

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CÂMPUS GUARAPUAVA
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

LUIS OTAVIO CANDIDO

**ANÁLISE DO DESGASTE DA PASTILHA DE METAL DURO
WNMG080408-UG NA USINAGEM DO AÇO 1045.**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

GUARAPUAVA

2020

LUIS OTAVIO CANDIDO

**ANÁLISE DO DESGASTE DA PASTILHA DE METAL DURO
WNMG080408-UG NA USINAGEM DO AÇO 1045.**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Aldo Przybysz

GUARAPUAVA

2020

TERMO DE APROVAÇÃO

**ANÁLISE DO DESGASTE DA PASTILHA DE METAL DURO WNMG080408-UG NA
USINAGEM DO AÇO 1045**

LUIS OTAVIO CANDIDO

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em Guarapuava, Paraná na data 12 de dezembro de 2019 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

ALDO PRZYBYSZ
Prof. Orientador

SILVIA DO NASCIMENTO ROSA
Membro Da Banca

DENISE ALVES RAMALHO
Membro Da Banca

ALDO PRZYBYSZ
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

LUIS OTAVIO CANDIDO

CANDIDO, Luis Otavio. **ANÁLISE DO DESGASTE DA PASTILHA DE METAL DURO WNMG080408-UG NA USINAGEM DE AÇO 1045**. 2020.40f. Trabalho de conclusão de curso – coordenação de engenharia mecânica (COME), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Guarapuava, 2020.

RESUMO

A área de estudo dos processos de fabricação é muito vasta devido à quantidade de fenômenos que influenciam no resultado final. Devido a isso, qualquer estudo que visa um melhor entendimento da influência dos parâmetros se torna relevante, uma vez que os processos de usinagem possuem grande influência no fator econômico de países desenvolvidos. Tendo em vista este cenário, o trabalho proposto tem como objetivo realizar uma análise da influência do parâmetro de velocidade de corte, através da variação da rotação do eixo árvore da máquina, de em relação ao desgaste da ferramenta e da rugosidade da peça em uma peça de aço SAE 1045 torneado com uma ferramenta de corte de metal duro, catalogada WNMG080408-US. Os resultados obtidos mostraram uma relação entre os parâmetros de tempo de usinagem, desgaste da ferramenta e influência no acabamento superficial da peça, onde o aumento da rotação de corte resultou em uma maior rugosidade da peça e um desgaste acelerado da pastilha.

Palavras chave: Fabricação. Usinagem. Velocidade de corte. Rugosidade. Metal duro. Desgaste. Ferramenta.

CANDIDO, Luis Otavio. **ANALYSIS OF THE WEAR OF THE HARD METAL PASTILE WNMG080408-UG IN STEEL MACHINING 1045**. 2019. 40f. Course final Project- Graduate School of Mechanical Engineering, Federal University of Technology – Paraná. Guarapuava. 2020.

ABSTRACT

The area of study of manufacturing processes is very wide due to the number of phenomena that influence the final result. Because of this, any study that seeks a better understanding of the influence of the parameters becomes relevant, since the machining processes have great influence on the economic factor of developed countries. In view of this scenario, the proposed work aims to perform an analysis of the influence of the cutting speed parameter, through the variation of the spindle rotation of the machine, in relation to tool wear and the roughness of the part in a part of SAE 1045 steel turned with a carbide cutting tool, cataloged WNMG080408-US. The results obtained showed a relationship between the parameters of machining time, tool wear and influence on the surface finish of the part, where the increase in the cutting speed resulted in a greater roughness of the part and an accelerated wear of the insert.

Keywords: Manufacturing. Machining. Cutting speed. Roughness. Hard metal. Wear. Tool.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, por todos os dons e graças a mim concebido durante toda a minha vida e nesta etapa não foi diferente.

Gostaria de agradecer toda a minha família, em especial meu pai Cesar Augusto Candido e minha mãe Silvia Cristina Ferreira Candido por todo o apoio incondicional durante a minha vida e que sempre estão ao meu lado, independente de qualquer coisa.

A minha namorada Gabriela Nascimento Reis que foi um presente de Deus durante toda esta caminhada e que foi fundamental em cada etapa dela, do início ao fim.

Ao meu professor orientador Aldo Przybysz, pela orientação, pelo suporte constante e por todos os ensinamentos prestados durante toda a graduação seja no papel de professor, coordenador ou orientador.

Aos técnicos dos laboratórios de Engenharia Mecânica da UTFPR campus Guarapuava: Lucas Franco Wrege e Adriana do Nascimento e Silva, pelos ensinamentos e conselhos durante a realização da parte prática do presente trabalho.

De modo geral a todos os servidores da UTFPR – Campus Guarapuava que de alguma forma, direta ou indiretamente, tiveram papéis fundamentais durante minha caminhada.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Principais processos de usinagem.....	15
Figura 2 - Torno convencional.....	16
Figura 3 – Movimentos ativos no torneamento.....	18
Figura 4 – Conceitos em relação a geometria da peça.....	22
Figura 5: Classificação de ligas metálicas.....	23
Figura 6 – Micrografia Aço SAE 1045 no estado bruto, atacada em Nital 1%.....	25
Figura 7 – Materiais para Ferramenta de corte.....	27
Figura 8 – Resultados obtidos no trabalho de Bezerra e Machado (2008).....	29
Figura 9 – Tarugo de aço SAE 1020.....	35
Figura 10 - Corpo de prova com dimensões iniciais do estudo.....	36
Figura 11 – Parâmetros de corte da pastilha WNMG080408-UG.....	37
Figura 12 – Lavador Ultra-sônica Digital.....	40
Figura 13 – Microscópio Olympus IBX 51.....	40
Figura 14 – Rugosímetro Mitutoyo SJ-410.....	41
Figura 15 – (a) aresta de corte principal com lascamento; (b) aresta de corte principal com desgaste contínuo.....	44
Figura 16 – Pastilha lascada durante a usinagem.....	45
Figura 17 - aresta de corte principal do 1º corpo de prova usinado a 1000 RPM.....	45
Figura 18 - Superfície de saída – 630 RPM.....	46
Figura 19 - Superfície de saída – 800 RPM.....	47
Figura 20 – Superfície de saída – 1000 RPM.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros para qualificação da rugosidade	33
Tabela 2 – Parâmetro de amostragem.....	34
Tabela 3 – Dureza ROCKWELL (HR) dos corpos de prova	36
Tabela 4 - Parâmetros de usinagem	39

LISTA DE FLUXOGRAMA

Fluxograma 1 – Etapas para a realização do trabalho	42
---	----

LISTA DE SIGLAS

AISI - *American Iron and Steel Institute*

APC - *Aresta postiça de corte*

ASTM - *American Society for Testing Materials*

SAE - *Society of Automotive Engineers*

UTFPR - *Universidade Tecnológica Federal do Paraná*

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - $Vb\ max\ x\ t$	43
Gráfico 2 - Rugosidade x tempo de usinagem	48
Gráfico 3 – Rugosidade x $Vb\ max$	49

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 JUSTIFICATIVA	14
1.2 OBJETIVOS	14
1.2.1 Objetivo Geral	14
1.2.2 Objetivo Específico	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 USINAGEM CONVENCIONAL	15
2.2 TORNEMAENTO	16
2.3 PARÂMETROS DE USINAGEM	17
2.3.1 Movimentos na Usinagem	17
2.3.1.1 Movimentos ativos	17
2.3.1.2 Movimentos passivos	18
2.3.2 Parâmetros de corte	19
2.3.3 Conceitos Auxiliares	21
2.4 MATERIAIS NA ENGENHARIA	22
2.4.1 Metais e suas Ligas	23
2.4.1.1 Aços	24
2.5 FERRAMENTA DE CORTE	25
2.5.1 METAL DURO	27
2.6 DESGASTE DE FERRAMENTA	30
2.7 RUGOSIDADE	32
2.7.1 Parâmetros para a quantificação da rugosidade	32
2.7.2 Cálculo teórico da rugosidade no torneamento	34
3 MATERIAS E MÉTODOS	35
3.1 MATERIAL UTILIZADO	35
3.2 FERRAMENTA DE CORTE	37
3.3 PARÂMETROS DE CORTE	38
3.4 ANÁLISE DO DESGASTE DA FERRAMENTA	39
3.5 ANÁLISE DO ACABAMENTO SUPERFICIAL	41
3.6 FLUXOGRAFA DE TRABALHO	42
4 RESULTADOS	43
4.1 RESULTADO DE $V_b Max$ X TEMPO DE USINAGEM	43
4.2 DESGASTE DE CRATERA	46
4.3 RESULTADO DE RUGOSIDADE X TEMPO DE USINAGEM	48
4.4 RESULTADO DE RUGOSIDADE X $V_b Max$	49
5 CONCLUSÃO	51
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	52
7 REFERÊNCIAS	53

1 INTRODUÇÃO

A busca por melhorias nos processos de fabricação são alvos de preocupação constante dentro da indústria. Tais melhorias podem ocorrer devido há otimizações no processo, aumento da produtividade, diminuição da matéria prima e redução dos custos.

Processos de fabricação podem acontecer de diversas maneiras, tais como com mudança de forma, aprimoramento das propriedades, união permanente.

Segundo Groover (2014), podem-se classificar os processos de mudança de forma de acordo com o estado inicial do material. Apresentam-se quatro categorias: (1) processos de solidificação (estado inicial líquido); (2) processamento de particulados (estado inicial pó); (3) processos de conformação (sólido dúctil); e (4) processos de remoção de material, material inicialmente sólido (dúctil ou frágil). Os processos de remoção de material são sub-classificados em usinagem, processos abrasivos e processos não tradicionais.

O aumento da utilização do processo de usinagem deve-se a variedade de geometrias que podem ser usinadas, com um alto grau de precisão dimensional e acabamento superficial sem que suas propriedades sejam alteradas. (DE AMORIN, 2002)

Devido à relevância econômica do processo, a busca por uma melhor compreensão das condições de usinabilidade permite entender a influência das condições de usinagem na obtenção dos resultados esperados. E com isso, buscar uma otimização a fim de obter os mesmos resultados com um custo operacional inferior.

A área de estudo para a melhoria dos processos de usinagem é ampla, devido a existência de diversos fatores que podem influenciar o processo de usinagem. Segundo Metals Handbook (1989), pode-se classificar como variáveis independentes de entrada: a) material usinado; b) a geometria de partida do material; c) seleção do processo de usinagem; d) ferramenta de corte recoberta ou não; e) parâmetros de corte; f) geometria da ferramenta; g) fluido de corte.

Segundo Diniz (2013), o parâmetro que mais influência no desgaste da ferramenta é a velocidade de corte, seguido pelo avanço da ferramenta e por último a profundidade de corte.

O presente trabalho irá analisar a influência da velocidade de corte, através da variação das rotações do eixo árvore em um torno convencional, para avaliar a influência deste parâmetro no desgaste da pastilha de metal duro e na qualidade superficial da peça.

O material escolhido para o presente trabalho foi o aço SAE 1045, devido a suas características de usinabilidade, além de ser um aço bastante comercializado no mercado e de inúmeras aplicações. O aço SAE 1045 é um aço de médio carbono, que apresentam concentrações de carbono em aproximadamente 0,45%p (CALLISTER JR, 2016).

1.1 JUSTIFICATIVA

Compreender o comportamento sofrido pela pastilha durante a usinagem permite uma melhor obtenção nos resultados desejados, minimizando as perdas inesperadas durante o processo.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar o desgaste sofrido pela pastilha WNMG080408-UG, fabricada pela empresa WG Turn, no processo de usinagem utilizando diferentes velocidades de corte e também avaliar a qualidade superficial da peça após a usinagem.

