

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA
CÂMPUS JARAGUA DO SUL - RAU
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM FABRICAÇÃO MECÂNICA

PATRICK LAFIN

ESTUDO COMPARATIVO DE FERRAMENTAS DO TIPO ALISADORA E
CONVENCIONAL NO TORNEAMENTO DO AÇO AISI 1045

Jaraguá do Sul – SC

13 de junho 2018

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA
CÂMPUS JARAGUA DO SUL - RAU
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM FABRICAÇÃO MECÂNICA

PATRICK LAFIN

ESTUDO COMPARATIVO DE FERRAMENTAS DO TIPO ALISADORA E
CONVENCIONAL NO TORNEAMENTO DO AÇO AISI 1045

Trabalho acadêmico de conclusão de curso apresentado ao curso de Tecnologia em Fabricação Mecânica do Câmpus Jaraguá do Sul - Rau do Instituto Federal de Santa Catarina para a obtenção do diploma de Tecnólogo em Fabricação Mecânica.

Orientador: Tiago da Silva, Me.

Jaraguá do Sul - SC

13 de junho 2018

Lafin, Patrick

Estudo comparativo de ferramentas do tipo alisadora e convencional no torneamento do aço AISI 1045 / Patrick Lafin ; orientação de Tiago da Silva. Jaraguá do Sul, SC, 2018.

47 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal de Santa Catarina, Câmpus Jaraguá do Sul - Rau. Tecnologia em Fabricação Mecânica. .
Inclui Referências.

1. Torneamento. 2. Ferramenta wiper. 3. Rugosidade.
I. Silva, Tiago da. II. Instituto Federal de Santa Catarina. . III. Título.

PATRICK LAFIN

ESTUDO COMPARATIVO DE FERRAMENTAS DO TIPO ALISADORA E
CONVENCIONAL NO TORNEAMENTO DO AÇO AISI 1045

Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do título em Tecnologia em
Fabricação Mecânica, pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de
Santa Catarina, e aprovado na sua forma final pela comissão avaliadora
abaixo indicada.

Jaraguá do Sul, 13, junho de 2018.



Prof. Tiago da Silva, Me.

Orientador

Instituto Federal de Santa Catarina



Prof. Gerson Ulbricht, Dr.

Instituto Federal de Santa Catarina



Prof. Delcio Luis Demarchi, Me.

Instituto Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pela vida e saúde para seguir em busca dos meus objetivos.

Aos meus pais e familiares que sempre me apoiaram e se esforçam para me motivar todos os dias.

Aos meus amigos e colegas de empresa que me ajudaram no desenvolvimento do trabalho, com ideias e sugestões.

A todos os professores do IFSC que me proporcionaram oportunidades de aprendizado ao longo desses anos, em especial aos professores Tiago da Silva e Eduardo Castaldo que me orientaram na execução do trabalho.

RESUMO

Em usinagem, a otimização dos parâmetros de corte e o emprego de novos materiais e geometrias da aresta das ferramentas representam as possibilidades para um melhor rendimento produtivo. Esta pesquisa apresenta um estudo comparativo entre as ferramentas de corte convencional (*standard*) e alisadora (*wiper*) no torneamento do aço AISI 1045. Foram utilizados diferentes parâmetros de corte para avaliar a qualidade da superfície gerada, de forma que se determine a melhor combinação dos parâmetros de usinagem, com o objetivo de otimizar o processo de fabricação e alcançar rugosidades similares ao processo de retificação. Os resultados experimentais comprovam a eficiência da ferramenta *wiper* em relação a ferramenta *standard* em gerar melhores acabamentos superficiais utilizando os mesmos parâmetros de corte.

Palavras chave: Torneamento. Aço AISI 1045. Rugosidade. Acabamento superficial. Ferramenta *wiper*.

ABSTRACT

In machining, the optimization of cutting parameters and the use of new materials and tool edge geometries represent the possibilities for a better productive yield. This research presents a comparative study between conventional (wiper) and wiper cutting tools in AISI 1045 steel turning. Different cutting parameters were used to evaluate the quality of the generated surface, in order to determine the best combination of machining parameters, in order to optimize the manufacturing process and achieve roughness similar to the grinding process. The experimental results confirm the efficiency of the wiper tool in relation to the standard tool in generating better surface finishes using the same cutting parameters.

Keywords: Turning. AISI 1045 Steel. Roughness. Surface finish. Wiper

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Relações de entradas e saídas no processo de torneamento.	13
Figura 2 - Rugosidades Ra e Rt em uma determinada superfície.....	17
Figura 3 - Classificação de códigos dos insertos de metal duro.....	19
Figura 4 - Rugosidade máxima teórica durante o processo de torneamento.	20
Figura 5 - Fluxograma simplificado do DOE.....	22
Figura 6 - Avaliação dos índices de Cp e Cpk.....	25
Figura 7 - Torno utilizado para realizar os experimentos.....	28
Figura 8 - Geometria T standard, geometria W wiper e geometria T wiper.....	28
Figura 9 – Rugosímetro digital portátil SJ-210.....	29
Figura 10 - Relógio comparador.....	29
Figura 11 - Micrômetro externo digital.....	30
Figura 12 - Fluxograma do processo.....	31
Figura 13 - Árvore de amostragem.....	32
Figura 14 - Amostras numeradas após usinagem.....	33
Figura 15 - a) Verificação do batimento. b) Análise da rugosidade.....	34
Figura 16 – Gráficos para análise de resultados.....	35
Figura 17 - a) Amostra número 4. b) Amostra número 3. c) Amostra número 2.....	37
Figura 18 - Gráfico para análise da variação do processo.....	39
Figura 19 - Análise do projeto x processo.....	39

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 Objetivos	11
1.1.1 Objetivo geral	11
1.1.2 Objetivos específicos.....	11
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	12
2.1 Torneamento	12
2.2 Parâmetros de usinagem	13
2.1.1 Avanço	14
2.1.2 Velocidade de corte.....	14
2.1.3 Raio de ponta do inserto e profundidade de corte.....	15
2.2 Rugosidade e acabamento superficial	16
2.3 Insertos para torneamento	18
2.3.1 Insertos <i>Standard</i> e <i>Wiper</i>	18
2.4 Planejamento de experimentos (DOE).....	21
2.4.1 Planejamentos fatoriais	22
2.5 Índices de capacidade e performance do processo	23
3 METODOLOGIA	27
3.1 Materiais	27
3.2 Métodos	31
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
4.1 Pré-usinagem	33
4.2 Usinagem dos eixos	38
5 CONCLUSÃO	41
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42
APÊNDICE A – RESULTADOS ANALISADOS DO EIXO	45
ANEXO 1 – DESENHO DIMENSIONAL DO EIXO AVALIADO	46

1 INTRODUÇÃO

Na indústria, cada vez mais busca-se inovação, seja um produto novo ou uma forma nova e mais eficiente de manufatura. Junto a esta ideia, vem a questão de otimizar o tempo, aumentar a qualidade e reduzir o custo de fabricação dos produtos.

E, se tratando de usinagem dos materiais, cada peça produzida traz consigo uma contribuição grandiosa ao acompanhar o rendimento do seu processo. Segundo Ferraresi (1970), o rendimento de todos os processos de usinagem está diretamente ligado às propriedades das ferramentas e aos parâmetros de corte empregados na fabricação das peças e isso se traduz na busca constante de inovações e fornecedores que possam atender o nível extremo de produtividade, com competitividade do mercado metal-mecânico.

Dentre os equipamentos que se utilizam de peças usinadas para serem construídos, está o motor elétrico. Este dispositivo transforma energia elétrica em energia mecânica, sendo o tipo de motor mais utilizado no mundo. Existem vários tipos de motores elétricos, os quais foram projetados para atender diversas aplicações, podendo ser das mais severas ou até as mais simples.

A especificação de tolerância geométrica para assento de rolamento de eixos de motores elétricos, segue a recomendação do fabricante de rolamentos. Além da tolerância controlada, estes eixos torneados necessitam de baixa rugosidade.

Segundo Sales (2004), é possível obter-se em tornos CNC, rugosidades de 0,2 a 0,3 μm , que correspondem às obtidas nos processos de retificação. Portanto, existe uma possível substituição do processo de retificação pelo torneamento, trazendo inúmeras vantagens, dentre as quais podem ser citadas:

- A possibilidade de trabalhar sem fluido de corte,
- A eliminação de etapas no processo de fabricação,
- Maior produtividade,
- Baixo consumo de energia por volume de material usinado, etc.

Atualmente o eixo avaliado neste trabalho e que é utilizado em motores elétricos passa pelo processo de torneamento e as dimensões finais do assento do rolamento são obtidas pelo processo de retificação, pois, a especificação do fornecedor de rolamentos é muito precisa e é difícil atendê-la utilizando apenas o torneamento.

O presente trabalho busca alterar o processo atual afim de alcançar as tolerâncias dimensionais e geométricas apenas com a usinagem no torneamento, variando parâmetros de corte e ferramentas para que o processo tenha maior eficiência.

Através da coleta de dados e controles estatísticos, será avaliado se existe alguma restrição no processo que impeça atingir as tolerâncias e dimensões recomendadas pelo fabricante e garantir a repetibilidade da usinagem.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar a eficiência do processo de torneamento, utilizando as ferramentas de corte de metal duro com as geometrias *wiper* (alisadora) e *standard* (convencional), e variar os parâmetros de processo como avanço, profundidade de corte e velocidade de corte, para obter o acabamento e dimensional especificado, afim de eliminar o processo de retificação que é feito posteriormente ao torneamento do eixo.

1.1.2 Objetivos específicos

- Definir parâmetros de usinagem que oferecem melhor rendimento e qualidade;
- Alterar os parâmetros de usinagem afim de obter o dimensional especificado para o assento do rolamento nos eixos.
- Analisar resultados e propor alternativas para o processo;
- Verificar estatisticamente a viabilidade e repetibilidade do processo.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Torneamento

Segundo Ferraresi (2006), o torneamento é um processo mecânico de usinagem destinado a obtenção de superfícies de revolução com o auxílio de uma ou mais ferramentas de corte. Para tanto, a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente seguindo uma trajetória coplanar com o eixo referido.

