



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
Campus Macaé – Professor Aloísio Teixeira

Douglas Gelsomino Azeredo

ESTUDO EXPERIMENTAL DAS CONDIÇÕES ECONÔMICAS DE USINAGEM DO
AÇO CARBONO 1045 NO TORNEAMENTO CILÍNDRICO EXTERNO UTILIZANDO
FERRAMENTA DE CORTE DE AÇO RÁPIDO

Macaé
2023

Douglas Gelsomino Azeredo

ESTUDO EXPERIMENTAL DAS CONDIÇÕES ECONÔMICAS DE USINAGEM DO
AÇO CARBONO 1045 NO TORNEAMENTO CILÍNDRICO EXTERNO UTILIZANDO
FERRAMENTA DE CORTE DE AÇO RÁPIDO

Trabalho de conclusão do Curso de Engenharia
Mecânica da Universidade Federal do Rio de
Janeiro – Campus Macaé, sobre as condições
econômicas de usinagem no torneamento
cilíndrico externo

Orientador: Profª Tabatta Martins

Macaé
2023

CIP - Catalogação na Publicação

D287

Azeredo, Douglas Gelsomino

Estudo experimental das condições econômicas de usinagem do aço carbono 1045 no torneamento cilíndrico externo utilizando ferramenta de corte de aço rápido / Douglas Gelsomino Azeredo - Macaé, 2023.
59 f.

Orientador(a): Tabatta Regina de Brito Martins.

Trabalho de conclusão de curso (graduação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Politécnico, Bacharel em Engenharia Mecânica, 2023.

1. Usinagem. 2. Aço carbono. 3. Torneamento. 4. Engenharia mecânica.
I. Martins, Tabatta Regina de Brito, orient. II.Título.

CDD 624

Douglas Gelsomino Azeredo

ESTUDO EXPERIMENTAL DAS CONDIÇÕES ECONÔMICAS DE USINAGEM DO
AÇO CARBONO 1045 NO TORNEAMENTO CILÍNDRICO EXTERNO UTILIZANDO
FERRAMENTA DE CORTE DE AÇO RÁPIDO

Trabalho de conclusão do Curso de Engenharia
Mecânica da Universidade Federal do Rio de
Janeiro – Campus Macaé, sobre as condições
econômicas de usinagem no torneamento
cilíndrico externo

Macaé, 11 de julho de 2023.

Prof^a. Tabatta Regina de Brito Martins
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Prof^o. João Carlos Sant'Anna da Silva
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Prof^o. Marcelo Costa Cardoso
Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Este trabalho é dedicado ao meu irmão Diego e aos meus pais Jovino e Cláudia que sempre me apoiaram em todas as etapas da minha vida acadêmica e pessoal. Sem o amor, a paciência e o incentivo de vocês, eu não teria chegado até aqui. Agradeço por serem os meus maiores exemplos de perseverança, dedicação e dedicação. Todo o meu sucesso é o resultado do amor e da educação que vocês me deram. Espero que este trabalho seja uma forma de honrar a dedicação e o esforço que vocês investiram em mim. Amo vocês.

AGRADECIMENTOS

É com grande satisfação que expresso minha gratidão por esta oportunidade de apresentar meu trabalho de conclusão de curso. Gostaria de agradecer a cada um de vocês por dedicar seu tempo e energia para avaliar este projeto e me ajudar a melhorá-lo.

Primeiramente, gostaria de expressar meu sincero agradecimento à minha orientadora, Prof^a Tabatta Regina de Brito Martins, pelo seu constante apoio e orientação durante todo o processo de elaboração do TCC. Suas valiosas sugestões e feedbacks foram cruciais para o sucesso deste trabalho.

Gostaria também de agradecer à minha família e amigos por todo o seu encorajamento e apoio ao longo da minha jornada acadêmica. Sem vocês, eu não teria conseguido chegar até aqui.

Agradeço também à Universidade Federal do Rio de Janeiro pelo ambiente de aprendizado estimulante e por fornecer os recursos necessários para a conclusão deste trabalho.

Por fim, gostaria de agradecer novamente a todos os membros da banca examinadora por seu tempo e dedicação em avaliar este projeto. Seus comentários e sugestões serão inestimáveis para o meu crescimento acadêmico e profissional

"A usinagem é a arte de dar forma ao metal através do corte, uma arte que combina precisão e conhecimento" - Richard P. Lindsay.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo investigar as condições econômicas da usinagem do aço 1045 por meio da análise experimental do desgaste de uma ferramenta de corte durante o processo de torneamento cilíndrico externo. Será realizada uma revisão dos tipos de desgaste de ferramentas de corte e os principais materiais utilizados com o objetivo de definir os critérios que determinam o fim de vida da ferramenta, e será observado experimentalmente quais desses critérios são alcançados primeiro. Após a identificação do critério que indica o fim da vida útil da ferramenta, será possível determinar a função do tempo de vida da ferramenta em relação à velocidade de corte, além de estabelecer as condições ideais para o processo de fabricação, através do Intervalo de Máxima Eficiência para o par ferramenta-peça em estudo. A metodologia do experimento consiste na usinagem do aço 1045 com uma ferramenta de corte de aço rápido com 10% de cobalto em diferentes velocidades de corte até a necessidade de reafiação da ferramenta. Dessa forma, encontrar os parâmetros da equação de Taylor e definir as condições econômicas de usinagem. Os resultados encontrados mostram que uma variação pequena na velocidade de corte acarretou em uma variação grande no tempo de vida da ferramenta e que os pontos utilizados durante o experimento estavam fora do Intervalo de Máximo de Eficiência.

Palavras-chave: Processo de Fabricação por Usinagem; Torneamento Cilíndrico; Desgaste de ferramenta de corte; Vida da ferramenta de corte, Intervalo de Máxima Eficiência;

ABSTRACT

This work aims to investigate the economic conditions of the machining of 1010 steel through the experimental analysis of the wear of a cutting tool during the external cylindrical turning process. A review of the types of wear of cutting tools and the main materials used will be carried out in order to define the criteria that determine the end of life of the tool, and it will be observed experimentally which of these criteria are reached first. Once the end-of-life criterion has been identified, it will be possible to determine the function of the tool life in relation to the cutting speed and to establish the optimal conditions for the manufacturing process through the Maximum Efficiency Interval for the tool-piece pair under study. The methodology of the experiment consisted of machining a 1045 steel cylindrical bar with a fast steel cutting tool with 10% cobalt at different cutting speeds up to the need for re-sharpening of the tool. Thus, find the parameters of Taylor's equation and define the economic conditions of machining. The results found show that a small variation in cutting speed led to a large variation in tool life and that the points used during the experiment were outside the Maximum Efficiency Range.

Keywords: Machining Manufacturing Process; Cylindrical turning; Cutting tool wear; Life of cutting tool, Maximum Efficiency Range.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação dos processos de usinagem	16
Figura 2 - Alguns processos de torneamento: cilíndrico externo; cônico externo; curvilíneo; cilíndrico interno; cônico interno; sangramento radial	17
Figura 3 - Direção dos movimentos ativos no torneamento.....	18
Figura 4 - Diagrama de dureza-tenacidade dos materiais de ferramentas de corte	20
Figura 5 - Aumento das velocidades de corte ao longo dos anos por tipo de material	21
Figura 6 - Algumas aplicações dos aços-rápidos	22
Figura 7 - Alguns exemplos de pastilhas de metal duro	23
Figura 8 - Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte	25
Figura 9 - Parâmetros utilizados para medir os desgastes das ferramentas de corte	26
Figura 10 - Comportamento do desgaste de uma ferramenta de corte com o tempo de corte	27
Figura 11 - Curvas de desgaste em função do tempo de usinagem, para diferentes velocidades de corte, em determinadas condições de usinagem	29
Figura 12 - Curva de vida da ferramenta para o desgaste $V_b = 0,8\text{mm}$, obtida através das curvas de desgaste	29
Figura 13 - Desgaste V_b da ferramenta em função da velocidade de corte para um tempo de usinagem de 60 min	30
Figura 14 - Representação em escalas logarítmicas da curva de vida da ferramenta	31
Figura 15 - Comportamento das variáveis de tempo de fabricação por peça com a velocidade de corte	36
Figura 16 - Comportamento das componentes de custo com a velocidade de corte	40
Figura 17 - Determinação do intervalo de máxima eficiência	42
Figura 18 - Torno mecânico Romi modelo S-20A	43
Figura 19 - Barra cilíndrica de aço SAE 1045	44
Figura 20 - Bit de aço rápido (grupo M) 10% de cobalto fabricante Ades Ferramentas	45
Figura 21 - Microscópio digital USB	46
Figura 22 - Aresta de corte da ferramenta de aço rápido após 1º ensaio	49
Figura 23 - Aresta de corte da ferramenta após a quebra da lasca no 2º ensaio	50
Figura 24 - Cavaco antes e depois da quebra da ferramenta	50
Figura 25 - Curva de vida da ferramenta de aço rápido até sua reafiação	53
Figura 26 - Curva de vida da ferramenta de metal duro para o desgaste ($KT = 0,132\text{ mm}$)....	53
Figura 27 - Intervalo de máxima eficiência.....	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais características dos aços-rápidos e suas relações com os elementos de liga presentes	22
Tabela 2 - Classificação dos metais duros	24
Tabela 3 - Composição química do aço SAE 1045	44
Tabela 4 - Propriedades mecânicas do aço SAE 1045	44
Tabela 5 - Composição química do bit de aço rápido (grupo M) 10% de cobalto fabricante Ades Ferramentas	45
Tabela 6 - Dados utilizados no 1º ensaio	47
Tabela 7 - Dados utilizados no 2º ensaio	48
Tabela 8 - Dados obtidos no 1º ensaio	48
Tabela 9 - Velocidade de corte para torneamento	49
Tabela 10 - Dados obtidos no 2º ensaio	50
Tabela 11 - Aproximação do 2º ensaio para as duas barras utilizadas	51
Tabela 12 - Parâmetros y e C da equação de Taylor	51
Tabela 13 - Parâmetro y médio para usinagem de aço com aço rápido	52
Tabela 14 - Parâmetros x e K da equação de Taylor	52

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA	14
1.2	OBJETIVOS.....	15
1.2.1	Objetivo geral	15
1.2.2	Objetivos específicos.....	15
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	USINAGEM.....	15
2.1.1	Torneamento.....	17
2.1.2	Movimentos na usinagem	17
2.1.3	Velocidade de corte.....	19
2.1.4	Velocidade de avanço	19
2.2	MATERIAIS PARA FERRAMENTA	19
2.2.1	Aço-Rápido	21
2.2.2	Metal duro	23
2.3	DESGASTE DA FERRAMENTA.....	24
2.3.1	Tipos de desgaste	25
2.3.2	Parâmetros de medição dos desgastes.....	26
2.3.3	Crítérios de fim de vida da ferramenta	27
2.4	VIDA DA FERRAMENTA.....	28
2.4.1	Curva de vida da ferramenta	28
2.4.2	Equação de Taylor.....	30
2.5	CONDIÇÕES ECONÔMICAS DE CORTE	32
2.5.1	Ciclos e Tempos de Usinagem	32
2.5.2	Velocidade de corte de máxima produção	35
2.5.3	Velocidade econômica de corte	37
2.5.4	Intervalo de máxima eficiência	41
3	MATERIAIS e MÉTODOS	42

3.1	DADOS DO EXPERIMENTO.....	43
3.2	REALIZAÇÃO DO 1º ENSAIO	47
3.3	REALIZAÇÃO DO 2º ENSAIO	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	48
4.1	DADOS ENCONTRADOS NO 1º ENSAIO	48
4.2	DADOS ENCONTRADOS NO 2º ENSAIO	49
4.3	CURVA DE VIDA DA FERRAMENTA	51
4.4	VELOCIDADE DE CORTE DE MÁXIMA PRODUÇÃO.....	54
4.5	VELOCIDADE ECONÔMICA DE CORTE	54
4.6	INTERVALO DE MÁXIMA EFICIÊNCIA	55
5	CONCLUSÕES	56
6	TRABALHOS FUTUROS	56
	REFERÊNCIAS.....	58

1 INTRODUÇÃO

A usinagem é um processo de remoção de material que ao conferir à peça a forma, as dimensões, o acabamento, ou ainda a combinação qualquer destes itens, produz cavaco. E por cavaco entende-se a porção de material da peça de forma geométrica irregular retirada pela ferramenta de corte. Esse processo evoluiu muito ao longo da história, sendo influenciada por diversos fatores, como o desenvolvimento de novos materiais e a evolução das máquinas-ferramenta (SOUZA, 2011).