1.2.2 Objetivo Específico

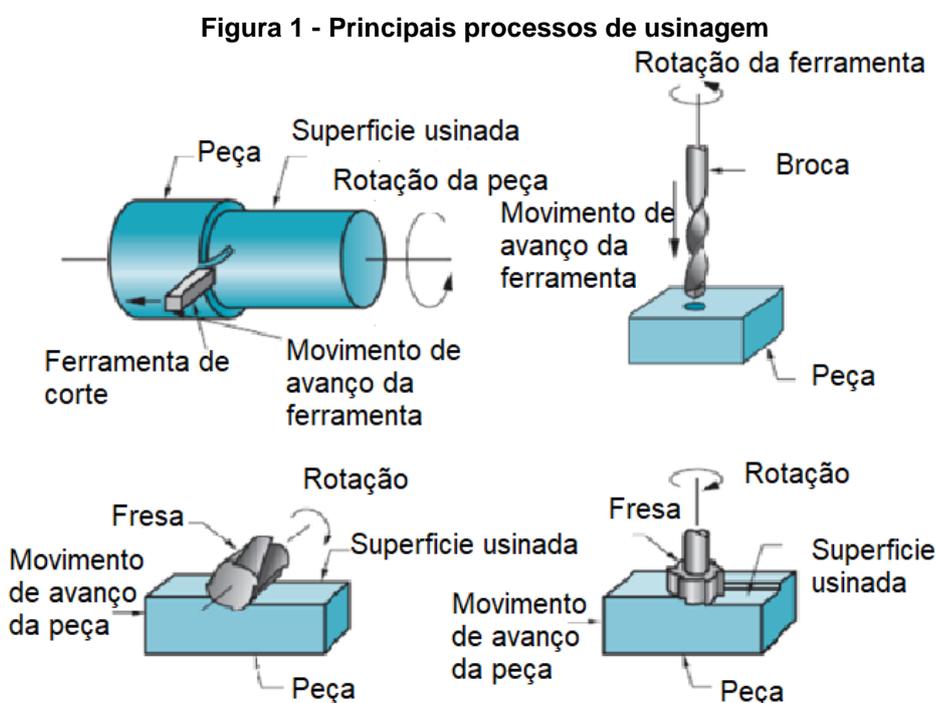
Para alcançar o objetivo geral, alguns objetivos específicos são definidos a fim de direcionar o estudo em questão:

- Usinar os corpos de prova;
- Medir os parâmetros de rugosidade dos corpos de prova;
- Medir o desgaste da ferramenta;
- Analisar os resultados obtidos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 USINAGEM CONVENCIONAL

Usinagem convencional é um grupo de processos que possuem como característica comum a utilização de ferramenta de corte para remoção de material. Denomina-se o material retirado como cavaco. Os principais processos são torneamento, furação e fresamento e estão ilustrados na Figura 1 sendo: (a) torneamento; (b) furação; (c) fresamento tangencial; (d) fresamento de topo (GROOVER, 2014; FERRARESI, 1924).



Fonte: Adaptado de GROOVER, 2014

Para a realização do processo é necessário um movimento relativo entre a ferramenta e a peça. Este movimento é obtido através do movimento primário, denominado velocidade de corte, e do movimento secundário, denominado avanço. A combinação desses movimentos, da geometria inicial da peça e a penetração na superfície de trabalho, produzirá a geometria da superfície desejada (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

De acordo com GROOVER (2014), usinagem convencional é um dos processos de fabricação mais importantes e seu desenvolvimento está diretamente

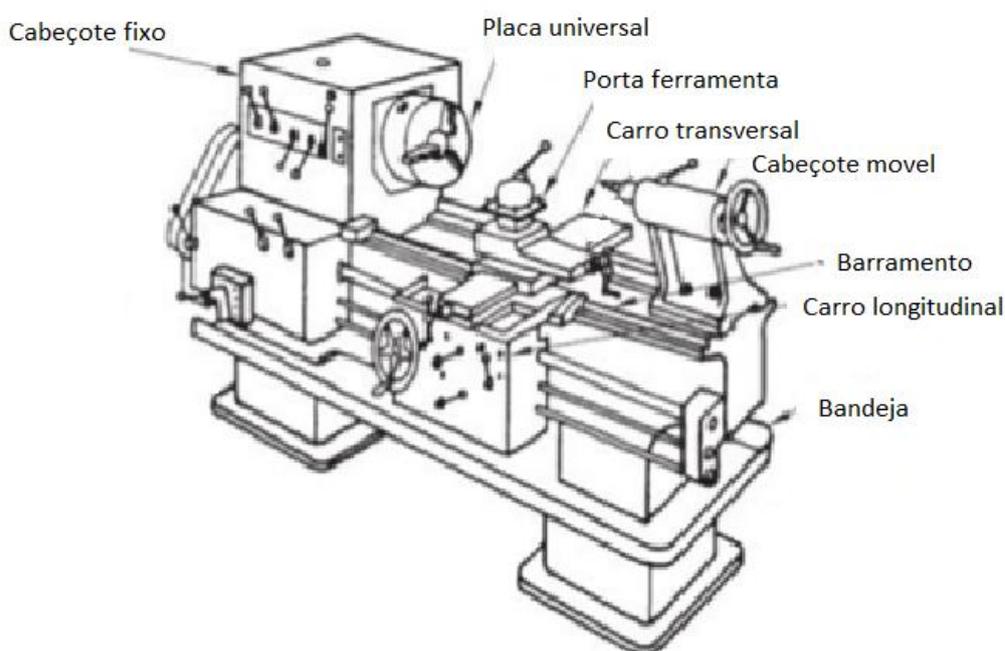
ligado ao crescimento econômico da manufatura. Tal relevância deve-se ao fato que este processo pode ser realizado em uma grande variedade de materiais com alto grau de precisão dimensional, acabamento superficial desejado para diversas formas/características geométricas da peça (DE AMORIN, 2002).

2.2 TORNEMAENTO

Torneamento é um processo mecânico de usinagem que tem como característica a remoção de material através de uma ferramenta mono cortante que remove o material superficial de uma peça que está em movimento giratório (GROOVER, 2014).

A máquina-ferramenta que realiza este trabalho é denominada torno conforme ilustrado na Figura 2.

Figura 2 - Torno convencional



Fonte: Manual do torno mecânico (1947) apud ZAVELINSKI

O princípio de funcionamento deste maquinário é através da fixação da peça no eixo árvore do torno que gira a uma velocidade previamente calculada, (a velocidade do giro é mensurada em rotações por minuto, RPM) e do movimento da ferramenta de corte dotada de ângulos de corte específicos, que avança em uma

direção paralela ao eixo de rotação da peça retirando o sobre metal desejado (DE ALMEIDA; FERRARESI, 2014).

2.3 PARÂMETROS DE USINAGEM

Parâmetros de usinagem são os fatores que definirão as condições operacionais de acordo com a necessidade do processo, a fim de atingir os resultados esperados. No presente trabalho estes parâmetros serão apresentados em movimentos de usinagem, parâmetros de corte e conceitos auxiliares.

A otimização desses parâmetros impactará diretamente na obtenção dos resultados. Por exemplo, os movimentos da usinagem estão ligados ao tempo total da operação (que impacta no custo do processo); os parâmetros de corte, por sua vez, influenciam no desgaste da ferramenta, na qualidade superficial da peça. Esses conceitos serão explorados mais a fundo nos próximos capítulos (COPPINI; BAPTISTA, 2020).

2.3.1 Movimentos na Usinagem

O contato entre os movimentos da ferramenta e da peça durante a usinagem permite a ocorrência do processo de usinagem (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013). Esses movimentos são considerados no projeto e na fabricação das máquinas-ferramentas que os realizarão. Por convenção adota-se que a ferramenta realizará todo o movimento e que a peça ficará parada (DE ALMEIDA, 2015).

Os movimentos podem ser classificados como ativos e passivos. Ambos são importantes, pois a eles estão associados tempos que, somados, resultam no tempo total de fabricação (DE ALMEIDA, 2015). Todos esses possuem direções, sentidos, velocidades e percursos associados, considerados nas direções dos movimentos durante o processo (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

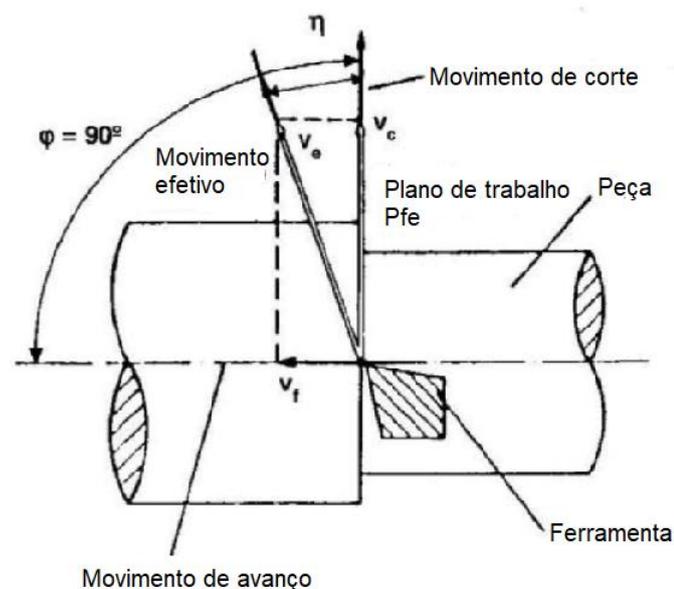
2.3.1.1 Movimentos ativos

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013) e Machado (2009), movimentos ativos são aqueles que promovem a remoção de material. São eles:

- Movimento de corte: movimento entre a peça e a ferramenta que provoca a retirada de cavaco em uma rotação na ausência do movimento de avanço;
- Movimento de avanço: realizado entre a peça e a aresta de corte, o qual, como o movimento de corte, possibilita a retirada contínua de material;
- Movimento efetivo de corte: resultante dos movimentos de corte e avanço quando ocorrem simultaneamente.

A Figura 3 ilustra os movimentos no processo de torneamento.

Figura 3 – Movimentos ativos no torneamento



Fonte: Adaptado de Diniz, Marcondes e Coppini, 2013

Onde o ângulo ϕ representa o ângulo de direção de avanço e η da direção efetiva. Os valores de v_c e v_f serão apresentados no presente trabalho.

2.3.1.2 Movimentos passivos

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2013) e Machado (2009), movimentos passivos são fundamentais para a realização do processo de usinagem, porém não promovem remoção de material, sendo classificados como:

- Movimento de ajuste: entre a ferramenta e a peça, no qual determina a espessura da camada de material a ser removida;
- Movimento de correção: movimento entre a ferramenta e a peça empregada para compensar os desgastes da ferramenta, ou outra variação;
- Movimento de aproximação: é o movimento de aproximação entre a ferramenta e a peça, antes do início da usinagem;
- Movimento de recuo: movimento entre a ferramenta e a peça com o qual a ferramenta, após a usinagem, é afastada da peça.

2.3.2 Parâmetros de corte

Os parâmetros de corte são fundamentais para o setup correto da máquina, para uma maior eficiência. O cálculo correto destes parâmetros nos permite uma série de vantagens, tais como economia de energia elétrica, aumento da vida útil da ferramenta, economia no fluido de corte, aumento da vida útil da máquina, entre outros (DE ALMEIDA, 2015).

O primeiro parâmetro analisado é a velocidade de corte. Segundo Diniz, Marcondes, Coppini (2013), velocidade de corte é a velocidade tangencial instantânea resultante da rotação da ferramenta em torno da peça, sendo medida em metros por minuto. Através dela, pode-se calcular a quantidade de rotações da máquina e o percurso percorrido pela ferramenta no período de um minuto.

Segundo de Almeida (2015), os fatores que influenciam a velocidade de corte são:

- Material da peça a ser usinada;
- Operação de usinagem (desbaste ou acabamento);
- Material da ferramenta utilizado;
- Tipo de perfil que será usinado.

A velocidade de corte é calculada por:

$$V_c = (\pi * d * n)/1000 = m/min$$

Equação 1

Onde:

D : diâmetro da peça, em mm;

n : número de rotações da ferramenta, em RPM.

Ao isolar n na equação de V_c e multiplicar pelo avanço da ferramenta, é possível obter o valor da velocidade de avanço (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013; FERRARESI, 1924). Essa é dada por:

$$V_f = f * n = \frac{1000 * V_c}{\pi * D} * f \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

V_f : velocidade de avanço, em mm/min.

f : avanço, em mm/volta.

Os tempos ativos dos movimentos de corte e ou de avanço representam a totalidade do tempo de corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013; FERRARESI, 1924).

$$t_c = \frac{l_f}{V_f} = \frac{l_f}{f * n} = \frac{\pi * D * l_f}{1000 * f * V_c} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

t_c : tempo de corte, em min;

l_f : percurso de avanço, em mm.

O trabalho de Bezerra e Machado (2008) mostra que para diferentes valores de velocidade de corte, apresentam resultados diferentes para o desgaste da ferramenta e para a rugosidade superficial da peça. Em relação ao desgaste estudado pelos autores a pastilha apresentou um maior desgaste na velocidade de 100 m/min quando comparadas com as velocidades de 300 m/min e 10 m/min , independente da pastilha utilizada.

