

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

BARBARA BRANDINI SOUZA

**Análise de produtividade a partir da variação de parâmetros de corte na
operação de torneamento**

São Carlos

2018

BARBARA BRANDINI SOUZA

**Análise de produtividade a partir da variação de parâmetros de corte na
operação de torneamento**

Monografia apresentada à Escola de
Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo, para
obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Alessandro
Roger Rodrigues

São Carlos

2018

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da
EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

818a Brandini Souza, Barbara
Análise de produtividade a partir da variação de
parâmetros de corte na operação de torneamento /
Barbara Brandini Souza; orientador Alessandro Roger
Rodrigues; coorientador Marcelo Bertolete Carneiro. São
Carlos, 2018.

Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) --
Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de
São Paulo, 2018.

1. Torno vertical. 2. Produtividade. 3. Parâmetros
de corte. I. Título.

FOLHA DE AVALIAÇÃO

Candidata: Barbara Brandini Souza

Título: Análise de Produtividade a partir da Variação de Parâmetros de Corte na Operação de Torneamento

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Escola de Engenharia de São Carlos da
Universidade de São Paulo,
Curso de Engenharia Mecânica.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Alessandro Roger Rodrigues (USP-São Carlos)
(Orientador)

Nota atribuída: 10,0 (DEZ)

(assinatura)

Prof. Dr. Marcelo Bertoletti Carneiro (UFES)

Nota atribuída: 9,5 (NOVE E MEIO)

(assinatura)

Prof. Dr. Ricardo Arai (IFSP-São Carlos)

Nota atribuída: 9,0 (NOVE)

(assinatura)

Média: 9,5 (NOVE E MEIO)

Resultado: Aprovada

Data: 10/12/2018

Este trabalho tem condições de ser hospedado no Portal Digital da Biblioteca da EESC

SIM ☒ NÃO ☐ Visto do orientador

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Marcelo Bertolete Carneiro pela orientação, suporte e incentivos, mesmo após sua saída da Escola de Engenharia de São Carlos. Ao prof. Dr. Alessandro Roger Rodrigues por aceitar a orientação na sua etapa final, auxiliando também com as questões burocráticas.

À Universidade, por proporcionar tantas oportunidades em meus estudos, ao corpo docente, pelas orientações sempre que foi preciso durante o curso, e aos funcionários, por todo o auxílio prestado.

Aos funcionários Mateus Oliveira, Leandro Santos e Leandro Tófolo pelo auxílio durante a realização dos experimentos e pelos conhecimentos passados.

Aos meus pais por todo apoio e incentivo em minha educação durante todos esses anos.

A todos os meus amigos que diretamente ou indiretamente contribuíram para o meu conhecimento e para minhas experiências profissionais.

RESUMO

SOUZA, B.B. **Análise de produtividade a partir da variação de parâmetros de corte na operação de torneamento**. 2018. 44 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, 2018.

Dado a importância da fabricação mecânica no contexto industrial, a produtividade se torna um fator determinante para se manter competitivo no mercado. Por isso, o objetivo do presente trabalho é estudar a influência de dois parâmetros de usinagem (velocidade de corte e avanço) em um torno vertical de uma indústria de autopeças, visando encontrar o ponto de maior produção. Para tal, foi usinada uma peça, feita de um aço de baixa liga que se aproxima do SAE 4125, cuja origem é laminação, forjamento e normalização, e após a usinagem se torna uma polia. Foram analisadas duas etapas, o desbaste externo que utiliza uma pastilha com o formato trigon e a usinagem de um canal feito por um bedame. Com relação aos ensaios, optou-se pelo planejamento fatorial 3^2 , resultando em 9 diferentes testes executados durante 30 min. A variável de saída mais importante avaliada foi o número de peças fabricadas. Apenas a variável f (avanço) linear foi significativa sobre a resposta, dado que seu nível de significância foi menor que 0,10. A partir dos dados coletados, foi gerada uma parábola, em que foi possível encontrar o ponto de máxima, ou seja, as condições de maior produção, resultando em 14,58 peças. A análise englobou também o desgaste de flanco médio (VB_B) das ferramentas, entretanto, não foi possível identificar influência significativa dos parâmetros de corte sobre a resposta VB_B , visto que o curto tempo de usinagem não permitiu um desgaste considerável para a análise. No que se refere ao acabamento, os ensaios de 1 a 5 mantiveram bons acabamentos, todavia, os ensaios de 6 a 9 tiveram acabamentos prejudicados pela vibração causada pelas altas condições de corte, principalmente, o avanço.

Palavras-chave: Torno vertical. Produtividade. Parâmetros de corte.

ABSTRACT

SOUZA, B.B. Productive analysis from the variation of cutting parameters in the turning operation. 2018. 44 p. Monograph (Final Course Assignment). São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, São Carlos, São Paulo, 2018.

Because of the importance of mechanical manufacturing in an industrial context, productivity becomes a determining factor in the market competitiveness. For this reason, the assignment's purpose is to study the influence of two cutting parameters (cutting speed and feed) in a vertical lathe of an auto parts manufacturer, to find the point of greatest production. For this purpose it was used a part made of a low-alloyed steel similar to SAE 4125 whose origin came from lamination, forging and normalization, and after cutting process it becomes a pulley. Two steps were analyzed, the rough machining that uses a trigon shape tool and the machining of a groove that uses a grooving tool. Regarding the tests, 3^2 factorial design was chosen, thus resulting in 9 different tests carried out every 30 minutes. The most important output variable was the number of parts manufactured. Just the variable f (feed) linear was significant over the solution, since the significance level was less than 0.10. Based on the collected data, a parabola was created and it was possible to find the maximum point, which corresponds to the point of greatest production, resulting in 14.58 parts. The analysis included flank wear, however, it was not possible to identify the influence of cutting parameters over the answer VB_B due to the reduced time of cutting has not been able to produce a considerable wear. In addition, finishing quality was analyzed; tests 1 to 5 kept the good quality, nevertheless tests 6 to 9 had their finish hampered by vibrations caused by severe machining conditions, especially the feed.

Keywords: Vertical lathe. Productivity. Machining conditions.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Consumo mundial de máquinas-ferramenta em 1996	12
Figura 2 – Porcentagem de tempo de máquina e do número de operações de cada processo	14
Figura 3 – Torneamento. (a) Retilíneo; (b) Curvilíneo	14
Figura 4 – Fresamento. (a) Definição; (b) Tangencial; (c) Frontal	15
Figura 5 – Tipos de furação	16
Figura 6 – Torneamento Cilíndrico	16
Figura 7 – Torneamento radial	17
Figura 8 – Movimentos de corte, velocidades de corte e plano de trabalho	18
Figura 9 – Grandezas de corte: (a) Avanço; (b) profundidade de corte	19
Figura 10 – Torno Vertical	20
Figura 11 – Formas de desgaste: Cratera (A); Flanco (B); Entalhe (C e D)	21
Figura 12 – Sistema operando com entradas e produzindo respostas	22
Figura 13 – Formato da peça	26
Figura 14 – Ferramentas: (a) WNMG 080412-M6(F1); (b) TGMF 508 (F2)	27
Figura 15 – Croqui do torno vertical ROMI EMAG	28
Figura 16 – Configuração do torno vertical	28
Figura 17 – Em azul, perfil de usinagem das ferramentas: (a) F1; (b) F2.	29
Figura 18 – Gráfico de efeito para a variável f	32
Figura 19 – Gráfico de efeito para a variável v_c	33
Figura 20 – Distribuição dos resíduos	33
Figura 21 – Ajuste de dados entre valores experimentais e preditos	34
Figura 22 – Superfície de resposta ajustada para os níveis codificados	35
Figura 23 – Gráfico de contorno da superfície de resposta	36
Figura 24 – Gráfico de efeito para a variável v_c	38
Figura 25 – Gráfico de efeito para a variável f	39
Figura 26 – Desgastes de flanco médio na F1 para cada ensaio	39
Figura 27 – Desgastes de flanco médio na F2 para cada ensaio	40
Figura 28 – Relação do desgaste de flanco médio da F1 e do número de peças fabricadas em função dos testes executados	41
Figura 29 – Acabamentos prejudicados pelas altas condições de usinagem	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Matriz de planejamento codificada 3^2	23
Tabela 2 – Composição do aço SAE 4125	26
Tabela 3 – Planejamento 3^2 para F1	30
Tabela 4 – Planejamento 3^2 para F2	30
Tabela 5 – Resultado do número de peças produzidas	31
Tabela 6 – Análise de significância e efeito para o planejamento 3^2	31
Tabela 7 – Valores codificados e decodificados no ponto ótimo	36
Tabela 8 – Desgaste de flanco médio para a ferramenta F1	37
Tabela 9 – Análise de significância e efeito para o desgaste de flanco médio (VB_B)	37