Segundo MC Shaw e RC Dewes (2016), em seu livro "Machining Technology: Machine Tools and Operations", a usinagem começou a ser utilizada de forma rudimentar na antiguidade, com a utilização de ferramentas manuais, como a pedra lascada. Com o tempo, as ferramentas foram sendo aprimoradas, com o uso de metais mais resistentes e o desenvolvimento de novas técnicas de trabalho.

No século XVIII, vieram as primeiras máquinas-ferramenta, que permitiram a produção em larga escala de peças com maior precisão. Segundo Eric S. Hinshaw (2018), em seu livro "Machining Fundamentals", uma das primeiras máquinas-ferramenta foi o torno mecânico, desenvolvido pelo inglês Henry Maudslay. Com ele, era possível produzir peças cilíndricas com grande precisão, tornando-se um equipamento essencial para a indústria.

Devido à grande importância do torneamento cilíndrico para a indústria da usinagem, estudar e entender os processos de desgaste das ferramentas de corte é essencial, pois permitem ações coerentes e efetivas para reduzir a taxa deste desgaste, prolongando a vida da aresta de corte. Caso contrário, as ferramentas de corte podem sofrer desgastes acelerados tornando frequente necessidade de parada da máquina para a troca destas, e isto significa custos adicionais e perda de produtividade (MACHADO E SILVA, 2004).

Existem muitos estudos que relacionam o desgaste dos insertos e a velocidade de corte no torneamento. Um estudo que pode ser referenciado é o de Deng e Chen (2017), que investigaram a influência da velocidade de corte na vida útil do inserto em torneamento de aço inoxidável AISI 316L.

Os autores descobriram que o aumento da velocidade de corte resultou em um aumento do desgaste do flanco do inserto. Além disso, eles observaram que o aumento da velocidade de corte também levou a uma diminuição da rugosidade da superfície usinada (DENG E CHEN, 2017).

Outro estudo relevante é o de Wang et al. (2020), que analisaram a influência da velocidade de corte na vida útil do inserto em torneamento de liga de alavanca Ti-6Al-4V. Eles

descobriram que o aumento da velocidade de corte resultou em um aumento do desgaste do flanco e da cratera do inserto.

Esses estudos sugerem que a velocidade de corte é um fator importante na vida útil do inserto de corte, e que um aumento na velocidade de corte pode levar a um aumento no desgaste do inserto. Portanto, é necessário encontrar um equilíbrio entre a velocidade de corte e a vida útil do inserto para maximizar a eficiência do processo de usinagem (DENG E CHEN, 2017; WANG ET AL, 2020).

O intervalo de máxima eficiência (IME) na usinagem é o intervalo de velocidades de corte em que se obtém a melhor combinação entre a taxa de remoção de material e a vida útil da ferramenta de corte. Isso significa que nesse intervalo, a ferramenta de corte apresenta uma boa resistência ao desgaste e à quebra, enquanto a taxa de remoção de material é elevada, resultando em uma usinagem mais rápida e eficiente e para determina-lo são levados em consideração diversos fatores, tais como o tipo de material a ser usinado, a geometria da ferramenta de corte, as condições de lubrificação e condução, entre outros. É importante ressaltar que esse intervalo pode variar de acordo com as especificidades de cada aplicação e deve ser determinado experimentalmente. (DINIZ, 2006)

1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVA

As empresas da indústria da usinagem vêm cada vez mais buscando competitividade no mercado, por isso em uma produção onde se procura a potencialização dos lucros e satisfação do cliente sem perder a qualidade do produto é necessário saber quais condições de usinagem vão gerar um mínimo custo de fabricação, ou seja, a determinação das condições econômicas de corte.

Segundo Machado e Silva (2004), um aumento da velocidade de corte e avanço vão resultar em maior produção, ou seja, redução do tempo de horas trabalhadas por peça, o que implica em um custo de fabricação menor. Por outro lado, maiores velocidades de corte e avanços irão aumentar o número de ferramentas gastas por peça, pois o desgaste das ferramentas é aumentado. Encontrar esse equilíbrio é essencial para a saúde financeira das empresas.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo principal deste trabalho é realizar uma análise experimental do desgaste e vida da ferramenta de corte de aço rápido (grupo M com 10% de cobalto) utilizando barras do aço 1045. Nesse estudo, a ferramenta será usinada até o final de sua vida útil para determinar os parâmetros de vida da ferramenta. Assim será possível calcular as velocidades de máxima produção e mínimo custo e definir o IME.

1.2.2 Objetivos específicos

Tendo em vista o objetivo geral, os objetivos específicos do presente trabalho são explicitados a seguir.

- Definir velocidade corte, velocidade de avanço e profundidade de corte.
- Definir o critério de vida útil da ferramenta utilizada
- Fazer ensaio com diferentes velocidades de corte afim de obter o tempo de vida útil da ferramenta.
- Obter o desgaste da ferramenta ao longo do tempo
- Definir a velocidade de corte de máxima produção
- Definir a velocidade de corte de mínimo custo
- Delimitar o intervalo de máxima eficiência para o par ferramenta-peça

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 USINAGEM

Usinagem é um processo de fabricação em que uma ferramenta de corte afiada é utilizada para remover material e produzir o formato da peça desejada. A ação predominante de corte na usinagem envolve a deformação por cisalhamento do material trabalhado para formar o cavaco, conforme o cavaco é removido, uma nova superfície é exposta. É um processo

de transformação mecânica que utiliza ferramentas específicas para dar forma e acabamento a materiais como metais, plásticos, cerâmicos e outros (GROOVER, 2014).

O processo de usinagem pode ser realizado por meio de diversas técnicas, tais como torneamento, fresagem, furação, retificação, entre outras. Cada uma dessas técnicas envolve o uso de máquinas específicas, como tornos, fresadoras, furadeiras e retificadoras, que são operadas por profissionais especializados em usinagem. A usinagem é reconhecidamente o processo de fabricação mais popular do mundo, transformando em cavacos algo em torno de 10% de toda a produção de metais, e empregando dezenas de milhões de pessoas em todo o mundo. (MACHADO E SILVA, 2004)

Segundo Souza (2011), o processo de remoção por usinagem pode ser dividido em duas grandes categorias segundo a energia utilizada na execução do mesmo, conforme indicado na Figura 1.

- Processos convencionais, em que as operações de corte empregam energia mecânica na remoção do material, principalmente por cisalhamento, no contato físico da ferramenta com a peça como por exemplo o torneamento, furação e retificação.
- Processos especiais (não-convencionais), em que as operações se utilizam de outros tipos de energia de usinagem (p.ex. termelétrica), não geram marcas-padrão na superfície da peça e a taxa volumétrica de remoção de material é muito menor que a dos processos convencionais.

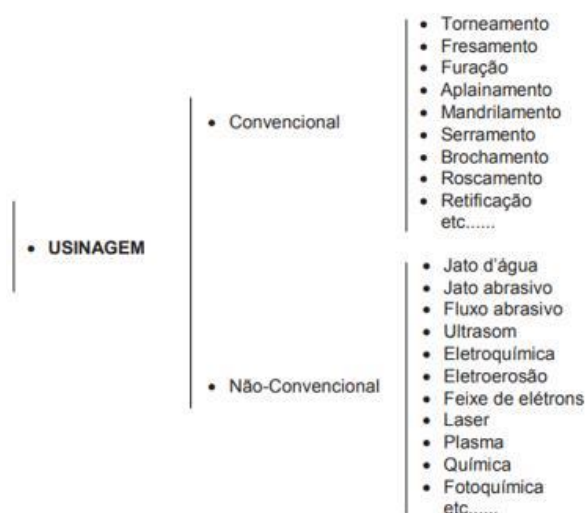


Figura 1 - Classificação dos processos de usinagem (Adaptado de MACHADO E SILVA, 2004).

2.1.1 Torneamento

É um processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes. Para isso, a peça gira em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar com o referido eixo, sendo que essa trajetória pode ser tanto retilínea quanto curvilínea, conforme ilustrando na Figura 2 (SOUZA, 2011).

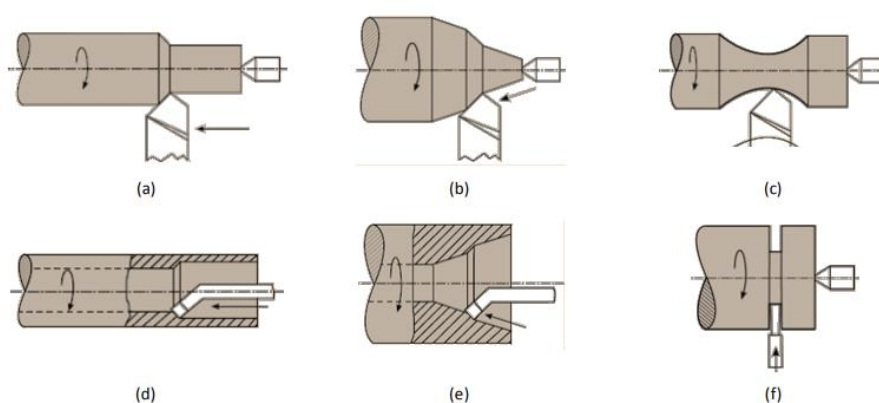


Figura 2 - Alguns processos de torneamento: (a) cilíndrico externo; (b) cônico externo; (c) curvilíneo; (d) cilíndrico interno; (e) cônico interno; (f) sangramento radial (SOUZA, 2011).

2.1.2 Movimentos na usinagem

Durante o processo de usinagem, ocorrem movimentos relativos entre a peça e a aresta cortante, sendo que estes se referem à peça em estado de repouso. É possível distinguir dois tipos de movimentos, os ativos e os passivos. Os movimentos ativos são aqueles que estão diretamente envolvidos na remoção do cavaco e estão ilustrados na Figura 3. Segundo Machado e Silva (2004) eles são:

- Movimento de Corte: movimento entre a peça e a ferramenta, o qual sem o movimento de avanço origina somente uma única retirada de cavaco.
- Movimento de Avanço: movimento entre a peça e a ferramenta, o qual juntamente com o movimento de corte origina retirada contínua de cavaco.

- Movimento Efetivo: movimento resultante dos movimentos de corte e avanço, realizados ao mesmo tempo.

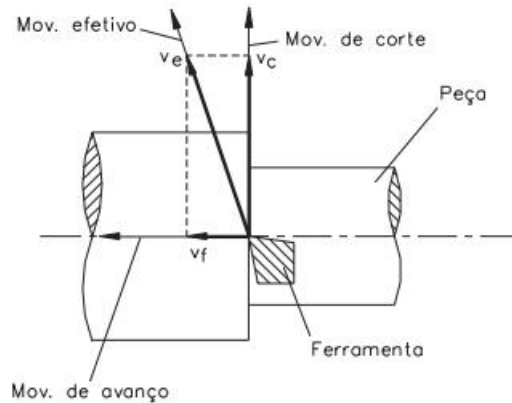


Figura 3 - Direção dos movimentos ativos no torneamento (MACHADO E SILVA, 2004).

Já os movimentos passivos são aqueles que, apesar de fundamentais para o processo de usinagem, não promovem remoção de material ao ocorrerem. Segundo Machado e Silva (2004) eles são:

- Movimento de Aproximação: movimento entre a peça e a ferramenta, com a qual a ferramenta, antes da usinagem, é aproximada à peça.
- Movimento de Ajuste: movimento entre a peça e a ferramenta para se determinar a espessura de material a ser retirada (ou a profundidade de corte).
- Movimento de Correção: movimento entre a peça e a ferramenta para se compensar o desgaste da ferramenta, ou outra variação.
- Movimento de Recuo: movimento entre a aresta de corte e a peça, com o qual a ferramenta, após a usinagem, é afastada da peça.

2.1.3 Velocidade de corte

Segundo Diniz (2006) a velocidade de corte é a velocidade tangencial instantânea resultante da rotação da ferramenta em torno da peça para as operações do tipo torneamento, onde os movimentos de corte e avanço ocorrem concomitantemente. Ela é calculada da seguinte forma:

$$V_c = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad (1)$$

Onde:

$V_c =$ velocidade de corte [m/min]

$d =$ diâmetro da ferramenta [mm]

$n =$ rotação da ferramenta [rpm]

2.1.4 Velocidade de avanço

Segundo Diniz (2006) a velocidade de avanço, em operações do tipo torneamento, é o produto do avanço pela rotação da ferramenta. É definida como:

$$V_f = f \cdot n = \frac{1000 \cdot V_c}{\pi \cdot d} \cdot f \quad (2)$$

Onde:

$f =$ avanço [mm/rev]

$V_f =$ velocidade de avanço [mm/min]

2.2 MATERIAIS PARA FERRAMENTA

Conforme observado, a técnica de usinagem se baseia na eliminação de material, empregando uma ferramenta confeccionada com um material mais duro e resistente do que o

da peça a ser trabalhada. O princípio da dureza relativa aplica-se aqui, e o surgimento de novas ligas estruturais e materiais com propriedades superiores de resistência mecânica e dureza contribuiu para o desenvolvimento de ferramentas mais robustas, capazes de realizar as operações de usinagem com maior eficácia. (MACHADO E SILVA, 2004).