Os tempos passivos nem sempre podem ser calculados, por isso geralmente estima-se estes valores através de técnicas específicas que estudam os movimentos

e/ou cronometra-se os tempos relacionados a esses movimentos (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013; FERRARESI, 1924).

O segundo parâmetro analisado é o avanço (f) denominado como o percurso de avanço em cada volta ou em cada curso da ferramenta. Este parâmetro influencia na formação do cavaco e na rugosidade superficial da peça. (MARCONDES; COPPINI, 2013; MACHADO, 2009).

Profundidade de corte (a_p) refere-se à grandeza de penetração da ferramenta em relação à peça, medida perpendicularmente ao plano de trabalho. Semelhante ao avanço, esse parâmetro também influencia na formação do cavaco, porém em relação a rugosidade da peça sua influência só ocorre para valores acima de 1mm (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

2.3.3 Conceitos Auxiliares

Cunha de corte (ou gume de corte) é a parte da ferramenta na qual o cavaco se origina, através do movimento relativo entre a ferramenta e a peça. Para a construção desta cunha, alguns conceitos são importantes (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Aresta principal de corte: é a aresta cuja cunha correspondente, observada no plano de trabalho, e para um ângulo de direção de avanço igual a 90° , indica a direção de avanço (FERRAREZI, 1924; MACHADO, 2009).

Aresta secundária de corte: é a aresta cuja cunha correspondente, observada no plano de trabalho, e para um ângulo de direção de avanço igual a 90° , indica a direção contrária à direção de avanço (FERRAREZI, 1924; MACHADO, 2009).

Superfície a usinar: é a superfície da peça antes da operação da usinagem.

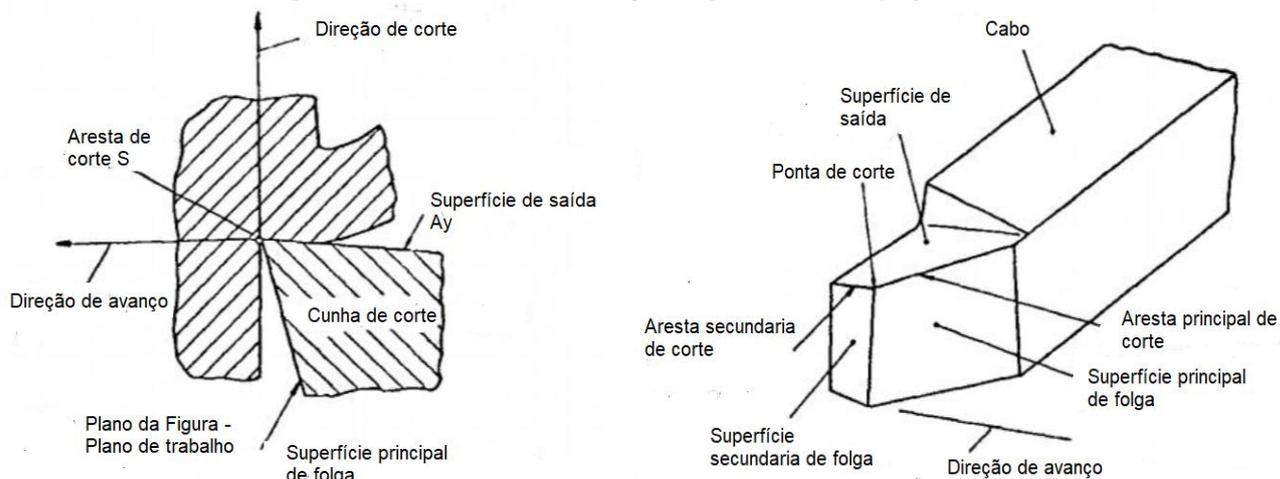
Superfície em usinagem: é a superfície que está sendo gerada pela ferramenta.

Superfície usinada: é a superfície gerada pelo processo de usinagem (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013; MACHADO, 2009).

Superfície de saída: é a superfície a qual o cavaco se forma (MACHADO, 2009).

A Figura 4 ilustra os conceitos necessários para a construção de uma cunha.

Figura 4 – Conceitos em relação a geometria da peça



(a) – Cunha de corte da ferramenta de torneamento.

(b) – Aresta de corte e superfícies da parte de corte de uma ferramenta de torneamento.

Fonte: Adaptado de Diniz (2009)

Ângulo da direção de avanço (φ): é o ângulo entre a direção de avanço e a direção de corte. No torneamento e na furação este ângulo é constante ($\varphi = 90^\circ$) ou variável continuamente durante o processo, como no fresamento (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

Ângulo da direção efetiva (η): é o ângulo entre a direção efetiva e a direção de corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013; MACHADO, 2009).

Ponto de corte escolhido: é um ponto qualquer da aresta de corte escolhido para realizar a análise do sistema ferramenta/peça.

Plano de trabalho (P_{fe}): é o plano imaginário que passa pelo ponto de corte escolhido e que contém as direções de avanço e corte. Plano o qual ocorrem os movimentos ativos (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

2.4 MATERIAIS NA ENGENHARIA

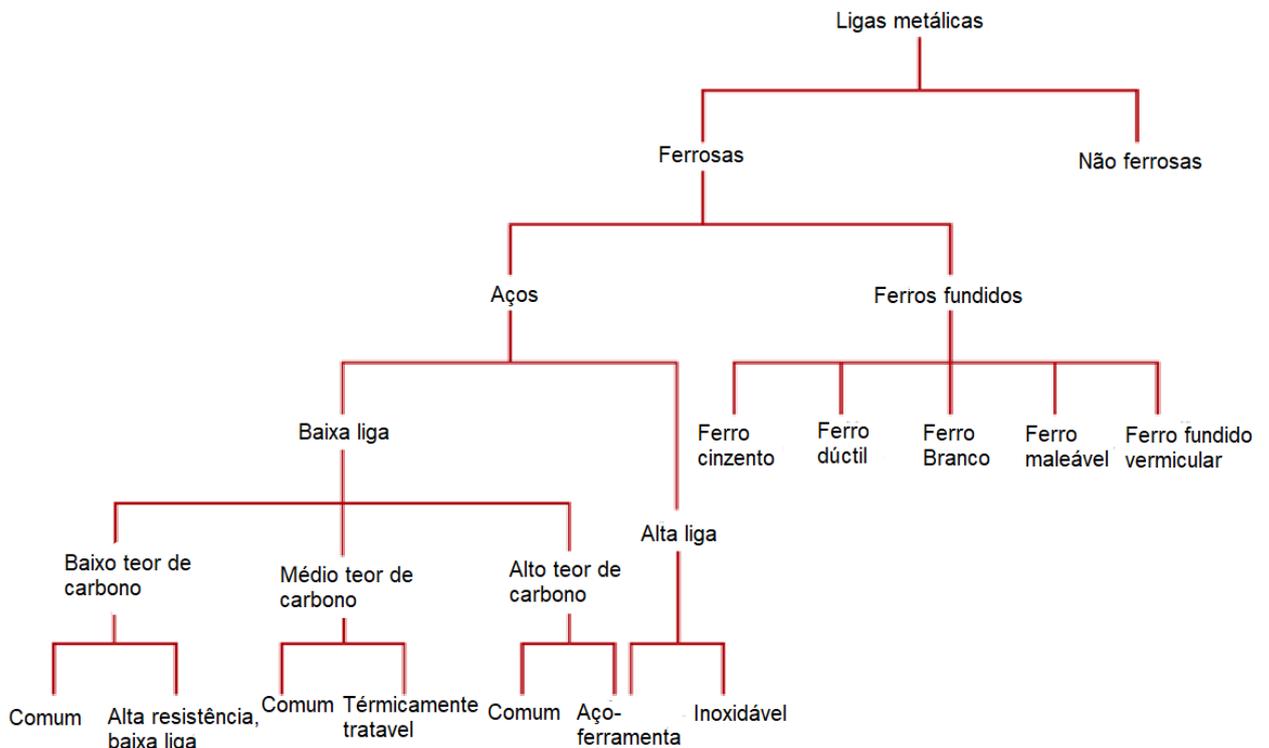
Os materiais sólidos na engenharia são classificados quanto a sua estrutura atômica e composição química em três grupos, sendo eles metais, cerâmicas e polímeros. Dentro de cada classificação existem subclassificações que especificam melhor os materiais disponíveis (CALLISTER JR., 2016).

O presente trabalho utiliza uma liga de aço carbono comum com médio teor de carbono, justificando o seu enfoque nas descrições subsequentes.

2.4.1 Metais e suas Ligas

Os metais são os materiais mais importantes da engenharia. Eles podem ser utilizados em sua forma pura, como o ouro, prata e cobre ou através de suas ligas metálicas. Algumas propriedades que os tornam relevantes são: alta rigidez e resistência mecânica, tenacidade, boa condutividade elétrica e térmica. A Figura 5 ilustra a classificação das ligas metálicas. (GROOVER, 2014; CALLISTER JR, 2016).

Figura 5: Classificação de ligas metálicas



Fonte: Adaptado de Callister Jr., 2016

Liga é um metal composto de dois ou mais elementos, em que pelo menos um é de natureza metálica. Esse processo é realizado para melhorar as propriedades dos materiais como resistência, dureza e outras em relação ao material em seu estado puro (CALLISTER JR., 2016).

Segundo Callister Jr. (2016), podemos classificar as ligas em dois grupos:

- Ligas ferrosas: são ligas que possuem o ferro como principal constituinte. Estas são amplamente usadas no ramo da engenharia

devido a alguns fatores como quantidade abundante na natureza, versatilidade na produção (variedade de propriedades físicas e químicas) e técnicas de extração e fabricação relativamente econômicas. Subclassificam-se as ligas ferrosas em: aços e ferros fundidos;

- Ligas não ferrosa: são ligas que não se baseiam no ferro (Fe).

2.4.1.1 Aços

Os aços são ligas de ferro-carbono com teor de carbono normalmente inferior a 1,0%p e podem conter concentrações consideráveis de outros elementos de liga. As propriedades dos aços estão ligadas ao percentual de carbono presente no material (CALLISTER JR., 2016).

Aços com médio teor de carbono contêm concentrações de carbono entre 0,25 e 0,60%p. Eles apresentam maior resistência mecânica que os aços com baixo teor, porém em contrapartida possuem menor ductilidade e tenacidade. Suas aplicabilidades incluem componentes de motores (virabrequim e biela) e mecânicos. (CALLISTER JR., 2016).

Uma análise rápida permite dizer que quanto maior o percentual de carbono maior será a resistência e dureza do material, entretanto a ductilidade é inversamente proporcional a este percentual (CALLISTER JR., 2016).

O presente trabalho utilizará o aço SAE 1045, caracterizado como um aço de médio teor de carbono que possui composição química de carbono entre 0,43% a 0,50%, silício 0,15% a 0,35%, magnésio 0,30% a 0,60%, fósforo com máximo de 0,03% e enxofre com máxima de 0,05%. (DA SILVA; NETO, 2012)

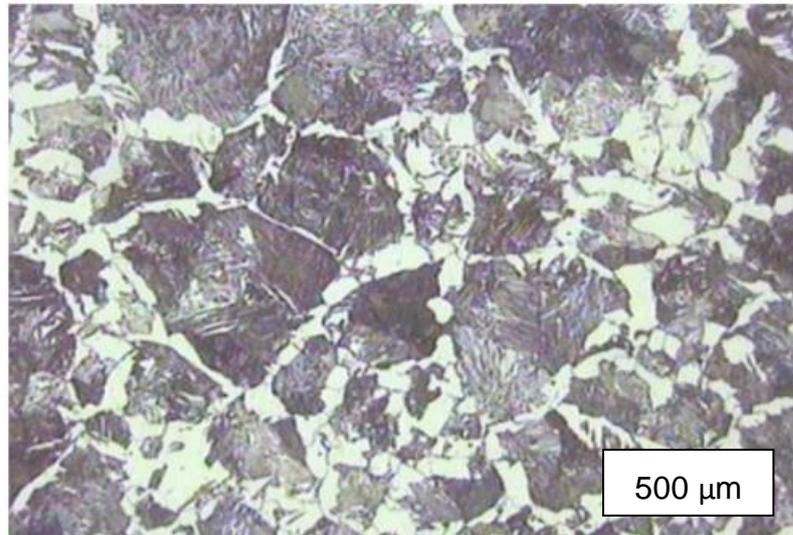
Este aço geralmente é utilizado na fabricação de componentes de uso geral, pois tem uma resistência mecânica superior à dos aços de baixo carbono convencionais, apresenta uma boa relação entre resistência à fratura e mecânica. Dependendo da necessidade, este material pode passar por processos térmicos a fim de melhorar alguma característica para determinada aplicação. De modo geral, este material é utilizado com dureza na escala Brinell (HB) entre 180 HB a 300 HB (CALLISTER JR., 2016).