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1. Objetivo	11
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1. Processo de Fabricação de Usinagem	12
2.1.1. Operações de usinagem	13
2.1.1.1. <i>Torneamento</i>	16
2.1.2. Torno vertical	19
2.1.3. Formas de desgaste	20
2.2. Planejamento Fatorial	22
3. METODOLOGIA	25
3.1. Materiais	25
3.2. Método	27
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
5. CONCLUSÃO	43
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

1. INTRODUÇÃO

A indústria de fabricação proporciona o fortalecimento da economia e o aumento da qualidade de vida para a população em países desenvolvidos. A contribuição dos processos de fabricação no PIB de países industrializados é cerca de 15% a 35% (GROOVER, 2010). Na manufatura industrial, a usinagem é um dos processos de fabricação mais utilizados, por garantir elevada precisão, ser rápida e versátil, além de utilizar ferramental relativamente simples e padronizado (CHILDS et al., 2010). Segundo Trent e Wright (2000), ela está presente nos segmentos mais relevantes da indústria de transformação, tais como, automobilística, naval, aeroespacial, de eletrodomésticos entre outras. Das operações de usinagem, pode-se destacar o torneamento como a principal em termos de tempo de uso de máquinas (TÖNSHOF et al., 1994).

Devido à importância da fabricação para o mercado atual, a competitividade entre as empresas é intensa, principalmente no setor de autopeças, cujo faturamento em 2017, segundo o Sindicato Nacional da Indústria de Componentes para Veículos Automotores (Sindipeças), foi cerca de R\$ 86,6 bilhões (SINDIPEÇAS, 2018). Por isso, se torna necessário ter uma alta produtividade, para que o produto chegue ao cliente na data estipulada, com qualidade e com um preço competitivo. Segundo Machado et al. (2015), em usinagem a produtividade se relaciona principalmente ao material da peça, material da ferramenta de corte, máquina-ferramenta, fluido de corte e aos parâmetros de corte, sendo este, o objeto de estudo do presente trabalho.

Para se ter aumento de produtividade, considerando apenas a operação de torneamento, deve-se aumentar os valores dos parâmetros de corte, velocidade de corte (v_c), avanço (f) e profundidade (a_p), para se ter aumento da taxa de remoção de material. Todavia, ao aumentá-los haverá também a tendência de aumentar o desgaste e a troca de ferramentas (DINIZ et al., 2014; MACHADO et al.; 2015).

Uma forma de estudar a influência dos parâmetros de corte sobre o processo é através do planejamento de experimentos, baseados em princípios estatísticos. Eles são úteis para avaliar a produtividade, pois permitem extrair do sistema em estudo (parâmetros x resposta), o máximo de informação com um número mínimo de experimentos (NETO et al., 2001).

1.1 Objetivo

O presente trabalho visa o estudo de produtividade em uma operação de torneamento de uma polia, em uma empresa do setor autopeças, por meio da análise experimental de diferentes valores para dois parâmetros de usinagem: velocidade de corte e avanço.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

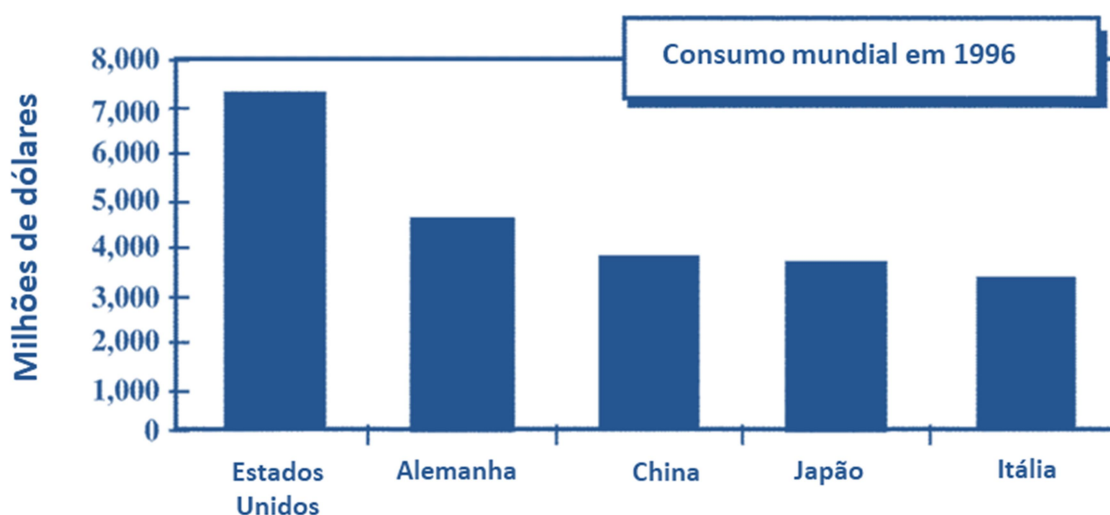
Esta revisão bibliográfica aborda processos de fabricação, principalmente a usinagem por torneamento em um torno vertical. Também são abordadas as formas de desgaste da ferramenta e planejamento fatorial para execução de experimentos.

2.1 Processo de Fabricação de Usinagem

De acordo com Ferraresi (1995), usinagem é um processo de fabricação cujas operações conferem à peça a forma, as dimensões ou o acabamento através da produção de cavaco. Por sua vez, cavaco é definido como uma porção de material da peça, retirada pela ferramenta, caracterizando-se por apresentar forma geométrica irregular.

Os processos de fabricação demonstram sua importância econômica e social na contribuição com cerca de 15% (EUA) a 35% (China) do PIB em países industrializados (GROOVER, 2010), servindo de indicativo referente à qualidade de vida da população (KALPAKJIAN, 1995) e empregando dezenas de milhares de pessoas (TRENT; WRIGHT, 2000). Ainda, pode-se relacionar a sua relevância ao consumo mundial de máquinas-ferramentas, envolvendo de \$35 a \$40 bilhões/ano, como visto na Figura 1 (TRENT; WRIGHT, 2000).