Entretanto, realizar cortes em materiais frágeis ou em operações de corte interrompido exigem que os materiais tenham uma tenacidade suficiente para resistir aos impactos e choques envolvidos na usinagem. No entanto, a dureza e a tenacidade são geralmente consideradas como propriedades antagônicas, conforme mostrado na Figura 4, onde uma alta dureza é associada a uma baixa tenacidade e vice-versa. Isso torna um desafio para os fabricantes de ferramentas de corte encontrar um equilíbrio entre essas duas propriedades nos materiais utilizados (SOUZA, 2011).

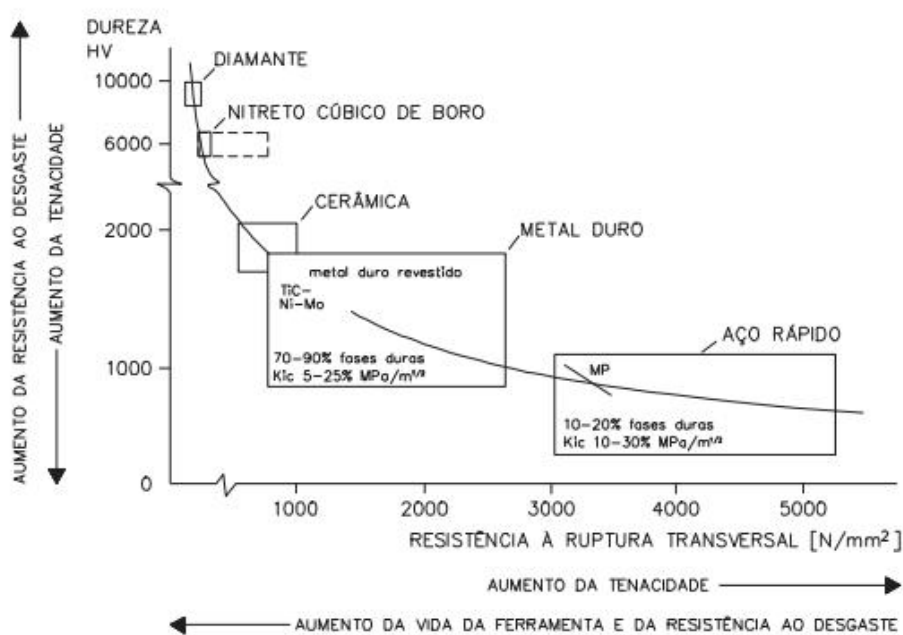


Figura 4 - Diagrama de dureza-tenacidade dos materiais de ferramentas de corte (PASTOR, 1987).

Outro ponto importante é que a capacidade de imprimir altas velocidades nos processos de corte está diretamente ligada às propriedades de dureza e resistência ao desgaste, como destacado na Figura 5 (MACHADO E SILVA, 2004).

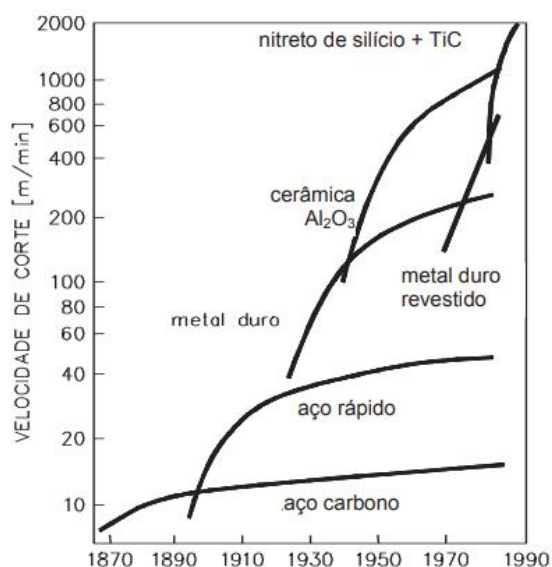


Figura 5 - Aumento das velocidades de corte ao longo dos anos por tipo de material (PASTOR, 1987).

2.2.1 Aço-Rápido

Desenvolvido por F. W. Taylor, no final do século XIX, o aço-rápido foi o responsável pelo primeiro grande salto tecnológico na história da usinagem (SOUZA, 2011).

As principais aplicações de aços-rápidos são em brocas, fresas inteiriças, cossinetes, brochas e até em ferramentas de barra para aplicações em torneamento de peças de diâmetros reduzidos (Figura 6), cuja velocidade de corte conseguida é inferior à velocidade econômica de corte dos materiais mais resistentes. Suas principais propriedades são a dureza quente, a resistência ao desgaste e a tenacidade (SOUZA, 2011).



Figura 6 - Algumas aplicações dos aços-rápidos (SOUZA, 2011).

As ferramentas de aço-rápido são divididas em dois grandes grupos: aços ao tungstênio (W), identificados pela letra T, e aços ao molibdênio (Mo), identificados pela letra M. Assim, os principais elementos de liga dos aços-rápidos são: tungstênio (W), molibdênio (Mo), cobalto (Co), vanádio (V), cromo (Cr) e outros. A Tabela 1 mostra alguns elementos de liga comumente aplicados e suas características (SOUZA, 2011).

CARACTERÍSTICAS	ELEMENTOS DE LIGA
Dureza a quente	W, Mo, Co (com W ou Mo), V, Cr, Mn
Resistência ao desgaste abrasivo	V, W, Mo, Cr, Mn
Profundidade de endurecimento	B, V, Mo, Cr, Mn, Si, Ni
Empenamento mínimo	Mo (com Cr), Cr, Mn
Aumento da tenacidade pelo refinamento do grão	V, W, Mo, Mn, Cr

Tabela 1 - Principais características dos aços-rápidos e suas relações com os elementos de liga presentes (SOUZA, 2011).

2.2.2 Metal duro

O segundo grande impulso na área dos materiais de ferramenta de corte aconteceu com o aparecimento do metal duro. Com eles, novamente, as velocidades de corte puderam ser aumentadas em praticamente uma ordem de grandeza, de 35 m/min com os aços-rápidos para 250 - 300 m/min com os metais duros (MACHADO E SILVA, 2004).

Segundo Machado e Silva (2004), a grande popularidade dos metais duros, que são fabricados pelo processo de metalurgia do pó, se deve ao fato deles possuírem a combinação de resistência ao desgaste, resistência mecânica e tenacidade em altos níveis. Eles foram desenvolvidos em forma de pastilhas (Figura 7) que são intercambiáveis e fixadas mecanicamente aos seus suportes, facilitando o processo de troca de uma ferramenta gasta por uma nova (SOUZA, 2011).



Figura 7 - Alguns exemplos de pastilhas de metal duro (<https://www.ftdb.com.br/metal-duro-revestido>).

Segundo Souza (2011), os componentes mais importantes dos metais duros são: o carboneto de tungstênio (WC) que determina a resistência ao desgaste, o metal ligante cobalto (Co) que determina a tenacidade e os carbonetos de titânio (TiC) e tântalo (TaC) que retardam de forma significativa a taxa de desgaste de cratera na usinagem do aço, proveniente da forte afinidade química entre o aço e o carbono do WC. De acordo com Souza (2011) os metais duros podem ser classificados conforme a Tabela 2.

Existe também a possibilidade de revestir a superfície das pastilhas, estas camadas de revestimento proporcionam uma maior durabilidade à aresta de corte, pois permitem que uma

mesma pastilha suporte tanto maiores esforços de corte em operações de desbaste, quanto altas velocidades em operações de acabamento. Comumente, são utilizadas camadas finas de carboneto de titânio (TiC), nitreto de titânio (TiN) ou óxido de alumínio (Al₂O₃) (SOUZA, 2011).

Principais classes		
Letra de identificação	Cor de identificação	Materiais a serem usinados
P	Azul	Aços: Todos os tipos de aços e aços fundidos, exceto aços inoxidáveis com estrutura austenítica
M	Amarelo	Aço Inoxidável: aço inoxidável austenítico e aço duplex (austenítico/ferrítico) e aço fundido
K	Vermelho	Ferro fundido: Ferro fundido cinzento, ferro fundido com grafita esferoidal, ferro fundido maleável
N	Verde	Metais não ferrosos: Alumínio e outros metais não ferrosos, materiais não metálicos
S	Marrom	Superligas e titânio: Ligas especiais resistentes ao calor à base de ferro, níquel e cobalto, titânio e ligas de titânio
H	Cinza	Materiais duros: Aços endurecidos, ferros fundidos endurecidos, ferros fundidos resfriados

Tabela 2 - Classificação dos metais duros (SOUZA, 2011).

2.3 DESGASTE DA FERRAMENTA

Podem-se distinguir três tipos de destruição da ferramenta de corte na usinagem: avaria, desgaste e deformação plástica. Os três promovem a mudança na geometria da ferramenta de corte. Os dois primeiros, geralmente, promovem a perda de massa, enquanto o último promove o deslocamento de massa na ferramenta de corte (MACHADO E SILVA, 2004).

A avaria é um processo de destruição da ferramenta de corte que ocorre de maneira repentina e inesperada, causado pela quebra, lasca ou trinca da ferramenta de corte. A deformação plástica é a mudança da geometria da ferramenta de corte pelo deslocamento de massa. Ela ocorre por cisalhamento devido às altas tensões atuantes nas superfícies das ferramentas de corte. Já o desgaste, que é o foco principal deste trabalho, é definido como sendo: “mudança de sua forma original durante o corte, resultante da perda gradual de material”. (MACHADO AND SILVA, 2004).

2.3.1 Tipos de desgaste

Desgaste de cratera (área A da Figura 8) - É o tipo de desgaste que ocorre na superfície de saída da ferramenta, causado pelo atrito entre ferramenta e cavaco. O crescimento do desgaste de cratera gera a quebra da ferramenta, quando tal desgaste se encontra com o desgaste frontal (DINIZ, 2006).

Desgaste frontal ou de flanco (área B da Figura 8) - ocorre na superfície de folga da ferramenta, causado pelo contato entre ferramenta e peça. É o tipo de desgaste mais comum e todo processo de usinagem causa o desgaste frontal (DINIZ, 2006).

Desgaste de entalhe (áreas C e D da Figura 8) - esse tipo de desgaste se forma sempre nos dois extremos de contato entre a superfície de folga da ferramenta e peça. Esse tipo de desgaste ocasiona deterioração do acabamento superficial da peça, fazendo com que a peça mude de dimensão, podendo sair de sua faixa de tolerância (DINIZ, 2006).

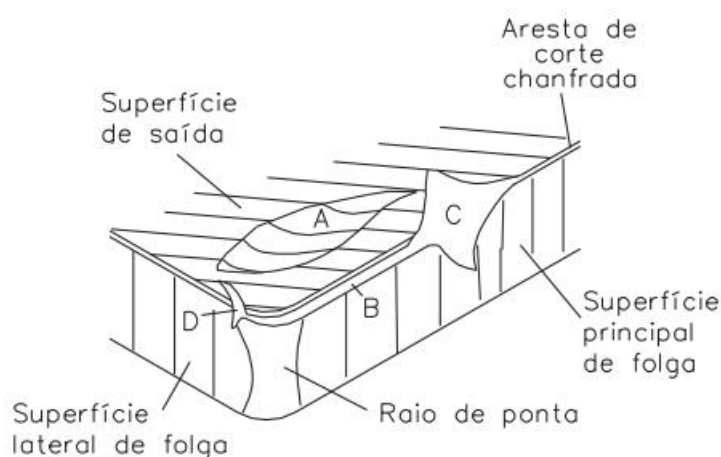


Figura 8 - Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte (DEARNLEY E TRENT, 1982).

2.3.2 Parâmetros de medição dos desgastes

Os desgastes são medidos a partir do plano ortogonal da ferramenta e podem ser distinguidos entre desgastes na superfície de saída e na superfície de folga da ferramenta.

Para quantificar esses desgastes existem alguns parâmetros que são utilizados segundo Machado e Silva (2011). Os principais deles estão listados abaixo e ilustrados na Figura 9.