A microestrutura do material é um importante fator na sua usinabilidade. A quantidade e a forma de como os elementos estão arranjadas na microestrutura influencia nas condições de usinagem, como por exemplo, na ductilidade e fragilidade do material, na formação do cavaco, força de usinagem, abrasividade e temperatura de corte (DA SILVA; NETO, 2012).

Os tratamentos térmicos têm como finalidade alterar a microestrutura do material sem alterar a sua composição química (DA SILVA; NETO, 2012).

A figura 6 ilustra a microestrutura do aço 1045 sem tratamento térmico.

Figura 6 – Micrografia Aço SAE 1045 no estado bruto, atacada em Nital 1%



Fonte: Adaptado de Da Silva e Neto (2012)

A região mais escura da imagem são os grãos de perlita e a parte clara é caracterizada pela matriz ferrítica. Em aços com porcentagem de aproximadamente 0,5% de carbono, a porção de perlita é em torno de 65%.

2.5 FERRAMENTA DE CORTE

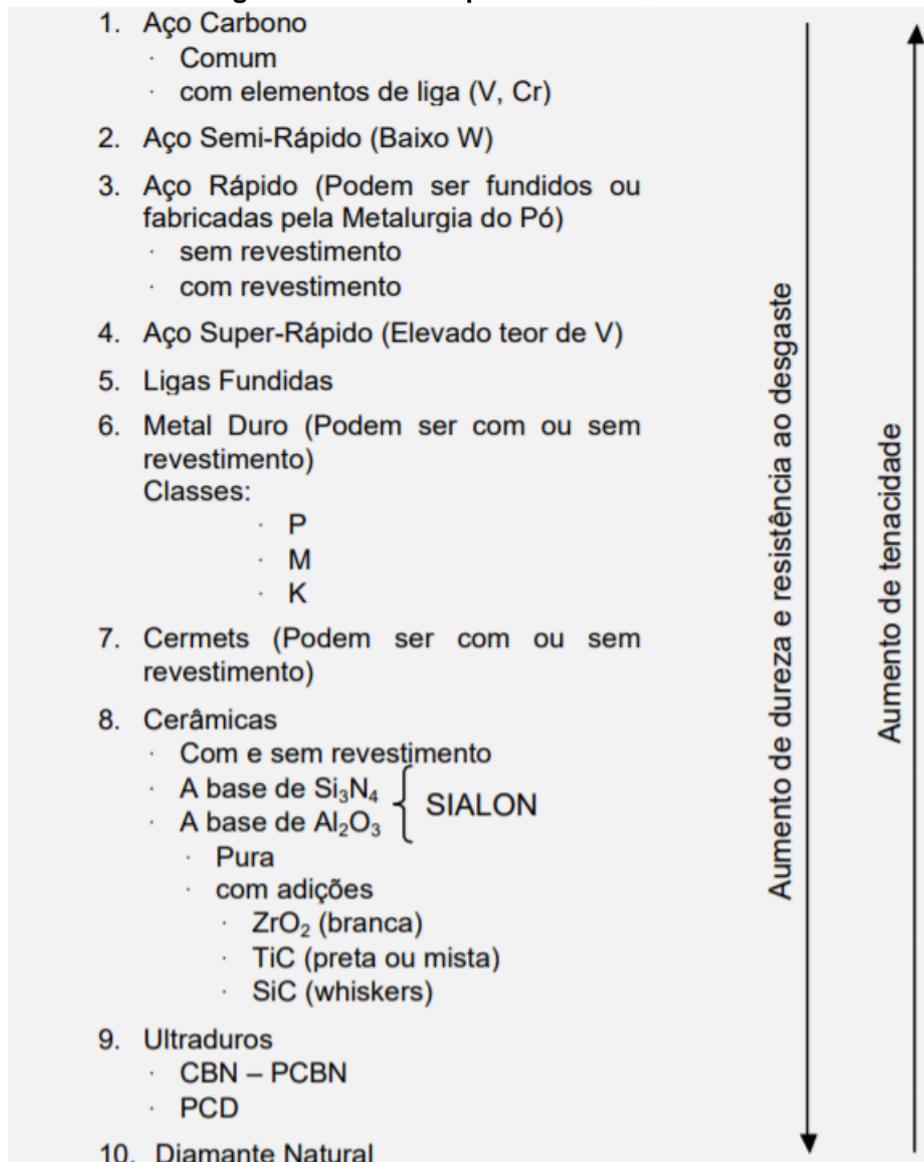
Para a definição da ferramenta a ser utilizada, leva-se em conta alguns fatores, tais como: o material a ser usinado, o processo de usinagem, a condição da máquina operatriz, a forma e a dimensão da própria ferramenta, o custo do material para a ferramenta, o emprego de refrigeração, a condição de operação entre outros (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013; FERRARESI, 2013).

Segundo Stemmer (2009), um material de ferramenta de corte deve apresentar as seguintes propriedades:

- Elevada dureza a frio bem superior à da peça usinada;
- Elevada dureza a quente;
- Tenacidade para resistir a consideráveis esforços de corte e impactos;
- Resistência a abrasão;
- Estabilidade química.

Segundo Groover (2014), Diniz, Marcondes, Coppini (2013), Ferraresi (2013), Machado (2009) os materiais não possuem uma classificação geral definida, mas pode-se classificar de acordo com as suas características químicas. A Figura 7 ilustra os materiais existentes no mercado atualmente e algumas das propriedades mecânicas desejadas no material dependente da aplicação.

Figura 7 – Materiais para Ferramenta de corte



Fonte: Adaptado de Machado (2009)

À medida que se desce na lista, aumenta-se a resistência ao desgaste (devido a maior dureza do material) e perde-se em tenacidade, e vice-versa. A ordem dos materiais apresentados obedece também à ordem cronológica do desenvolvimento desses materiais, com algumas exceções.

2.5.1 METAL DURO

O metal duro representa o segundo grande avanço nas ferramentas de corte, pois proporcionou um aumento significativo nas velocidades de corte (praticamente

10 vezes, de 35 m/min para 250 m/min à 300 m/min). Essa descoberta ocorreu na Alemanha em meados de 1920 quando Schröter conseguiu produzir em laboratório o carboneto de tungstênio (WC). A adição deste material junto com cobalto (é possível também adicionar outros materiais como níquel ou ferro, porém com resultados inferiores) possibilitou a formação desta nova classe de material (STEMMER, 1993; FERRARESI, 2013).

A combinação pura de WC-Co permitiu a usinagem de ferro fundido e materiais não metálicos com velocidades de corte superiores ao aço rápido e ligas fundidas. Entretanto, o mesmo não ocorreu na usinagem dos aços, devido a uma alta afinidade química entre o aço e o carbono do WC ocasionando uma aceleração no desgaste da pastilha, principalmente por desgaste de cratera. Para solucionar tal problema, visto que os aços são materiais de grande importância no uso geral da engenharia, verificou-se que a adição de carboneto de titânio (TiC) e carboneto de tântalo (TaC) ao WC-Co retardava significativamente a taxa de desgaste de cratera na usinagem de metais (GROOVER, 2014; MACHADO, 2009).

Segundo Machado (2009), a diminuição é possível devido aos carbonetos apresentarem em relação ao WC:

- Maiores durezas, conseqüentemente apresentam maiores resistências ao desgaste abrasivo;
- Menor solubilidade, inibindo a difusão;
- Maior estabilidade química, implicando em maiores dificuldades de dissolução e de difusão desses elementos.

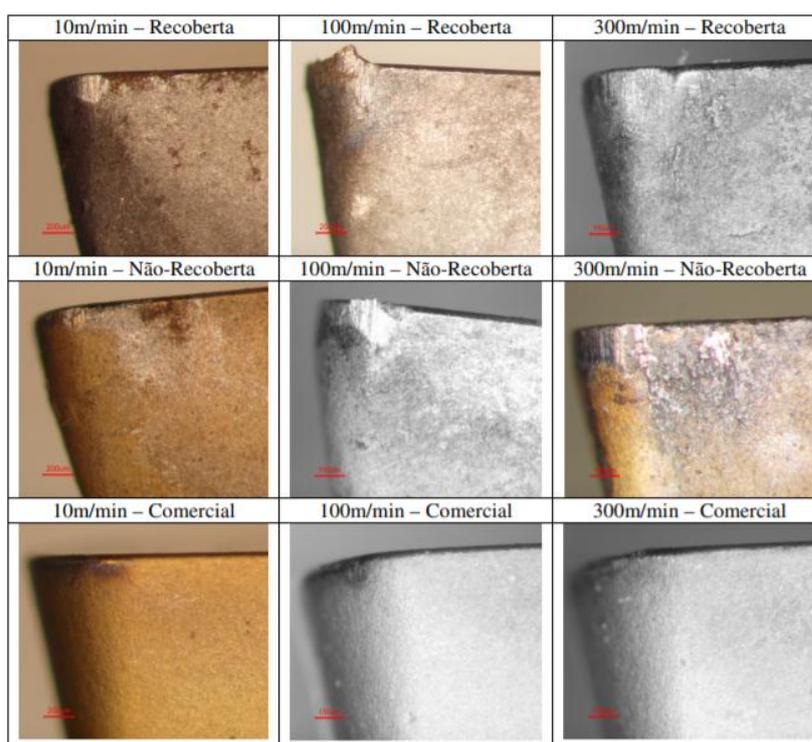
O metal duro com revestimento surgiu na década de 1970 e também representou um avanço significativo em relação a ferramentas de corte. Essa ferramenta consiste em um inserto de metal duro revestido com uma ou mais camadas finas de materiais resistentes ao desgaste. O carboneto de titânio, nitreto de titânio e/ou óxido de alumínio (Al_2O_3) são exemplos de revestimentos. Estes revestimentos permitem um aumento da vida útil da ferramenta (STEMMER 1993; MACHADO, 2009).

Esta camada de revestimento é aplicada, na maioria das vezes, através de dois processos: deposição de um vapor químico (processo CVD = *Chemical Vapor Deposition*) ou por deposição física de vapor (processo PVD = *Physical Vapor Deposition*) (STEMMER 1993).

A melhoria obtida com a aplicação de revestimento ocorre devido a diversos fatores, tais como redução do atrito e o baixo coeficiente de condutibilidade térmica da camada de revestimento, diminuição da temperatura no gume de corte.

Na pesquisa de Bezerra e Machado (2008), é possível verificar a diferença de desgaste sofrido por diferentes pastilhas sob a mesma condição de usinagem. O trabalho foi realizado com três diferentes pastilhas sendo uma sem revestimento, outra com revestimento por deposição de filmes por CVD, chamada no trabalho como comercial, e a última revestida por deposição de filmes por PVD. E cada pastilha foi utilizada na usinagem de aço SAE 1045 para três diferentes velocidades, 10m/min, 100m/min e 300m/min. A Figura 8 ilustra os resultados obtidos para as nove diferentes condições ensaiadas.

Figura 8 – Resultados obtidos no trabalho de Bezerra e Machado (2008)



Fonte: Adaptado de Bezerra e Machado (2008)

É possível visualizar qualitativamente que para as mesmas condições de usinagem as pastilhas sofreram diferentes desgastes, porém não é possível dizer quantitativamente, pois o trabalho não apresenta estes resultados.

2.6 DESGASTE DE FERRAMENTA

Os custos com ferramenta de corte representam uma pequena porção no custo de fabricação, porém quando ocorrem desgastes acelerados e avarias frequentes, ocasionam paradas de máquinas indesejadas para a sua substituição, causando um custo adicional na fabricação de peças. Com isso, é de extrema importância entender como funciona o seu desgaste a fim de ampliar a vida da aresta de corte (MACHADO, 2009).

Avaria é definida como um fenômeno que ocorre de maneira repentina e inesperada, causado pela quebra, lasca, ou trinca da aresta de corte. Quebra e lascas levam a destruição total ou parcial da aresta de corte. Já a trinca promove à abertura de uma fenda na ferramenta de corte, porém não há perda de material (MACHADO, 2009).

Segundo a norma ISO 3685 (1993), desgaste é definido como “a mudança de sua forma original durante o corte, resultante da perda gradual de material”. No desgaste a perda do material acontece de forma contínua e progressiva, diferentemente da avaria. Tal desgaste pode acontecer em proporções pequenas, às vezes em nível atômico, às vezes no nível dos grãos do material (MACHADO, 2009).