Figura 1 – Consumo mundial de máquinas-ferramenta em 1996



Fonte: Trent; Wright (2000)

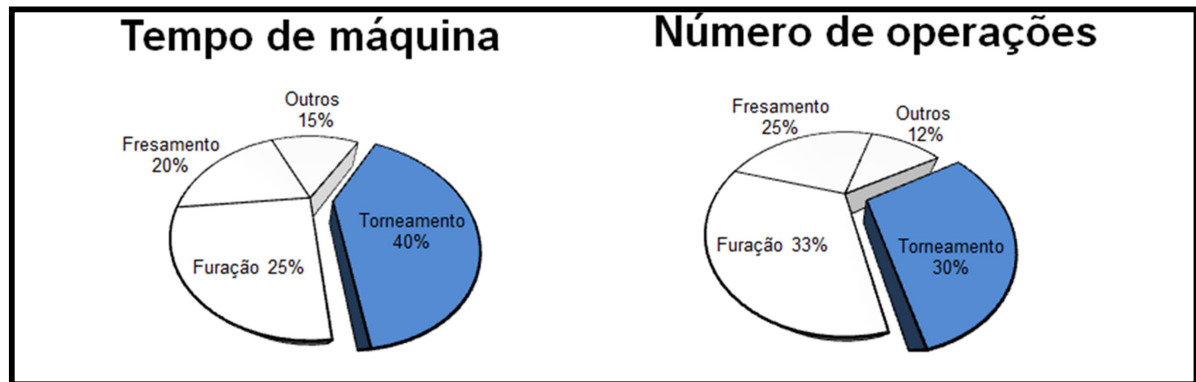
A usinagem é um dos processos de fabricação mais utilizados na manufatura industrial. Está presente, por exemplo, nas indústrias automobilística, naval, aeroespacial e de eletrônicos. As razões para a larga utilização são diversas, como a versatilidade e a capacidade de atingir elevada precisão. Essa versatilidade torna a fabricação seriada mais rápida e simples, uma vez que é possível utilizar ferramentas padrões ao invés de moldes específicos (CHILDS et al., 2010). A usinagem, quando comparada com a conformação, possui certas vantagens, como melhor acabamento, melhor precisão, e menor custo para produção seriada. Entretanto, caso a peça possua geometria com certa complexidade ou muito material a ser retirado pela usinagem, outros processos de fabricação devem ser considerados, como a conformação, fundição, entre outros, para tornar a fabricação economicamente viável. (AGOSTINHO, 2004).

Além disso, a competição presente no mercado estimula a produtividade para manter e/ou conquistar novos consumidores, sendo assim, para alcançar essa maior produtividade, há o avanço nas tecnologias de máquinas, nos sistemas de gerenciamento da manufatura e na tecnologia dos materiais (CHILDS et al., 2010).

2.1.1 Operações de usinagem

De acordo com Tönshof et al. (1994), as principais operações de usinagem são furação, torneamento e fresamento. Como mostrado na Figura 2, o torneamento é a principal operação em termos de tempo de uso de máquina, representando 40% do tempo gasto, enquanto a furação e o fresamento correspondem a 25 e 20%, respectivamente. Já em termos de número ou frequência de uso, a operação de torneamento é a segunda maior (30%), enquanto a furação é a primeira com 33% e o fresamento é o terceiro com 25%.

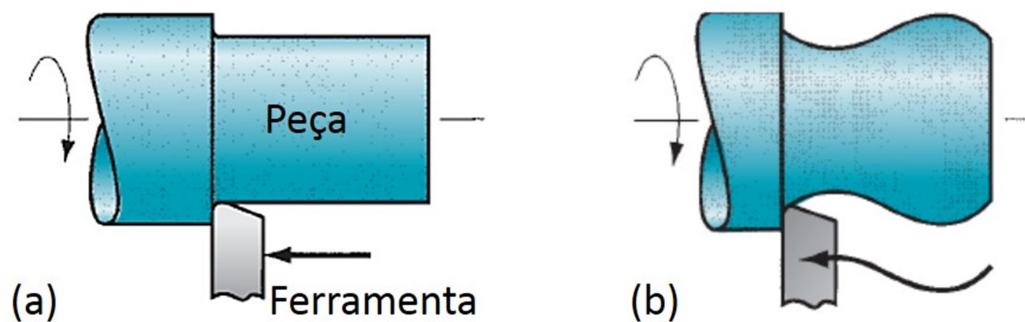
Figura 2 – Porcentagem de tempo de máquina e do número de operações de cada processo



Fonte: Adaptado de TÖNSHOF et al. (1994)

O torneamento, segundo Ferraresi (1995), é uma operação mecânica de usinagem que visa à obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes, ou seja, aquela que possui apenas uma superfície de saída. Para tanto, a peça gira em torno do seu eixo principal de rotação e a ferramenta se desloca segundo uma trajetória coplanar ao eixo citado, como se observa na Figura 3. Ainda, o torneamento pode ser categorizado quanto a sua trajetória em retilínea ou curvilínea.

Figura 3 – Torneamento. (a) Retilíneo; (b) Curvilíneo

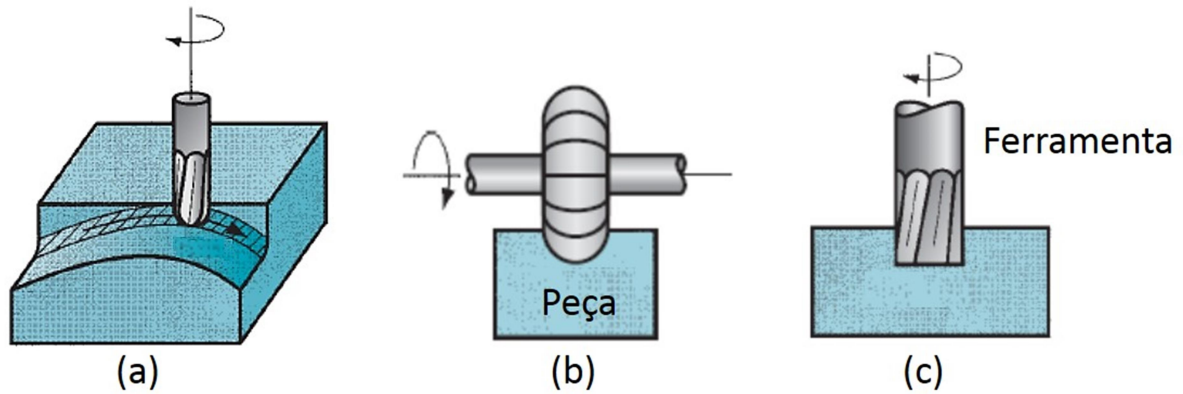


Fonte: Adaptado de GROOVER (2010)

O fresamento, de acordo com Ferraresi (1995), é uma operação mecânica de usinagem que visa à obtenção de superfícies quaisquer com o auxílio de ferramentas geralmente multicortantes. Para tal, a ferramenta gira e a peça ou a ferramenta se deslocam segundo uma trajetória qualquer. Esta operação pode ser dividida em Fresamento cilíndrico tangencial e Fresamento frontal, cuja diferença é a orientação do eixo de rotação da ferramenta em relação à superfície plana a ser

obtida, sendo essa paralela no tangencial e perpendicular no frontal, como pode ser observado na Figura 4.

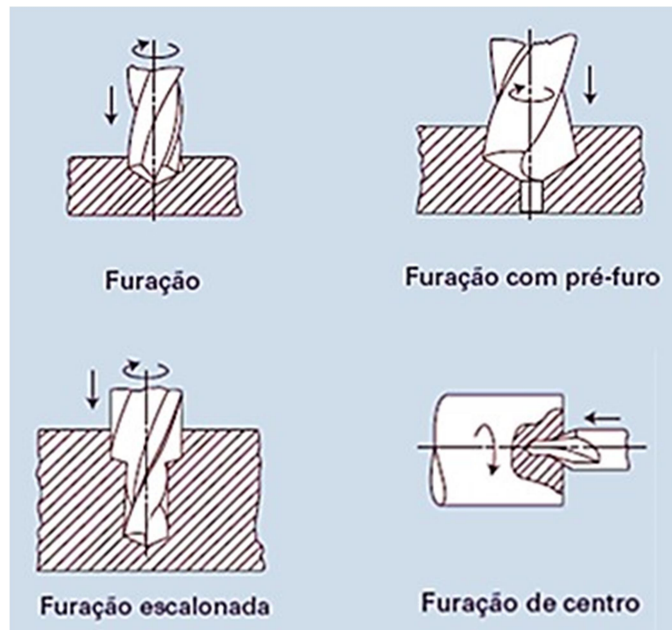
Figura 4 – Fresamento. (a) Definição; (b) Tangencial; (c) Frontal



Fonte: Adaptado de GROOVER (2010)

A furação, segundo Ferraresi (1995), trata-se de uma operação mecânica de usinagem que visa à obtenção de um furo cilíndrico em uma peça através de uma ferramenta multicortante. Para tanto, a ferramenta ou a peça giram, e simultaneamente a ferramenta ou a peça se deslocam segundo uma trajetória retilínea, coincidente ou paralela ao eixo principal da máquina. Esta operação pode ser dividida em furação em cheio, com pré-furo, escalonada, de centros, entre outras, como demonstrado na Figura 5.

