezes a quantidade de trocas necessárias.

Figura 12 - Fixação das ferramentas na máquina



Fonte: do próprio autor

Em relação ao inserto de CBN, trata-se de uma das ferramentas de maior custo da planta. Isto porque o conceito do inserto permite a utilização de apenas duas arestas de corte, e a vida útil desta ferramenta, após otimização do processo ao longo dos anos, continua sendo baixa. Embora a utilização de CBN para torneamento seja altamente recomendada, devido ao material resistir a altas forças e temperaturas de corte e ainda manter sua aresta de corte, estuda-se substituir o material do inserto a fim de reduzir o CPP do processo.

2.4 PARÂMETROS DE CORTE

O entendimento dos parâmetros de corte é de fundamental importância para condução do projeto, pois será através da alteração deles que é pretendido alcançar a combinação ótima de fatores para a redução dos custos de usinagem.

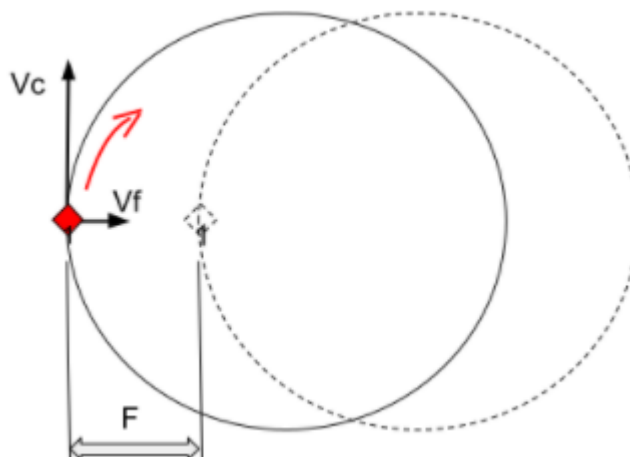
Segundo Machado (2009), devido ao processo de usinagem ter diversas variáveis, é praticamente impossível prever o desempenho no corte de metais. Sendo assim, essa variedade de opções de parâmetros de entrada de processo resulta em muitas combinações possíveis, restando três maneiras de lidar com essa complexidade. A primeira é através de sucessivas tentativas e erros, a segunda é através de experimentações, e, por fim, por intermédio de modelos teóricos. Nada impede que mais de uma destas três opções sejam utilizadas para atingir o objetivo proposto.

Ao longo deste capítulo, entenderemos quais são os principais parâmetros de corte que impactam na usinagem da Op. 80 5L do Virabrequim.

2.4.1 Velocidade de corte

De acordo com Machado (2009), Velocidade de corte (V_c) é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e o sentido do corte. A velocidade de corte pode ser melhor caracterizada conforme figura 13.

Figura 13 - Ilustração Velocidade de corte



Fonte: Adaptado de Machado, 2009

No caso de processos que utilizam movimentos de rotação, V_c pode ser calculado através da equação 2. A unidade de medida deste parâmetro de corte é metros/minuto.

$$V_c = \frac{\pi \times D \times n}{1.000} \quad (2)$$

onde,

D é o diâmetro da peça a ser usinada em mm;

n é o número de rotações por minuto em rpm.

2.4.2 Rotação

A rotação (n) nada mais é do que a velocidade angular do eixo principal da máquina. A mesma é medida através de RPM, que é a rotação por minuto do motor.

2.4.3 Velocidade de avanço

Consoante Machado (2009), a Velocidade de avanço (V_f) é a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante da ferramenta, segundo a direção e o sentido de avanço. Ela pode ser calculada por meio da equação 3. A unidade de medida deste parâmetro de corte é mm/minuto.

$$V_f = F_z \times z \times n \quad (3)$$

onde,

F_z é o avanço por aresta de corte em mm/min;

z é o número de insertos da ferramenta;

n é o número de rotações por minuto em rpm.

2.4.4 Avanço por aresta de corte

Segundo Machado (2009), o avanço por aresta de corte (F_z) é o percurso de avanço de cada dente medido na direção do avanço da ferramenta. Este avanço pode ser calculado através da equação 4. A unidade de medida deste parâmetro de corte é mm/revolução.

$$F_z = \frac{V_f}{n \times z} \quad (4)$$

onde,

V_f é a velocidade de avanço em mm/min;

z é o número de insertos da ferramenta;

n é o número de rotações por minuto em rpm.

2.5 DESGASTES DE FERRAMENTAS DE CORTE

Devido a busca pela melhor eficiência no processo de usinagem, procura-se utilizar o máximo do potencial de cada ferramenta utilizada. Na maioria dos casos, o limitador da vida útil da ferramenta é o desgaste da mesma, que após atingir certo ponto, deixa de exercer suas funções de corte, gerando avarias na peça usinada.

A saída deste projeto de delineamento de experimentos será o desgaste do inserto, na qual a combinação de fatores que apresentar um menor grau de desgaste na ferramenta será a escolhida, então é de suma importância entender alguns dos principais tipos de desgaste em insertos.

De acordo com Machado (2009), mesmo se a ferramenta de corte possuir tenacidade suficiente para evitar uma avaria, estará sempre sujeita ao desgaste. Verifica-se, assim, um desgaste progressivo tanto na superfície de folga quanto na superfície de saída da ferramenta.

São três os principais tipos de desgaste que ocorrem em ferramentas de corte: desgaste de flanco, craterização e desgaste de entalhe.

- Desgaste de flanco (Figura 14)

O tipo mais comum de desgaste da ferramenta de corte é preferível porque oferece vida útil da ferramenta previsível e estável. O desgaste de flanco ocorre em razão da abrasão causada por elementos duros no material da peça (SANDVIK, 2021).

Figura 14 - Desgaste de flanco



Fonte: Sandvik, 2021

- Craterização (Figura 15)

A craterização da ferramenta de corte é localizada na face de ataque da pastilha e ocorre devido a uma reação química entre o material da peça e a ferramenta de corte e pode ser ampliada pela velocidade de corte. A craterização excessiva enfraquece a aresta de corte e pode causar a quebra (SANDVIK, 2021).

Figura 15 - Craterização



Fonte: Sandvik, 2021

- Desgaste tipo entalhe (Figura 16)

O desgaste da pastilha é caracterizado pelo excesso de danos localizado na face de ataque e no flanco da pastilha na profundidade da linha de corte. É causado pela adesão (soldagem dos cavacos por pressão) e uma deformação na superfície endurecida (SANDVIK, 2021).

Figura 16 - Desgaste tipo entalhe



Fonte: Sandvik, 2021

Como citado anteriormente, a variável de saída deste DOE será o desgaste do inserto, em milímetros. O equipamento de medição utilizado para dimensionamento desta característica é uma máquina óptica da Hexagon, com lente que aproxima até 72 vezes uma imagem, conforme figura 17.

Figura 17 - Máquina óptica Hexagon



Fonte: do próprio autor

Para garantir que os resultados obtidos nesta máquina são confiáveis, ela é calibrada anualmente. Além disso, existem padrões para verificação periódica das medidas, atividade que pode ser feita a qualquer momento.

2.6 REQUISITOS DE QUALIDADE DO PROCESSO

Outro fator de extrema importância que deve ser levado em consideração na implementação deste projeto são as características de qualidade exigidas nas usinagens que são realizadas na Op. 80 5L do Virabrequim. Não adianta nada obter um ganho significativo em vida de ferramenta se a qualidade do produto não for garantida.

A empresa Y utiliza como documentação para gestão das características de qualidade um plano de controle, sendo que neste documento é contido informações como frequência de controle, características a serem inspecionadas, tolerâncias de produto e métodos de controle. No caso específico da Op. 80 5L, as características controladas no acabamento da flange são o batimento e a perpendicularidade da face. Em relação ao diâmetro do cubo, são controlados o diâmetro externo, o batimento e a profundidade do undercut. Por fim, para o acabamento do alojamento da engrenagem de sincronismo são controlados o diâmetro, batimento e profundidade do undercut.