Segundo Diniz, Marcondes, Coppini (2013) os principais desgastes e avarias são:

- Desgaste de cratera: consiste numa cavidade na superfície de saída da ferramenta, formada devido ao atrito entre o deslizamento do cavaco contra essa superfície. A região do contato cavaco-ferramenta é caracterizada por altas temperaturas e tensões que contribuem para o desgaste. É possível medir o desgaste tanto pela profundidade quanto por sua área.
- Desgaste de flanco: Ocorre na superfície de folga da ferramenta. É o resultado do atrito entre a superfície que acaba de ser gerada com a superfície de flanco, adjacente à aresta de corte. O desgaste de flanco é medido pela largura média do desgaste, VB (marca de desgaste de flanco). Todo processo de usinagem causa desgaste frontal. À medida que este desgaste ocorre, a aresta de corte se retrai

e, conseqüentemente, a dimensão da peça usinada muda. É incentivado pelo aumento da velocidade de corte.

- Desgaste de entalhe: é uma condição de desgaste de flanco extrema que geralmente ocorre na aresta de corte, na posição correspondente à superfície original da peça. Esse desgaste muda a forma da ponta da ferramenta e, com isso, influencia no acabamento da superfície usinada. Ele é incentivado pelo aumento da temperatura e velocidade de corte
- Deformação plástica da aresta de corte: é uma avaria da ferramenta ocasionada pela pressão aplicada à ponta da ferramenta juntamente com à alta temperatura. Tal deformação provoca deficiência do controle do cavaco e deterioração do acabamento superficial da peça. O crescimento desta deformação pode acarretar na quebra da aresta de corte.
- Lascamento: é um tipo de avaria. É a retirada de partículas maiores de maneira súbita. Prejudicam o acabamento superficial da peça e, se continuam crescendo, provocam a quebra da ferramenta.
- Trincas: as trincas podem ser divididas em dois tipos: de origem térmica e de origem mecânica. Quando a trinca tem origem térmica, ocorre perpendicularmente à aresta de corte e quando têm origem mecânica são paralelas à aresta.
- Quebra: a continuidade dos desgastes e avarias pode causar a quebra da aresta, porém além disso a quebra pode ocorrer de forma inesperada devido aos seguintes fatores como ferramenta muito dura, carga excessiva sobre a ferramenta, raio de ponte, corte interrompido entre outros. A quebra da ferramenta pode ocasionar danos também no porta-ferramenta e na própria peça.

Uma avaria qualquer destas ou a soma de várias avarias em uma ferramenta de corte resulta em uma usinagem deficiente, provocando defeitos na peça usinada e aumenta o custo final do processo (MACHADO, 2009).

2.7 RUGOSIDADE

A condição final da superfície usinada é o resultado de diversos fatores ocorridos durante a usinagem. Tais fatores que influenciam no resultado final são: a pressão da ferramenta contra a peça, o atrito da superfície de incidência da ferramenta com a peça, o calor gerado no processo de corte, a vibração do conjunto máquina-ferramenta entre outros. Cada material, mesmo sujeito as mesmas condições de usinagem apresentam uma condição superficial diferente, com isso, definiu-se um parâmetro para avaliar tal condição, denominado rugosidade superficial. Para realizar a medição deste parâmetro utilizam-se aparelhos especiais como rugosímetro, perfilômetro, perfilógrafo entre outros (MACHADO, 2009).

Segundo Machado (2009), para cada aplicação deseja-se um acabamento superficial específico, com isso, tal fator deve ser levado em consideração na hora de realizar o projeto. Alguns fatores a serem considerados na hora de definir qual o acabamento superficial desejado são:

- Grau de acoplamento entre componentes;
- Coeficiente de atrito, desgaste e lubrificação;
- Resistência a fadiga e à corrosão;
- Aparência;
- Custo.

2.7.1 Parâmetros para a quantificação da rugosidade

Segundo Machado (2009) os parâmetros de avaliação da rugosidade são classificados como:

- Parâmetros de amplitude: determinado por alturas dos picos, profundidade dos vales ou pelos dois, sem considerar o espaçamento entre as irregularidades ao longo da superfície;
- Parâmetros de espaço: determinados pelos espaçamentos do desvio do perfil ao longo da superfície;
- Parâmetros híbridos: determinados pela combinação dos parâmetros de amplitude e de espaço.

A tabela 1 apresenta os principais parâmetros empregados na qualificação da rugosidade de acordo com a Norma ABNT NBR ISO 4287 (2002).

Tabela 1 - Parâmetros para qualificação da rugosidade

Símbolo	Nome	Definição
R_a	Desvio aritmético médio	Média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento da amostragem
R_q	Desvio médio quadrático	Raiz quadrada da média dos valores das ordens no comprimento da amostragem
R_t	Altura total do perfil	Soma da maior altura de pico do perfil e da maior profundidade de vale do perfil no comprimento da amostragem
R_z	Altura máxima do perfil	Soma da altura máxima dos picos e a maior das profundidades dos vales no comprimento de amostragem

Fonte: Adaptado de Norma ABNT NBR ISO 4287(2002)

Para realizar essa medição, a Norma ABNT NBR ISO 4287 (2002) define o l_r (comprimento da amostragem) como sendo o comprimento na direção do eixo X usado para identificar as irregularidades características do perfil sob avaliação. Já o comprimento de avaliação, l_n , é definido como o comprimento na direção do eixo X que pode conter um ou mais comprimentos de amostragem a fim de estabelecer o perfil sob avaliação.

A tabela 2 apresenta os valores de l_r e l_n de acordo com a Norma ABNT NBR ISO 4287 (2002).

Para realizar uma verificação nos resultados obtidos, um bom parâmetro de análise é o R_a , uma vez que alterações no seu valor representam alterações no processo, principalmente no desgaste da ferramenta. Trata-se de um parâmetro estável, pois representa um valor médio, que não recebe influência de efeitos excepcionais. Entretanto este parâmetro isoladamente não é totalmente eficiente, pois perfis de superfícies diferentes podem apresentar um R_a semelhante, sendo assim, importantes características não seriam avaliadas (MACHADO, 2009).

Tabela 2 – Parâmetro de amostragem

Faixa de R_a (μm)	Comprimento de amostragem l_r (mm)	Comprimento de avaliação l_n (mm)
Até 0,02	0,08	0,4
De 0,02 a 0,1	0,25	1,25
De 0,1 a 2	0,8	4
De 2 a 10	2,5	12,5
De 10 a 80	8	40

Fonte: Adaptado de Norma ABNT NBR ISO 4287 (2002)

Nos casos onde se encontra a necessidade ou deseja-se especificar a altura máxima da rugosidade, os parâmetros R_t e R_z são recomendados, pois são diretamente influenciados por qualquer defeito ou irregularidade na superfície (MACHADO, 2009).

2.7.2 Cálculo teórico da rugosidade no torneamento

O cálculo a seguir apresenta uma formulação teórica, uma vez que na realidade este valor é acrescido de outros fatores que influenciam a rugosidade de peça, como vibração e desgaste da aresta de corte (MACHADO, 2009).

- Avanço (f) é menor que o raio de ponta (r_e), tem-se:

$$R_a = \frac{f^2}{18\sqrt{3} * r_e} = \frac{f^2}{31,2 * r_e} \quad \text{Equação 4}$$

$$R_t = \frac{f^2}{8 * r_e} \quad \text{Equação 5}$$

3 MATERIAS E MÉTODOS

O presente trabalho foi realizado no Laboratório de Usinagem da UTFPR-Campus Guarapuava. Para a realização do trabalho, inicialmente definiu-se o material, a geometria da peça e a pastilha a ser utilizada.

3.1 MATERIAL UTILIZADO

Escolheu-se o aço SAE 1045 como material da peça, por ser um material de uso geral, que apresenta uma resistência mecânica superior à dos aços de baixo carbono e apresenta boa relação entre resistência à fratura e mecânica. A Figura 9 ilustra o tarugo de aço, escolhido para a realização do estudo.

Figura 9 – Tarugo de aço SAE 1020



Fonte: A autoria própria (2020)

O tarugo inicialmente possuía as dimensões de 75 mm de diâmetro por 250 mm de comprimento. Levando-se em consideração a fixação na castanha, o faceamento do tarugo e a eliminação da oxidação superficial, definiu-se as dimensões efetivas do corpo de prova, sendo elas de 70 mm x 200 mm.

Devido ao comprimento total do tarugo ser de 250mm, recomenda-se a utilização de um contra ponto na face oposta da fixação da castanha, com a finalidade de aumentar a sua fixação e de evitar problemas como descentralização e vibração. A Figura 10 mostra o corpo de prova após o preparo inicial.

Figura 10 - Corpo de prova com dimensões iniciais do estudo



Fonte: Autoria própria (2020)

Para a execução desta preparação foi utilizado uma aresta de corte que não será analisada no trabalho.

Foi realizado um teste de dureza ROCKWELL (HR) no material, a fim de determinar qual era o valor. A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos.

Tabela 3 – Dureza ROCKWELL (HR) dos corpos de prova

	1º C.P	2º C.P	3º C.P	4º C.P	5º C.P	6º C.P	7º C.P	8º C.P	9º C.P
Média	66	65	64	64	68	63	66	67	65
Desvio padrão	2,21	1,14	2,77	2,37	1,95	0,84	2,59	1,58	1,32

Fonte: Autoria própria (2020)

Foram realizadas sete medidas e descartadas a maior e a menor encontrada e realizado a média entre as cinco que restaram.

3.2 FERRAMENTA DE CORTE

Adotou-se a pastilha da marca WG Turn, catalogada como WNMG080408-UG, a mesma comumente utilizada no laboratório de usinagem da UTFPR – Campus Guarapuava para o torneamento. A pastilha adotada possui geometria hexagonal, porém somente com três arestas de corte por face. Neste caso, ambas as faces possuem arestas de corte (catalogada pela 4ª letra), totalizando seis arestas de corte por pastilha.

Cada corpo de prova foi torneado com uma aresta de corte diferente, pois as análises de desgaste do gume de corte foram realizadas no intervalo de 10 em 10 mm de usinagem.

Analisando os parâmetros recomendados pelo fabricante, ilustrados nas Figuras 11 e 12, e os objetivos do trabalho definiu-se a utilização de uma pastilha com raio de ponta 0,8 mm, uma vez que estas apresentam os menores valores para a_p e f .

Figura 11 – Parâmetros de corte da pastilha WNMG080408-UG

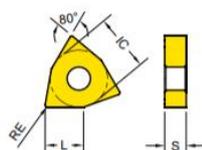


Fonte: Autoria própria (2020)

As letras catalogadas na parte de superior da imagem representam com quais materiais a pastilha pode ser utilizada. No presente caso, como o aço escolhido é o aço 1045, catalogado com a letra P.

Figura 12 - Informações de pastilhas tipo W no catálogo WG Turn

Turning Inserts - Negative

WNMG / WNMA (80° Trigonal Negative)

Series	L	IC	S
WNM□0604	5.7	9.53	4.76
WNM□0804	7.8	12.7	4.76

● : Stock item ○ : Order made item

WNMA WNMG	Designation	RE	Fn (mm/rev.)	Ap (mm)	YG1001	YG3010	YG3020	YG3030	YG801	YG211	YG213	YG214	YG100	YG10
-UG Medium Machining at stable condition	WNMG 060408 - UG	0.8	0.2~0.4	1~2.5			●		●					
	WNMG 080404 - UG	0.4	0.2~0.3	1.5~2.5	●	●	●							
	WNMG 080408 - UG	0.8	0.2~0.4	1~3.5	●	●	●		●					
	WNMG 080412 - UG	1.2	0.2~0.4	1.5~3.5	●	●	●							
-UC Cast iron and Medium roughing	WNMG 080404 - UC	0.4	0.25~0.4	0.5~3.5	●	●	●	●						
	WNMG 080408 - UC	0.8	0.25~0.45	1~4	●	●	●	●						
	WNMG 080412 - UC	1.2	0.3~0.55	1.5~4.5	●	●	●	●						
-UR Roughing	WNMG 080408 - UR	0.8	0.3~0.6	1.2~5	●	●	●	●						
	WNMG 080412 - UR	1.2	0.3~0.6	1.5~5	●	●	●	●	●					
	WNMG 080416 - UR	1.6	0.3~0.6	2~5	●	●								

Fonte: Adaptado de WG Turn

Para o mesmo formato da pastilha WMNG, existem diferentes raios de ponta e conseqüentemente diferentes parâmetros de corte. Para o presente trabalho, visando atingir os objetivos a opção de escolha foi a pastilha com raio de ponta 0,8mm.