Na superfície de saída:

- KT = profundidade de cratera
- KB = largura de cratera
- KM = distância do centro da cratera á aresta de corte

Na superfície de folga:

- VB_b = largura média do desgaste de flanco
- VB_{bmax} = largura máxima do desgaste de flanco
- VB_N e VC_N = desgastes de entalhe

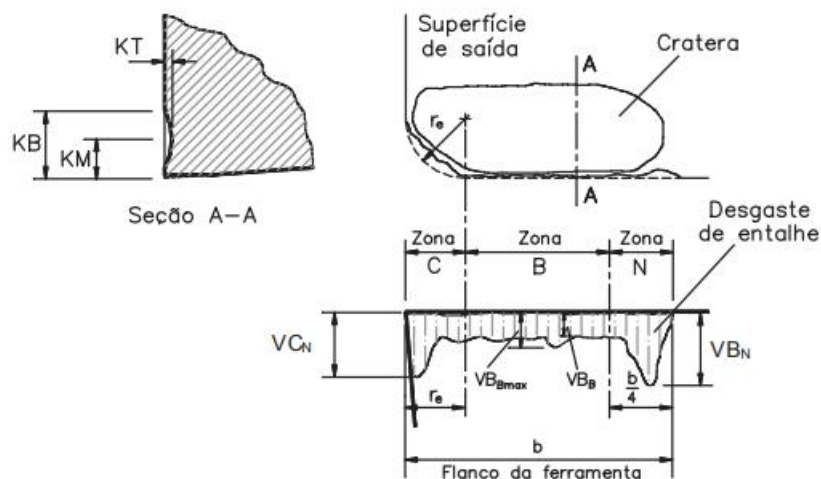


Figura 9 - Parâmetros utilizados para medir os desgastes das ferramentas de corte (MACHADO E SILVA, 2004).

2.3.3 Critérios de fim de vida da ferramenta

A vida da ferramenta de corte, que será melhor explicada no item 2.4, é o período durante o qual a ferramenta pode ser usada efetivamente antes de ser reafiada ou substituída. É importante estabelecer critérios para determinar o fim de vida da ferramenta, a fim de manter o processo produtivo dentro das condições econômicas adequadas (MACHADO E SILVA, 2004).

Segundo Machado e Silva (2004) existem critérios de fim de vida recomendados para ferramentas de aço-rápido, metal duro e cerâmica utilizadas em operações de desbaste. Estes critérios são:

- Desgaste de flanco médio, $VB_b = 0,3$ mm;
- Desgaste de flanco máximo, $VB_{bmax} = 0,6$ mm;
- Profundidade da cratera, $KT = 0,06 + 0,3f$, onde f é o avanço de corte em mm/rev;
- Desgastes de entalhe, VB_N e $VC_N = 1,0$ mm;
- Falha catastrófica.

Desta maneira, quando qualquer um dos limites for ultrapassado, recomenda-se a reafiação ou substituição da ferramenta de corte. A Figura 10 ilustra a evolução do desgaste ao longo do tempo. Em usinagem, normalmente, as ferramentas de corte se desgastam seguindo uma curva padrão, distinguida em três estágios, I, II e III, com taxas decrescentes, constantes e aceleradas respectivamente (MACHADO E SILVA, 2004).

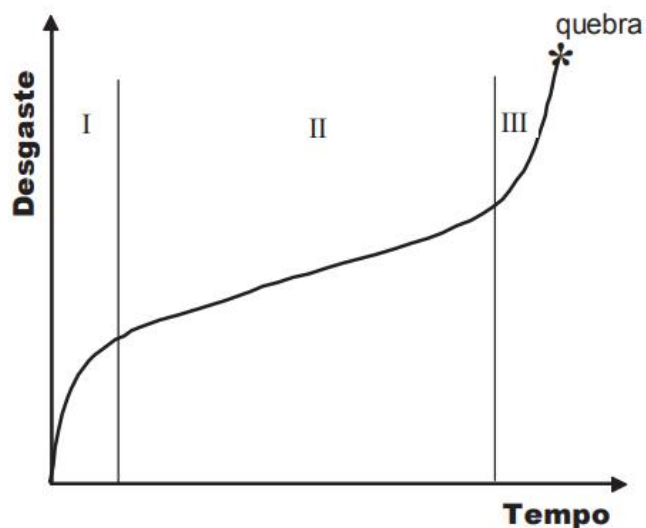


Figura 10 - Comportamento do desgaste de uma ferramenta de corte com o tempo de corte (MACHADO E SILVA, 2004).

2.4 VIDA DA FERRAMENTA

Segundo Ferraresi (1977), a vida da ferramenta é o tempo que a mesma trabalha efetivamente (deduzindo os tempos passivos), até perder a sua capacidade de corte, dentro de um critério previamente estabelecido. Atingido esse tempo, a ferramenta deve ser reafiada ou substituída. Resumindo, a vida da ferramenta é o tempo entre duas afiações sucessivas necessárias, no qual ela trabalha efetivamente.

O tempo de vida da ferramenta (T) pode ser expressada de várias maneiras como por exemplo:

- Através do tempo total de trabalho (caso de cortes interrompidos, fresamento)
- Percurso de corte (L_c)
- Percurso de avanço (L_f)
- Volume de material removido
- Número de peças produzidas
- Velocidade de corte para um determinado tempo de vida

O percurso de corte (L_c) e o percurso de avanço (L_f) para uma vida da ferramenta (T) em minutos, são dados por:

$$L_c = \frac{V_c \cdot T}{1000} \quad (3)$$

$$L_f = f \cdot n \cdot T \quad (4)$$

2.4.1 Curva de vida da ferramenta

As curvas de vida de uma ferramenta são aquelas que expressam a vida da ferramenta (T) em função da velocidade de corte (V_c). Elas são fundamentais para o estudo das condições econômicas de usinagem, e fornecem o tempo que uma ferramenta pode trabalhar até que se atinja o nível de desgaste estabelecido (MACHADO E SILVA, 2004).

Segundo Diniz (2006), para se obter a curva $T \times V_c$ de uma ferramenta de corte, são necessários gráficos que forneçam o desgaste da ferramenta ao longo do tempo para variadas velocidades de corte como ilustrado na Figura 11.

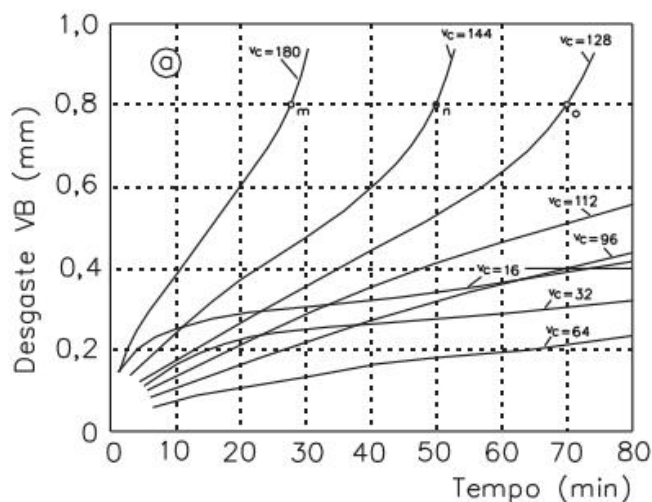


Figura 11 - Curvas de desgaste em função do tempo de usinagem, para diferentes velocidades de corte, em determinadas condições de usinagem (MACHADO E SILVA, 2004).

O exemplo acima utiliza $V_b = 0,8\text{mm}$ como critério de vida da ferramenta e os pontos (m, n, o) indicam o tempo de vida da ferramenta para velocidades distintas. A partir disso, é possível obter a curva de vida da ferramenta $T \times V_c$ (Figura 12) (FERRARESI, 1970).

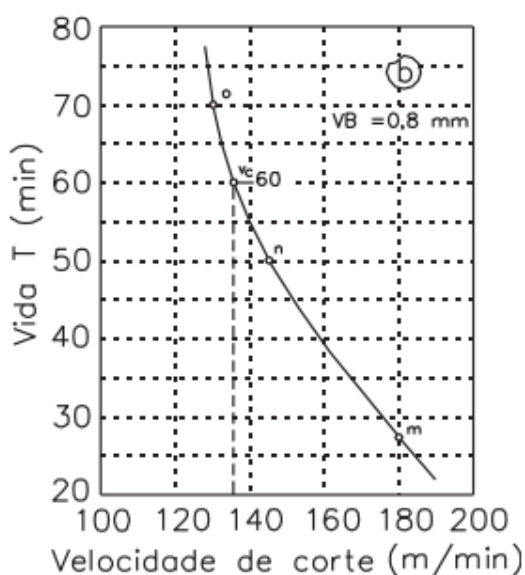


Figura 12 - Curva de vida da ferramenta para o desgaste $V_b = 0,8\text{mm}$, obtida através das curvas de desgaste (MACHADO E SILVA, 2004).

2.4.2 Equação de Taylor

Além destas curvas ilustradas nas Figuras 11 e 12, pode-se construir também, nas condições de usinagem especificadas, curvas que fornecem o desgaste atingido pela ferramenta em função da velocidade de corte para determinado tempo de usinagem, conforme mostrado na Figura 13 (FERRARESI, 1970).

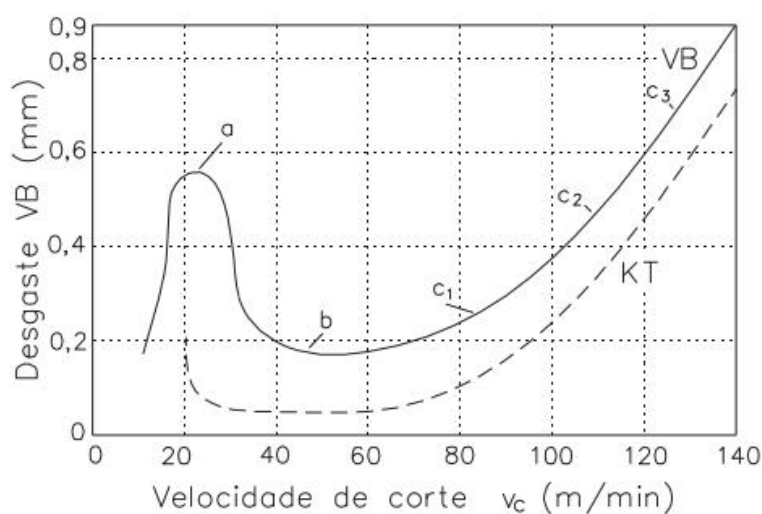


Figura 13 - Desgaste V_b da ferramenta em função da velocidade de corte para um tempo de usinagem de 60 min (MACHADO E SILVA, 2004).

De acordo com Ferraresi (1970), pode-se dividir estas curvas de desgaste em 3 regiões distintas: o trecho *a*, de baixa velocidade de corte, onde o desgaste é grande devido à formação da aresta postiça de corte; a região *b* de desgaste mínimo com velocidades de corte medianas e a região *c* de altas velocidades de corte e desgaste maior.

A região *c* da curva é a mais interessante economicamente, pois apesar do desgaste ser maior que no trecho *b*, na região *c* tem-se maiores velocidades de corte, permitindo assim uma maior produção e percursos de corte (L_c) com valores bem altos (FERRARESI, 1970).

A curva de vida da ferramenta $T \times V_c$ da Figura 12 representa a região *c* do gráfico da Figura 13 e quando representada em escala dilogarítmica, se aproxima de uma reta, como a Figura 14 mostra (MACHADO E SILVA, 2004)

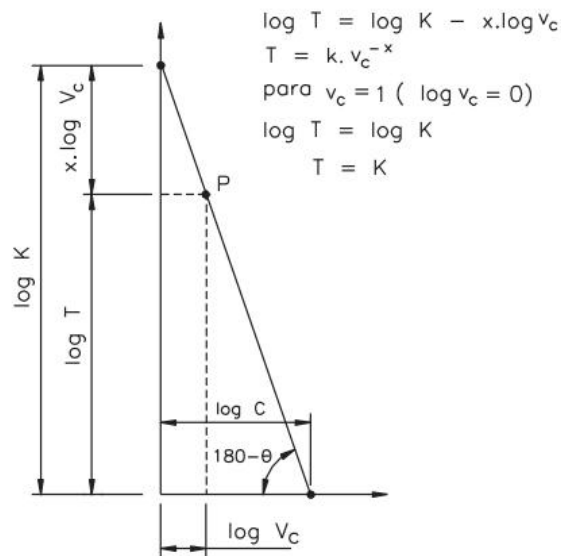


Figura 14 - Representação em escalas logarítmicas da curva de vida da ferramenta (MACHADO E SILVA, 2004).