Essas características são dimensionadas com o auxílio de gages de medição da própria linha de usinagem, conforme pode ser visto na figura 18, e também nas máquinas tridimensionais localizadas na área de metrologia da empresa.

Figura 18 - Rota de qualidade



Fonte: do próprio autor

É de suma importância seguir os procedimentos de trabalho da estação a fim de garantir a eficácia da medição.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo aborda sobre todas as disciplinas do curso que servem de referência para desenvolvimento do projeto, bem como as ferramentas e técnicas que servem como base para a aplicação na prática destes conceitos.

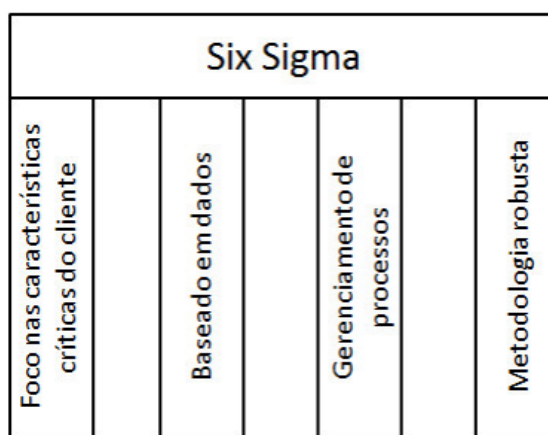
3.1 INTRODUÇÃO AO SEIS SIGMA

De acordo com Rotondaro (2002), diversos métodos de melhoria foram aplicados no início das indústrias com o objetivo de prover melhorias na qualidade dos produtos, sendo o método de Deming, o ciclo PDCA (Planejar, Executar, Verificar, Agir), um dos mais populares.

Em 1987, com o objetivo de tornar as empresas capazes de enfrentar seus concorrentes, que tinham preços menores e produtos de alta qualidade, a Motorola deu origem ao seis sigma. Seis sigma nada mais é do que uma estratégia gerencial disciplinada, que tem como objetivo aumentar drasticamente a performance e a lucratividade das empresas, por meio da melhoria na qualidade dos produtos e processos (Werkema, 2012). Essa metodologia se difundiu rapidamente nas áreas de manufatura e serviço das grandes empresas, tais como General Eletric (GE), ABB e Allied Signal obtiveram lucros na casa dos bilhões de reais em poucos anos.

Rotondaro (2002) considera que o Seis Sigma se apoia em quatro colunas, conforme figura 19.

Figura 19 - As bases do Six Sigma



Fonte: Rotondaro, 2002

Na figura 20 demonstrada a seguir, é possível observar benefícios resultantes de se alcançar o padrão Seis Sigma, de forma financeira:

Figura 20 - Tradução do nível de qualidade na forma financeira

Nível da qualidade	Defeitos por milhão (ppm)	Custo da não qualidade (percentual do faturamento da empresa)
Dois sigma	308.537	Não se aplica
Três sigma	66.807	25 a 40%
Quatro sigma	6.210	15 a 25%
Cinco sigma	233	5 a 15%
Seis sigma	3,4	< 1%

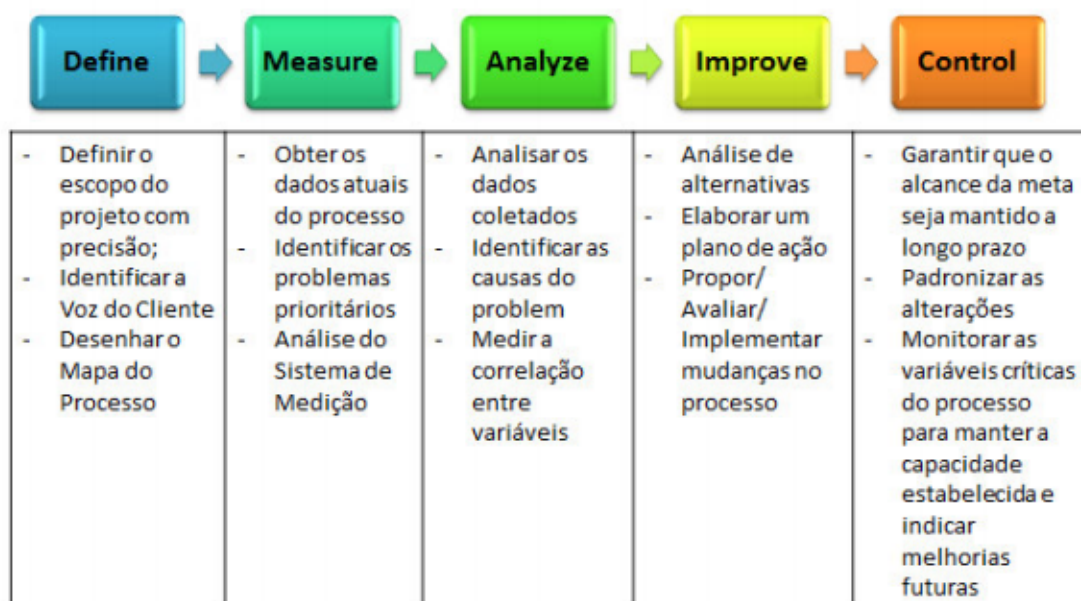
Fonte: Werkema, 2012

Ao longo dos anos, esta ferramenta foi passando por diversas transformações, sendo o método DMAIC (Define, Measure, Analyze, Improve, Control) a abordagem padrão para condução de projetos Seis Sigma.

3.2 DMAIC

A estrutura do DMAIC pode ser vista conforme figura 21.

Figura 21 - Estrutura DMAIC

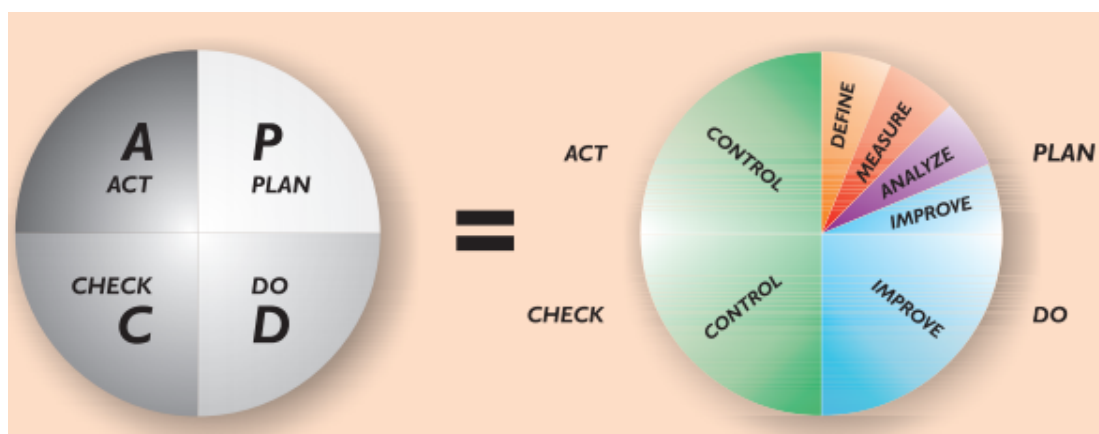


Fonte: Rotondaro, 2002

De acordo com Pande (2001), o método MAIC (Medir, Analisar, Melhorar, Controlar) foi desenvolvido pela empresa Motorola como uma melhoria do antigo método PDCA, e depois que foi adotado pela GE, passou a ser constituída por DMAIC, com a inclusão do Define.

De forma gráfica, Werkema (2012) expõe a correlação entre o método PDCA e o método DMAIC, conforme figura 22.

Figura 22 - Correlação PDCA x DMAIC



Fonte: Werkema, 2012

3.3 CONCEITOS LEAN

No entender de Dennis (2008), a produção Lean, também conhecida como o Sistema Toyota de Produção, representa fazer mais com menos, e ao mesmo tempo, dar aos clientes o que eles querem.