Figura 5 – Tipos de furação



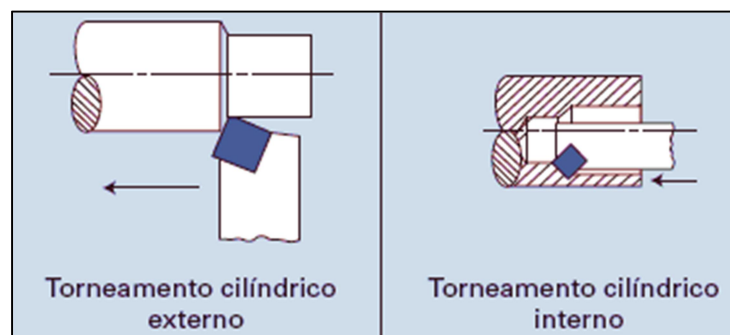
Fonte: Adaptado de MACHADO et al. (2015).

2.1.1.1 Torneamento

O estudo desta monografia se desenvolveu em uma empresa que fabrica autopeças. Embora a origem dessas peças seja o forjamento de barras de aço, o acabamento é feito pelo processo de usinagem através de operações de torneamento. Dessa forma, torna-se necessário defini-las de acordo com Ferraresi (1995):

- Torneamento cilíndrico é a operação na qual a ferramenta se desloca paralelamente ao eixo principal de rotação da máquina. Podendo ser externo ou interno, como ilustrado na Figura 6;

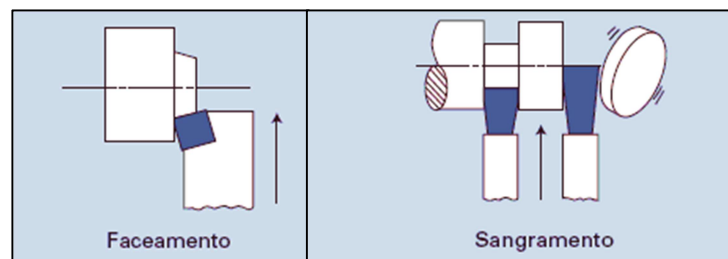
Figura 6 – Torneamento cilíndrico



Fonte: Adaptado de MACHADO et al. (2015)

- Torneamento radial é a operação na qual a ferramenta se desloca de forma retilínea e perpendicular ao eixo principal de rotação da máquina. Podemos dividir essa operação em faceamento e sangramento radial. O faceamento tem como objetivo a obtenção de uma superfície plana. O Sangramento radial visa obter um entalhe circular.

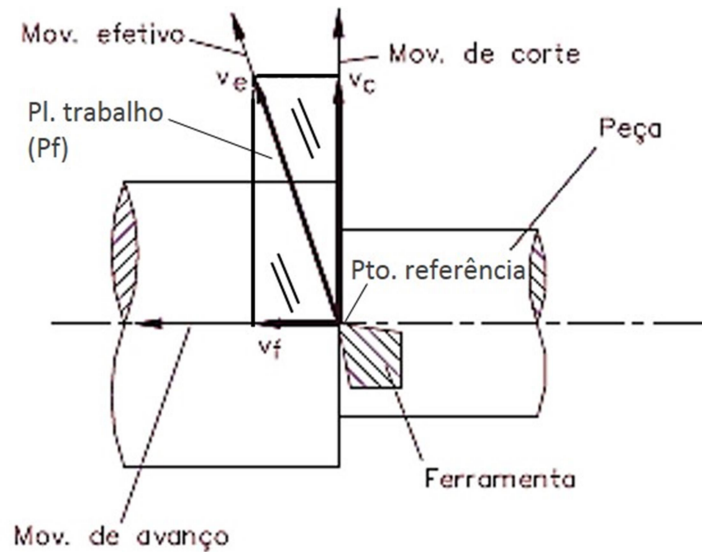
Figura 7 – Torneamento radial



Fonte: Adaptado de MACHADO et al. (2015)

Para a realização do estudo, se faz necessário entender o movimento de corte, de avanço e o efetivo. O primeiro é o movimento entre a peça e a ferramenta gerando uma única remoção de cavaco se não for combinado com o movimento de avanço. O segundo, associado ao movimento de corte, gera a retirada de cavaco de forma contínua. Alguns parâmetros podem ser alterados para a realização desses movimentos, como a velocidade de corte (v_c) e a velocidade de avanço (v_f). A velocidade de corte pode ser definida como a velocidade instantânea do ponto de referência da aresta cortante, segundo a direção e sentido de corte. A velocidade de avanço pode ser definida como a velocidade instantânea no ponto de referência na aresta de corte, segundo a direção e sentido de avanço. A resultante dessas duas velocidades é a velocidade efetiva (v_e), que representa, consequentemente, o movimento efetivo de corte. O plano de trabalho (Pf) é aquele que contém as v_c e v_f , sendo que no corte ortogonal, a realização de todos os movimentos que promovem a geração do cavaco, ocorrem no plano (MACHADO et al. 2015). A Figura 8 ilustra esses conceitos.

Figura 8 – Movimentos de corte, velocidades de corte e plano de trabalho



Fonte: Adaptado de MACHADO e da SILVA (2009)

As velocidades de corte e avanço podem ser calculadas através das Equações (1) e (2).

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

Em que,

$$v_c = \text{velocidade de corte} \left(\frac{m}{min} \right)$$

d = diâmetro da ferramenta (mm)

n = rotação da ferramenta (rpm)

$$v_f = f n \quad (2)$$

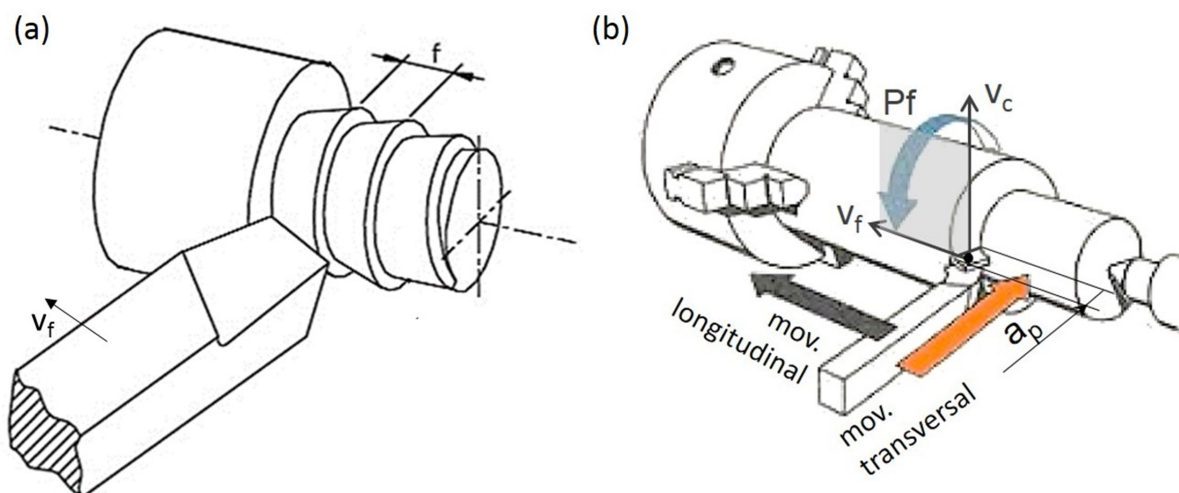
Em que,

$$f = \text{avanço} \left(\frac{mm}{volta} \right)$$

O avanço (f) é o percurso que a ferramenta avança a cada revolução. A profundidade de corte (a_p) é a profundidade ou a largura de penetração da aresta principal de corte na peça, medida numa direção perpendicular ao plano de trabalho

(Pf) (FERRARESI, 1995; MACHADO et al., 2015). Estas grandezas estão ilustradas na Figura 9.