Esta operação pode também ser dividida em operações mais específicas. Ferraresi (2006), sugere as seguintes classificações:

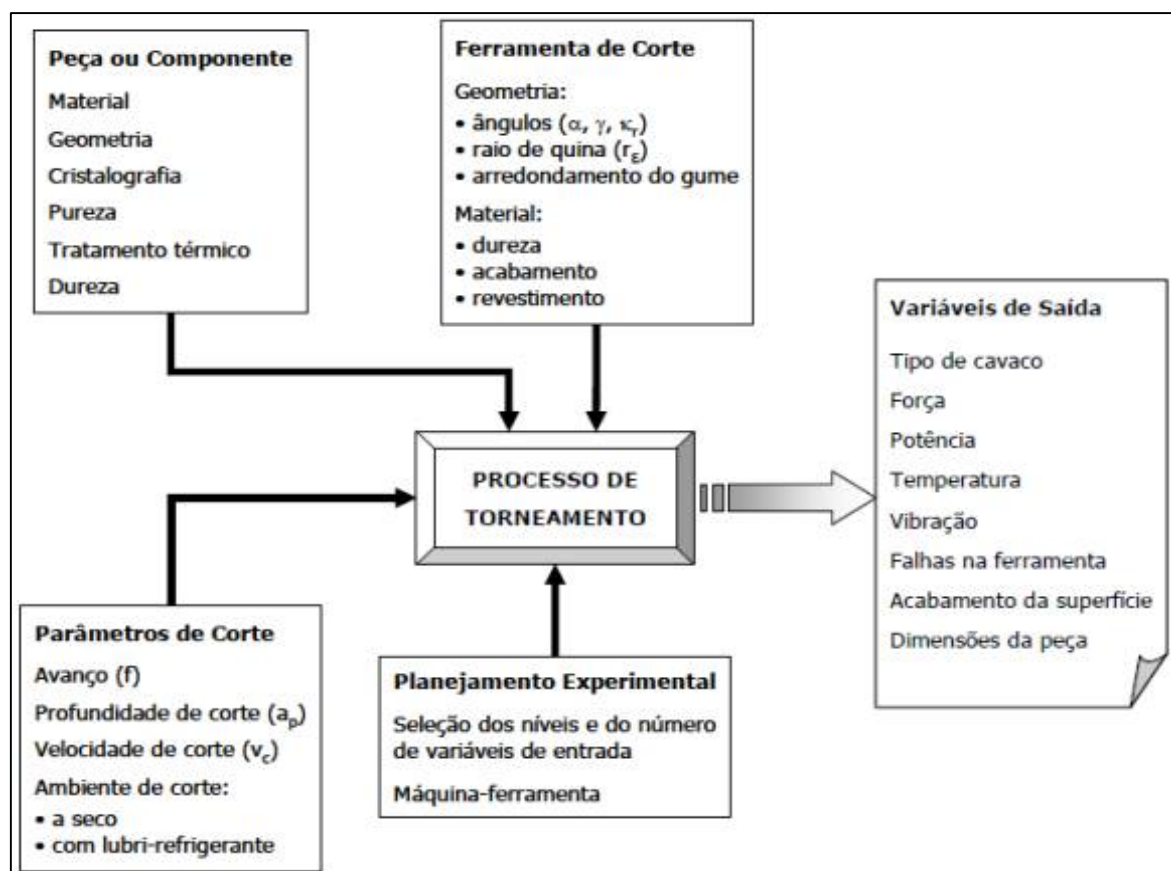
- Torneamento cilíndrico – Processo de torneamento no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória paralela ao eixo principal de rotação da máquina.
- Torneamento cônico – Processo de torneamento no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória retilínea.
- Torneamento radial - Processo de torneamento no qual a ferramenta se desloca segundo uma trajetória retilínea, perpendicular ao eixo principal de rotação da máquina.

Machado et al., 2009, salienta que estas operações de corte podem ser divididas em desbaste e acabamento. No desbaste não há preocupação com a qualidade superficial, pois a prioridade é a elevada taxa de remoção do material.

O torneamento de acabamento é a operação final, sendo em alguns casos a única operação e a qualidade final da superfície e as tolerâncias dimensionais da peça são prioridade. Para esta fase do processo, a combinação de avanço e profundidades de cortes reduzidas com altas velocidades de corte, conforme Diniz et al., 2010, produz uma quantidade razoável de cavaco sem que haja influência da vibração na remoção do sobremetal da peça.

A Figura 1 resume as relações de entrada e saída associadas ao torneamento. As variáveis de entrada são as independentes, pois podemos alterá-las, já as variáveis de saída são as dependentes, pois são influenciadas pelos parâmetros da entrada [Souza, 2011].

Figura 1- Relações de entradas e saídas no processo de torneamento.



Fonte: [Souza, 2011]

2.2 Parâmetros de usinagem

No estudo da vida de ferramentas e da rugosidade média das superfícies usinadas pelo processo de torneamento, há vários fatores de influência, como, por exemplo, a velocidade de corte, o avanço, a profundidade de usinagem e a geometria da ferramenta de corte. Na análise convencional da influência destes fatores num processo de usinagem, geralmente é estudada a influência de cada um deles isoladamente, o que demanda um grande número de ensaios, elevado consumo de material e ferramentas, além da necessidade de utilização de muitas horas-máquina, o que em geral, torna os custos com a experimentação altos (BOUACHA et al. 2010).

2.1.1 Avanço

O avanço (f) é o percurso de avanço em cada volta ou curso da ferramenta [Machado, et al., 2009] e afeta diretamente a formação do cavaco obtido, além da potência de corte necessária. O avanço, juntamente com o raio de ponta, define a rugosidade da superfície obtida na usinagem [Diniz, et al., 2001]. A velocidade de avanço pode ser calculado pela equação 1.

$$vf = f.n \text{ [mm/min]} \quad (1)$$

Onde:

f = avanço em milímetros por revolução (mm/rev)

n = número de rotações por minuto (rpm)

Nesta relação à medida que o avanço diminui também ocorre a redução dos níveis de rugosidade superficial. Existe também um ponto em que a diminuição do avanço irá fazer com que a tensão média na superfície de saída da ferramenta aumente substancialmente, isto causa um maior fluxo lateral de cavaco ampliando a diferença existente entre a rugosidade teórica e a medida. Desta forma, a redução do avanço é boa até certo ponto quando se leva em relação à rugosidade real. (DINIZ, MARCONDES, COPPINI, 2001; DINIZ, 1989);

2.1.2 Velocidade de corte

É definida como a velocidade com que o material é removido pela aresta de corte. O deslocamento da aresta de corte em direção à peça é expresso em metros por minuto (m/min). Essa velocidade é recomendada pelos fabricantes das ferramentas. O valor da velocidade de corte pode ser calculado pela Equação 2.

$$V_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad [m/min] \quad (2)$$

Onde:

d = diâmetro da peça ou da ferramenta em milímetros (mm)

n = número de rotações por minuto (rpm)

A velocidade de corte é um dos principais determinantes da potência de corte. De acordo com NEUGEBAUER et al. 2011, deve ser dada a devida ênfase à velocidade de corte do processo uma vez que, a eficiência e custo do processo, resultantes da potência de corte e desgaste da ferramenta podem ser reduzidas. Quando parâmetros críticos que afetam diretamente a potência de usinagem são aumentados, como a velocidade de corte, a profundidade de corte e o avanço, tem-se como consequência excessiva expansão térmica da peça e ferramenta, transferência de calor entre suas interfaces e deformações que podem resultar em acabamento não satisfatório da peça e desgaste precoce da ferramenta.

2.1.3 Raio de ponta do inserto e profundidade de corte

A profundidade de corte (ap) é definida no torneamento externo como a grandeza de penetração com que a aresta de corte penetra transversalmente no material. A utilização de grande ap aumenta a quantidade de metal removido por unidade de tempo, mas em compensação, provoca significativos acréscimos na força e na potência de corte, além de deixar a peça com um mau acabamento.

O raio da ponta do inserto é um fator importante nas operações de torneamento. A escolha do raio de ponta depende da profundidade de corte e do avanço e influencia o acabamento superficial, a quebra de cavacos e a resistência do inserto.

Segundo a fabricante Sandvik, é utilizado como regra geral, que a profundidade de corte deve ser maior que 2/3 do raio de ponta. O acabamento superficial gerado será diretamente influenciado pela combinação do raio de ponta e da faixa de avanço.

Abaixo segue quadro com as principais influências do raio da ponta da ferramenta:

Quadro 1 – Influência do raio da ponta da ferramenta.

Raio de ponta pequeno	Raio de ponta maior
Ideal para profundidades de corte pequenas	Faixas de avanço pesadas
Reduz a vibração	Grandes profundidades de corte
Aresta de corte fraca	Segurança da aresta robusta
Melhora o acabamento superficial	Pressões radiais maiores

Fonte: O autor.

A relação errada entre o raio de ponta e a profundidade de corte possui uma tendência a vibrações. Geralmente é vantajoso escolher um raio de ponta que seja menor que a profundidade de corte (SANDVIK 2012).