Já segundo Werkema (2012), o Lean é uma iniciativa que busca eliminar desperdícios, isto é, excluir o que não tem valor para o cliente e imprimir velocidade à empresa. Ainda segundo Werkema, estes desperdícios podem ser divididos em 7 categorias: Defeitos, Excesso de produção, Estoques, Processamento, Movimento, Transporte e Espera. Alguns exemplos destes desperdícios podem ser observados na figura 23.

Figura 23 - Exemplos de desperdícios

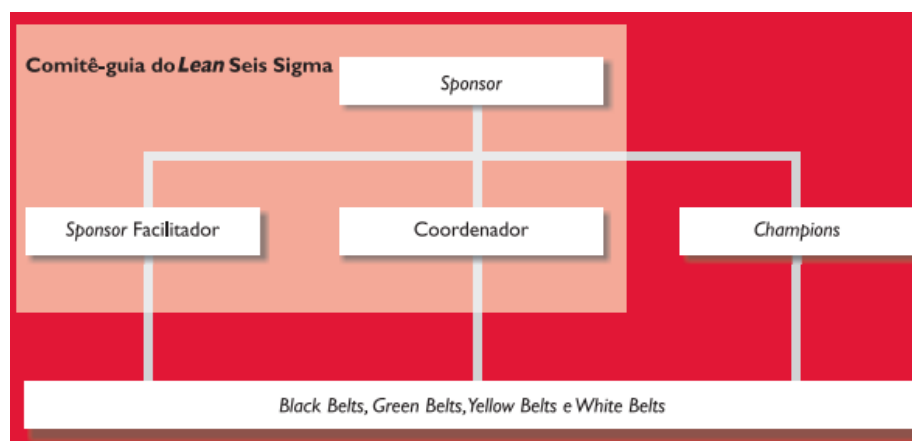
Tipo de desperdício	Exemplos
Defeitos	Erros em faturas, pedidos, cotações de compra de materiais.
Excesso de produção	Processamento e/ou impressão de documentos antes do necessário, aquisição antecipada de materiais.
Estoques	Material de escritório, catálogos de vendas, relatórios.
Processamento desnecessário	Relatórios não necessários ou em excesso, cópias adicionais de documentos, reentrada de dados.
Movimento desnecessário	Caminhadas até o fax, copiadora, almoxarifado.
Transporte desnecessário	Anexos de <i>e-mails</i> em excesso, aprovações múltiplas de um documento.
Espera	Sistema fora do ar ou lento, ramal ocupado, demora na aprovação de um documento.

Fonte: Werkema, 2012

3.4 IMPLEMENTAÇÃO DO LEAN SEIS SIGMA NAS EMPRESAS

No entender de Werkema (2012), para que as ferramentas de qualidade do Lean Seis Sigma atendam as expectativas esperadas e gerem bons resultados, é de suma importância que todos os envolvidos da empresa sejam responsáveis por conhecer e implementar os conceitos e a sua metodologia. Para isso acontecer, o CEO ou principal responsável por esta empresa deve estar comprometido com o programa, pois o Lean deve ser implementado de cima para baixo. Sendo assim, ele é responsável por prover o treinamento de todos os interessados, dividindo a empresa em níveis de conhecimento, onde é formada uma cadeia de ensino, a qual pode ser melhor demonstrada na figura 24.

Figura 24 - Estrutura básica para implementação LSS



Fonte: Werkema, 2012

3.5 DELINEAMENTO DE EXPERIMENTOS

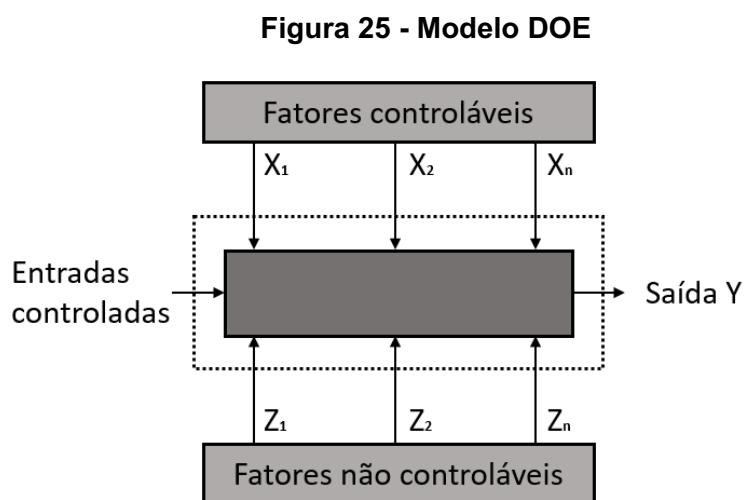
Segundo Calegare (2009), um experimento pode ser definido como um ensaio, ou uma série de ensaios, nas quais são realizadas alterações de forma proposital nas variáveis de entrada de um processo ou sistema, de forma que possam ser observadas as razões para as mudanças a serem observadas nas variáveis de saída (respostas). Estes experimentos podem ser realizados em todos os campos de conhecimento.

Ainda segundo Calegare, obedecendo aos princípios de gestão da qualidade total, os experimentos têm quatro fases, seguindo o ciclo PDCA:

- P - Planejamento do experimento;
- D - Realização do experimento;
- C - Análise dos resultados obtidos no experimento;
- A - Ação após análise dos resultados.

Já de acordo com Mattos (2004), um experimento é um teste ou uma série de testes nos quais as variáveis de entrada de um sistema são manipuladas para serem identificadas as razões das mudanças nas variáveis de saída. O projeto experimental permite manipular os fatores interferidores em um processo produtivo, fazendo-os variar para avaliação dos seus efeitos nas características funcionais.

Na figura 25 pode-se observar um modelo geral de um processo para DOE.



Fonte: Adaptado de Calegare, 2009

Para Aranda, Jung e Ten Caten (2008), o projeto de Experimento é uma técnica utilizada para definir quais dados, em quais quantidades e condições devem ser coletados durante um determinado experimento, buscando satisfazer dois grandes objetivos: a precisão estatística da resposta e o menor custo.

De acordo com Hajjaji (2010), as técnicas do DOE possuem diversos benefícios, como mais informações levantadas nos experimentos planejados do que em relação às abordagens feitas pelo método de tentativa e erro; Propicia uma redução no número de experimentos, impactando diretamente nos custos; Realiza o cálculo de interações entre as variáveis de controle, levando a um maior conhecimento do processo e, por fim, auxilia no levantamento das melhores condições experimentais na tentativa de aumentar a produtividade.

Calegare (2009) entende que existem diversos tipos de delineamento de experimentos que podem ser utilizados para determinadas situações. Para escolher de forma correta o tipo de delineamento, deve-se levar em consideração alguns fatores, os quais são citados na figura 26 e 27.