Figura 9 – Grandezas de corte. (a) Avanço; (b) profundidade de corte



Fonte: (a) Adaptado de MACHADO e da SILVA (2009); (b) Desconhecida

2.1.2 Torno vertical

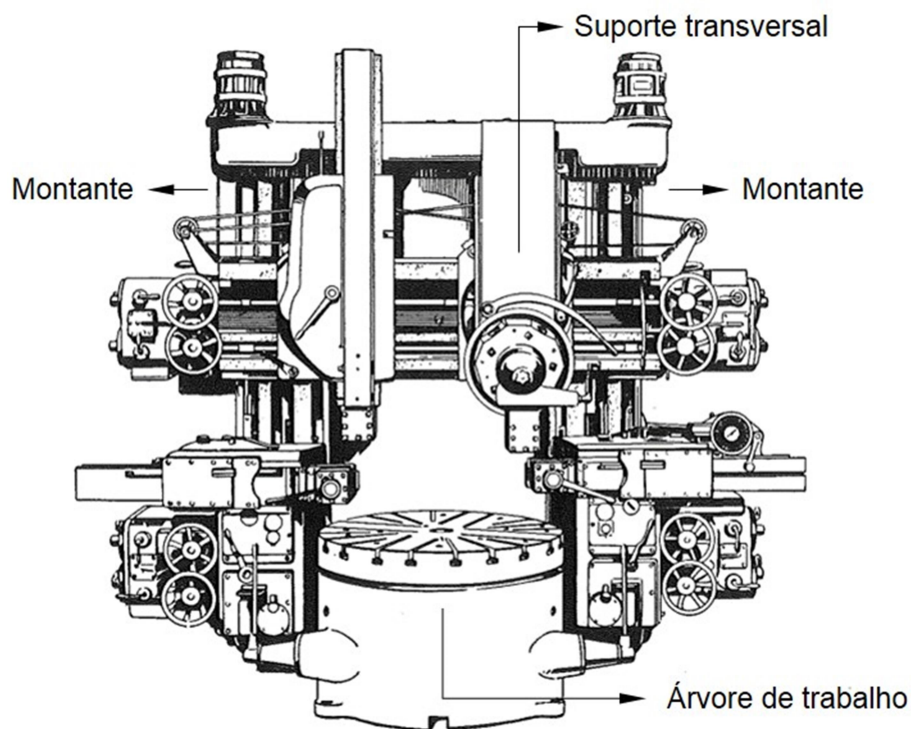
A máquina-ferramenta utilizada para a execução do estudo desta monografia é um torno vertical. Sua aplicação é voltada para a usinagem de peças grandes, como volantes, polias, rodas dentadas, etc., por ter como vantagem a comodidade da fixação, já que as peças não precisam ser cuidadosamente equilibradas antes de girar.

Os tornos verticais se diferem dos horizontais pela posição da árvore de trabalho, que no caso é vertical, e por não possuir cabeçote móvel. Com relação ao avanço, nestes tornos, é vertical e transversal, podendo ter um ou mais carros. A maior retirada de cavaco faz com que a resistência do eixo de trabalho e seus mancais sejam mais robustos, todavia o corte pode se tornar vagaroso. Além disso, a máquina é caracterizada por ter um ou dois montantes que possuem guias verticais em que o suporte transversal da ferramenta desliza. O movimento deste se deve a parafusos sem fim e engrenagens cônicas, ver Figura 10, (FREIRE, 1984).

No caso do torno deste estudo, o carro porta ferramenta encontra-se na parte inferior e não avança. Já a peça, fixada na parte superior, possui os avanços vertical e transversal. Segundo a fabricante EMAG (2018), essa concepção de equipamento

tem como vantagem a redução do tempo de deslocamento da peça, por ter um menor percurso.

Figura 10 – Torno Vertical

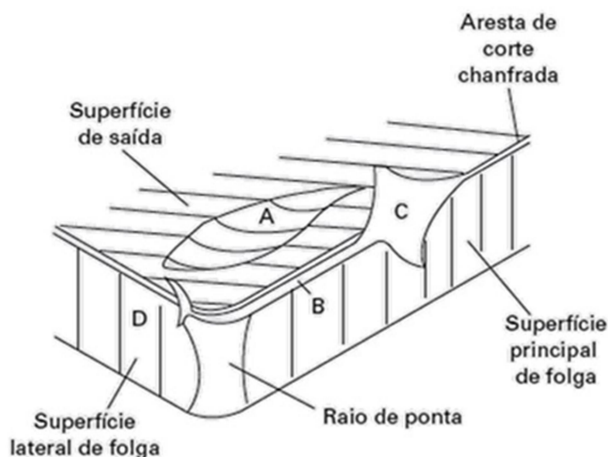


Fonte: FREIRE (1984)

2.1.3 Formas de desgaste

Pode-se definir o desgaste de uma ferramenta de corte como a mudança de sua forma original durante a usinagem, resultante da perda gradual de material (ISO 3685,1993). Há pelo menos três principais formas de desgaste: de cratera, de entalhe e de flanco, ver Figura 11 (MACHADO et al., 2015).

Figura 11 – Formas de desgaste: Cratera (A); Flanco (B); Entalhe (C e D)



Fonte: Adaptado de MACHADO et al. (2015)

O desgaste de flanco foi monitorado nas ferramentas utilizadas no presente trabalho. A Norma ISO 3685 (1993) quantifica o desgaste através dos parâmetros VB_B e $VB_{Bmáx}$, sendo o critério de vida recomendado para desgaste de flanco médio $VB_B = 0,3 \text{ mm}$ e para desgaste de flanco máximo $VB_{Bmáx} = 0,6 \text{ mm}$.

Segundo Vieregge (1970), citado por Machado et al. (2015), existem quatro mecanismos de desgaste das ferramentas de corte: adesão, abrasão, difusão e oxidação. Nas ferramentas de corte, um dos principais mecanismos associados ao desgaste de flanco é a abrasão. Segundo Hutchings (1992), neste mecanismo partículas duras podem deslocar matéria da superfície (deformação plástica) por microsulcamento, ou remover material (fratura frágil) causando microcorte ou microlascamento.

A abrasão pode ser considerada a dois corpos quando partículas emergem de uma das superfícies em movimento relativo. Em usinagem poderiam ser precipitados duros da peça ou do cavaco forçados a deslizar contra a superfície de folga e de saída da ferramenta. Quando as partículas duras estão soltas para escorregar e rolar entre as superfícies em movimento relativo, a abrasão é considerada a três corpos. Em usinagem as partículas abrasivas podem ser da própria ferramenta, contaminantes, óxidos, entre outros (HUTCHINGS, 1992; MACHADO et al., 2015).