2.2 Rugosidade e acabamento superficial

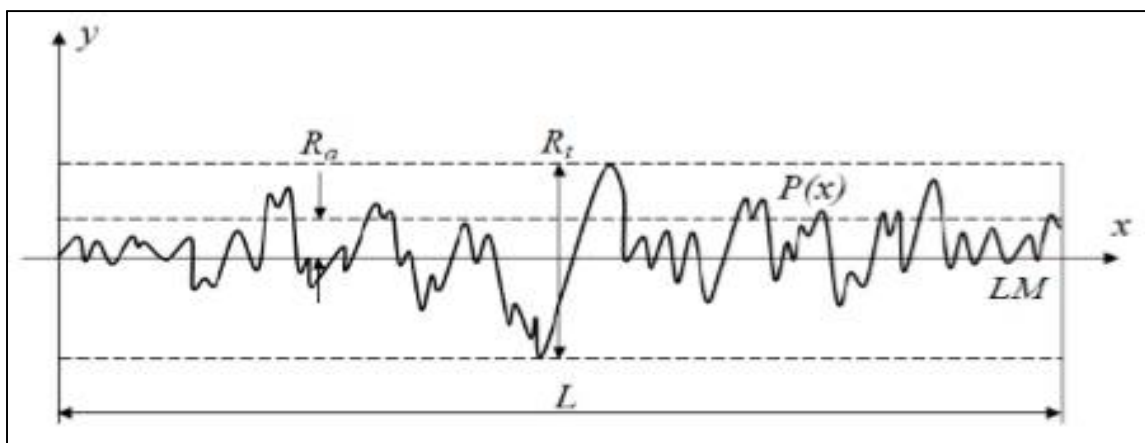
A rugosidade superficial é um tipo de topografia microscópica deixada pela usinagem e geralmente imperceptível numa inspeção visual. Sua avaliação é possível com a utilização de um aparelho específico chamado rugosímetro. No Brasil, os conceitos de rugosidade superficial são determinados pela norma ABNT NBR ISO 4287, 2002, adotando o sistema da linha média.

A rugosidade é gerada pelo processo de usinagem e não somente pela máquina. Conforme Machado (2009), os fatores que contribuem com a geração de rugosidade são:

- Marcas da ponta da ferramenta ou de fragmentos da mesma, podendo apresentar natureza periódica para alguns processos e aleatória para outros;
- Geração de rebarba do material durante a operação de usinagem;
- Restos de aresta postiça de corte de uma ferramenta na superfície;
- Forma do quebra-cavaco na ponta da ferramenta.

De fato, a rugosidade de uma superfície é controlada por vários parâmetros como, máquina ferramenta, propriedades do material da peça, geometria e material da ferramenta, técnicas de aplicação do fluido, atmosfera e processo de usinagem. Métodos estatísticos aplicados ao resultado da medição da rugosidade de uma superfície podem identificar as contribuições relativas de cada um destes parâmetros. Por exemplo, na operação de torneamento pode-se monitorar a vida útil da ferramenta analisando a rugosidade da superfície da peça.

Figura 2 - Rugosidades média (R_a) e total (R_t) em uma determinada superfície.



Fonte: [Mello et al., 2012].

A rugosidade Média (R_a) é a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas dentro do percurso de medição L , demonstrada na Figura 2. Podemos calcular o valor teórico de R_a , utilizando a Equação 3.

$$R_a = \frac{f^2 \cdot 50}{r\mathcal{E}} \quad (3)$$

Onde:

R_a – Rugosidade media (μm)

f – Avanço da máquina

$r\mathcal{E}$ – Raio da ponta da ferramenta

O acabamento superficial de uma face usinada é resultado da combinação de vários fatores que podem ser divididos em: rugosidade, ondulações e falhas.

Ondulações consistem de irregularidades superficiais ou erros geométricos cujos espaçamentos são maiores que as irregularidades consideradas como rugosidades. Podem ser causados por vibrações e deflexões da ferramenta e/ou peça, devido a forças de corte, temperaturas de corte ou erros de fixação da peça ou ferramenta. Peças longas e finas são mais sensíveis às forças elásticas e dinâmicas. Como resultado, as ondulações são mais pronunciadas. Por outro lado, peças grandes (grandes seções transversais), são rígidas e as alturas das ondulações são pequenas (Machado et al., 2009).

Falhas são interrupções na topografia típica da superfície de uma peça. São não intencionais, inesperadas e indesejáveis. Podem ser causadas por defeitos inerentes, tais como: inclusões, trincas, bolhas, ou podem surgir também durante o processo de corte (Machado et al., 2009).

2.3 Insertos para torneamento

Atualmente, as ferramentas de corte mais utilizadas no processo de torneamento em geral, em especial de aços, são os suportes com insertos (pastilhas) intercambiáveis de metal duro existentes em uma grande variedade de forma, tamanho e composição para as mais diversas aplicações (Espanhol, 2008).

Nas últimas décadas, o surgimento de novas ferramentas decorreu da necessidade de se usinar novos materiais e do desenvolvimento tecnológico da usinagem (Rosa e Diniz, 1999). Mesmo com esse elevado desenvolvimento tecnológico, as ferramentas ainda são o motivo de grande dispêndio de investimentos em pesquisa por parte de fabricantes e de centros de pesquisa em todo mundo (Schützer e Schulz, 2003).

Unir todas as características relevantes de uma ferramenta de corte, tais como alta dureza em elevadas temperaturas, alta resistência mecânica e ao desgaste, alta tenacidade, alta resistência ao choque térmico, à compressão e elevada estabilidade química, entre outras, ainda não está disponível em uma única ferramenta (Diniz, 2000).

2.3.1 Insertos *Standard* e *Wiper*

A otimização dos parâmetros de usinagem de acordo com a seleção adequada do inserto tem sido uma das principais alternativas empregadas na atualidade. Para definir o melhor inserto, deve-se considerar o material que está sendo usinado bem como as características da geometria da ferramenta. Abaixo segue a classificação para seleção do inserto conforme a norma ISO n. 1832 de 1991.

Figura 3 - Classificação de códigos dos insertos de metal duro.

C	N	M	G	09	03	08
1	2	3	4	5	6	7
1	Formato da pastilha					
2	Ângulo de incidência					
3	Tolerâncias					
4	Características da geometria de corte					
5	Comprimento da aresta de corte					
6	Espessura da pastilha					
7	Raio da ponta					

Fonte: O autor.

Com a inovação das ferramentas de geometrias alisadoras (wiper), tornou-se possível atingir um acabamento de alta qualidade em operações de torneamento quando comparadas com ferramentas convencionais (SANDVIK, 2010).

Este inserto foi desenvolvido para suavizar a superfície gerada enquanto o inserto avança ao longo da peça, o efeito *Wiper* foi projetado principalmente para faceamento e torneamento cilíndrico.

De acordo com Sandvik (2012), o raio de ponta em um inserto alisador tem sua construção utilizando de 3 a 9 raios diferentes. Isso aumenta o comprimento de contato dos insertos de modo que tanto os valores de avanço quanto de profundidade de corte possam ser o dobro dos valores usados nas ferramentas convencionais sem depreciar o acabamento superficial da peça.

Esta pequena alteração na geometria do raio de ponta, além de suas faces planas, permite que os minúsculos picos e vales encontrados na superfície do material, que seriam deixados para trás em função da utilização da geometria convencional, sejam eliminados, o que proporciona ganho produtivo com qualidade superficial superior (Sandvik, 2012; Production Machining, 2014).

Segundo a fabricante Mitsubishi, o inserto com superfície alisadora tem as seguintes características:

- Melhorar a Rugosidade da Superfície Acabada: Sob as mesmas condições de corte que os quebra-cavacos convencionais, mas com a taxa de avanço aumentada, o acabamento superficial da peça pode ser melhorado.

- Melhorar a Eficiência: Altas taxas de avanço não somente reduzem os tempos de corte como também possibilitam a combinação entre rugosidade e acabamento.

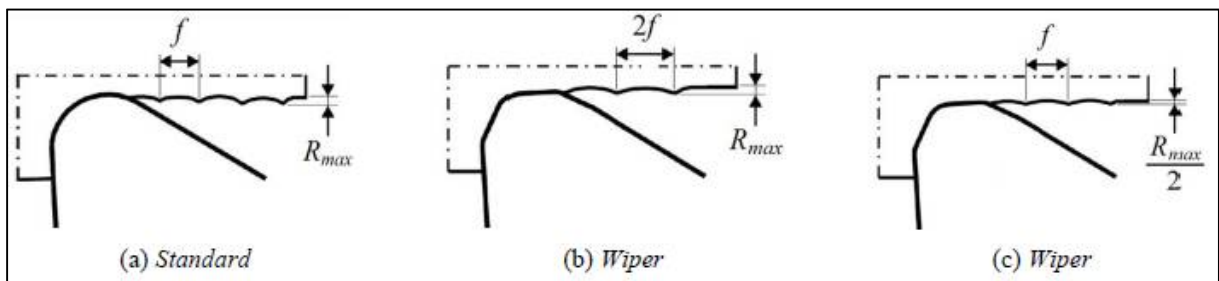
- Aumentar a Durabilidade da Ferramenta: Quando uma alteração para altas taxas de avanço é feita, o tempo necessário para usinar uma peça é menor, e dessa maneira, mais peças podem ser usinadas com cada inserto. Somado a isso, o alto avanço previne o atrito, retardando a progressão do desgaste e aumentando a vida útil do inserto.

- Melhorar o Controle do Cavaco: Sob altos avanços, os cavacos geralmente se tornam mais espessos e mais fáceis de serem quebrados, dessa maneira, seu controle é melhorado.

A ferramenta alisadora possui uma geometria com raio da ponta modificado. Esta alteração em sua geometria proporciona que o avanço f possa ser dobrado sem prejudicar o acabamento superficial. Na Figura 2a é possível identificar a geometria *standard* e a rugosidade máxima teórica gerada na superfície usinada para um avanço.

Nas Figuras 4b e 4c é possível comparar o perfil de rugosidade gerado durante a usinagem com ferramenta *wiper* devido ao seu raio da ponta modificado, evidenciando que a mesma rugosidade pode ser encontrada para ambas as ferramentas, mas utilizando o dobro do avanço com a geometria *wiper*.

Figura 4 - Rugosidade máxima teórica durante o processo de torneamento.



Fonte: O autor (adaptado de Stachurski et al., 2012).

Azambuja, 2012, afirma que, além das qualidades citadas, a ferramenta *wiper* tem vida útil mais longa que a *standard*, pois o tempo necessário para usinar uma peça é menor, visto que para a ferramenta *wiper* a velocidade de avanço pode ser aumentada, e dessa maneira, mais peças podem ser usinadas com cada inserto.

2.4 Planejamento de experimentos (DOE)

Desenvolvido entre 1920 e 1930 por Fisher, sendo posteriormente incrementada por importantes pesquisadores na área de estatística como Box, Hunter (1978) e Taguchi (1986), entre outros, o Projeto de Experimentos (DOE) é uma técnica relativamente antiga. Depois da segunda guerra mundial, o DOE foi introduzido na indústria química e nos processos industriais de empresas nos Estados Unidos e Europa. Atualmente as empresas aumentam em muito a sua produtividade com a utilização desta ferramenta.