Para a curva da Figura 14, temos a expressão:

$$\log T = \log K - x \cdot \log V_c \quad (5)$$

Onde:

$x =$ coeficiente angular da reta

$K =$ vida da ferramenta para uma velocidade de corte 1 m/min

A Equação 5 pode ser escrita da seguinte forma:

$$T = K \cdot V_c^{-x} \quad (6)$$

A Equação 6 representa o tempo de vida de uma ferramenta para determinada velocidade de corte e foi deduzida pela primeira vez por Taylor, por isso é conhecida como equação de Taylor. Ela é muitas vezes também expressa, conforme a Equação 7 (FERRARESI, 1970).

$$V_c \cdot T^y = C \quad (7)$$

A proposta de Taylor diz que o valor de x e y são relativamente constantes para um determinado material de ferramenta, enquanto o valor de K e C dependem do material da ferramenta, do material da peça e das condições de corte, portanto são obtidos experimentalmente através de testes de vida da ferramenta. (DINIZ, 2006).

As velocidades de corte obtidas pela equação de Taylor, podem ser usadas na otimização de um processo de usinagem e as velocidades, assim obtidas, são denominadas velocidades ótimas de corte. Caso a vida T da ferramenta seja calculada pelas condições econômicas de usinagem, a velocidade ótima de corte recebe o nome de velocidade econômica de corte, isto é, a velocidade na qual o custo de produção é o mínimo (FERRARESI, 1970).

2.5 CONDIÇÕES ECONÔMICAS DE CORTE

“Nos últimos 30 anos tem sido muito investigada a pergunta: Quais condições de usinagem acarretam o mínimo custo de fabricação? Tal pergunta se baseia essencialmente no fato que, com o aumento da velocidade de corte ou avanço, o tempo máquina diminui, abaixando conseqüentemente a parte do custo de fabricação devido à máquina. Porém, diminui simultaneamente a vida da ferramenta, ocasionando um aumento da parte do custo devido à ferramenta” (FERRARESI, 1970).

Segundo Diniz (2006) a velocidade de corte que deve ser utilizada em um processo de usinagem, deve ser sempre superior à velocidade crítica (velocidade abaixo da qual se tem a formação da aresta postiça de corte, APC). Então, existe um valor intermediário de velocidade entre a velocidade crítica e uma velocidade muito superior a ela, onde se tem os menores custos de produção. Neste ponto, a velocidade de corte é chamada de velocidade de mínimo custo (V_0). Por outro lado, existe também um valor intermediário de velocidade, onde se tem o menor tempo total de fabricação de uma peça. Neste ponto a velocidade de corte é chamada de velocidade de máxima produção (V_{cmaxp}).

2.5.1 Ciclos e Tempos de Usinagem

Segundo Ferraresi (1970) o ciclo de usinagem de uma peça, pertencente a um lote de Z peças é constituído diretamente pelas seguintes fases:

1. Colocação e fixação da peça
2. Aproximação e posicionamento da ferramenta
3. Corte
4. Afastamento da ferramenta
5. Inspeção (se necessário), e retirada da peça

Além destas fases, tomam parte indireta no ciclo de usinagem as seguintes:

6. Preparo da máquina para a execução de Z peças
7. Remoção da ferramenta para sua substituição
8. Recolocação e ajustagem da nova ferramenta

Segundo Diniz (2006) os tempos gastos nas fases informadas acima podem ser convencionados da seguinte forma:

$t_t =$ tempo total de usinagem de uma peça

$t_c =$ tempo de corte

$t_s =$ tempo secundário

$t_a =$ tempo de aproximação e afastamento

$t_p =$ tempo de preparo da máquina

$t_{ft} =$ tempo de troca da ferramenta

$t_{fa} =$ tempo de afiação da ferramenta

Dessa forma, o tempo total de usinagem de uma peça, dentro de um lote Z de peças, será:

$$t_t = t_c + t_s + t_a + \frac{t_p}{Z} + \frac{N_t}{Z} (t_{ft} + t_{fa}) \quad (8)$$

Onde:

$N_t =$ número de trocas ou afiações da ferramenta para a usinagem do lote

$Z =$ número de peças por lote

A afiação da ferramenta pode ser executada pelo próprio operador da máquina operatriz ou por uma seção da fábrica especializada para esse fim. Neste segundo caso o tempo de afiação (t_{fa}) não deve ser computado no tempo total de confecção por peça (t_t) (FERRARESI, 1970).

Admitindo-se que o preparo da máquina operatriz seja feito com ferramentas afiadas, tem-se:

$$Z = (N_t + 1)Z_t = (N_t + 1) \frac{T}{t_c} \quad (9)$$

$$N_t = Z \frac{t_c}{T} - 1 \quad (10)$$

Onde:

$T =$ Vida da ferramenta

$Z_t =$ número de peças usinadas durante a vida T de uma ferramenta

Substituindo a Equação 10 na Equação 8 obtêm-se o tempo total de usinagem de uma peça (DINIZ, 2006).

$$t_t = t_c + \left(t_s + t_a + \frac{t_p}{Z} - \frac{1}{Z} t_{ft} \right) + \frac{t_c}{T} t_{ft} \quad (11)$$

Pode-se ver na Equação 12 que o tempo total de usinagem de uma peça pode ser dividido em 3 parcelas (DINIZ, 2006).

$$t_t = t_c + t_1 + t_2 \quad (12)$$

Onde:

$t_c =$ tempo de corte, que diminui com o aumento da velocidade de corte.

$t_1 =$ tempo improdutivo, correspondente à colocação, fixação, inspeção e retirada da peça, aproximação e afastamento da ferramenta, preparo da maquina para usinagem de lote, que é independente da velocidade de corte.

t_2 = tempo de troca e/ou afiação da ferramenta. Quanto maior a velocidade de corte, menor a vida da ferramenta e maior o número de paradas da máquina, portanto, maior também esta parcela (DINIZ, 2006).

2.5.2 Velocidade de corte de máxima produção

Segundo Ferraresi (1970) para se calcular a velocidade de corte de máxima produção, ou seja, a velocidade de corte em que o tempo total de confecção de uma peça (t_t) é mínimo, aplica-se a Equação 4 do percurso de avanço L_f , para o caso de torneamento cilíndrico de uma peça correspondente ao tempo t_c :

$$L_f = f \cdot n \cdot t_c \quad (13)$$

A rotação da peça (n) através da equação da velocidade de corte, dada pela Equação 1, pode ser escrita como:

$$n = \frac{1000 \cdot V_c}{\pi \cdot d} \quad (14)$$

Dessa forma, tem-se para o torneamento cilíndrico:

$$t_c = \frac{L_f \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot f \cdot V_c} \quad (15)$$

Onde:

L_f = percurso de avanço em mm

d = diâmetro da peça em mm

f = avanço em mm/rev

V_c = velocidade de corte em m/min

Segundo Diniz (2006), substituindo a equação do tempo de corte para torneamento cilíndrico (Equação 15) e a fórmula de Taylor (Equação 6) na equação do tempo total de usinagem de uma peça (Equação 11), tem-se:

$$t_t = \frac{L_f \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot f \cdot V_c} + \left(t_s + t_a + \frac{t_p}{Z} - \frac{1}{Z} t_{ft} \right) + \frac{L_f \cdot \pi \cdot d \cdot v_c^{x-1}}{1000 \cdot f \cdot K} t_{ft} \quad (16)$$

Comparando a Equação 16 com a Equação 12 podemos ver as três parcelas que compõem o tempo total de confecção de uma peça e na figura 15 como a velocidade de corte influencia em cada uma delas. (FERRARESI, 1970).

$$t_c = \frac{L_f \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot f \cdot V_c}$$

$$t_1 = \left(t_s + t_a + \frac{t_p}{Z} - \frac{1}{Z} t_{ft} \right) \quad (17)$$

$$t_2 = \frac{L_f \cdot \pi \cdot d \cdot v_c^{x-1}}{1000 \cdot f \cdot K} t_{ft}$$

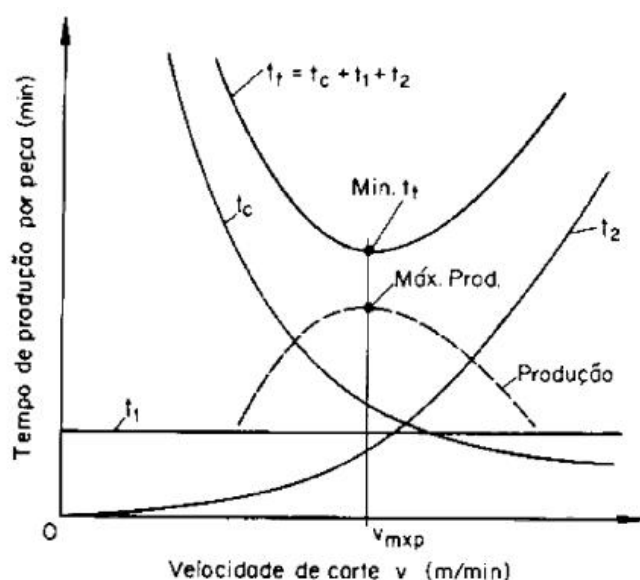


Figura 15 - Comportamento das variáveis de tempo de fabricação por peça com a velocidade de corte (FERRARESI, 1970).

Conforme ilustrado no gráfico da Figura 15, o valor de máxima produção é o ponto mínimo da Equação 16. Segundo Diniz (2006) para se obter o mínimo desta função, considerando o avanço (f) e a profundidade de usinagem (a_p) constantes temos que:

$$\frac{dt_t}{dV_c} = \frac{L_f \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot f \cdot V_c} + \left(t_s + t_a + \frac{t_p}{Z} - \frac{1}{Z} t_{ft} \right) + \frac{L_f \cdot \pi \cdot d \cdot V_c^{x-1}}{1000 \cdot f \cdot K} t_{ft} = 0 \quad (18)$$

Aplicando a derivada, obtêm-se,

$$-\frac{1}{V_{cmaxp}^2} + \frac{(x-1) \cdot V_{cmaxp}^{x-2}}{K} t_{ft} = 0 \quad (19)$$

Logo, a velocidade de máxima produção pode ser dada por:

$$V_{cmaxp} = \sqrt[x]{\frac{K}{(x-1) \cdot t_{ft}}} \quad (20)$$

Substituindo a equação da velocidade de máxima produção (Equação 20), na fórmula de Taylor (Equação 6), segundo Ferraresi (1970) temos que a vida da ferramenta para a máxima produção é:

$$T_{maxp} = (x-1) \cdot t_{ft} \quad (21)$$

2.5.3 Velocidade econômica de corte

Define-se velocidade de corte de mínimo custo (V_0), como sendo a velocidade para a qual o custo de fabricação por peças é mínimo. Para calculá-la, é necessário primeiramente determinar os custos de produção que dependem do tempo de usinagem (MACHADO E SILVA, 2004).