Figura 26 - Tipos de Delineamento de experimentos pt. 1

Tipo	Quando utilizar	Como realizar os ensaios	O que se procura
Com um único fator e totalmente randômico	Usado quando estamos interessados em estudar cada vez os efeitos de apenas um fator.	- A ordem de realização dos ensaios é escolhida aleatoriamente (por sorteio). - As unidades experimentais são escolhidas também ao acaso. - Não existe blocagem.	1 - Estimativa dos efeitos dos tratamentos. 2 - Comparação entre os efeitos dos tratamentos. 3 - Estimativa da variância.
Fatorial (Com dois ou mais fatores)	Recomendado quando estamos interessados em estudar os efeitos de dois ou mais fatores, em vários níveis, e pode existir interação entre os fatores.	- São realizados ensaios para todas as combinações possíveis dos vários níveis de todos os fatores. - A ordem de realização dos ensaios e a escolha das unidades experimentais são ao acaso (por sorteios). - Não existe blocagem.	1 - Estimativa dos efeitos com vários fatores. 2 - Comparação entre os efeitos dos tratamentos, em vários níveis. 3 - Estimativa de interação entre fatores. 4 - Estimativa da variância.
Fatorial com blocagem	Recomendado quando estamos interessados em estudar o efeito de um fator, mas existe uma certa variabilidade provocada por fontes perturbadoras conhecidas (ruídos).	- As fontes perturbadoras são divididas em blocos homogêneos (lotes, operadores, tempo, etc.). - São feitos os ensaios para todos os níveis do fator em cada bloco. - A ordem de realização dos ensaios é determinada ao acaso (sorteio).	As mesmas que no experimento Fatorial (Nota: algumas interações de ordem mais alta estão confundidas com os blocos e não podem ser estimadas.)
2° Fatorial	É um subtipo do experimento fatorial que é recomendado quando existem apenas dois níveis (alto e baixo ou presente e ausente) de cada fator.	Igual ao experimento fatorial (Nota: cada fator tem apenas 2 níveis: - Alto e baixo; ou - Presente e ausente.)	Igual ao experimento fatorial

Fonte: Adaptado de Calegare, 2009

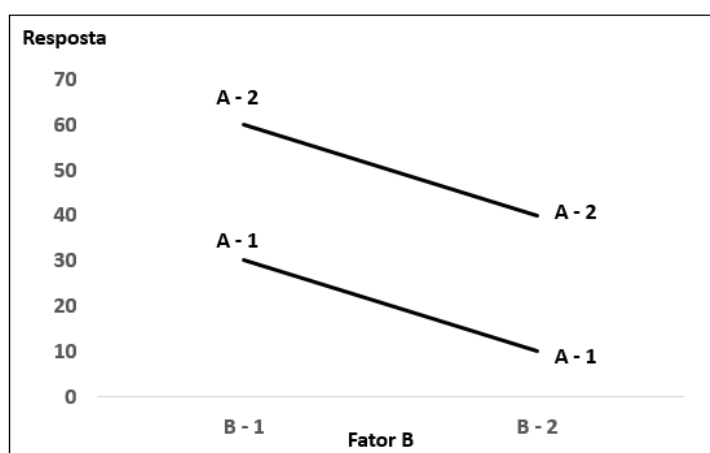
Figura 27 - Tipos de Delineamento de experimentos pt. 2

Tipo	Quando utilizar	Como realizar os ensaios	O que se procura
Quadro latino	Recomendado quando estamos interessados em estudar os efeitos de um fator, porém os resultados dos ensaios podem ser afetados por dois outros fatores ou por duas fontes de não-homogeneidade e não existem indícios de interação entre os fatores.	<ul style="list-style-type: none"> - O número do tratamento do fator em estudo (letra latina) deve ser igual ao número de colunas ou de linhas. - O número de colunas é igual ao de linhas. - Cada tratamento de letra latina ocorre uma vez em cada linha e uma vez em cada coluna. - Existe blocagem dos outros dois fatores, que correspondem às linhas e colunas ao quadrado. 	<ol style="list-style-type: none"> 1 - Estimativa efeitos dos tratamentos do fator em estudo, sem a influência dos fatores bloqueados. 2 - Comparação dos e feitos dos tratamentos do fator em estudo. 3 - Estimativa e comparação dos efeitos dos tratamentos dos fatores bloqueados. 4 - Estimativa da variância.
Operação evolutiva	Apropriado quando se deseja fazer os experimentos para otimizar a saída do processo sem parar a produção, a baixos custos e quando se dispõe de tempo e pode-se permitir algum risco de produto não conforme. (Exemplo: Indústrias de processos.)	<ul style="list-style-type: none"> - Podem ser usados experimentos com um único fator, fatorial ou fatorial com blocagem. - Devem ser selecionados os fatores que mais influem na saída (em geral, dois ou três fatores). - Os níveis dos fatores são mudados com pequenos passos em torno do padrão de referência. - São calculados os efeitos após alguns ciclos e pe estabelecido um novo padrão de referência. - Os níveis dos fatores são mudados em torno de novos padrões, indefinidamente, buscando-se a otimização da saída. 	<ol style="list-style-type: none"> 1 - Estimativa e comparação dos efeitos dos tratamentos dos fatores em estudo. 2 - Níveis dos tratamentos que otimizam a saída.

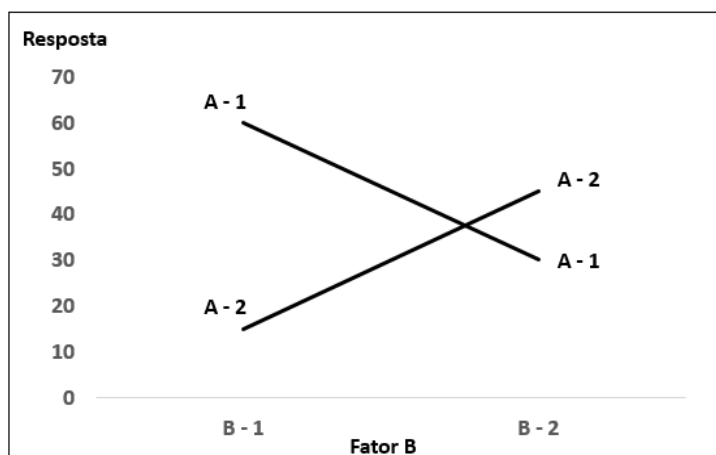
Fonte: Adaptado de Calegare, 2009

Calegare (2009) também afirma que existe interação entre os fatores quando certas combinações de seus tratamentos produzem respostas inusitadas, melhores ou piores, diferentes do que se poderia esperar. Quando existe interação entre os fatores, a diferença entre as respostas médias não é a mesma para todos os níveis do fator. Para exemplificar melhor esta afirmação, pode-se comparar de forma gráfica, nas figuras 28 e 29, a diferença entre fatores com e sem interação.

Figura 28 - Experimento fatorial sem interação



Fonte: Adaptado de Calegare, 2009

Figura 29 - Experimento fatorial com interação

Fonte: Adaptado de Calegare, 2009

Ainda segundo o autor, o efeito do fator é definido como a variação na saída (Y) produzida pela mudança do nível do fator.

4 DESENVOLVIMENTO

Para se atingir os objetivos propostos neste projeto, além de uma análise do mercado com a avaliação das propostas de novas tecnologias para usinagem, será realizado um delineamento de experimentos a fim de otimizar o processo e diminuir o desgaste do inserto, chegando a maior vida que for possível nesta ferramenta e consequentemente reduzir o custo por peça de fabricação.

4.1 MAPEAMENTO DOS FORNECEDORES

Como já destacado nos capítulos anteriores, o alto CPP para usinagem da Op. 80 5L do Virabrequim originou a necessidade de busca por outras vias para redução destes custos. O inserto atual, de composição CBN, tem um custo elevado, e na relação custo benefício apresenta fragilidades por não ser possível um aumento de vida devido a variações de medidas e lascamento do inserto.

Sendo assim, o primeiro passo é avaliar junto aos fornecedores de ferramentas de corte quais os tipos de ferramentas que podem ser aplicadas neste processo em específico, que tenham um custo conveniente e que também atendam todas as características de qualidade vinculadas a esta operação.

A empresa Y tem uma metodologia interna para seleção de fornecedores que é chamada de 7 Steps de ferramentas de corte. O objetivo é fazer um trabalho em conjunto com a área de compras, responsável pela negociação direta com os fornecedores, a fim de buscar a melhor alternativa, tanto técnica quanto financeira, disponível no mercado.

Como primeiro passo dessa metodologia, é necessário mapear a ferramenta a ser trabalhada, passo que já foi discutido anteriormente, sendo escolhida a Op. 80 5L do Virabrequim. Em sequência, é elaborado um escopo técnico com todas as informações relevantes sobre esta usinagem para ser enviado aos fornecedores, como tipo de material a ser usinado, limitações de parâmetros da máquina, características de qualidade a serem atingidas, etc.