3.3 PARÂMETROS DE CORTE

Como o estudo visa à análise do efeito da velocidade de corte no desgaste da ferramenta, os parâmetros de avanço e profundidade de corte foram fixados para todos os corpos de prova e somente a rotação foi variada. Para a execução do estudo também foi utilizado fluido de corte durante o torneamento. O fluido de corte utilizado foi SIGMA 20/78, do tipo semi-sintético comumente utilizado no laboratório de usinagem da UTFPR – Campus Guarapuava para processos de torneamento.

Os parâmetros utilizados na realização do estudo estão contidos na tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros de usinagem

	Rotação (RPM)	Avanço (mm/volta)	Profundidade (mm)
1° Corpo de prova	630	0,221	1
2° Corpo de prova	800	0,221	1
3° Corpo de prova	1000	0,221	1

Fonte: Autoria própria (2020)

Como definido na Equação 1 do presente trabalho, a velocidade de corte é diretamente proporcional a rotação da máquina. Assim, todas as velocidades estão dentro da tolerância recomendada pelo fabricante. Para a definição das velocidades, consideraram-se as rotações disponíveis no torno utilizado no trabalho. Com isso, a máxima rotação possível, sem ter que ultrapassar os limites recomendados pelo fabricante, foi de 1000 RPM.

3.4 ANÁLISE DO DESGASTE DA FERRAMENTA

Após a fabricação dos corpos de prova, avaliou-se o desgaste presente na pastilha de corte. Inicialmente as pastilhas foram lavadas utilizando um equipamento de limpeza por ultra-som, da marca Sanders a fim de limpar as impurezas aderidas na ferramenta e melhorar a visualização dos possíveis desgastes. O tempo de lavagem foi de 25 minutos em uma solução de água e sabão neutro.

A Figura 12 ilustra o equipamento utilizado para realizar a lavagem das pastilhas.

Figura 12 – Lavador Ultra-sônica Digital

Fonte: Autoria própria (2020)

Após a lavagem, as pastilhas foram analisadas no microscópio do tipo Olympus IBX 51, disponível no laboratório de Ensaios Mecânicos da UTFPR – Campus Guarapuava. O microscópio está ilustrado na figura a seguir.

Figura 13 – Microscópio Olympus IBX 51

Fonte: Autoria própria (2020)

Analisou-se o desgaste através de duas lentes com diferentes aproximações. A primeira análise ocorreu com lente de 5x aproximação, em uma

escala de 500 μm . Posteriormente, analisaram-se as arestas com uma aproximação de 10x no microscópio, em uma escala de 200 μm .

Para realizar a análise de desgaste sobre as superfícies de corte da ferramenta, utilizou-se um suporte específico para esta pastilha, desenvolvido pelo projeto de extensão 4Print da UTFPR – Campus Guarapuava por meio de uma impressora 3D.

3.5 ANÁLISE DO ACABAMENTO SUPERFICIAL

Para realizar a análise do acabamento superficial dos corpos de prova, utilizou-se o rugosímetro Mitutoyo SJ-410, disponível no laboratório de Metrologia da UTFPR – Campus Guarapuava, ilustrado na Figura 14.

Figura 14 – Rugosímetro Mitutoyo SJ-410

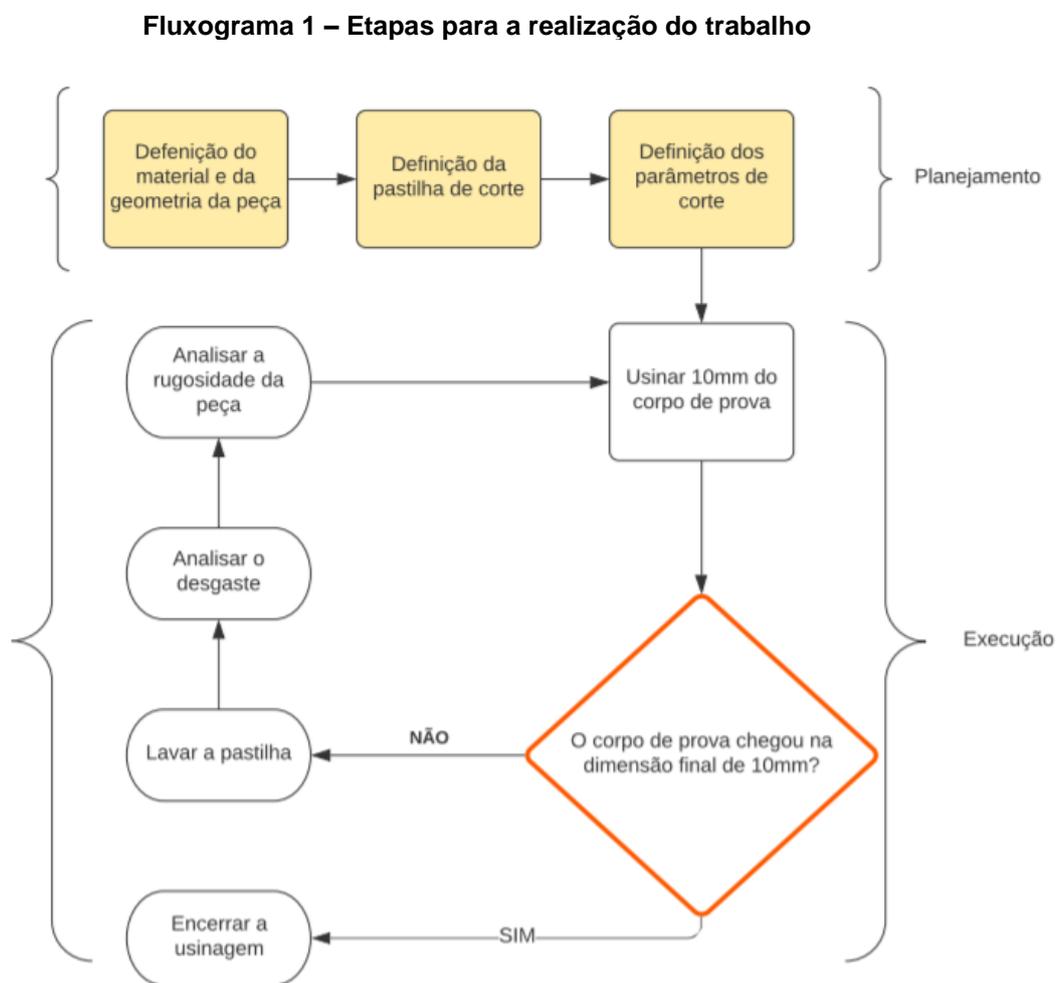


Fonte: Aatoria própria (2020)

As análises de rugosidade foram realizadas a cada 10 mm de usinagem de cada corpo de prova. Em cada situação, foram realizadas cinco medidas e realizado a média entre elas.

3.6 FLUXOGRAFA DE TRABALHO

O fluxograma a seguir ilustra como foi à metodologia aplicada no trabalho.



Fonte: Autoria própria (2020)

Os três primeiros processos são de planejamento e os demais são de execução. Os processos de execução foram realizados seis vezes, para cada corpo de prova, até o corpo de prova atingir o diâmetro final de 10mm.

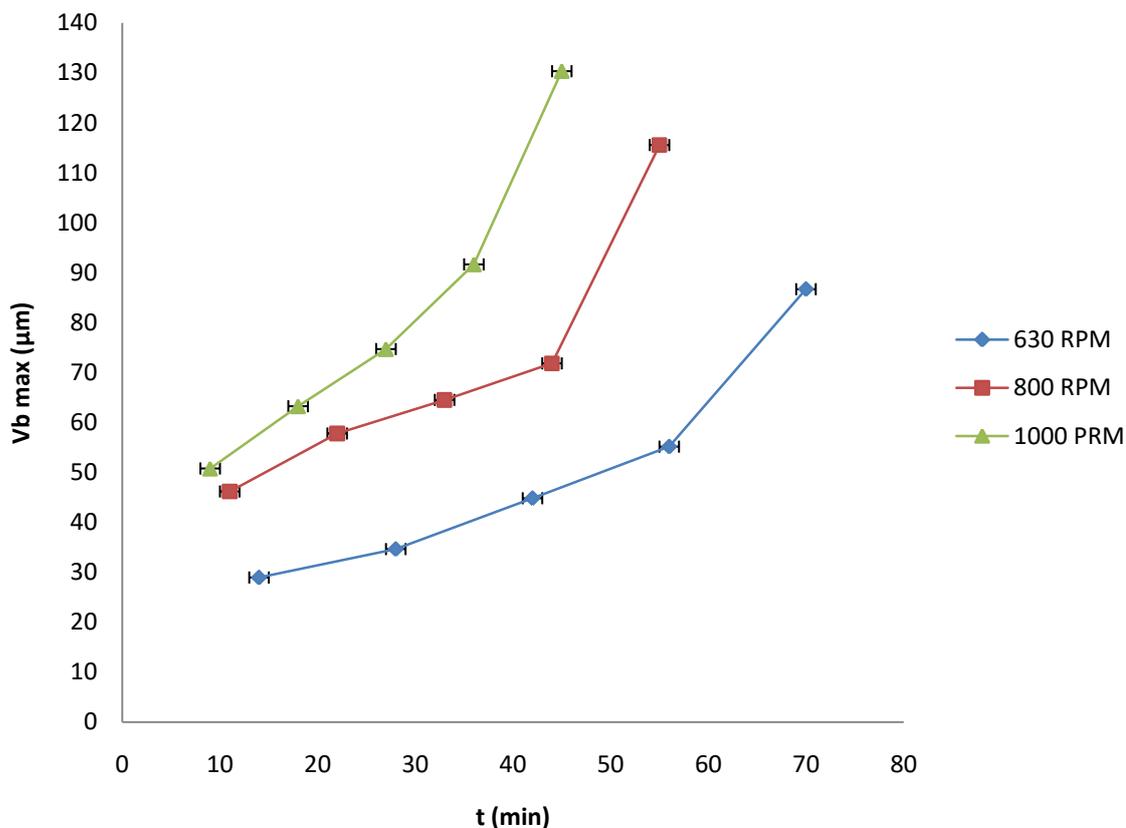
4 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentadas as análises de desgaste de flanco máximo ($V_{b\ Max}$), desgaste de cratera e as rugosidades médias de cada peça em relação às rotações do eixo árvore.

4.1 RESULTADO DE $V_{b\ Max}$ X TEMPO DE USINAGEM

O Gráfico 1, ilustrado a seguir, aponta os resultados obtidos na análise do desgaste da pastilha. Os valores apresentados no gráfico são as médias aritméticas das medidas obtidas na análise da pastilha no microscópio.

Gráfico 1 - $V_{b\ max}$ x t

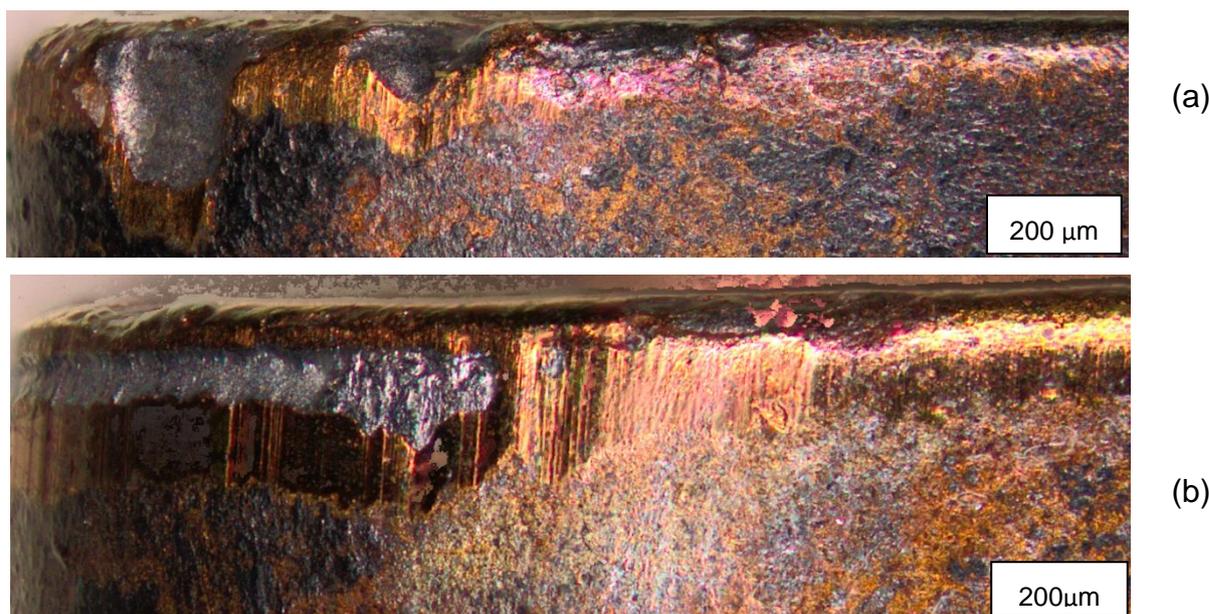


Fonte: Autoria própria (2020)

Analisando o gráfico é possível verificar que para todas as rotações o desgaste apresenta uma tendência exponencial ao desgaste. Segundo Diniz, pastilhas de metal duro revestidas apresentam essa característica uma vez que durante a usinagem o revestimento é desgastado até um ponto onde o substrato da ferramenta começa a realizar o corte. Neste momento, como a resistência do substrato é menor que o do revestimento, a pastilha começa a apresentar desgastes acelerados.