Segundo Ferraresi (1995), a curva desgaste-velocidade de corte, que relaciona estes dois parâmetros, possui dois pontos de máximo desgaste. O primeiro se encontra na maior velocidade de corte em que é possível se ter cavaco de cisalhamento e o segundo na velocidade de transição entre o cavaco contínuo

crescente e o decrescente. Pode-se observar também que o aumento do avanço desloca os valores máximos e mínimos do desgaste para velocidades de corte mais baixas. Além disso, os valores máximos crescem com o avanço, dado que a aresta de corte postiça é afetada por esse parâmetro.

2.2 Planejamento Fatorial

Planejamento fatorial é utilizado para determinar a influência das variáveis de entrada (fatores) sobre as variáveis de resposta (número de peças; desgaste; etc.). Dessa forma, tem-se um sistema que é uma função de fatores, que influenciam as variáveis de saída (respostas), como visto na Figura 12 (BARROZO, 2005).

Figura 12 – Sistema operando com entradas e produzindo respostas



Fonte: Adaptado de NETO (2001)

No planejamento de experimento é necessário escolher fatores possíveis de se controlar pelo experimentador e que sejam de interesse para o estudo. Da mesma forma, as respostas devem ser escolhidas e monitoradas de modo a melhor retratar aquilo que se deseja estudar. Ambos podem ser qualitativos ou quantitativos (NETO et al., 2001).

Para determinar a influência das entradas na resposta, pode-se utilizar um planejamento fatorial n^k . Este é caracterizado por fatores (k) e níveis (n) em que cada fator é variado. Para o planejamento ser completo, precisa ocorrer todas as combinações possíveis dos níveis e dos fatores, sendo cada combinação um ensaio

experimental. No presente trabalho, foi utilizado o planejamento 3^K , em que o número de fatores (k) foram 2, e o número de níveis (n) foram 3 (BARROZO, 2005).

A matriz de planejamento é a lista dessas combinações e pode ser vista na Tabela 1. Nela, pode-se observar que os níveis estão identificados como superior (+1), intermediário (0) e inferior (-1), e estão combinados com os fatores, formando 9 experimentos.

Tabela 1 – Matriz de planejamento codificada 3^2

Ensaio	Fator 1	Fator 2
1	-1	-1
2	-1	0
3	-1	+1
4	0	-1
5	0	0
6	0	+1
7	+1	-1
8	+1	0
9	+1	+1

Fonte: Autor

A decodificação dos níveis para a escala original pode ser feita a partir da Equação (3).

$$n = \frac{\xi - \xi(0)}{\frac{(\xi(+1) - \xi(-1))}{2}} \quad (3)$$

Em que,

n : é o código de interesse

ξ : é o valor na escala original referente ao código de interesse

$\xi(0)$: valor na escala original referente ao código no nível (0)

$\xi(+1)$: valor na escala original referente ao código no nível (+1)

$\xi(-1)$: valor na escala original referente ao código no nível (-1)

A partir das respostas, é possível chegar a uma função que caracteriza o sistema, utilizando a metodologia de superfícies de resposta para maximizar o resultado de interesse (NETO et al., 2001). O modelo de predição da equação de superfície de resposta está apresentado na Equação (4).

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_2 x_2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{12} x_1 x_2 \quad (4)$$

Em que,

η : é a resposta

β_0 : é a constante relacionada à média da equação

β_s : os demais β_s são coeficientes lineares (L), quadráticos (Q) e de interação da equação

x_s : são os fatores na condição linear (L), quadrática (Q) e de interação da equação

3. METODOLOGIA

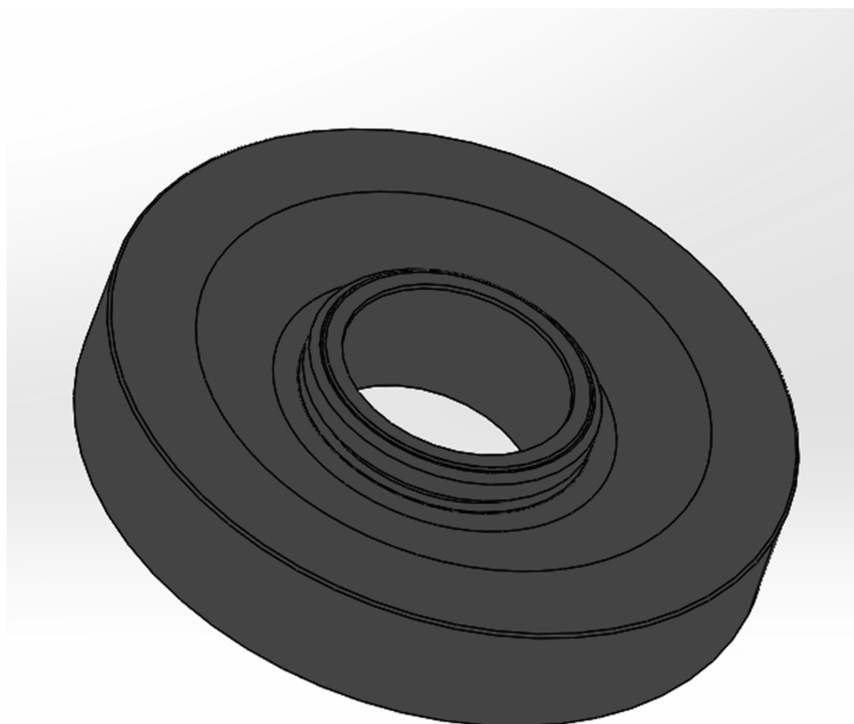
A metodologia desta monografia divide-se em Materiais, cujo conteúdo aborda o material da peça de trabalho e as especificações das ferramentas, e Método, em que se descrevem os equipamentos utilizados e o planeamento fatorial detalhado.

3.1 Materiais

A peça do presente trabalho é obtida através de operações de conformação à quente (laminação e forjamento), seguida de tratamento térmico de normalização para alívio de tensões internas, redução de dureza excessiva, adequação de tamanho de grão e para facilitar a usinagem. Após a primeira etapa de usinagem, a peça se tornará uma polia. Na segunda etapa de fabricação, a polia é usinada novamente para se tornar uma engrenagem e, posteriormente, é submetida a um tratamento termoquímico de cementação, para aumentar a dureza superficial, tornando-a resistente ao desgaste.

Neste estudo, a análise de produtividade está baseada na primeira etapa de usinagem para se alcançar a forma da polia com dimensões definidas. A forma da peça pode ser vista na Figura 13.

Figura 13 – Formato da peça



Fonte: Autor

Como o produto final se trata de uma engrenagem, seu núcleo precisa ser mais tenaz, por isso o material da peça é um aço de baixa-liga, ou seja, um aço com uma adição intencional de elementos de liga, a fim de alcançar as propriedades desejadas. Sua composição tem correspondência aproximada com o SAE 4125, contendo Cromo (0,40-0,60%) e Molibdênio (0,20-0,30%). A composição química em massa do material pode ser vista na Tabela 2.

Tabela 2 – Composição do aço SAE 4125

SAE	C%	Mn%	P%	S%	Si%	Cr%	Mo%
4125	0,23-0,28	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20-0,35	0,40-0,60	0,20-0,30

Para a usinagem da polia, foram analisadas duas ferramentas de metal-duro. A primeira ferramenta (F1), possui especificação de acordo com a NBR 6450-ISO, WNMG 080412-M6, com formato trigon, 6 arestas de corte com 8 mm de comprimento, 4,76 mm de espessura e raio de ponta de 1,2 mm. Esta foi montada em um suporte PWLNR 2525M08, que conferia ângulo de posição de 95°, ângulo de saída de -6°, ângulo de folga de 6°, e ângulo de inclinação de -6°. Ambos,

ferramenta e suporte, foram fornecidos pela SECO. A segunda ferramenta (F2) trata-se de um bedame, cuja especificação do fabricante é TGMF 508, com largura da aresta de corte de 5 mm e tem um raio de ponta de 0,8 mm. Esta foi montada em um suporte TGD L 2525-4M, que conferia ângulo de posição de 90°, ângulo de saída de 0°, ângulo de folga 7°, e ângulo de inclinação de 0°. Ambos, ferramenta e suporte, foram fornecidos pela ISCAR. Na Figura 14 podemos ver as duas ferramentas.