Tendo este escopo feito, a área de compras faz o envio deste material aos fornecedores que detêm esta tecnologia, desta forma, é possível estimular a concorrência entre fornecedores para obter as melhores soluções. Por fim, após

recebimento das cotações, é realizado o confronto técnico e comercial das propostas, e a melhor das opções é a escolhida para dar início aos testes em máquina.

Seguindo esta metodologia, foi selecionado o fornecedor Alfa que apresentou uma proposta para utilização de um inserto de MD com 4 arestas de corte disponíveis.

4.2 DEFINIÇÃO DOS FATORES, NÍVEIS E SAÍDA DO PROCESSO

Tendo definido o novo conceito de ferramenta para teste, e seguindo a metodologia do DOE, será necessário avaliar quais são os inputs do processo e quais as saídas esperadas, conforme figura 30.

Figura 30 - Entradas e saídas do processo



Fonte: do próprio autor

Serão mapeadas todas as variáveis x que têm influência sobre a resposta y , e será feita uma escolha dos níveis de cada uma destas variáveis a fim de realizar diversos testes, combinando estes fatores de forma aleatória para se obter o melhor resultado de saída. Isto se faz necessário pois devido a alteração de material do inserto, os parâmetros atuais de máquina tendem a não ser mais eficazes.

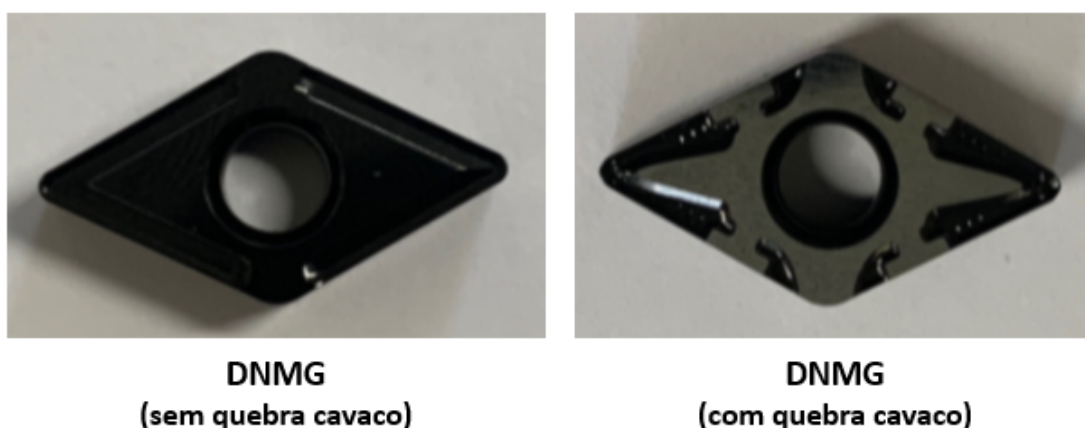
Primeiramente, o tipo de delineamento de experimentos escolhidos foi o Fatorial. Segundo Calegare (2009), o DOE fatorial é recomendado quando estamos interessados em estudar os efeitos de dois ou mais fatores, em vários níveis, e pode existir interação entre os fatores.

A escolha dos fatores de entrada controláveis foi realizada com base no conhecimento obtido ao longo dos anos sobre as variáveis que têm maior influência

nesta operação. São eles: rotação do motor (n), velocidade de avanço (V_f) e classe do inserto. Destes três fatores, dois deles são considerados quantitativos, pois são medidos de forma numérica, quais sejam a rotação e a velocidade de avanço. Já a classe do inserto é classificada como fator qualitativo, pois uma ferramenta tem uma condição diferente da outra.

Tendo os fatores controláveis do experimento definidos, se faz necessário definir quais os níveis de cada um destes fatores. Para a classe de inserto, foram selecionados dois níveis, pois o fornecedor Alfa ofereceu duas possíveis novas tecnologias de ferramenta, um inserto DNMG sem quebra cavaco, e um inserto DNMG com quebra cavaco, conforme pode ser observado na figura 31.

Figura 31 - Classes de insertos



Fonte: do próprio autor

Em relação a rotação do motor da máquina, foi realizado uma análise com base em indicações do próprio fornecedor da ferramenta, onde consta na embalagem do produto sugestões de velocidade de corte a serem aplicadas no processo utilizando este inserto. Segundo o fornecedor, o ideal é que V_c fique entre 280 a 350 mm/mm. Relembrando a equação 2, apresentada no capítulo 2.4.1:

$$V_c = \frac{\pi \times D \times n}{1.000} \quad (2)$$

Considerando que o diâmetro a ser usinado é de 95mm, para se atingir uma velocidade de corte entre 280 a 350 m/mm, a rotação indicada deve estar entre 938

à 1173 rpm. Porém, temos um fator complicador que é o limite de rotação do motor desta máquina. O maior valor de rpm possível é 1.000. Sendo assim, os dois níveis escolhidos para este fator são 700 e 1000 rpm. O motivo é que a rotação do inserto anterior já era 700 rpm, e apresenta resultados aceitáveis de desgaste, e o outro nível é o limite máximo do motor.

Por fim, a definição da velocidade de avanço também foi realizada com base em indicações do fornecedor, a qual indica que o avanço por aresta de corte (F_z) é indicado estar entre 0,1 a 0,5 mm/rev. Relembrando a equação 4, apresentada no capítulo 2.4.4:

$$F_z = \frac{V_f}{n \times z} \quad (4)$$

Tendo em consideração que a rotação (n) será entre 700 e 1.000 rpm, bem como a quantidade de insertos (z) é 1, os níveis escolhidos para velocidade de avanço (V_f) foram 130 e 180 mm/min. A velocidade mínima de 130 mm/min foi escolhida pois um dos objetivos do projeto é não aumentar o tempo de ciclo da máquina. A V_f atual é de 130 mm/min, caso ela seja reduzida, o tempo de ciclo aumenta, tratando-se de um limitante do processo. Já a velocidade máxima de 180 mm/min foi escolhida pois com este valor, o F_z fica centrado na nominal indicada pelo fornecedor.

Sendo assim, o DOE fica composto por 3 fatores, cada um deles com dois níveis diferentes (2^3), conforme demonstrado na figura 32.

Figura 32 - Fatores e níveis do DOE

FATORES	NÍVEIS	
Classe do inserto	1	DNMG (sem quebra cavaco)
	2	DNMG (com quebra cavaco)
Rotação (n)	1	700 rpm
	2	1.000 rpm
Velocidade de avanço (V_f)	1	130 mm/min
	2	180 mm/min

Fonte: do próprio autor

Para finalizar, resta definir qual a variável de saída Y do DOE. A escolha foi feita pelo desgaste de flanco do inserto, quanto menor o desgaste, melhor o resultado. A vida do inserto de CBN era de 100 peças, então para um melhor entendimento de como o inserto de MD irá se comportar, a vida a ser realizada nos testes foi reduzida para 75 peças, pois trata-se de um novo processo, para que posteriormente, com base nos resultados obtidos, seja realizada uma análise para otimizar estes resultados.

A pretensão é que todos os testes mesclando as variáveis sejam realizados no menor espaço de tempo possível para que as variáveis não controláveis (ruídos) não causem um impacto significativo nos testes, como o material do virabrequim, a temperatura ambiente, o operador da máquina, etc.

4.3 PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO

Para auxiliar no gerenciamento e análise dos dados, será utilizado o software Minitab, que tem recursos específicos para DOE. Este software receberá todos os inputs do processo, mapeados no capítulo 4.2, e disponibilizará um quadro com a ordem dos testes a serem realizados.

Como já informado anteriormente, o tipo de DOE escolhido para esta monografia é o Fatorial. Tendo isso definido, o software indica quantos ensaios devem ser realizados, de acordo com a quantidade de fatores, a fim que o estudo seja confiável. Conforme pode ser visto na figura 33, a quantidade de ensaios deve ficar na área verde. No caso deste projeto, onde existem 3 fatores com 2 níveis, a quantidade mínima de ensaios é 8, assim sendo considerado um Fatorial Completo.