O último valor apresentado no gráfico para a rotação de 800 RPM, aproximadamente $114\mu\text{m}$, apresenta um alto desvio padrão devido ao fato que um dos corpos de prova apresentou lascamento na aresta de corte. A Figura 16 compara a aresta de corte de dois corpos de prova após a usinagem de 50 mm a uma rotação de 800 RPM.

Figura 15 – (a) aresta de corte principal com lascamento; (b) aresta de corte principal com desgaste contínuo.



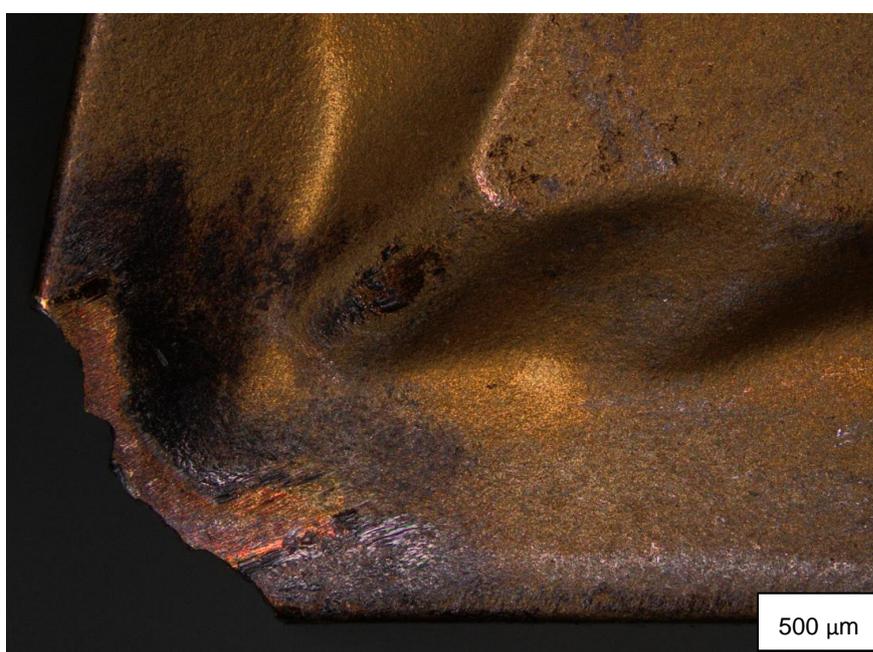
Fonte: Autoria Própria (2020)

Outra informação que é possível obter ao analisar o gráfico é que quanto maior a rotação, maior o desgaste apresentado. Ou seja, isso mostra que a velocidade de corte, neste caso apresentada pela variação da rotação do eixo árvore, influenciou no desgaste sofrido pela pastilha de corte. O presente resultado

vai de acordo com a literatura, que diz que a velocidade de corte tem influência no desgaste da ferramenta.

O último valor apresentado na rotação de 1000 RPM, aproximadamente 130 μm , não apresenta desvio padrão, pois durante a usinagem do 2º corpo de prova entre a 4º e a 5º análise a pastilha lascou, impossibilitando o término da usinagem tanto do 2º corpo de prova quanto ao 3º. A Figura 16 ilustra o estado final da pastilha.

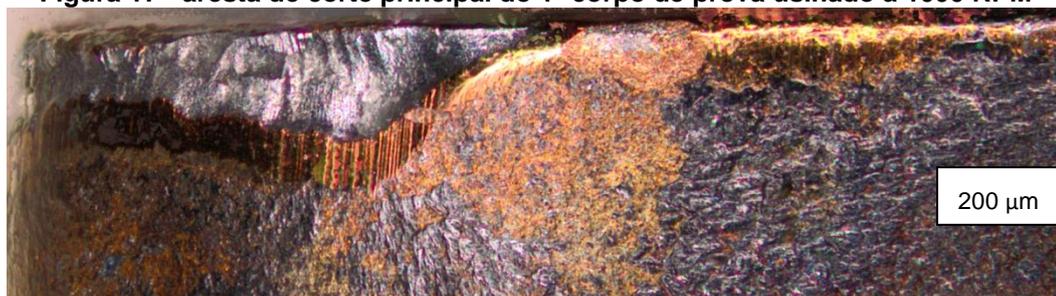
Figura 16 – Pastilha lascada durante a usinagem



Fonte: Aatoria própria (2020)

A Figura 17 ilustra a situação final da aresta de corte principal utilizada no 1º corpo de prova a uma rotação de 1000 RPM.

Figura 17 - aresta de corte principal do 1º corpo de prova usinado a 1000 RPM



Fonte: Aatoria própria (2020)

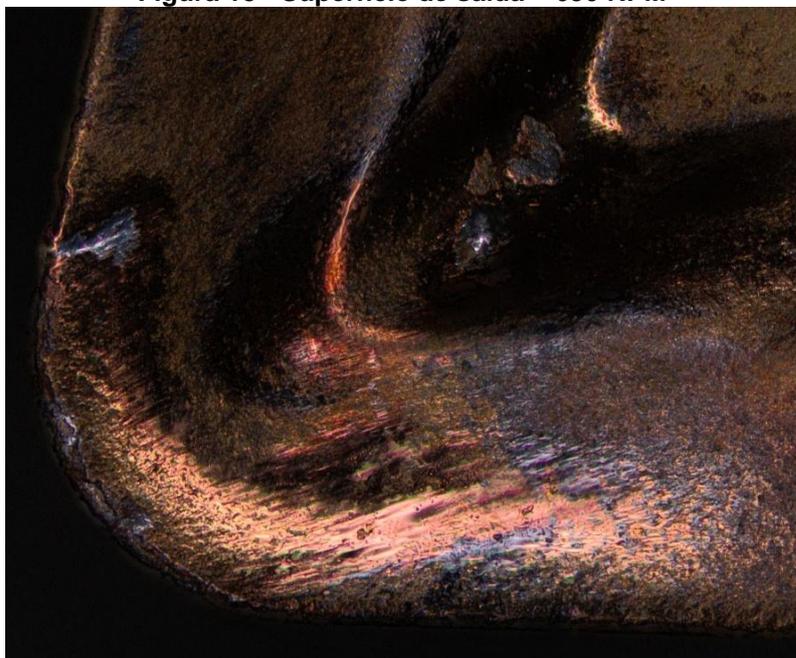
Analisando a imagem é possível verificar o desgaste contínuo sofrido pela aresta de corte durante o processo de usinagem.

4.2 DESGASTE DE CRATERA

As análises do desgaste serão feitas qualitativamente devido não ser possível medir a profundidade das crateras apresentadas.

As Figuras 18, 19 e 20 ilustram a situação final da superfície de saída de um dos corpos de prova usinados a 630RPM, 800RP, e 1000 RPM respectivamente.

Figura 18 - Superfície de saída – 630 RPM

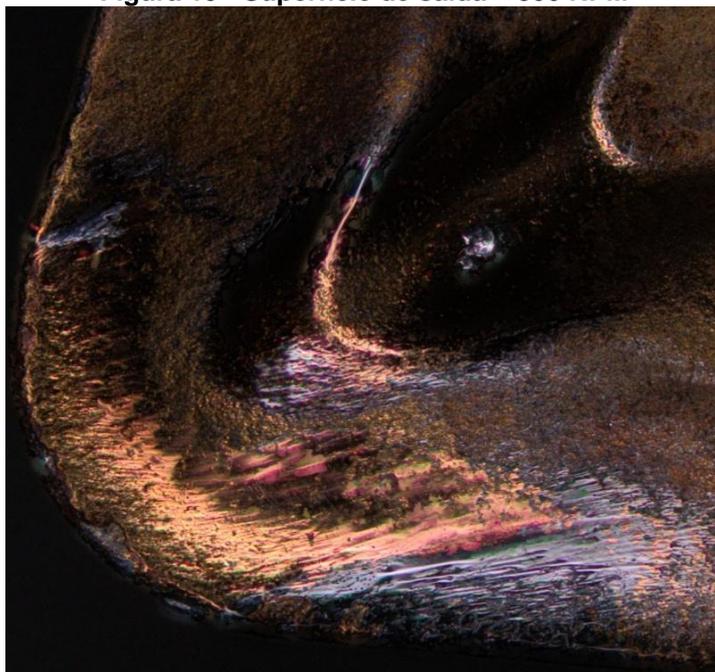


Fonte: A autoria própria (2020)

Analisando a figura acima é possível verificar que existe um desgaste no revestimento, ocasionado pelo atrito entre o cavaco e a pastilha e na ponta do quebra cavaco existe um desgaste mais severo, pois é a região onde ocorre o rompimento do cavaco, ou seja, a força de atrito nessa região é demasiadamente maior do que quando comparada com outras áreas da pastilha de corte.

Na figura 19, o desgaste apresentado é semelhante ao sofrido no torneamento a 630 RPM, porém neste caso é possível verificar marcas mais profundas (severas) no revestimento. Esse aumento deve-se ao aumento da temperatura na região devido ao aumento da velocidade de corte.

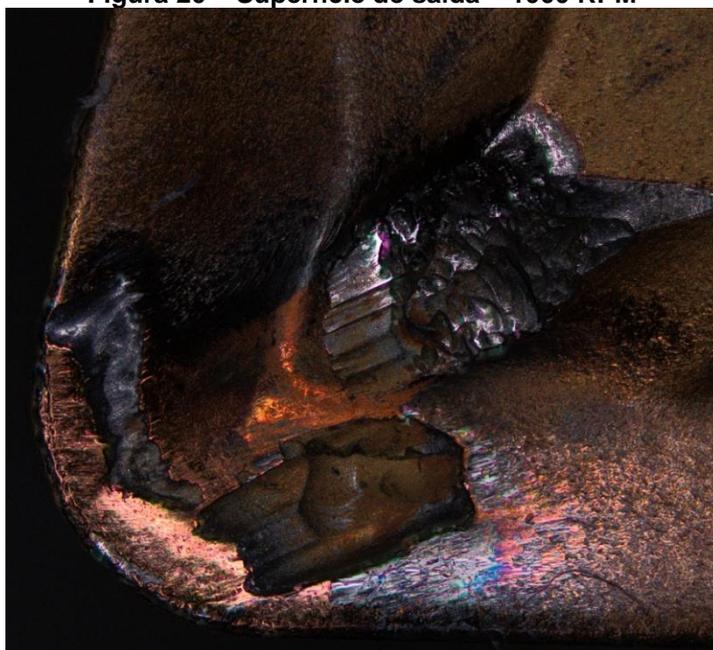
Figura 19 - Superfície de saída – 800 RPM



Fonte: Autoria própria

A figura 20, é referente a partilha utilizada no torneamento a 1000RPM. É possível verificar a formação de crateras e o desgaste na região da quebra cavaco da ferramenta.