Figura 14 – Ferramentas: (a) WNMG 080412-M6(F1); (b) TGMF 508 (F2)

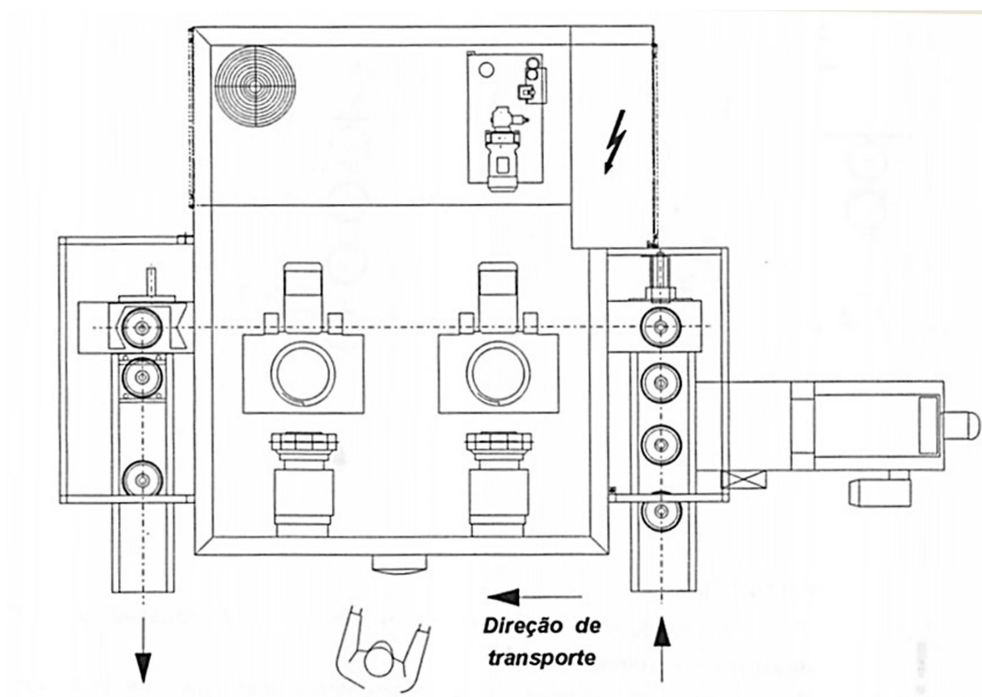


Fonte: Catálogos online SECO e ISCAR

3.2 Método

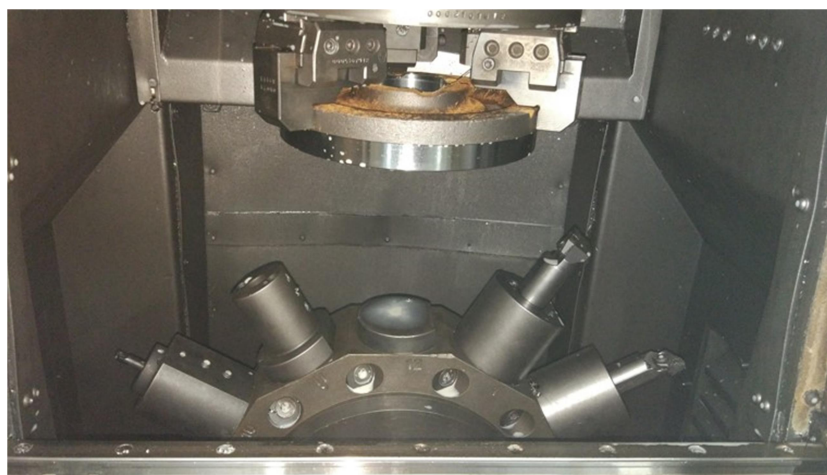
A usinagem foi feita em um torno vertical VSC 250 Duo da fabricante Romi, com a utilização de fluido de corte emulsionável, Tutela Mecafluid S113 (Petronas), na concentração de 10%. Trata-se de uma máquina com duas estações de usinagem e um sistema automatizado, em que o transporte das peças é realizado através de esteiras e as fixações através de robôs. O croqui do torno pode ser visto na Figura 15. A máquina-ferramenta é um torno vertical invertido, em que a fixação da peça é feita na parte superior, possuindo avanço vertical e transversal. Com relação ao carro porta-ferramenta, este se encontra na parte inferior e não avança. A Figura 16 ilustra a configuração de torno.

Figura 15 – Croqui do torno vertical ROMI EMAG



Fonte: Manual da máquina Romi EMAG

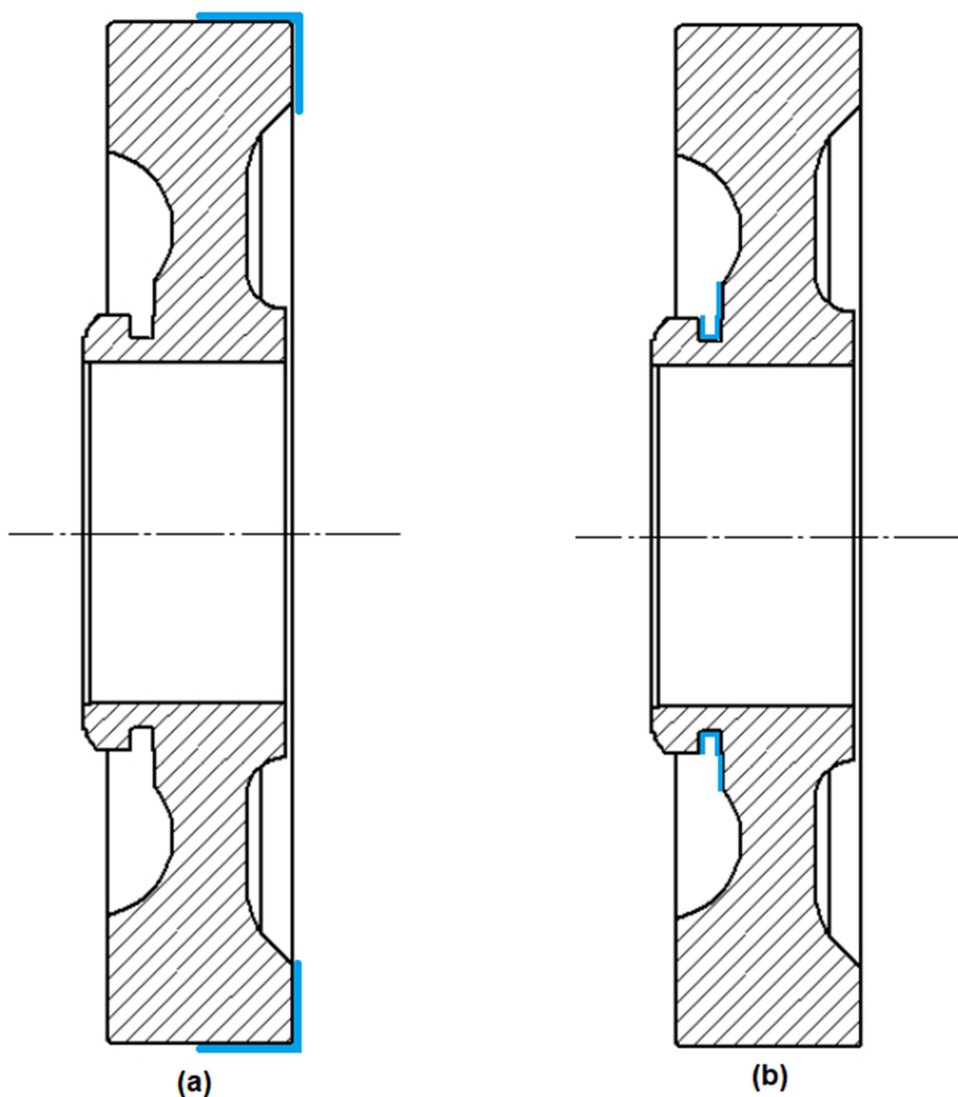
Figura 16 – Configuração do torno vertical



Fonte: Autor

De acordo com o perfil da peça, a primeira ferramenta (F1) realiza o desbaste na primeira estação de usinagem (primeira fixação), enquanto a segunda ferramenta (F2) faz o canal na segunda estação de usinagem (segunda fixação), como se pode ver na Figura 17.