O Planejamento de Experimentos é uma técnica utilizada para se planejar experimentos, ou seja, para definir quais dados, em que quantidade e em que condições devem ser coletados durante um determinado experimento. Segundo Rodrigues e Lemma (2006) uma das vantagens do Planejamento de Experimentos é que reduz o número de experiências ou repetições e melhora a qualidade da informação obtida através dos resultados. Isto significa uma sensível diminuição do trabalho e, conseqüentemente, do tempo e do custo final.

Montgomery (2005) propõem as seguintes etapas para o desenvolvimento de um Planejamento de Experimentos na Indústria:

- Caracterização do problema;
- Escolha dos fatores de influência e níveis;
- Seleção das variáveis de resposta;
- Determinação de um modelo de planejamento de experimento;
- Condução do experimento;
- Análise dos dados;
- Conclusões e recomendações.

Figura 5 - Fluxograma simplificado do DOE.



Fonte – O autor

Um experimento planejado é um teste, ou série de testes, no qual são feitas mudanças propositalmente nas variáveis de entrada de um processo, de modo a podermos observar e identificar mudanças correspondentes na resposta. O processo pode ser visualizado como uma combinação de máquinas, métodos e pessoas, que transforma um material de entrada em um produto.

Este produto pode ter uma ou mais características de qualidade observáveis. Algumas das variáveis do processo são controláveis, enquanto outras são não controláveis. Algumas vezes, esses fatores não controláveis são chamados fatores ruído. Todas essas características devem ser analisadas para o planejamento do experimento, incluindo ainda a especificação do objetivo do estudo.

2.4.1 Planejamentos fatoriais

Planejar experimentos é definir uma sequência de coletas de dados experimentais para atingir certos objetivos. Dentre os métodos de planejamento experimental disponíveis na literatura, o planejamento fatorial é o mais indicado quando se deseja estudar os efeitos de duas ou mais variáveis de influência, sendo que em cada tentativa ou réplica, todas as combinações possíveis dos níveis de cada variável são investigadas (BARROS NETO et al., 1996).

Segundo Montgomery (2012) planejamentos fatoriais são usados geralmente para descobrir o efeito de fatores de forma isolada, quando esse muda de nível, e

seria essa a grande vantagem do método. Além disso, o método permite descobrir quais fatores mais influenciam as respostas do problema analisado. Em geral, usam-se apenas dois níveis (alto-baixo, + e -) na condução dos experimentos, com a intenção de reduzir sua quantidade. Estes sinais também permitem esquematizar estas variáveis na forma de matrizes de planejamento, assim como determinar, por meio de cálculos, a influência das mesmas e das suas interações no sistema (BRASIL et al., 2007). Para esse tipo de análise, tem-se a Equação 4.

$$n = L^k \quad (4)$$

Onde:

n : números de experimentos a serem utilizados,

L : a quantidade de níveis e k a quantidade de fatores.

Dentre as diversas vantagens da utilização do planejamento fatorial, destacam-se as seguintes (BUTTON, 2005):

- Redução do número de ensaios sem prejuízo da qualidade da informação;
- Estudo simultâneo de diversas variáveis, separando seus efeitos;
- Determinação da confiabilidade dos resultados;
- Realização da pesquisa em etapas, num processo interativo de acréscimo de novos ensaios;
- Seleção das variáveis que influenciam um processo com número reduzido de ensaios;
- Representação do processo estudado através de expressões matemáticas;
- Elaboração de conclusões a partir de resultados qualitativos.

2.5 Índices de capacidade e performance do processo

Entender a estrutura do processo e quantificar seu desempenho é essencial para o sucesso das atividades de melhoria da qualidade. Assim, o estudo da capacidade é uma técnica que visa a melhoria contínua da qualidade e produtividade (WU et al., 2009). Observa-se que um processo pode estar sob controle estatístico, mas caso apresente variabilidade maior do que a amplitude das especificações, será considerado não capaz, exigindo ações corretivas sobre o processo. Spiring (1995) e Deleryd (1999) afirmam que o principal objetivo de estudar e interpretar a capacidade

dos processos é servir de base para tomadas de decisões, provendo um guia estratégico para alavancar a qualidade.

Os índices de capacidade e performance do processo relacionam a variação do processo com os limites de especificação, sem levar em consideração a centralização do processo. É um índice potencial pois não avalia se o processo está atendendo às especificações, mas apenas se tem a capacidade de atender caso esteja centralizado. Os índices de Pp e Cp são calculados dividindo o campo de tolerância por seis vezes o desvio padrão de acordo com a Equação 5.

$$Pp = \frac{LSE - LIE}{6 * s} \qquad Cp = \frac{LSE - LIE}{6 * \sigma} \qquad (5)$$

Onde:

LSE: Limite superior especificado (projeto);

LIE: Limite inferior especificado (projeto);

σ : Desvio padrão

A diferença entre o Pp e o Cp está no método usado para obter o desvio padrão, sendo que o Pp utiliza o desvio padrão amostral e o Cp o desvio padrão populacional.

Abaixo segue quadro com um resumo das duas situações de índices:

Quadro 2 - Situações para utilização dos índices de Cp, Pp, Cpk e Ppk.

Índice	Uso	Definição
Cp, Pp	O processo está centrado entre os limites de especificação	Taxa de tolerância (a largura dos limites de especificação) à variação atual (tolerância do processo)
Cpk, Ppk	O processo não está centrado entre os limites de especificação, mas cai sobre ou entre eles	Taxa de tolerância (a largura dos limites de especificação) à variação atual, considerando a média do processo relativa ao ponto médio das especificações.

Fonte: O autor

Os índices Pp e Ppk são associados a análises pontuais, de curto prazo, onde deseja-se obter um índice de capacidade momentâneo, conhecido como a “foto do processo”. Podem ser usados, por exemplo, em liberações de novos processos ou produtos, testes de ferramentais, ou em situações onde se deseja comparar a situação atual de duas máquinas ou processos diferentes. Já o Cp e Cpk estão associados a análises de longo prazo, onde as coletas de dados são realizadas variando, e conhecendo, as condições de processo. São utilizados principalmente para monitoramento contínuo de processos já estabilizados.

Para o cálculo do Ppk é utilizada a Equação 6.

$$Ppk = \text{Mínimo} \left(\frac{LSE - \bar{X}}{3 * s}, \frac{\bar{X} - LIE}{3 * s} \right) \quad (6)$$

Onde:

LSE: Limite superior especificado (projeto);

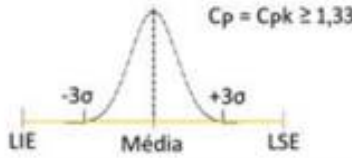
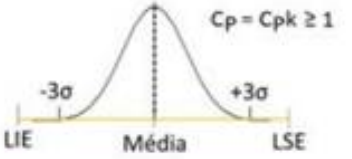
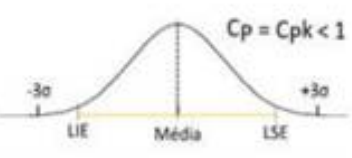
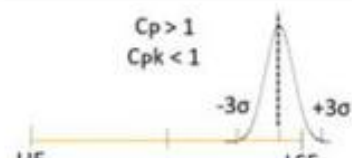
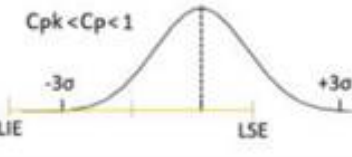
LIE: Limite inferior especificado (projeto);

s: Desvio padrão amostral;

\bar{X} : Média das dimensões do processo.

A Figura 6 mostra alguns exemplos de processos com índices de Cp e Cpk variados. A mesma análise vale para índices de Pp e Ppk.

Figura 6 - Avaliação dos índices de Cp e Cpk.

	<p>Processo excelente.</p>
	<p>Processo bom.</p>
	<p>Processo centralizado porém com alta variação</p>
	<p>Processo com pouca variação porém descentralizado</p>
	<p>Processo com alta variação porém descentralizado</p>

O índice Cp representa a capacidade potencial do processo para fornecer um produto aceitável, não levando em consideração a localização dos dados (MONTGOMERY, 2004). Para solucionar esta questão, Kane (1986) introduziu o índice Cpk (índice de capacidade efetiva). Os índices Cp e Cpk, quando usados em conjunto, proporcionam uma boa indicação da capacidade do processo, tanto em relação à média quanto à variabilidade (PALMER E TSUI, 1999).

Através da curva estatística gerada pelos pontos coletados, calculando a média e o desvio padrão do processo, é possível estimar o índice de defeitos máximo de um processo através dos valores de Ppk e Cpk. Esses valores estão na tabela abaixo:

Tabela 1 – Estimativa de defeitos conforme Ppk / Cpk.

Ppk / Cpk	Estimativa do índice de defeitos (ppm)
0,33	317.400
0,67	45.400
1	2.700
1,33	63
1,67	0,57
2	0,002

Fonte: Norma Weg WPS 6097

Qualquer processo pode produzir peças fora das especificações. Alguns com maior, outros com menor frequência. Estas peças fora da especificação são mensuradas em partes por milhão (ppm), ou seja, quantas peças defeituosas estima-se que haja a cada um milhão de peças produzidas.

3 METODOLOGIA

Os procedimentos utilizados na realização do trabalho serão descritos, com o detalhamento de cada processo, materiais e equipamentos necessários para desenvolver a pesquisa.

Algumas variáveis foram consideradas, sendo estas:

- Geometria da ferramenta de corte;
- Velocidade de corte;
- Profundidade de corte;
- Avanço;

Com o auxílio da ferramenta DOE e através de análises estatísticas, foi possível identificar o método mais eficiente para se alcançar os melhores resultados em relação ao acabamento superficial e dimensional dos eixos.