Os custos envolvidos diretamente com a usinagem de uma peça podem ser divididos da seguinte forma:

$$K_p = K_{us} + K_{um} + K_{uf} \quad (22)$$

Onde:

$K_p = \text{custo de produção por peça}$

$K_{us} = \text{custo de mão de obra}$

$K_{um} = \text{custo da máquina}$

$K_{uf} = \text{custo das ferramentas}$

As três parcelas citadas anteriormente segundo Diniz (2006) são calculadas da seguinte forma:

$$K_{us} = t_t \frac{Sh}{60} \quad (23)$$

Onde:

$t_t = \text{tempo total de confecção por peça em minutos}$

$Sh = \text{salário e encargos do operador em R\$/hora}$

$$K_{um} = t_t \frac{Sm}{60} \quad (24)$$

Onde:

$t_t = \text{tempo total de confecção por peça em minutos}$

$Sm = \text{custo total da máquina em R\$/hora}$

$$K_{uf} = \frac{K_{ft}}{Z} \quad (25)$$

Onde:

$K_{ft} = \text{custo da ferramenta por vida } T$

$Z = \text{números de peças usinadas por vida } T \text{ da ferramenta}$

Já o valor de K_{ft} pode ser calculado de duas formas conforme Ferraresi (1970). No caso de ferramentas com pastilhas intercambiáveis têm-se:

$$K_{ft} = \frac{Vsi}{N_{fp}} + \frac{Kpi}{Ns} \quad (26)$$

Onde:

N_{fp} = vida média do porta-ferramentas, em quantidade de arestas de corte

Vsi = custo de aquisição do porta-ferramenta

Ns = número de aresta de corte da pastilha intercambiável

Kpi = custo de aquisição da pastilha intercambiável

Porém, no caso de ferramentas de insertos rafiáveis, de fixação mecânica, o custo da ferramenta por vida pode ser expresso pela fórmula simplificada:

$$K_{ft} = \frac{V_{fi} - V_{ff}}{n_f} + \frac{K_{fa} \cdot n_a}{n_f} \quad (27)$$

Onde:

V_{fi} = valor inicial de aquisição da ferramenta

V_{ff} = valor final da ferramenta

n_f = número de vidas da ferramenta

K_{fa} = custo por afiação da ferramenta

n_a = número de afiações da ferramenta

Segundo Diniz (2006), substituindo as equações do tempo total de usinagem para uma peça (Equação 16) na equação do custo total de produção por peça (Equação 22), já aplicando as equações das parcelas dos custos de produção (Equação 23), (Equação 24), (Equação 25) e a fórmula de Taylor (Equação 6) obtêm-se o seguinte resultado:

$$Kp = C_1 + \frac{\pi \cdot d \cdot l_f}{60 \cdot 1000 \cdot f \cdot V_c} C_2 + \frac{\pi \cdot d \cdot l_f \cdot V_c^{x-1}}{1000 \cdot f \cdot K} C_3 \quad (28)$$

Onde:

$C_1 =$ constante independente da velocidade de corte

$C_2 =$ soma das despesas com mão de obra e com máquina em R\$/hora

$C_3 =$ constante do custo relativo à ferramenta

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{t_t}{60} - \frac{1}{Z} (Sh + Sm) \\ C_2 &= (Sh + Sm) \\ C_3 &= K_{ft} + \frac{t_{ft}}{60} (Sh + Sm) \end{aligned} \quad (29)$$

Analogamente à equação do tempo total de usinagem por peça, o custo de usinagem para uma peça também é composto por 3 parcelas. A Figura 16 mostra como essas parcelas variam com a influência da velocidade de corte (DINIZ, 2006).

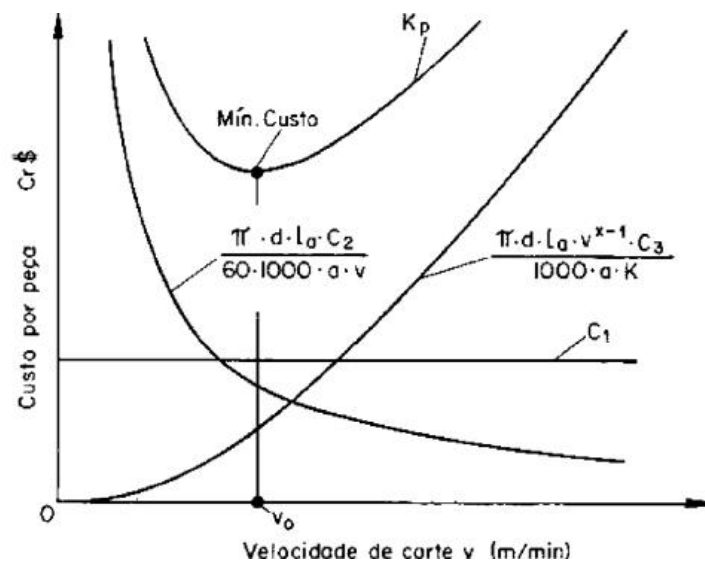


Figura 16 - Comportamento das componentes de custo com a velocidade de corte (FERRARESI, 1970).

Conforme ilustrado no gráfico da Figura 16, o valor de mínimo custo é o ponto mínimo da Equação 28. Então, segundo Ferraresi (1970), para se obter o mínimo desta função, considerando o avanço (f) e a profundidade de usinagem (a_p) constantes temos que:

$$\frac{dKp}{dV_c} = - \frac{\pi \cdot d \cdot l_f}{60 \cdot 1000 \cdot f \cdot V_c^2} C_2 + \frac{(x-1) \cdot \pi \cdot d \cdot l_f \cdot V_c^{x-2}}{1000 \cdot f \cdot K} C_3 = 0 \quad (30)$$

Aplicando a derivada obtêm-se a velocidade econômica de corte que pode ser escrita da seguinte forma:

$$V_0 = \sqrt[x]{\frac{C_2 \cdot K}{60 \cdot (x-1) \cdot C_3}} \quad (31)$$

Substituindo a equação da velocidade econômica de corte (equação 31) na fórmula de Taylor (equação 6), segundo Diniz (2006) obtêm-se o tempo de vida da ferramenta para a condição de mínimo custo, que é dada por:

$$T_0 = \frac{60 \cdot (x-1) \cdot K_{ft}}{Sh + Sm} + (x+1) \cdot t_{ft} \quad (32)$$

2.5.4 Intervalo de máxima eficiência

O intervalo de máxima eficiência (IME) é definido como o intervalo compreendido entre as velocidades de mínimo custo (V_0) e de máxima produção (V_{cmaxp}) (DINIZ, 2006).

A Figura 17 mostra a representação da curva do custo total de produção por peça (K_p) e da curva do tempo total de usinagem de uma peça (t_t) evidenciando, assim, o intervalo de máxima eficiência (IME) (FERRARESI, 1970).

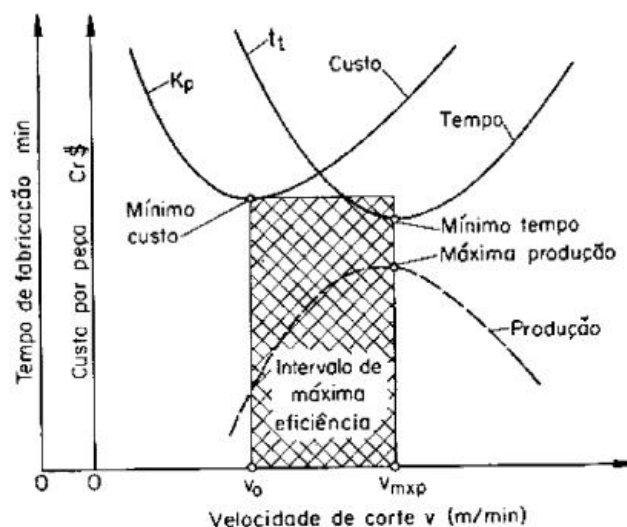


Figura 17 – Determinação do intervalo de máxima eficiência (FERRARESI, 1970).

Pode-se observar que se o valor de V_c utilizado estiver logo abaixo da velocidade econômica de corte, o custo da peça em usinagem vai ser próximo do mínimo, mas o tempo para fabricá-la será bem alto. Em contrapartida, se o valor de V_c estiver logo acima da velocidade de corte de máxima produção, o tempo de usinagem de uma peça é próximo do mínimo, porém o custo de produção por peça se torna bem alto. Portanto, é muito importante que os valores de velocidade de corte utilizados estejam compreendidos no IME (DINIZ, 2006).

É importante ressaltar que toda a análise feita em cima da velocidade de corte é aplicada para o par ferramenta-peça e é obtida experimentalmente, podendo variar de acordo com os materiais, máquinas, ferramentas e dimensões utilizadas. Além disso, os valores de avanço e da profundidade de usinagem escolhidos devem ser baseados nas condições de contorno do processo e mantidos constantes até o final do mesmo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O procedimento experimental consistiu em realizar o processo de torneamento cilíndrico para dois ensaios com velocidades de corte distintas, mantendo os valores de profundidade de corte e avanço constantes. Dessa forma foi possível identificar o tempo de vida para cada um dos casos e encontrar os parâmetros x e K da fórmula de Taylor (equação 6). Através desses parâmetros foi possível calcular a velocidade de corte de máxima produção

(V_{cmxp}), velocidade econômica de corte (V_0) e o intervalo de máxima eficiência (IME) para o par ferramenta-peça utilizado.

3.1 DADOS DO EXPERIMENTO

O torno utilizado para a realização do experimento foi o Romi modelo S-20A, conforme ilustrado na Figura 18.



Figura 18 - Torno mecânico Romi modelo S-20A (PRÓPRIO AUTOR, 2023).

Para realização do experimento utilizou-se uma barra cilíndrica de aço SAE 1045, com diâmetro inicial de 36,4mm e comprimento de 800mm conforme Figura 19. A composição química e propriedades mecânicas do material estão descritas na Tabela 3 e Tabela 4, respectivamente. O SAE 1045 é um aço de média resistência e pouca temperabilidade, comumente utilizado em componentes estruturais e de máquinas, como virabrequins, eixos, engrenagens comuns e peças forjadas.



Figura 19 – Barra cilíndrica de aço SAE 1045 (PRÓPRIO AUTOR, 2023).

Elemento	(% em peso)
Manganês (Mn)	0.60-0.90
Carbono (C)	0.42-0.50
Enxofre (S)	0.05 (max)
Fósforo (P)	0.04 (max)

Tabela 3 - Composição química do aço SAE 1045 (Adaptado de <https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/aco-sae-1045-propriedades-mecanicas.html>).

Tensão de escoamento	450 Mpa
Resistência a tração	585 Mpa
Módulo de elasticidade	190 a 210 GPa
Coefficiente de Poisson	0,27 a 0,30
Dureza Brinell	163 HB
Dureza Rockwell B	84 HRB

Tabela 4 - Propriedades mecânicas do aço SAE 1045 (Adaptado de <https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/aco-sae-1045-propriedades-mecanicas.html>).

A ferramenta de corte utilizada foi um bit de aço rápido do grupo M com 10% de cobalto do fabricante Ades Ferramentas conforme ilustrado na figura 20. Essa ferramenta

permite afiação para as mais variadas aplicações proporcionando uma maior resistência a altas temperaturas e ao desgaste sem perder o corte devido à adição do cobalto (Co). Apresenta uma dureza entre 63 e 67 HRC que permite a usinagem em aços de alto, médio, baixo carbono e aço inox. A composição química da ferramenta de aço rápido do grupo M com adição de cobalto está descrita na Tabela 5 (<https://adesferramentas.com.br/bits-e-bedames/>).



Figura 20 - Bit de aço rápido (grupo M) 10% de cobalto fabricante Ades Ferramentas (PRÓPRIO AUTOR, 2023).

Elemento	(% em peso)
Carbono (C)	0.78-1.05
Manganês (Mn)	0.15-0.40
Silício (Si)	0.20-0.45
Cromo (Cr)	0.20-0.45
Níquel (Ni)	0.3
Molibdênio (Mo)	4.50-5.50
Tungstênio (W)	5.50-6.75
Vanádio (V)	1.75-2.20
Cobre (Cu)	0.25
Fósforo (P)	0.03
Enxofre (S)	0.03
Cobalto (Co)	10

Tabela 5 - Composição química do bit de aço rápido (grupo M) 10% de cobalto fabricante Ades Ferramentas (Adaptado de <https://acosnobre.com.br/blog/aco-m2/>).

Devido ao experimento ter sido realizado em torno convencional, torna-se inviável a obtenção de uma velocidade de corte constante. Isso acontece pois o diâmetro da peça varia e com isso a velocidade de corte também irá variar, essa relação pode ser vista na Equação 1.

Dessa forma foi definida uma velocidade de corte inicial para cada um dos ensaios, porém a velocidade de corte utilizada nos cálculos foi a velocidade de corte média, que é dada por:

$$V_c = V_{cmédia} = \frac{V_{cinicial} + V_{cfinal}}{2} \quad (33)$$

Visto que no 2º ensaio foi necessário usar duas barras diferentes, foi preciso realizar a média da velocidade de corte média das duas barras e somar o tempo total de corte de cada uma delas.

Para garantir medidas padronizadas e resultados precisos, a peça bruta passou por um passe de usinagem prévio. Isso permitiu uma usinagem uniforme e evitou interrupções no corte, prevenindo possíveis tensões não consideradas nas arestas de corte que foram analisadas.

O critério de fim de vida da ferramenta utilizado não foi calculado através dos desgastes mencionados na seção 2.3.3, mas sim até o momento em que o bit de aço rápido necessitou ser reafiado, conforme experiência do operador do torno. A ferramenta de metal duro apresenta um ruído alto e nítido quando chega na condição de reafiação.

Posteriormente aos ensaios foi utilizado um microscópio digital USB conforme Figura 21 para avaliação qualitativa da aresta de corte.