Figura 20 – Superfície de saída – 1000 RPM



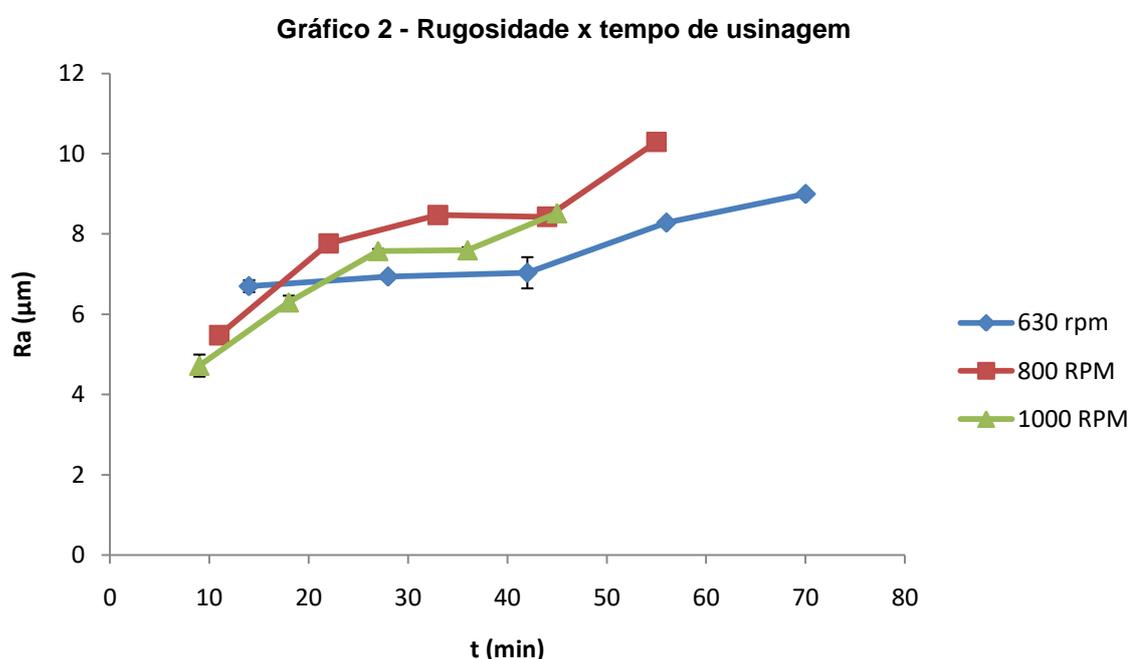
Fonte: Autoria própria (2020)

Com isso, pode-se dizer que o aumento da velocidade proporciona um aumento no desgaste na superfície de saída de ferramenta, devido ao aumento da

temperatura e das tensões superficiais sofridas nesta região, em razão do atrito introduzido pelo cavaco resultante do processo de torneamento.

4.3 RESULTADO DE RUGOSIDADE X TEMPO DE USINAGEM

O gráfico a seguir mostra os resultados obtidos na análise da rugosidade superficial da peça. Os valores apresentados no gráfico são as médias aritméticas das medidas obtidas na análise da peça no rugosímetro.



Fonte: Autoria própria (2020)

Analisando o gráfico é possível verificar que no início do corte, para as menores velocidades, o acabamento superficial é prejudicado. Segundo Machado (2009), isto ocorre devido ao fato que em velocidades mais baixas, pode ocorrer a formação de aresta postiça de corte (APC) durante o processo e quando este material sofre cisalhamento o mesmo pode aderir a superfície da peça em usinagem.

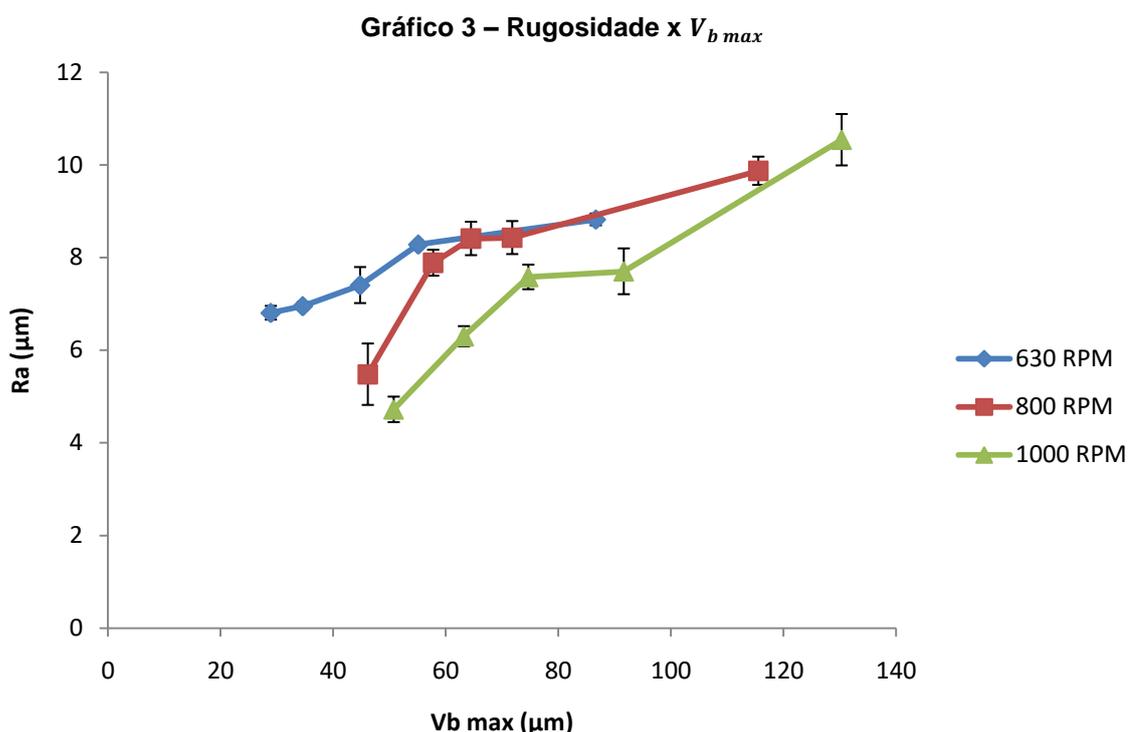
O resultado encontrado no presente trabalho vai de encontro com o resultado obtido por Bezzera (2009) e Machado (2009), que diz “o comportamento da condição de ferramenta comercial está dentro do esperado tanto pela experiência

nos ensaios quanto pela bibliografia pesquisada, pois as velocidades mais baixas apresentaram um acabamento superficial mais grosseiro.”

Outro resultado que pode ser analisado do gráfico é que para todas as rotações, o aumento do desgaste da ferramenta impactou negativamente no acabamento superficial da peça. Ou seja, quanto maior o desgaste da pastilha, pior o acabamento superficial. Essa relação independe da velocidade, visto que ocorreu para todos os casos e não necessariamente a pior rugosidade será obtida da análise da peça usinada com maior velocidade.

4.4 RESULTADO DE RUGOSIDADE X $V_{b \text{ Max}}$

O gráfico 3 a seguir apresenta os valores da rugosidade em relação ao desgaste da ferramenta.



Este gráfico, juntamente com o gráfico 2, nos mostra que o desgaste da pastilha possui influência no acabamento superficial da peça. Para cada rotação, o maior valor encontrado para a rugosidade coincide com o maior valor do desgaste da ferramenta.

Outro resultado obtido da análise do gráfico é que a rugosidade apresenta uma tendência de aumentar à medida que se aumenta a o desgaste da aresta, visto que a maior rugosidade obtida foi para o maior desgaste, obtido na rotação de 1000 RPM. O 2º maior valor da rugosidade também coincidiu com o 2º maior valor do desgaste e analisando o gráfico percebe-se que existe está tendência.

Tal resultado também foi obtido por Amorin (2002), que obteve uma tendência de relação exponencial entre $V_{b\ max}$ e Ra.

É importante salientar que não foram levados em consideração fatores como fixação e vibração do conjunto peça-máquina para a obtenção dos resultados, pois segundo Stemmer (1993) são fatores que depende da máquina e possuem influencias no desgaste da ferramenta e no acabamento superficial da peça. Problemas de vibração podem ocorrer devido a diversos fatores tais como folga nos mancais, engrenagens e polias desbalanceadas, rigidez deficiente do eixo árvore principal e etc. Como tais fatores não eram o foco do trabalho, eles não foram levados em consideração.

5 CONCLUSÃO

Conclui-se através dos resultados obtidos neste estudo que:

- Quanto maior a rotação do eixo árvore, maior o desgaste de flanco da pastilha.
- A pastilha tende a sofrer um desgaste exponencial à medida que é utilizada, devido à perda do revestimento.
- Quanto maior a rotação do eixo árvore, maior o desgaste de cratera da pastilha.
- Há uma relação diretamente proporcional entre V_b e rugosidade, independente da rotação do eixo árvore.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Recomendam-se como trabalhos futuros na mesma linha de pesquisa as seguintes propostas:

- Avaliar a influência o uso do fluido de corte no estudo, a fim de observar o aumento do desgaste da ferramenta nas mesmas velocidades do trabalho, porém sem a utilização do fluido de corte.
- Variar os parâmetros de avanço de corte e profundidade para ver qual a influência dos mesmos no desgaste da ferramenta.
- Aplicar em diferentes materiais para a peça e ferramenta a fim de comparar a usinabilidade dos materiais.
- Aplicar o trabalho proposto em outros processos de fabricação por usinagem (fresamento e furação).
- Aplicar o trabalho proposto em um processo CNC.

7 REFERÊNCIAS

BEZERRA, D. C.; MACHADO, I. F. **ESTUDO DA USINABILIDADE DE AÇO AISI 1045 APÓS DIFERENTES TRATAMENTOS TÉRMICOS**. Poli, USP, 2008.

CALLISTER JR., W. D.; RETHWISCH, D. G. **CIÊNCIA E ENGENHARIA DOS MATERIAIS**. Rio de Janeiro: Grupo Editora Nacional, 2016.

COPPINI, N. L.; BAPTISTA, E. A. **ALTERNATIVAS DE OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CORTE PARA CENÁRIOS DE FABRICAÇÃO EM USINAGEM**. Encontro Nacional de Engenharia e Produção - ENEGEP, Niteroi – RJ.

DA SILVA, R. A.; NETO, A. F. **ESTUDO DA MICROESTRUTURA DO AÇO SAE 1045 PARA A MELHORIA DA USINABILIDADE: UMA PROPOSTA PARA A GESTÃO DOS PROCESSOS DE USINAGEM**. The 4th International Congress University Industry Cooperation, Taubate- SP, 7 dez. 2012

DA SILVA, S. D. **PROCESSOS DE PROGRAMAÇÃO, PREPARAÇÃO E OPERAÇÃO DE TORNO CNC**. SÃO PAULO: ÉRICA, 2015.

DE ALMEIDA, P. S. **PROCESSOS DE USINAGEM UTILIZAÇÃO E APLICAÇÕES DAS PRINCIPAIS MÁQUINAS OPERATRIZES**. SÃO PAULO: ÉRICA, 2015.

DE AMORIN, H. J. S. In: DE AMORIN, Heraldo José. **ESTUDO DA RELAÇÃO ENTRE VELOCIDADE DE CORTE, DESGASTE DE FERRAMENTA, RUGOSIDADE E FORÇAS DE USINAGEM EM TORNEAMENTO COM FERRAMENTA DE METAL DURO**. Orientador: Augusto Oscar Kunrath Neto. 2002. TESE (Pós graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **TECNOLOGIA DA USINAGEM DOS MATERIAIS**. SÃO PAULO: Artliber, 2013.

GROOVER, M. P. **INTRODUÇÃO AOS PROCESSOS DE FABRICAÇÃO**. Rio de Janeiro: Grupo Editora Nacional, 2014.

MACHADO, A. R. **TEORIA DA USINAGEM DOS MATERIAIS**. SÃO PAULO: Editora Edgar Blücher Ltda., 2009.

MEDEIROS, I. *et al.* **ESTUDO DA INTERFERÊNCIA DO RAIOS DE PONTA DA FERRAMENTA SOBRE A RUGOSIDADE SUPERFICIAL EM UM PROCESSO DE TORNEAMENTO**. Enciclopédia Biosfera, [s.l.], v. 15, n. 28, p.1472-1484, 3 dez. 2018. Centro Científico Conhecer. http://dx.doi.org/10.18677/encibio_2018b114.

SHAW, M. C. **METAL CUTTING PRINCIPLES**. 2. ed. NEW YORK: OXFORD UNIVERSITY PRESS, 2005.

STEMMER, C. E. **FERRAMENTAS DE CORTE I**. 3. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1993.

TRENT, E. M. **METAL CUTTING**. 2. ed. [S. l.]: Butterworths & Co (Publishers) Ltda., 1984.

WG TURN: **ISO Turning**. Disponível em: [http://www.yg1.co.kr/finder/iso_turning/\[YE-TU19\]%20Turning%20Insert.pdf](http://www.yg1.co.kr/finder/iso_turning/[YE-TU19]%20Turning%20Insert.pdf) . Acesso em: 3 dez. 2019.