3.1 Materiais

Os ensaios foram realizados na empresa Weg S.A. localizada em Jaraguá do Sul, com o auxílio de colaboradores da seção de usinagem de eixos, pois o estudo avaliou o processo de usinagem atual da empresa e adicionar novos parâmetros para alcançar os objetivos propostos no trabalho.

A máquina utilizada para realização dos ensaios foi o torno CNC MAZAK modelo Quick Turn Smart 200. As usinagens foram realizadas conforme o padrão da empresa, para cada eixo existe um programa de usinagem com os parâmetros de corte já selecionados, porém dependendo do ensaio a ser realizado os parâmetros foram alterados para as avaliações.

Figura 7 - Torno utilizado para realizar os experimentos.



Fonte – O autor

Para realizar os testes, foram utilizados três tipos de insertos de metal duro com dois fornecedores diferentes conforme quadro abaixo:

Quadro 3 – Insertos utilizados nos testes

Inserto de metal duro		
Tipo	Código	Fornecedor
Geometria T Standard (Padrão)	TNMG 16 04 04L-K 4325	Sandvik
Geometria T Wiper	TNMX 16 04 04W-G 4325	Sandvik
Geometria W Wiper	WNMG 060404W-G IC807	Iscar

Fonte: O autor

Os novos insertos a serem testados foram selecionados conforme indicações dos fabricantes, e também utilizamos o inserto padrão utilizado nas usinagens da empresa (geometria T standard).

Figura 8 – a) geometria T *standard*, b) geometria W *wiper*, c) geometria T *wiper*.



Fonte: O autor

Inicialmente, foram preparados 24 corpos de prova com diâmetro de 160 mm e comprimento de 562 mm. Posteriormente foi feito o faceamento em uma das extremidades dos corpos de prova, seguido de furos de centro para auxiliarem no processo de usinagem. Após a preparação, iniciou-se a usinagem dos eixos com as dimensões do assento do rolamento recomendadas pelos fabricantes de rolamentos e as demais dimensões do eixo seguindo o padrão adotado pela empresa. O dimensional do eixo está representado no anexo 1, e abaixo segue quadro indicando as especificações de projeto para a dimensão do assento do rolamento.

Quadro 4 - Dimensional do eixo e especificações do assento do rolamento.

Dimensões de Projeto para o assento do rolamento	
Média dimensão nominal	45,310 mm
Limite inferior	45,302 mm
Limite superior	45,318 mm
Campo de tolerância	0,016 mm

Fonte: O autor

O material dos eixos para realização dos testes é aço AISI 1045, padrão utilizado em motores elétricos na empresa. Abaixo temos a composição química do aço 1045:

Quadro 5 – Composição química Aço AISI 1045.

ABNT/SAE/AISI	C	Mn	P máx.	S máx.
1045	0,43 – 0,50	0,60 – 0,90	0,04	0,05

Fonte: O autor.

Para medir a rugosidade média das amostras, foi utilizado o rugosímetro digital portátil SJ-210 da marca Mitutoyo conforme representado na figura abaixo.

Figura 9 - Rugosímetro digital portátil SJ-210.



Fonte: O autor

A avaliação do batimento do assento do rolamento, foi feita utilizando o relógio comparador com resolução de um centésimo com o auxílio de um dispositivo que é utilizado pela seção do controle de qualidade da empresa.

Figura 109 – Relógio comparador.



Fonte: O autor

Para a avaliação da rugosidade ser feita, o sensor do rugosímetro deve ser colocado sobre uma parte da superfície, onde se traça um percurso em uma taxa constante limitada ao comprimento do apalpador. Por meio do apalpador que fica na ponta do sensor, o mesmo mede a rugosidade da superfície.

A medição do dimensional das amostras, foi feita utilizando o micrômetro externo digital Mitutoyo com abertura de 25-50mm para medir o diâmetro do assento do rolamento do eixo. Este instrumento de medição também é de uso da seção do controle de qualidade da empresa.

Figura 10 - Micrômetro externo digital.

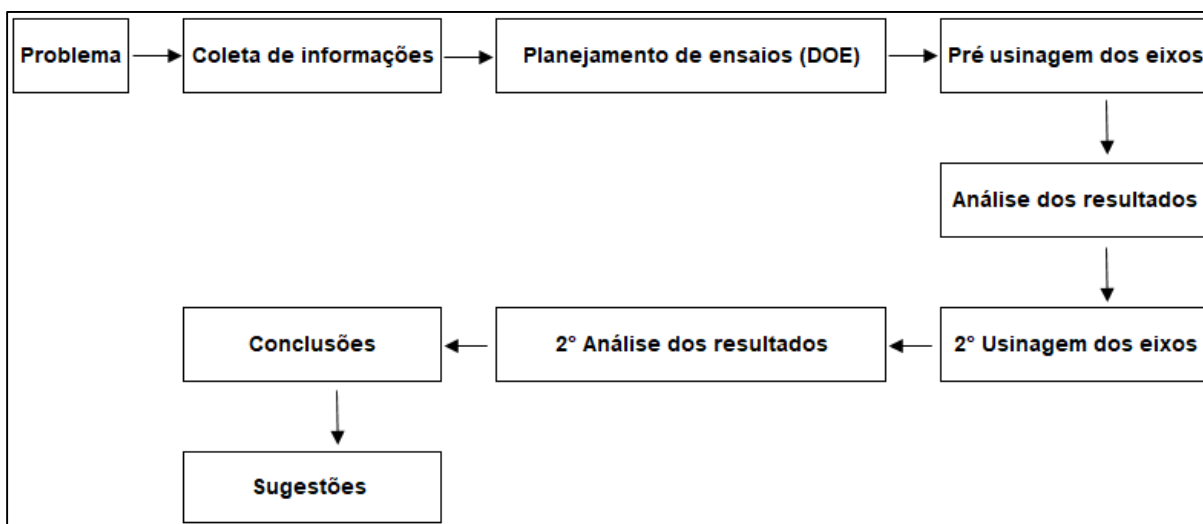


Fonte: O autor

3.2 Métodos

Para melhor compreensão de como foi realizado o trabalho, foi elaborado um fluxograma com as etapas e procedimentos seguidos.

Figura 11 - Fluxograma do processo.

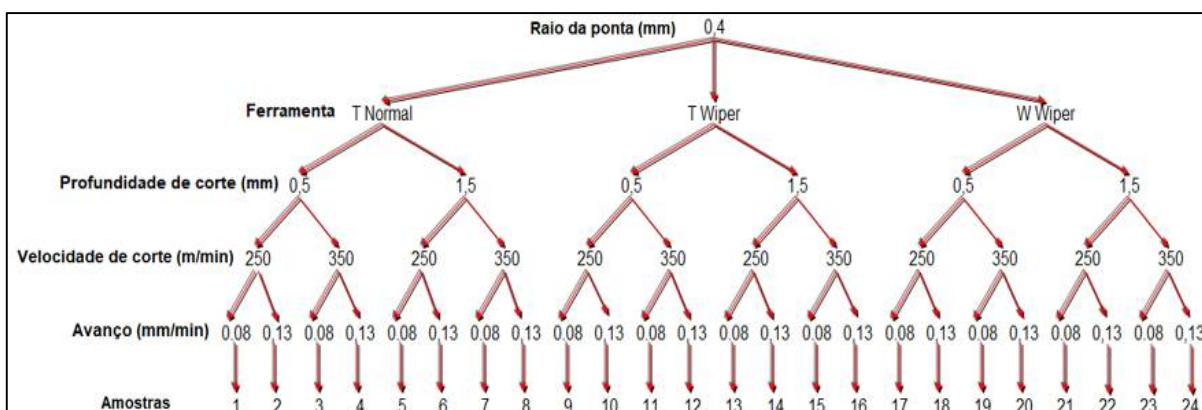


Fonte: O autor

Inicialmente foi feita uma pesquisa com os fabricantes de ferramentas (insertos de metal duro), para selecionar qual seria o melhor inserto e alcançar os objetivos propostos do trabalho. Foram então selecionados três tipos de insertos para realização dos testes. Em seguida, foram escolhidos os parâmetros de usinagem, como a velocidade de corte, o raio da ponta da ferramenta, o avanço e a profundidade de corte. Os mesmos foram definidos utilizando a fórmulas para cálculo e por recomendação dos fabricantes de ferramentas para alcançar a rugosidade estabelecida no assento do rolamento.

Os agrupamentos das possíveis variações foram definidos conforme DOE elaborado juntamente com colaboradores da seção de pesquisa e desenvolvimento da empresa. Os ensaios iniciaram combinando todas as variações selecionadas com as três opções de insertos de metal duro. No total, foram realizados vinte e quatro tratamentos conforme árvore de amostragem representada na figura 13.

Figura 12 - Árvore de amostragem.



Fonte: O autor

Após serem definidas as variações do processo, iniciou-se a usinagem dos eixos utilizando o torno conforme descrito anteriormente. Para não haver desperdício de material, as dimensões do assento do rolamento foram deixadas com sobremetal para após os ensaios, os eixos continuarem a ser usados conforme sua aplicação e simular na prática a possibilidade da alteração do processo de usinagem.

Por fim, foram analisados os eixos após serem usinados medindo sua rugosidade afim de identificar o melhor parâmetro a ser utilizado. O valor final da rugosidade foi retirado da média dos valores obtidos após a peça ter sido avaliada em três pontos a 90°.

Após serem feitas as avaliações, foi escolhida a melhor combinação de parâmetros para serem realizados novos ensaios e analisar a repetibilidade do processo, para isso foram usinados mais sessenta eixos.

Feito a usinagem, foi realizado o dimensional dos eixos avaliando o diâmetro do assento do rolamento especificado pelo fabricante.

E por último, afim de avaliar a repetibilidade do processo, utilizando métodos estatísticos foi possível obter gráficos para observar a variação das operações.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste experimento investiga-se a variação da rugosidade entre pastilhas standard e wiper e toma-se como referência o cálculo teórico dos parâmetros de rugosidade Ra. O valor teórico da rugosidade media foi calculado conforme Equação 3 citada anteriormente. Abaixo, segue os valores de Ra, utilizando o avanço proposto para realizar os testes (0,08 e 0,13mm/min):

$$Ra = \frac{0,08^2 \cdot 50}{0,4} = 0,8\mu m \quad / \quad Ra = \frac{0,13^2 \cdot 50}{0,4} = 2,11\mu m$$

Com base no valor teórico calculado, é possível alcançar valores de rugosidades similares ao processo de retífica utilizando apenas o processo de torneamento para o avanço de 0,08mm/min.