Figura 21 - Microscópio digital USB (PRÓPRIO AUTOR, 2023)

3.2 REALIZAÇÃO DO 1º ENSAIO

Inicialmente para a realização do 1º ensaio foi utilizada uma barra cilíndrica de 36,4 mm de diâmetro e 800 mm de comprimento, porém foi observado que devido ao grande comprimento da barra, existia uma grande vibração da peça enquanto se usinava com 630 rpm. Então, foi decidido serrar a barra em dois pedaços. Um com 430 mm e outro com 370 mm devido às limitações da serra. Logo após foi dado um passe para retirar as imperfeições de cada uma das barras.

Para o 1º ensaio utilizou-se a barra com 370 mm de comprimento e os dados utilizados estão descritos nas Tabela 6. Não foi utilizado fluido de corte para realização do ensaio e o tempo de corte foi sendo medido à cada passe realizado.

	Barra de 370 mm
Rotação [rpm]	630
Profundidade de corte [mm]	0,5
Avanço [mm]	0,229
Percurso de avanço [mm]	345
Diâmetro inicial da peça [mm]	35,40
Velocidade de corte inicial [m/min]	70,06

Tabela 6 - Dados utilizados no 1º ensaio (PRÓPRIO AUTOR, 2023).

3.3 REALIZAÇÃO DO 2º ENSAIO

Para a realização do 2º ensaio continuou sendo utilizada a barra de 370 mm. Porém, após a barra atingir 10,7mm de diâmetro, foi preciso continuar a usinagem na barra de 425 mm de comprimento devido a vibração aumentar com diâmetros menores.

Assim como o 1º ensaio, também não foi utilizado fluido de corte e o tempo foi sendo medido à cada passe realizado. Os dados utilizados durante o 2º ensaio estão descritos nas Tabela 7.

	Barra de 370 mm	Barra de 430 mm
Rotação [rpm]	400	400
Profundidade de corte [mm]	0,5	0,5
Avanço [mm]	0,229	0,229
Percurso de avanço [mm]	345	400
Diâmetro inicial da peça [mm]	34,50	34,20
Velocidade de corte inicial [m/min]	43,35	42,98

Tabela 7 - Dados utilizados no 2º ensaio (PRÓPRIO AUTOR, 2023).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 DADOS ENCONTRADOS NO 1º ENSAIO

No 1º ensaio, após o primeiro passe a ferramenta já encontrava sua aresta de corte danificada, necessitando reafiação. Os dados obtidos durante o 1º ensaio estão descritos na Tabela 8. A possível causa da falha acontecer rapidamente está ligada ao aumento de temperatura excessivo provocado pela alta rotação e velocidade média de corte aplicada pois conforme pode ser visto na Tabela 9 a velocidade de corte utilizada no 1º ensaio está acima do especificado para o aço 1045. A Figura 22 mostra o aspecto queimado da aresta de corte após o passe.

	Barra de 370 mm
Diâmetro final da peça [mm]	34,50
Velocidade de corte final [m/min]	68,28
Velocidade de corte média [m/min]	69,17
Número de passes até reafiação	1
Tempo de corte por passe [min]	2
Tempo total de corte até reafiação [min]	2

Tabela 8 - Dados obtidos no 1º ensaio (PRÓPRIO AUTOR, 2023).

MATERIAIS	FERRAMENTAS DE AÇO RÁPIDO			FERRAMENTAS DE METAL DURO	
	DESBASTE	ACABAMENTO	ROSCAR E RECARILHAR	DESBASTE	ACABAMENTO
AÇO 1020	25	30	10	200	300
AÇO 1045	20	25	8	120	160
AÇO DURO (1060)	15	20	6	40	60
FERRO FUNDIDO MALEÁVEL	20	25	8	70	85
FERRO FUNDIDO GRIS	15	20	8	65	95
FERRO FUNDIDO DURO	10	15	6	30	50
BRONZE	30	40	10-25	300	380
LATÃO E COBRE	40	50	10-25	350	400
ALUMÍNIO	60	90	15-35	500	700

Tabela 9 - Velocidade de corte para torneamento (<http://www.acjusinagem.com.br/>).

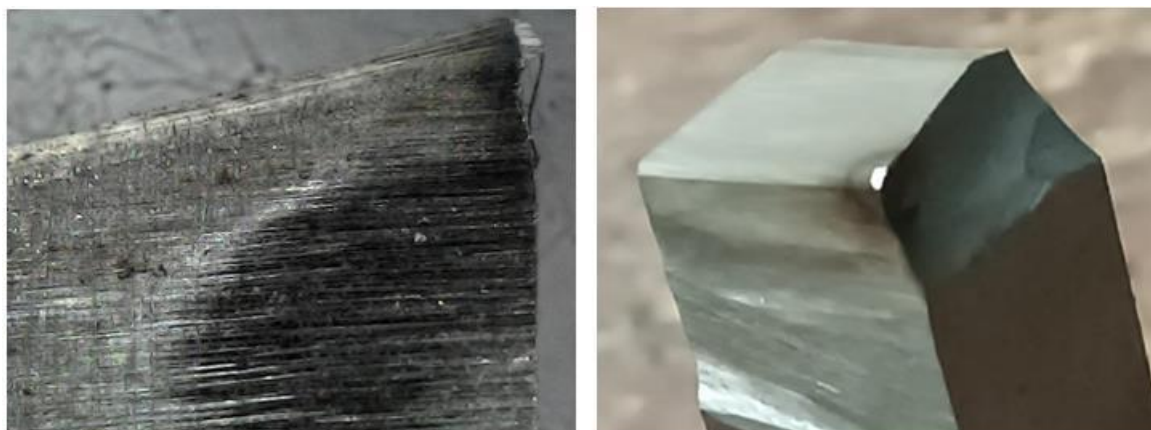


Figura 22 - Aresta de corte da ferramenta de aço rápido após 1º ensaio (PRÓPRIO AUTOR, 2023).

4.2 DADOS ENCONTRADOS NO 2º ENSAIO

Foram realizados 24 passes na barra de 370 mm e mais 23 passes na barra de 430 mm, ambos a 400 rpm, quando a ferramenta então precisou ser reafiada devido a uma quebra em sua aresta de corte conforme Figura 23. Logo após a quebra da ferramenta o cavaco mudou sua forma, ficando mais longo e menos queimado conforme a Figura 24, isso se deu pelo fato da quebra da ferramenta ter formado uma lasca, reafiando a ferramenta temporariamente. Os dados obtidos durante o 2º ensaio estão descritos na Tabela 10.

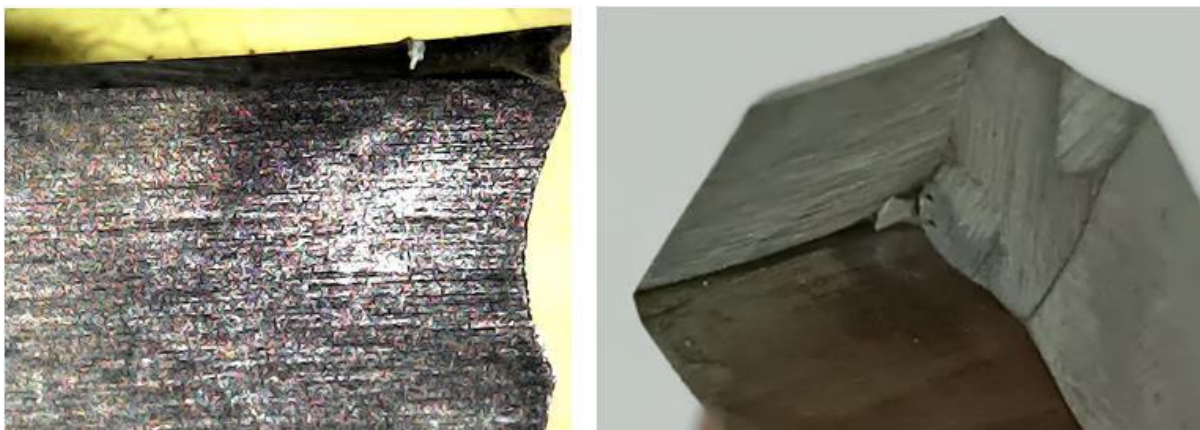


Figura 23 - Aresta de corte da ferramenta após a quebra da lasca no 2º ensaio (PRÓPRIO AUTOR, 2023).



Figura 24 - Cavaco antes e depois da quebra da ferramenta (PRÓPRIO AUTOR, 2023).

	Barra de 370 mm	Barra de 430 mm
Diâmetro final da peça [mm]	10,70	11,60
Velocidade de corte final [m/min]	13,45	14,58
Velocidade de corte média [m/min]	28,40	28,78
Número de passes até reafiação	24	23
Tempo de corte por passe [min]	3,17	3,68
Tempo total de corte até reafiação [min]	76,08	84,64

Tabela 10 - Dados obtidos no 2º ensaio (FEITO PELO PRÓPRIO AUTOR, 2023).

Com os dados medidos e obtidos no 2º ensaio foi calculada a média da velocidade de corte média das duas barras e somado o tempo total de corte de cada uma delas conforme descrito na Tabela 11.

	Barra de 370 mm	Barra de 430 mm	Total/Soma
Velocidade de corte média [m/min]	28,40	28,78	28,59
Tempo total de corte até reafiação [min]	76,08	84,64	160,72

Tabela 11 - Aproximação do 2º ensaio para as duas barras utilizadas (FEITO PELO PRÓPRIO AUTOR, 2023).

4.3 CURVA DE VIDA DA FERRAMENTA

Com os valores de tempo total de corte da ferramenta até a reafiação encontrados nos ensaios, ou seja, o tempo de vida da ferramenta para cada uma das velocidades de corte consideradas, consegue-se obter os coeficientes de Taylor conforme Equação 6, resolvendo o seguinte sistema:

$$\begin{aligned} 2 &= K \cdot 69,17^{-x} \\ 160,72 &= K \cdot 28,59^{-x} \end{aligned} \quad (34)$$

Para facilitar a resolução do problema, conforme Equação 7, o sistema também pode ser representado da forma apresentada abaixo:

$$\begin{aligned} 69,17 \cdot 2^y &= C \\ 28,59 \cdot 160,72^y &= C \end{aligned} \quad (35)$$

Aplicando ln em ambos os lados das equações os valores de y e C encontrados foram:

y	0,201
C	79,435

Tabela 12 - Parâmetros y e C da equação de Taylor (PRÓPRIO AUTOR, 2023).

Segundo a Tabela 13, verifica-se que o valor médio de y para usinagem de aço com aço rápido está compreendido entre os limites 0,125 e 0,254. Dessa forma o valor de 0,201 encontrado através dos ensaios está coerente e dentro dos limites já encontrados na literatura.

USINAGEM DE AÇO COM AÇO RÁPIDO	
<i>Fonte de referência</i>	<i>y médio</i>
Curtiss Wright Corp. (Tabela X.3)	0,15
ASTME — Tool Engineers Handbook (Tabela X.5)	0,15
ASME — Manual on Cutting of Metals (Tabela X.13)	0,125
Kienzle (Tabela X.6)	0,254
AWF 158 (Tabela X.14)	0,25

Tabela 13 - Parâmetro y médio para usinagem de aço com aço rápido (FERRARESI, 1970).

Para encontrar as condições econômicas de usinagem, os valores de x e K foram calculados a partir das correlações descritas na Equação 36 abaixo.

$$x = \frac{1}{y} \quad (36)$$

$$K = C^y$$

Os valores de x e K encontrados foram:

x	4,975
K	$2,83 \times 10^9$

Tabela 14 - Parâmetros x e K da equação de Taylor (PRÓPRIO AUTOR, 2023).

A partir dos valores dos coeficientes de Taylor, é possível plotar a curva de vida da ferramenta até sua reafiação conforme Figura 25, evidenciando os pontos do gráfico utilizados para calcular os parâmetros x e K .

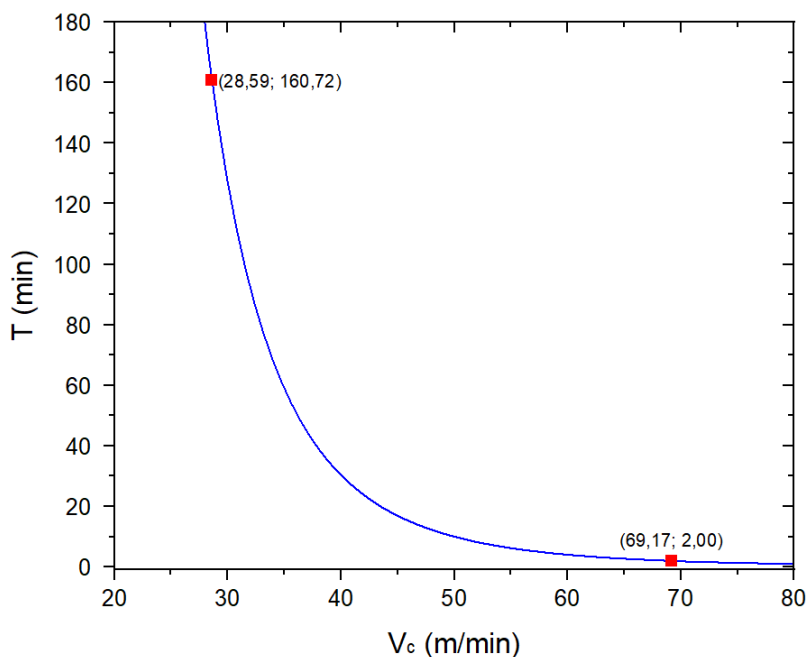


Figura 25 - Curva de vida da ferramenta de aço rápido até sua reafiação (FEITO PELO PRÓPRIO AUTOR, 2023).