Figura 33 - Experimentos disponíveis Minitab

Criar Experimento Fatorial: Exibir Experimentos Disponíveis														
Experimentos Fatoriais Disponíveis (com Resolução)														
	Fatores													
Ens	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
4	Com	III												
8		Com	IV	III	III	III								
16			Com	V	IV	IV	IV	III	III	III	III	III	III	III
32				Com	VI	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
64					Com	VII	V	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
128						Com	VIII	VI	V	V	IV	IV	IV	IV

Fonte: do próprio autor

Além dos 8 ensaios já programados (2^3), foi selecionado a opção de réplica no software, onde todos os testes serão realizados duas vezes. Isso permite que tenha-se uma estimativa do erro experimental que pode afetar os resultados, além de verificar a influência de uma variável no comportamento do processo. Sendo assim, foram realizados inicialmente 16 ensaios, de forma aleatória, que o próprio software disponibiliza conforme figura 34.

Figura 34 - Ordem dos ensaios

↓	C1	C2	C3	C4	C5-T	C6	C7	C8
	OrdemPad	OrdemEns	PtCentral	Blocos	Classe do Inserto	Rotação	Velocidade avanço	Desgaste (mm)
1	3	1	1	1	DNMG	1000	130	
2	9	2	1	1	DNMG	700	130	
3	2	3	1	1	DNMG WE	700	130	
4	10	4	1	1	DNMG WE	700	130	
5	6	5	1	1	DNMG WE	700	180	
6	12	6	1	1	DNMG WE	1000	130	
7	5	7	1	1	DNMG	700	180	
8	13	8	1	1	DNMG	700	180	
9	8	9	1	1	DNMG WE	1000	180	
10	15	10	1	1	DNMG	1000	180	
11	11	11	1	1	DNMG	1000	130	
12	4	12	1	1	DNMG WE	1000	130	
13	1	13	1	1	DNMG	700	130	
14	16	14	1	1	DNMG WE	1000	180	
15	14	15	1	1	DNMG WE	700	180	
16	7	16	1	1	DNMG	1000	180	

Fonte: do próprio autor

A ordem dos testes foi seguida conforme a coluna C2 da figura 34.

4.4 EXECUÇÃO DOS EXPERIMENTOS

Com a ordem dos ensaios já estabelecida, se faz necessário o acompanhamento de um operador da máquina que tenha amplo conhecimento sobre o funcionamento dela, para realizar as trocas de ferramentas e auxiliar em possíveis problemas que possam vir a ocorrer no decorrer dos testes.

A nova tecnologia de inserto utiliza um corpo de ferramenta diferente, porém no mesmo conceito de Capto, conforme figura 35.

Figura 35 - Novo corpo de ferramenta Capto



Fonte: do próprio autor

Então o primeiro passo é realizar a troca do corpo de ferramenta, que tem o mesmo sistema de fixação, para que seja possível a utilização dos novos insertos, conforme figura 36.

Figura 36 - Substituição da do corpo da ferramenta



Fonte: do próprio autor

Embora o fuso da máquina tenha a opção de montagem de 7 corpos de ferramentas diferentes, foi optado por realizar os ensaios com apenas um Capto, para que seja eliminada uma possível variável de ruído que é a posição da ferramenta.

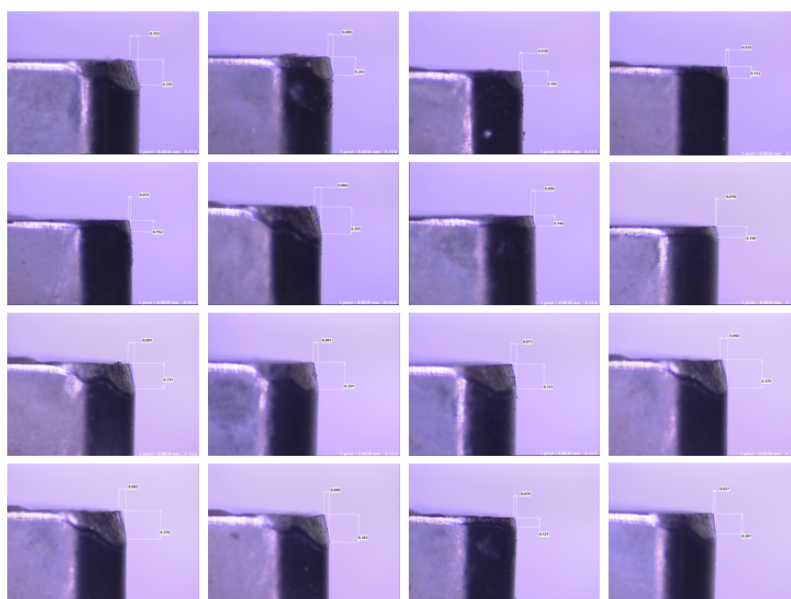
Seguindo a ordem pré estabelecida pelo software, foram realizados sequencialmente os 16 ensaios, com a vida da ferramenta programada para 75 peças, alterando no início de cada teste os fatores de rotação, classe do inserto e velocidade de avanço. No início e no final da vida de cada ensaio, foi realizada uma inspeção visual e dimensional das características usinadas neste processo, a fim de garantir a qualidade das peças e detectar possíveis problemas oriundos de parâmetros de corte não ideais.

4.5 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para que possa ser avaliado os resultados de saída de cada ensaio, que é o desgaste do inserto, foi realizada uma marcação em cada aresta de corte a fim de indicar qual é o seu ensaio respectivo, isso porque os ensaios foram realizados de forma totalmente aleatória, variando os 3 fatores em cada teste.

Com o auxílio da máquina óptica Hexagon, foi possível realizar a medição do desgaste de cada uma das arestas, para que os dados possam ser imputados no software Minitab, conforme pode ser visto nas figuras 37.

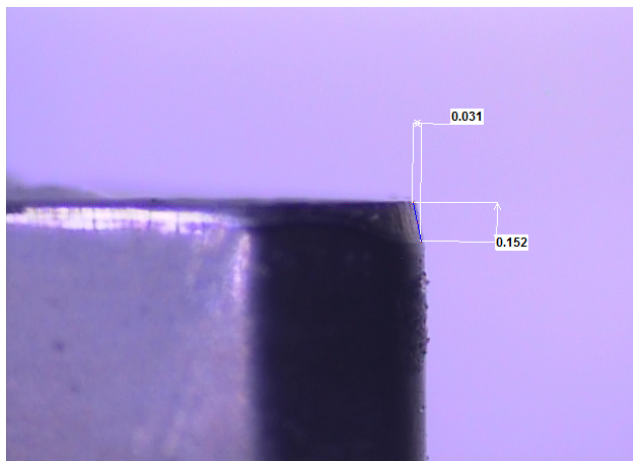
Figura 37 - Medições dos desgaste dos insertos



Fonte: do próprio autor

A saída do DOE é uma variável quantitativa, medida em milímetros, que pode ser melhor demonstrada na figura 38.