4.1 Pré-usinagem

Para garantir que estes parâmetros poderiam ser efetivos, foram feitos inicialmente 24 ensaios como pré-teste seguindo a sequência estabelecida na árvore de amostragem. Nesta pré-usinagem, foram avaliadas todas as combinações e escolhido a que teve o melhor resultado após ser medido a rugosidade e o batimento entre o diâmetro da ponta dianteira com o centro da peça. As amostras eram numeradas conforme cada opção de parâmetros:

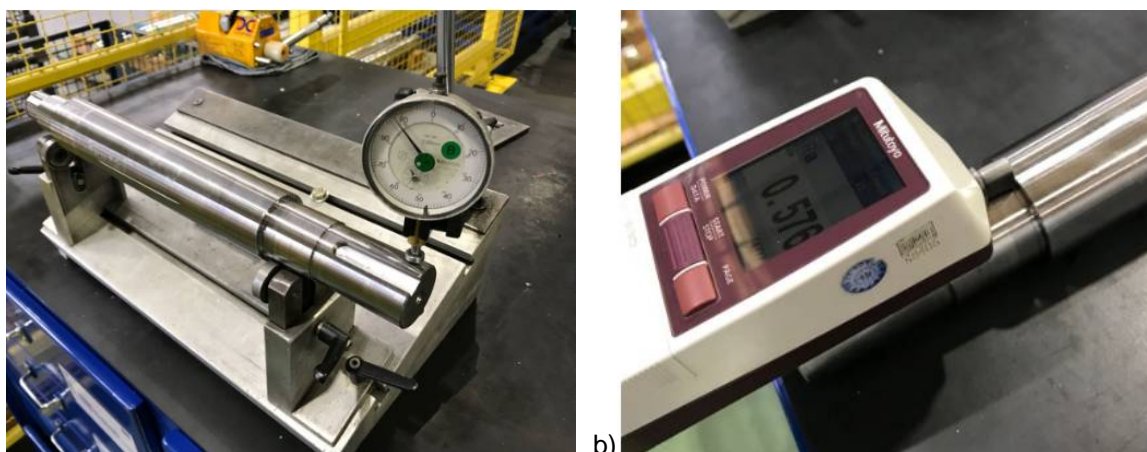
Figura 13 - Amostras numeradas após usinagem.



Fonte: O autor.

Para obter os valores de rugosidade e batimento da ponta do eixo, foram utilizados equipamentos e dispositivos da empresa. A rugosidade foi medida em três pontos distintos do diâmetro do eixo.

Figura 14 - a) Verificação do batimento. b) Análise da rugosidade.



Fonte: O autor.

Após serem realizados os ensaios, conforme os parâmetros de usinagem preestabelecidos, foram obtidos os dados da Tabela 4, referentes à rugosidade superficial e batimento dos eixos para os diferentes avanços, profundidades de corte, velocidades de corte e tipo da ferramenta.

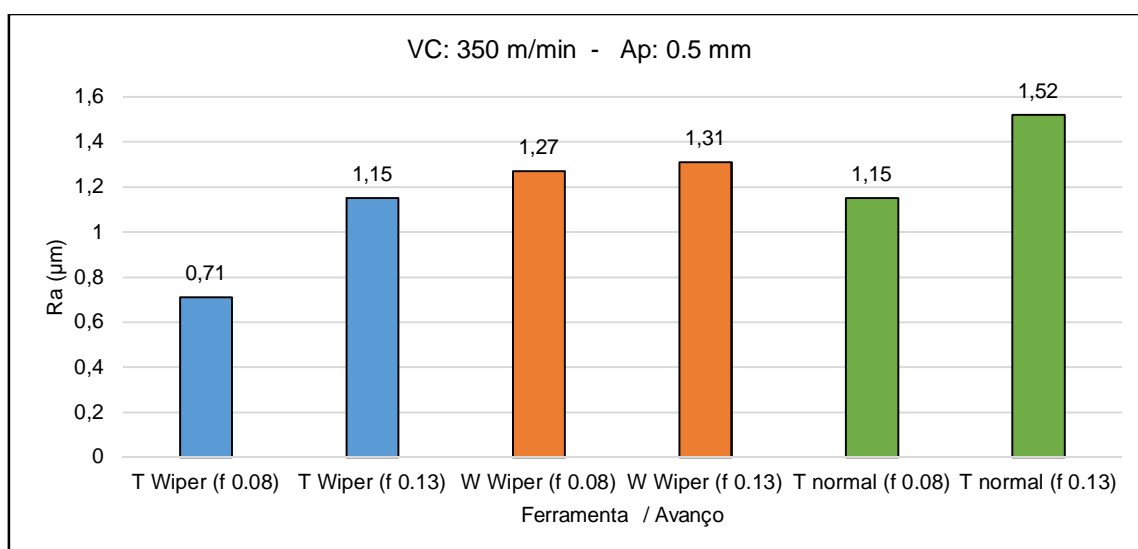
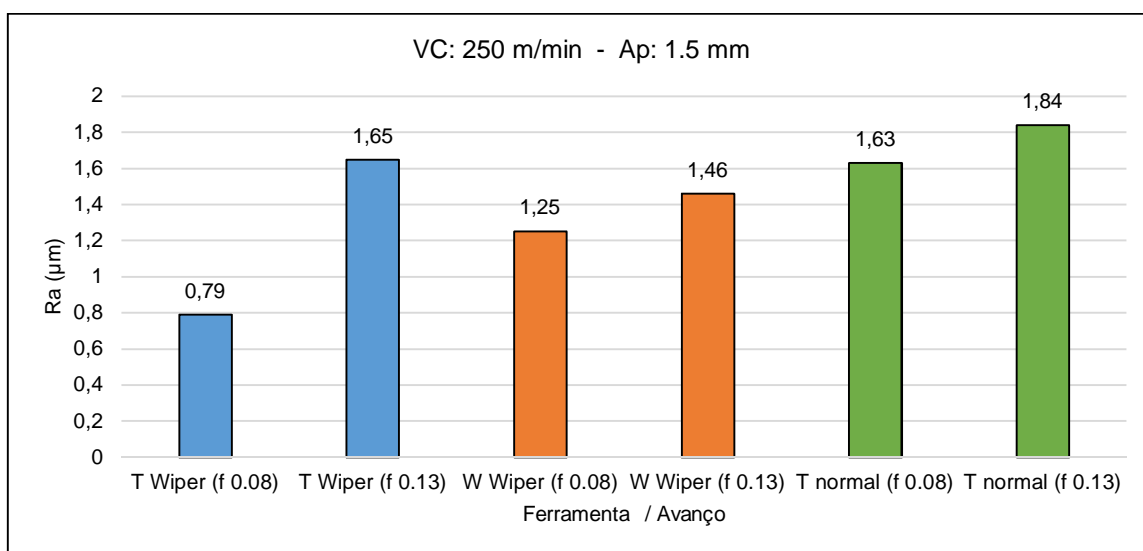
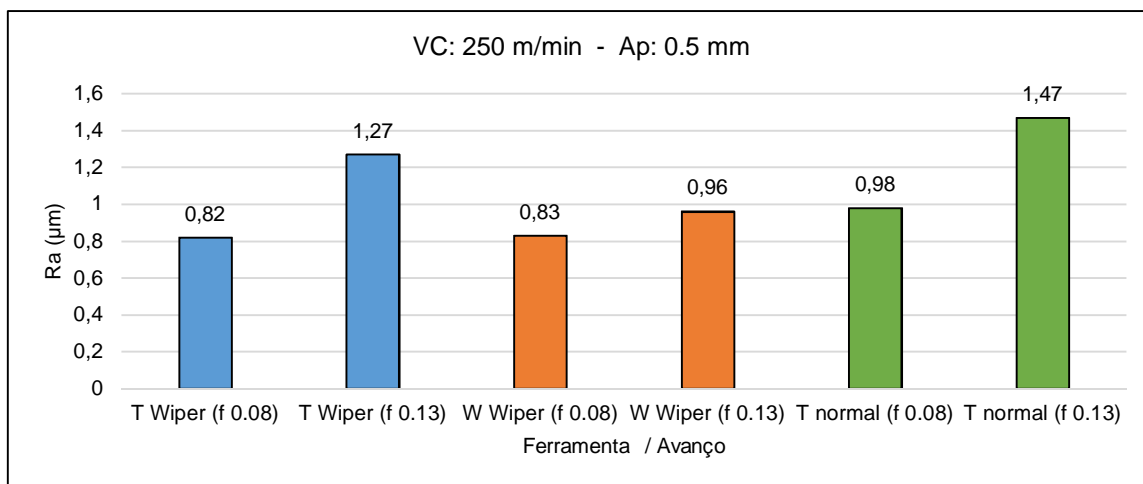
Tabela 2 – Tabela com valores de rugosidade média e batimento.