Segundo Ferraresi (1970), a variação da vida da ferramenta com a velocidade de corte é bem mais sensível para aço rápido do que para metal duro. Isto se torna evidente ao comparar o gráfico da Figura 25 com o gráfico da Figura 26 onde foram realizados ensaios com pastilha de metal duro.

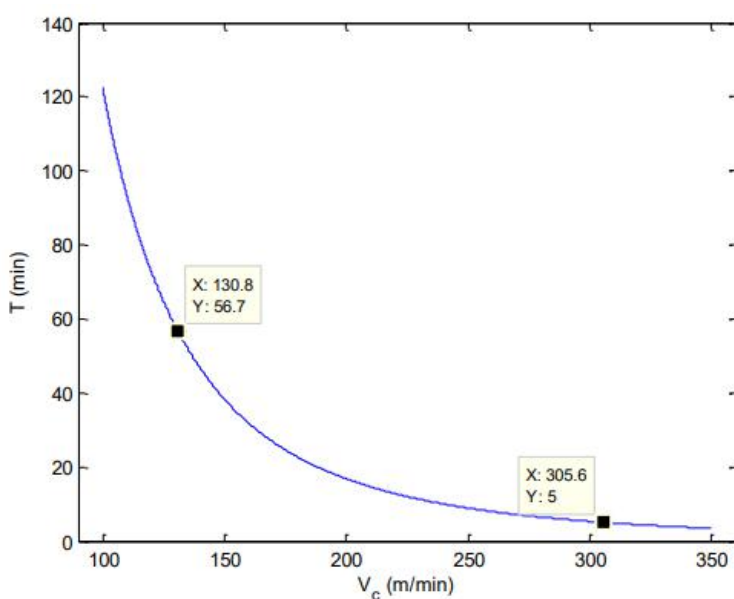


Figura 26 – Curva de vida da ferramenta de metal duro para o desgaste ($K_T = 0,132$ mm) (RODRIGUES, BATISTA, SILVA, 2017).

O parâmetro x que representa o coeficiente angular da reta obtido para o experimento com metal duro foi 2,861, menor do que 4,975 encontrado para o aço rápido. Evidenciando assim que a taxa de variação do tempo de vida em relação a velocidade é maior no segundo caso.

Com os valores de x e K encontrados e a curva de vida da ferramenta plotada, consegue-se realizar a análise das condições econômicas de corte para o par ferramenta-peça estudado. Dessa forma, conseguimos verificar se a usinagem realizada se encontra dentro da faixa de máxima eficiência.

4.4 VELOCIDADE DE CORTE DE MÁXIMA PRODUÇÃO

Utilizando a Equação 21 e considerando o tempo de troca da ferramenta (t_{ft}) como 2 minutos (MAIA, 2012) obtêm-se:

$$T_{m_{xp}} = (4,975 - 1) \cdot 2 = 7,95 \text{ min} \quad (35)$$

Substituindo o resultado encontrado acima na Equação 20, têm-se:

$$V_{cm_{xp}} = \sqrt[4,975]{\frac{2,83 \times 10^9}{7,95}} = 52,34 \text{ m/min} \quad (36)$$

4.5 VELOCIDADE ECONÔMICA DE CORTE

Utilizando a Equação 32, considerando os valores de $(Sh + Sm) = 34,10$ retirados de Maia (2012) e o custo da ferramenta por reafiação (K_{ft}) como 5,2 reais (SOARES, 2009). Obtêm-se:

$$T_0 = \frac{60 \cdot (4,975 - 1) \cdot 5,2}{34,10} + (4,975 - 1) \cdot 2 = 44,31 \text{ min} \quad (37)$$

Substituindo o resultado encontrado acima na equação da velocidade econômica de corte (equação 31), têm-se:

$$V_0 = \sqrt[4,975]{\frac{2,83 \times 10^9}{44,31}} = 37,06 \text{ m/min} \quad (38)$$

4.6 INTERVALO DE MÁXIMA EFICIÊNCIA

Com a velocidade de corte de máxima produção e a velocidade econômica de corte já calculadas, pode-se definir o intervalo de máxima eficiência conforme mostrado na Figura 27.

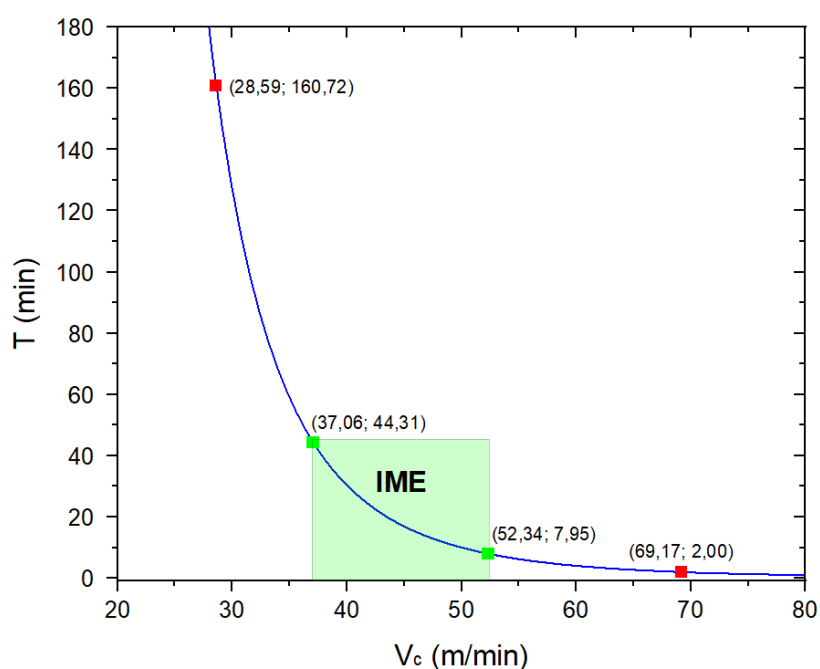


Figura 27 - Intervalo de máxima eficiência (FEITO PELO PRÓPRIO AUTOR, 2023).

A partir do gráfico da Figura 27, torna-se evidente que as velocidades utilizadas durante o experimento não se encontram na faixa de máxima eficiência, indicando que não devem ser utilizadas como padrão para uma produção em massa.

Portanto, a usinagem deve ser realizada dentro do intervalo de máxima eficiência com o objetivo de obter uma melhor relação entre custo e produtividade. Uma outra alternativa é realizar a usinagem em torno da velocidade de máxima produção, conforme Diniz (2006). Os dados utilizados para o cálculo dessa velocidade são mais precisos e de mais fácil obtenção que os relacionados aos custos de operação da máquina-ferramenta.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho mostrou-se bastante interessante por permitir a obtenção de dados reais a partir da usinagem do corpo de prova utilizado.

O IME foi determinado, sendo a velocidade de corte de mínimo custo de 37,06 m/min e a velocidade de corte de máxima produção de 52,34 m/min. Entretanto, a velocidade de corte utilizada no segundo ensaio (28,59 m/min) encontra-se abaixo do mínimo no IME, o que leva a crer que a usinagem realizada neste ensaio resultaria em um custo de produção elevado para um tempo de produção já elevado (aproximadamente 160 minutos).

Se a usinagem fosse realizada com a velocidade de corte de mínimo custo, o tempo de produção até a o fim da vida da ferramenta seria de aproximadamente 44 minutos, ou seja, um aumento da velocidade de corte de 29,6% reduz o tempo de produção em 72,5%, levando o custo para o mínimo possível.

Com relação a velocidade de corte de máxima produção com um aumento de 32,1% da velocidade (52,34 para 69,17 m/min), há uma redução de 74,8% no tempo de produção (7,95 min para 2 min).

Conclui-se que o tempo de produção e conseqüentemente o custo de produção para usinagem com ferramenta de aço rápido são bastante sensíveis à variação da velocidade de corte. Dessa forma, um estudo detalhado das condições econômicas de usinagem pode resultar em uma economia significativa da produção assim como um aumento na taxa de produção, fatores que podem ser determinantes na disputa pelo mercado.

6 TRABALHOS FUTUROS

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

- A repetição do processo em torno automático, para maior precisão da velocidade de corte.
- A repetição do processo mantendo a velocidade de corte constante e variando o avanço para estudar sua influência no tempo de vida da ferramenta.
- A repetição do processo mantendo a velocidade de corte constante e variando a profundidade de corte para estudar sua influência no tempo de vida da ferramenta.
- A repetição do processo utilizando aço rápido revestido com o objetivo de avaliar o quanto o revestimento aumenta a vida do aço rápido.

- A repetição do processo utilizando fluido de corte com o objetivo de avaliar o quanto o fluido de corte aumenta a vida da ferramenta.

REFERÊNCIAS

- DEARNLEY, P.A.; TRENT, E.M. “Wear Mechanisms of Coated Carbide Tools”, *Metal Technology*, vol. 9, feb., 1982, pp. 60-75.
- DENG, J., & Chen, X. (2017). Influência dos parâmetros de corte no desgaste da ferramenta e na rugosidade superficial no torneamento do aço inoxidável AISI 316L. *Materials Research Express*, 4(1), 015029.
- DINIZ, A. E; MARCONDES, F. C; COPPINI, N. L. *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*. 5º ed. São Paulo: Art Líber Ltda, 2006. 255 p.
- FERRARESI, D. *Fundamentos da Usinagem dos Metais*. 12 ed. São Paulo: Edgard Blucher. 1970. 751 p.
- GROOVER, MIKELL P. *Introdução aos Processos de Fabricação*. Rio de Janeiro, 1ª Ed. LTC, 2014
- HINSHAW, Eric S. *Machining Fundamentals*. 9. ed. Delmar Cengage Learning, 2018.
- LUZ, Gelson. Aço SAE 1045 Propriedades Mecânicas e Composição Química. Blog *Materiais*, [s. l], 2017. Disponível em: <https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/aco-sae-1045-propriedades-mecanicas.html>. Acesso em: 20 de Junho de 2023.
- MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. *Teoria da usinagem dos materiais*. São Paulo, Blucher, 2004.
- MAIA, N. A. D. Estudo de caso: formulação de custo de um produto de usinagem em uma pequena empresa. Trabalho de conclusão de curso (bacharelado - Engenharia de Produção Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2012
- PASTOR, H., 1987, “Present Status and development of Tool Materials: Part 1 Cutting Tools”, *International Journal of Refractory and Metals*, vol. 6, nº 4, December, pp 196 - 209.
- SHAW, M.C.; DEWES, R.C. *Machining Technology: Machine Tools and Operations*. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2016.
- SOUZA, André João de. *Processos de fabricação por usinagem – Parte 1*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011, 89p
- WANG, D., Li, D., Li, G., & Yang, X. (2020). Efeito dos parâmetros de corte no desgaste da ferramenta no torneamento da liga de titânio Ti-6Al-4V. *O Jornal Internacional de Tecnologia de Manufatura Avançada*, 107(1-2), 431-441.
- SOARES, E. Y. F. Análise econômica da usinagem de aço automotivo DIN 100Cr6. Trabalho de conclusão de curso. (bacharelado – Engenharia Mecânica) – Universidade de São Paulo Escola Politécnica Departamento de Engenharia Mecânica, 2009
- RODRIGUES, G.; BATISTA, R.; SILVA, W. Estudo experimental das condições econômicas de usinagem no torneamento cilíndrico externo. 15 abr. 2017.

<https://adesferramentas.com.br/bits-e-bedames/>

<https://acosnobre.com.br/blog/aco-m2>

http://www.acusinagem.com.br/tabelas/vel_corte_torno.pdf

<https://www.ftdb.com.br/metal-duro-revestido>

<https://www.materiais.gelsonluz.com/2017/10/aco-sae-1045-propriedades-mecanicas.html>