Figura 38 - Desgaste de flanco da amostra 5

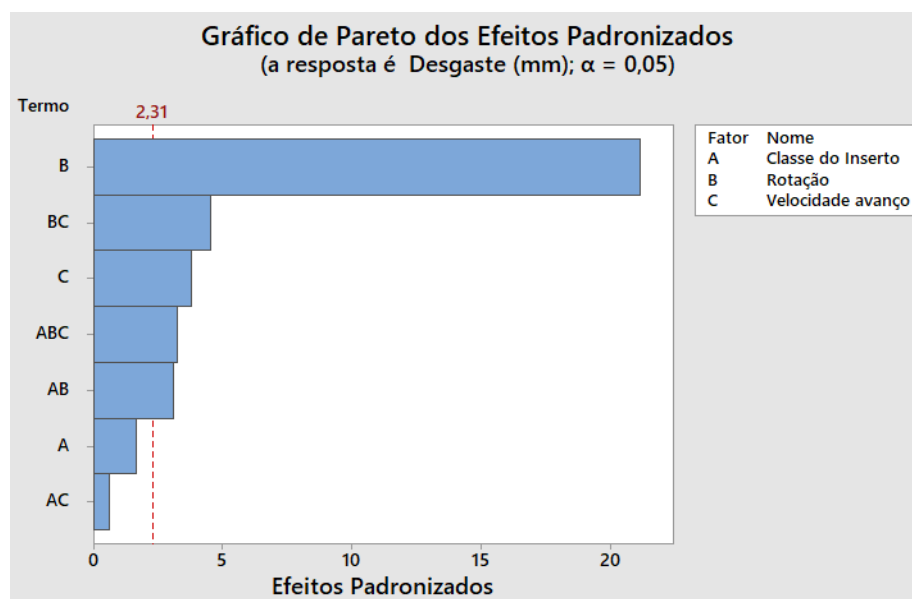


Fonte: do próprio autor

Tendo os resultados de saída dimensionados, os dados foram imputados no experimento do Minitab para serem avaliados. Dentre as diversas opções de ferramentas de análise deste software, foram escolhidas duas como principais para verificação das interações e melhores combinações entre fatores e níveis, que são o gráfico de pareto dos efeitos e o gráfico de interação para desgaste.

Conforme pode ser visto no gráfico de pareto da figura 39, com um nível de 95% de confiança, o fator de rotação é de forma disparada o que mais tem efeito no desgaste do inserto.

Figura 39 - Gráfico de Pareto dos efeitos

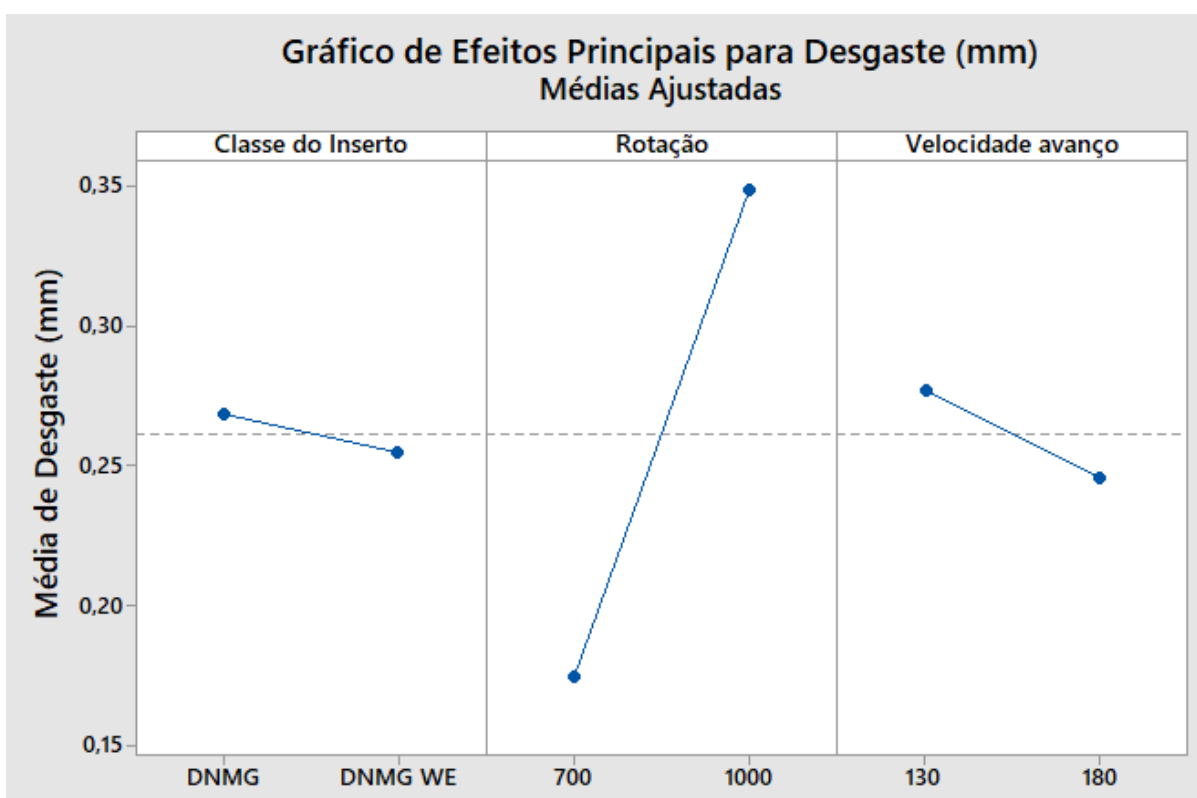


Fonte: do próprio autor

Devido a este alto impacto no efeito causado pela rotação, todas as demais interações dos demais fatores com a rotação também se tornam relevantes: BC, ABC e AB. Paralelo a isto, a velocidade de avanço também se mostrou relevante para este estudo. Apenas a classe do inserto e a interação de AC não demonstram impacto no desgaste do inserto.

Agora conhecendo quais os fatores que mais influenciam na saída Y, é de suma importância entender qual o nível destes fatores que apresenta o melhor resultado para a redução do desgaste. Para exemplificar melhor este tema, utiliza-se o gráfico de efeitos, conforme demonstrado na figura 40.

Figura 40 - Gráfico de efeitos principais para desgaste



Fonte: do próprio autor

Como já demonstrado no gráfico de pareto, a classe do inserto tem pouca influência no desgaste do inserto, sendo possível utilizar qualquer uma das ferramentas. Relativo à rotação, pode ser observado que a menor rotação é a que gera um menor desgaste, sendo ela a melhor opção dentre os dois níveis testados. Esta afirmação está de acordo com o feedback do operador de máquina que acompanhou os testes. Ele relatou que durante os ensaios com alta rotação, foi

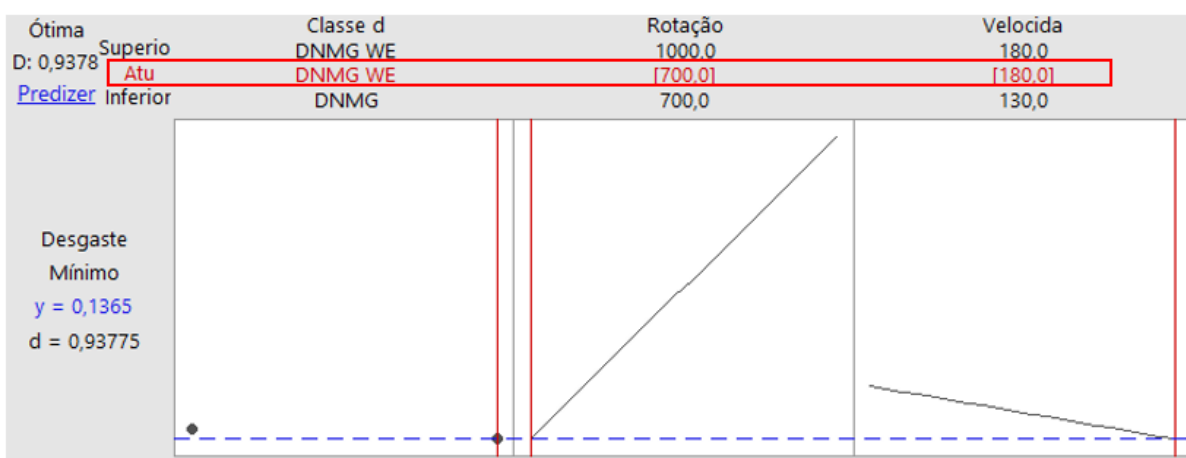
observado uma maior variação entre as medidas de qualidade, podendo causar impactos caso fossem usinadas mais peças além das 75 propostas para cada teste. Por fim, a velocidade de avanço, que também se mostrou ser significativa para o estudo, apresenta melhores resultados de desgaste quando é maior.