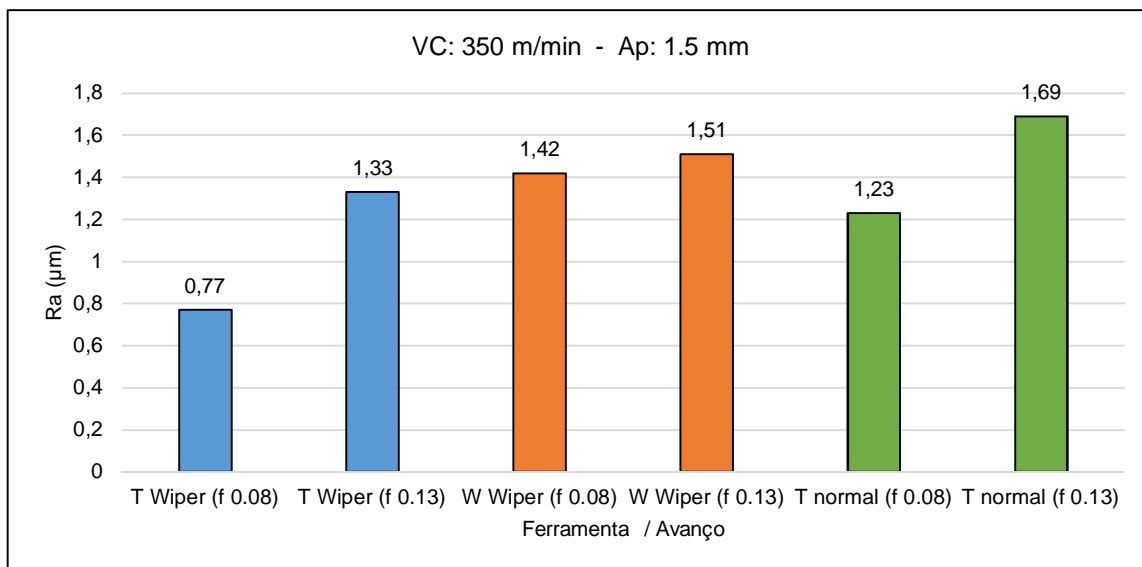
Pç	Inserto	A_p (mm)	V_c (m/min)	F (mm/min)	Ra - Assento rolamento dianteiro (μm)	Batimento da Ponta (mm)
1	T Wiper	0,5	250	0,08	0,52	0,003
2	T Wiper	0,5	250	0,13	1,27	0,01
3	T Wiper	0,5	350	0,08	0,77	0,006
4	T Wiper	0,5	350	0,13	1,15	0,008
5	T Wiper	1,5	250	0,08	0,73	0,007
6	T Wiper	1,5	250	0,13	2,65	0,011
7	T Wiper	1,5	350	0,08	0,71	0,006
8	T Wiper	1,5	350	0,13	1,33	0,008
9	W Wiper	0,5	250	0,08	0,83	0,008
10	W Wiper	0,5	250	0,13	0,96	0,004
11	W Wiper	0,5	350	0,08	1,27	0,007
12	W Wiper	0,5	350	0,13	1,31	0,009
13	W Wiper	1,5	250	0,08	1,25	0,006
14	W Wiper	1,5	250	0,13	1,46	0,005
15	W Wiper	1,5	350	0,08	1,42	0,004
16	W Wiper	1,5	350	0,13	1,51	0,012
17	T normal	0,5	250	0,08	0,98	0,019
18	T normal	0,5	250	0,13	1,47	0,013
19	T normal	0,5	350	0,08	1,15	0,011
20	T normal	0,5	350	0,13	1,52	0,01
21	T normal	1,5	250	0,08	1,63	0,006
22	T normal	1,5	250	0,13	1,84	0,012
23	T normal	1,5	350	0,08	1,23	0,004
24	T normal	1,5	350	0,13	1,69	0,004

Fonte: O autor.

Afim de obter uma melhor compreensão dos dados coletados, foram elaborados gráficos para comparar o desempenho de cada ferramenta e combinações dos parâmetros de usinagem.

Figura 15 – Gráficos para análise dos resultados.





Fonte: O autor.

Como já era esperado, a ferramenta T *wiper* apresentou os melhores valores de rugosidade superficial. Isso ocorre por conta da geometria da aresta de corte presente na ferramenta T *wiper* que possui uma face alisadora, produzindo um melhor acabamento superficial e redução da rugosidade. Como economicamente não há diferença de custo entre as ferramentas, escolhe-se a ferramenta T *wiper*, que permite trabalhar em uma maior faixa de parâmetros de entrada.

Os resultados desta pré-usinagem com o inserto de geometria T *wiper*, obteve melhores resultados em todas as condições de parâmetros utilizando o avanço de 0.08 mm/min.

Porém, para o avanço de 0.13mm/min é possível observar que em alguns casos as outras ferramentas obtiveram resultados melhores, com isso a amostra com a combinação de parâmetros número três, obteve os melhores resultados. E isto pode ter ocorrido, pois foi a peça foi usinada com um menor avanço e menor profundidade de corte.

Figura 17 - a) Amostra número 4. b) Amostra número 3. c) Amostra número 2.



Fonte: O autor.

A ferramenta standard possui uma interação ferramenta/peça diferente da interação da ferramenta wiper. O melhor comportamento de rugosidade da ferramenta wiper se deve ao fato de que suas arestas proporcionam uma menor altura do perfil na aresta de corte na superfície gerada. Os raios existentes na ferramenta wiper e sua parte alisadora impedem a formação de grandes abaulamentos e elevações (vales e picos) resultantes do aumento da velocidade de corte.

Também é possível perceber que com o aumento da profundidade de corte e do avanço, houve uma tendência de as rugosidades aumentarem seus valores.

Conforme Machado et al. (2009), o avanço é o parâmetro mais influente sobre a rugosidade, seguido pelo raio de ponta da ferramenta. De fato, houve um aumento da rugosidade com o aumento do avanço, e mostrou-se que a rugosidade também aumentou consideravelmente com o aumento da profundidade de corte.

O aumento da profundidade de corte provocou, de uma maneira geral, um aumento de Ra. Isso acontece porque com o aumento da profundidade de corte também são aumentadas as forças, e, a possibilidade de flexões. As alturas das ondulações também tendem a aumentar com a profundidade de corte.

Após as análises da pré-usinagem, o parâmetro com melhores condições de corte e qualidade da peça usinada, foi definido para realizar mais 60 ensaios para verificar a variação do processo, medindo o dimensional da peça.

Abaixo, segue quadro com os parâmetros definidos para realização dos novos ensaios:

Quadro 6 – Definições para combinação dos testes.

Inserto	Twiper
Raio Ponta	0,4
Ap	0,5
Vc	350
f	0,08

Fonte: O autor.

4.2 Usinagem dos eixos

Após a usinagem dos eixos e medições geométricas foram analisados os valores do diâmetro e rugosidade do assento do rolamento dianteiro o batimento da ponta do eixo em relação ao assento do rolamento, os valores obtidos foram organizados conforme apêndice A.

Com os resultados da tabela se fez necessário verificar a variação do processo, com isso foi gerado um quadro com as definições obtidas no processo conforme abaixo:

Quadro 7 – Análise do processo

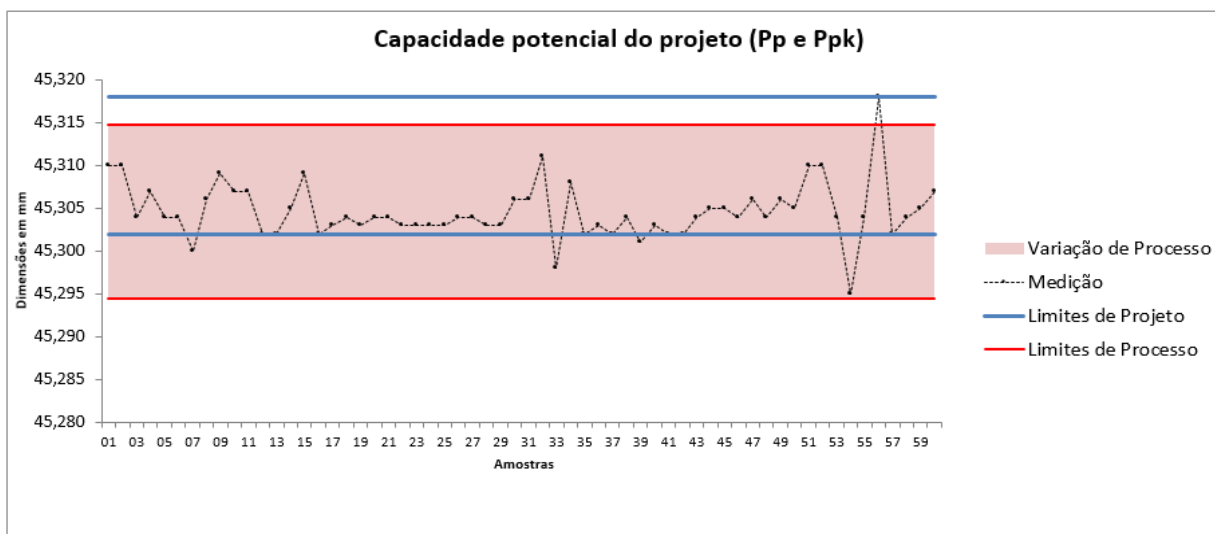
Definições de Processo	
Desvio Padrão	0,003 mm
Menor dimensão	45,295 mm
Maior dimensão	45,318 mm
Campo de tolerância de processo	0,0027 mm
Limite inferior de processo	45,291 mm
Limite superior de processo	45,318 mm
Pp	0,79
Ppk	0,29
Probabilidade de peça boa	78,17%

Fonte: O autor.

Os valores obtidos para variação do processo foram calculados através das equações 5 e 6 citadas anteriormente.

Para melhor interpretação dos resultados foram gerados dois gráficos utilizando a ferramenta de gráficos do Excel.

Figura 18 - Gráfico para análise da variação do processo.

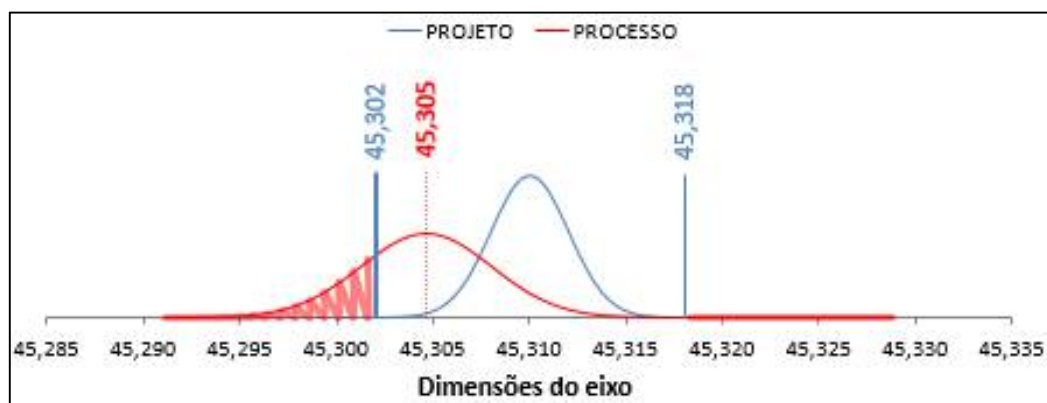


Fonte: O autor.

O gráfico acima está comparando as especificações dos limites de dimensões definidas pelo projeto do eixo e seus limites obtidos no processo. Pode-se observar que no experimento algumas peças ficaram fora do dimensional especificado. Como o trabalho foi executado simulando a produção de eixos normal da empresa, não foi analisado peça por peça. No gráfico, existem dois pontos extremos que estão distantes da média do processo, isso pode ter ocorrido devido a uma quebra da ferramenta de corte.

A capacidade e performance de atender as especificações do processo foi definida pelos parâmetros Pp e Ppk.

Figura 19 - Análise do projeto x processo.



Fonte: O autor.

Após a serem feitos os cálculos e gráficos, foi possível observar que o processo realizado não está atendendo as especificações. Uma solução para este caso seria alterar as especificações do projeto para centralizar os valores obtidos com

os especificados, porém para que isso ocorra é necessário observar se é possível ser feita essa alteração com o fabricante de rolamentos (ou para outros casos, verificar se essa alteração não impactaria no funcionamento de outros componentes).

5 CONCLUSÃO

Dentre as conclusões obtidas neste trabalho após a execução dos ensaios e análises de resultados, pode-se citar:

- Os parâmetros de corte com melhor desempenho nesse estudo durante o processo de usinagem, foram a combinação dos parâmetros de avanço operando com 0,08 m/min, o parâmetro profundidade de corte de 0.5 mm e o parâmetro de velocidade de corte em 350mm/min utilizando a ferramenta com geometria triangular de face alisadora (*T wiper*).

- O aumento do avanço provoca um aumento significativo na rugosidade média.

- Os resultados teóricos obtidos através das equações, apresentaram uma discrepância entre os valores encontrados para a rugosidade média.

- Em todos os casos, quando houve aumento da profundidade de corte e do avanço, houve também aumento da rugosidade superficial, sendo que na ferramenta standard este aumento foi mais significativo.

- Avaliando a repetibilidade do processo estatisticamente, é possível observar que as especificações para rugosidade e batimento foram atendidas, mas não é indicado a alteração do processo atual adotado pela empresa, pois o processo de retificação é mais estável que o de torneamento, sendo, portanto, mais seguro para a obtenção de tolerâncias muito apertadas (abaixo de IT7).

Após conclusões, deixa-se como sugestão para trabalhos futuros:

- A repetição do processo em outros tornos;

- Expansão da análise para avaliar os esforços de corte e o comportamento da rugosidade superficial ao longo do tempo de vida das ferramentas estudadas;

- Verificar a possibilidade da alteração do valor especificado pelo fabricante de rolamentos;

- Análise de custo das operações, para verificar se economicamente é viável a alteração do processo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR ISO 4287:2002. Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I.S.; BRUNS, R. E. **Planejamento e otimização de experimentos**. 2ed. Campinas: Editora da UNICAMP, 1996. 299p

BOUACHA, K.; YALLESE, M.A.; MABROUKI, T.; RIGAL, J. **Statistical analysis of surface roughness and cutting forces using response surface methodology in hard turning of AISI 52100 bearing steel with CBN tool**. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, [S.l.], v. 28, p. 349-361. 2010.

Box, G. E. P., Hunter, W. G., Hunter, J.S. **Statistics for Experimenters**. New York, John Wiley & Sons, 1978

BRASIL, J. L.; VAGHETTI, J. C. P.; SANTOS JR , B. R. A.; SIMON, N. M.; PAVAN, F. A.; DIAS, S. L. P.; LIMA, E. C. **Planejamento estatístico de experimentos como uma ferramenta para otimização das condições de biossorção de Cu(II) em batelada utilizando-se casca de nozes pecã como biossorvente**. Quimica Nova, v.30, n.3, p.548-553, 2007.

Diniz, A. E., Marcondes, F. C., Coppini, N. L., 2000.**Tecnologia da Usinagem dos Materiais**, Art Liber Editora, Brasil, 248 p.

ESPANHOL, V. **Análise dos esforços de corte e acabamento superficial no torneamento de aço com ferramenta de superfície lisa e com quebra-cavaco**. 2008. 90f. Dissertação de Mestrado- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 1970, p. 277-563.

Fórmulas para torneamento – Mitsubishi Carbide. Disponível em: <http://www.mitsubishicarbide.net/contents/mht/pt/html/product/technical_information/information/formula1.html>. Acessado em: 03 mar. 2018.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Indexable inserts for cutting tools: Designation. ISO 1832. Genebra, 1991.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. **Teoria da usinagem dos materiais**. São Paulo, Blucher, 2009.

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 6 ed, John Wiley & Sons, 2005.

NEUGEBAUER, R.; BOUZAKIS, K. D.; DENKENA, B.; KLOCKE F.; STERZING, A.; TEKKAYA, A. E.; WERTHEIM, R. **Velocity effects in metal forming and machining processes**. CIRP Annals - Manufacturing Technology. v. 60, Issue 2, p. 627-650, 2011.

NEVES, C. F. C., SCHVARTZMAN, M. M. A. M.; J., E. **Variables search technique applied to gas separation**. Química Nova. v.25, n 2, p.327-329, 2002.

RODRIGUES, Maria Isabel; IEMMA, Antonio Francisco. Planejamento de Experimentos e Otimização de Processos – **Uma estratégia seqüencial de planejamentos**. Campinas: Editora Casa do Pão, 2006

Taguchi, G., “System of Experimental Design”, UNIPUB, Kraus International Publications, New York, 1986.

SALES, W.F.; EZUGWU, E.O. e MACHADO, A.R.; **Determinação da Eficiência de Quebra-cavacos com as Principais Condições de Corte**; XIV COBEM, Bauru, São Paulo, Brasil, 2004.

Sandvik-Coromant. **Technology machining of metals**. Technical Manual. Sandviken, Sweden. 2010.

Sandvik, 2012, **Manual Técnico de Usinagem, Parte A: Torneamento Geral**, Sandvik Coromant, São Paulo, 156 p.

SOUZA, André João de. **Processos de fabricação por usinagem – Parte 1**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011, 89p.

SCHUTZER, K; SCHULZ, H. (2003). **Histórico da usinagem com altíssima velocidade até os dias atuais**. São Paulo; Editora Érica Ltda. Cap.01, p. 13-28.

APÊNDICE A – RESULTADOS ANALISADOS DO EIXO

Peça	ØAss. Rol. Diant.	Ra	ØAss. Rol. Tras.	Ra	Bat. Ass. Polia
1	45,310	0,83	45,310	0,52	0,008
2	45,310	0,74	45,312	0,52	0,028
3	45,304	1,17	45,303	0,78	0,020
4	45,307	1,23	45,300	0,88	0,030
5	45,304	1,37	45,303	1,27	0,026
6	45,304	1,40	45,310	1,38	0,026
7	45,300	1,46	45,310	1,58	0,032
8	45,306	1,56	45,303	1,55	0,022
9	45,309	1,57	45,301	1,60	0,005
10	45,307	1,62	45,304	1,53	0,006
11	45,307	0,94	45,304	0,86	0,007
12	45,302	0,97	45,310	1,03	0,008
13	45,302	1,23	45,308	1,11	0,011
14	45,305	1,21	45,310	1,17	0,003
15	45,309	1,22	45,312	1,06	0,004
16	45,302	1,45	45,302	1,32	0,034
17	45,303	1,39	45,307	1,32	0,032
18	45,304	1,15	45,304	1,32	0,034
19	45,303	1,38	45,302	1,17	0,015
20	45,304	1,32	45,310	1,40	0,042
21	45,304	1,31	45,307	1,43	0,040
22	45,303	1,34	45,309	1,42	0,016
23	45,303	1,57	45,300	1,60	0,022
24	45,303	1,37	45,307	1,11	0,024
25	45,303	1,53	45,304	1,50	0,024
26	45,304	1,04	45,298	1,55	0,011
27	45,304	1,30	45,304	1,37	0,013
28	45,303	1,24	45,303	1,38	0,004
29	45,303	1,36	45,302	1,29	0,038
30	45,306	1,48	45,306	1,42	0,016
31	45,306	1,58	45,308	1,51	0,026
32	45,311	0,59	45,307	0,80	0,018
33	45,298	0,75	45,305	0,63	0,034
34	45,308	0,73	45,303	0,88	0,034
35	45,302	0,78	45,301	0,85	0,008
36	45,303	0,97	45,302	0,91	0,040
37	45,302	0,99	45,302	1,06	0,036
38	45,304	1,03	45,304	1,11	0,014
39	45,301	1,06	45,304	1,07	0,036
40	45,303	1,02	45,303	1,22	0,042
41	45,302	0,93	45,303	1,04	0,019
42	45,302	0,89	45,307	1,06	0,041
43	45,304	0,91	45,303	0,99	0,042
44	45,305	0,94	45,303	1,12	0,058
45	45,305	0,87	45,306	0,99	0,004
46	45,304	1,01	45,302	1,06	0,022
47	45,306	1,03	45,307	1,04	0,034
48	45,304	1,05	45,308	1,25	0,018
49	45,306	1,06	45,306	1,09	0,006
50	45,305	1,11	45,307	1,38	0,018
51	45,310	1,09	45,307	1,29	0,034
52	45,31	1,11	45,303	1,11	0,034
53	45,304	1,39	45,310	1,11	0,008
54	45,295	1,49	45,304	1,37	0,040
55	45,304	1,52	45,295	1,48	0,018
56	45,318	0,62	45,304	0,42	0,016
57	45,302	0,72	45,304	0,70	0,030
58	45,304	0,80	45,303	0,72	0,032
59	45,305	0,82	45,302	0,57	0,004
60	45,307	0,86	45,303	0,86	0,032

ANEXO 1 – DESENHO DIMENSIONAL DO EIXO AVALIADO