Em resumo, a melhor combinação inicialmente encontrada nos testes realizados é a rotação de 700 rpm, a velocidade de avanço de 180 mm/min, e qualquer uma das classes dos insertos.

4.6 OTIMIZAÇÃO DOS RESULTADOS

Para certificar que as análises feitas no capítulo 4.5 referentes a melhor combinação entre fatores está correta, foi utilizada uma funcionalidade no Minitab de otimização de resposta. O software demonstra através de um gráfico quais os melhores níveis para cada fator, conforme pode ser visto na figura 41.

Figura 41 - Gráfico de Otimização



Fonte: do próprio autor

Para atingir os menores resultados de desgaste, segundo o software, é necessário utilizar os níveis indicados no quadro vermelho da figura 41, que são os mesmos já verificados no tópico 4.5.

Assim, inicia-se a segunda parte dos testes em máquina, em que serão utilizados este conjunto de fatores para aumentar de pouco em pouco a vida do inserto. Os testes iniciais foram realizados com a usinagem de 75 peças, então a segunda rodada iniciou com 80 peças, subindo de 10 em 10 peças.

Foi observado que os resultados até 100 peças usinadas por aresta esteve dentro do especificado, porém o operador de máquina relatou que ao tentar elevar a vida até 110 peças, começam a ocorrer variações dimensionais, impedindo chegar até esse valor. Com base nisso, a vida da ferramenta foi estabilizada em 100 peças. A fim de verificar se a máquina estava apresentando estabilidade, foram acompanhados os resultados em diversos testes, o que se confirmou após análise dimensional do desgaste dos insertos.

Sendo assim, foram estabelecidos os novos parâmetros e a nova vida do inserto, que por coincidência é igual a vida do inserto antigo de CBN. O resultado é considerado muito satisfatório por alguns motivos, o primeiro deles é que normalmente insertos de MD, na usinagem de ferro fundido, tendem a apresentar menor vida útil do que insertos de CBN. O segundo ponto positivo é que o novo inserto tem um custo muito abaixo do antigo. E, por fim, o novo inserto possui 4 arestas de corte, enquanto o antigo possui apenas 2.

4.7 CÁLCULO DOS BENEFÍCIOS OBTIDOS

Conforme relatado na justificativa deste projeto, gastava-se aproximadamente R\$ 0,63 em insertos de CBN neste processo para produzir cada virabrequim. Com o novo padrão estabelecido, esse valor foi reduzido para aproximadamente R\$ 0,11. Para atingir este valor, utiliza-se novamente a equação 1:

$$CPP = \frac{\text{Custo Inserto} \times \text{Qtde. Insertos por ferramenta}}{\text{Qtde. arestas por inserto} \times \text{Vida Ferramenta}} \quad (1)$$

Na qual temos,

Custo do Inserto MD 4: R\$ 42,20;

Qtde. Insertos por ferramenta: 1 pç;

Qtde. arestas por inserto: 4;

Vida Ferramenta: 100 pçs.

Com isso, foi obtido uma redução de R\$ 0,52 por virabrequim produzido. Como a produção anual está prevista em 140.000 motores, o benefício deste projeto é de R\$ 73.115,00.

Como custos do projeto, foi necessário fazer a aquisição de três porta ferramentas Capto para manter em estoque. Os demais Captos foram entregues como amostra sem custo. O valor de cada Capto foi de R\$ 1.500,00, sendo o custo total de R\$ 4.500,00.

Como saving do projeto, fazendo o benefício menos o custo, o projeto obteve lucro de R\$ 68.615,00 no ano.

5 CONCLUSÕES

Com a realização deste trabalho, foi possível identificar quais os parâmetros de corte que mais impactam a usinagem de assentamento do volante do motor no virabrequim. Comprovou-se que a rotação do motor da Op. 80 5L gera o principal efeito no desgaste das arestas de corte do inserto de metal duro, seguido pela velocidade de corte, que também tem grande influência.

Foi verificado que, neste caso em específico, a presença de quebra cavaco no inserto de metal duro não tem influência no desgaste da aresta de corte do inserto.

Observou-se que, ao contrário do que é recomendado pelo fornecedor da ferramenta de corte, que indica rotações acima de 1.000 rpm para a operação em específico, obteve-se melhores resultados de desgaste do inserto quando esta rotação é mais baixa, na casa dos 700 rpm.

Uma das premissas do projeto era diminuir ou manter o tempo de ciclo da estação, pois em caso de redução poderia ocasionar perda de produtividade da linha. Apesar das alterações dos parâmetros de corte e classe do material, o tempo de ciclo foi mantido.

Devido a pandemia do coronavírus, ocorreram algumas dificuldades logísticas que causaram atraso ao andamento do projeto, devido ao novo fornecedor de ferramentas ter sua sede no oriente médio. Porém, as demais atividades ocorreram conforme o planejado, outras conseguiram ser antecipadas, e o projeto foi entregue dentro do prazo estabelecido,

Outra dificuldade encontrada foi uma colisão do corpo de ferramenta na carenagem da máquina no primeiro teste realizado. O problema foi resolvido com a realização de um alívio no corpo da ferramenta, impedindo que tivesse contato com a máquina. Com isso, o desenho da ferramenta foi alterado.

O projeto obteve uma redução de 83% no custo por peça desta operação, gerando um saving de aproximadamente R\$ 68.000,00 no ano, superando a expectativa de redução de 50% no início do projeto.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o entendimento da metodologia, é possível aplicar um delineamento de experimentos em diversos outros processos de usinagem além do torneamento. Processos como furação, fresamento, rosqueamento, dentre outros tem total possibilidade de suportar estas atividades a fim de obter ganhos produtivos e financeiros.

REFERÊNCIAS

ARANDA, M. H.; JUNG, C. F.; TEN CATEN, C. S. **Aplicação do Projeto de Experimentos para Otimização de uma Inovação Tecnológica**. Revista Gestão Industrial, v. 04, n. 02, p. 116-132, 2008.

CALEGARE, Álvaro J. A. **Introdução ao delineamento de experimentos**. 2. ed. São Paulo, Editora Blucher, 2009.

DENNIS, Pascal. **Produção Lean Simplificada: Um Guia para Entender o Sistema de Produção Mais Poderoso do Mundo**. 2. ed. São Paulo, Editora Bookman, 2008.

GIL, Antonio C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 5.ed. São Paulo: Atlas, 1999.

FERRARESI, Dino. **Fundamentos da usinagem dos materiais**. São Paulo: Edgard Blücher, 1977.

HAJJAJI, N. **Factorial design of experiment (DOE) for parametric exergetic investigation of a steam methane reforming process for hydrogen production**. Chemical Engineering and Processing, v.49, p.500–507, 2010.

MACHADO, Álisson R. **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo: Blucher, 2009

MATTOS, V. L. D. de. **Identificação de Efeitos de Dispersão em Experimentos com poucas replicações**: Tese de Doutorado Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

MORAES, C.C. **Engenharia de Automação Industrial**. Ed. LTC, Rio de Janeiro – RJ, 2001.

PANDE, Peter S. **Estratégia Seis Sigma: Como a GE, a Motorola e outras grandes empresas estão aguçando seu desempenho**. São Paulo: Qualitymark, 2001.

RICHARDSON, Roberto J. **Pesquisa social: Métodos e Técnicas**. 3. ed. São Paulo: Atlas, 1999.

ROTONDARO, Roberto G. et al. **Seis Sigma. Estratégia Gerencial para controle de processos, produtos e serviços**. São Paulo; Atlas, 2002.

SANDVIK. **Desgaste das arestas de corte**. Disponível em: <<https://www.sandvik.coromant.com/>>. Acesso em: 31 de abril de 2021.

WERKEMA, Cristina. **Criando a Cultura Seis Sigma**. Rio de Janeiro: Campus, Volume 2, 2012.