Figura 17 – Em azul, perfil de usinagem das ferramentas: (a) F1; (b) F2



Fonte: Autor

Para analisar a produtividade, foi utilizado o planejamento de experimento fatorial 3^k , em que os fatores (k), velocidade de corte (v_c) e avanço (f), foram variados em três níveis (n), resultando em nove testes diferentes para cada ferramenta, como indicado nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 – Planejamento 3^2 para F1

Testes	v_c [m/min]	f [mm/rev]
1	(-1) 200	(-1) 0,25
2	(-1) 200	(0) 0,35
3	(-1) 200	(1) 0,45
4	(0) 250	(-1) 0,25
5	(0) 250	(0) 0,35
6	(0) 250	(1) 0,45
7	(1) 300	(-1) 0,25
8	(1) 300	(0) 0,35
9	(1) 300	(1) 0,45

Fonte: Autor

Tabela 4 – Planejamento 3^2 para F2

Testes	v_c [m/min]	f [mm/rev]
1	(-1) 100	(-1) 0,1
2	(-1) 100	(0) 0,15
3	(-1) 100	(1) 0,2
4	(0) 125	(-1) 0,1
5	(0) 125	(0) 0,15
6	(0) 125	(1) 0,2
7	(1) 150	(-1) 0,1
8	(1) 150	(0) 0,15
9	(1) 150	(1) 0,2

Fonte: Autor

Devido à limitação de tempo para parar a produção em série com objetivo de executar experimentos, foi necessário otimizar os testes realizando-os de maneira simultânea em ambas estações de usinagem. Para cada teste, foi estipulado o tempo de fabricação de 30 min, em seguida havia a troca da ferramenta usada por uma nova.

Para a obtenção dos resultados, foi contabilizado o número de peças produzidas em cada teste com o intuito de encontrar a região experimental de maior produtividade, de maneira a não comprometer a qualidade superficial da peça. Além disso, o desgaste de flanco médio (VB_B) das ferramentas foi avaliado, relacionando-os com o número de peças fabricadas. Para tanto, foi utilizado o microscópio óptico Observer Z1m da fabricante ZEISS, com auxílio de dispositivos fabricados em uma impressora 3D, PP3DP do fabricante UP! 3D, para posicionar as ferramentas adequadamente. Finalmente, o acabamento da superfície das peças foi comparado qualitativamente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resultado da quantidade de peças fabricadas em cada ensaio está apresentado na Tabela 5. Os testes da 1ª estação de usinagem são referentes a primeira ferramenta (WNMG 080412-M6) e os da 2ª estação de usinagem, refere-se à segunda ferramenta (TGMF 508).

Tabela 5 – Resultado do número de peças produzidas

Testes	1ª Estação usinagem		2ª Estação usinagem		Nº de Peças
	v_c [m/min]	f [mm/rev]	v_c [m/min]	f [mm/rev]	
1	(-1) 200	(-1) 0,25	(-1) 100	(-1) 0,10	11
2	(-1) 200	(0) 0,35	(-1) 100	(0) 0,15	14
3	(-1) 200	(1) 0,45	(-1) 100	(1) 0,20	14
4	(0) 250	(-1) 0,25	(0) 125	(-1) 0,10	12
5	(0) 250	(0) 0,35	(0) 125	(0) 0,15	15
6	(0) 250	(1) 0,45	(0) 125	(1) 0,20	14
7	(1) 300	(-1) 0,25	(1) 150	(-1) 0,10	13
8	(1) 300	(0) 0,35	(1) 150	(0) 0,15	13
9	(1) 300	(1) 0,45	(1) 150	(1) 0,20	14

Fonte: Autor

Para analisar quantitativamente a discrepância da hipótese estatística em relação aos dados observados, utilizou-se a análise de significância. Trata-se do cálculo do nível de significância (p) em cada experimento para todas as variáveis, sejam elas de primeira ordem (L), quadrática (Q) ou de interação (1x2) e sua comparação com $p < 0,10$, ou seja, se valor de p for menor que 0,10, a variável influencia significativamente na resposta. Na Tabela 6 pode-se observar essa análise de significância para todas as variáveis.

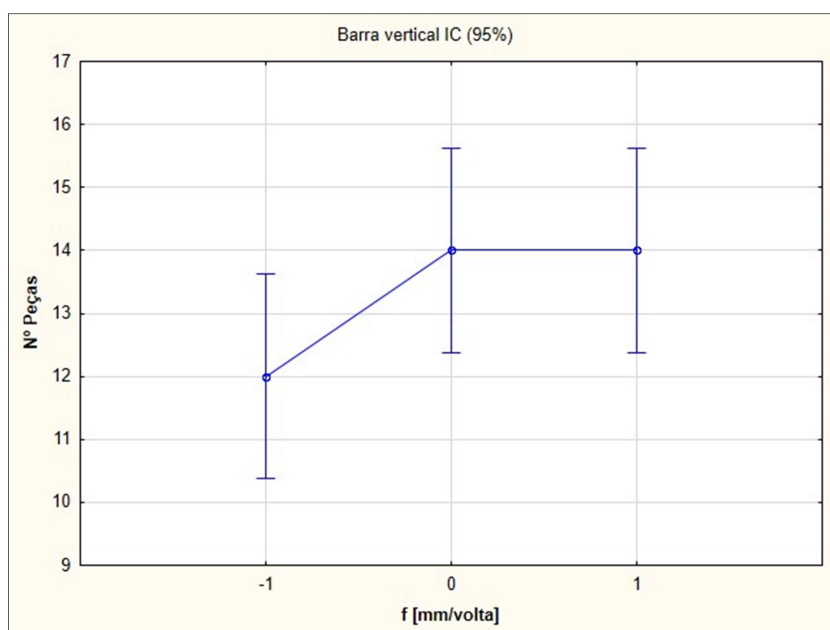
Tabela 6 – Análise de significância e efeito para o planejamento 3^2

	Efeito	Desvio-padrão	t	p	IC (-95%)	IC (+95%)
Média	13,33333	0,293972	45,35574	0,000024	12,39778	14,26888
(1) v_c [m/min] (L)	0,33333	0,720082	0,46291	0,674941	-1,95829	2,62496
v_c [m/min] (Q)	0,50000	0,623610	0,80178	0,481309	-1,48460	2,48460
(2) f [mm/volta] (L)	2,00000	0,720082	2,77746	0,069137	-0,29162	4,29162
f [mm/volta] (Q)	1,00000	0,623610	1,60357	0,207143	-0,98460	2,98460
1L x 2L	-1,00000	0,881917	-1,13389	0,339254	-3,80665	1,80665

Fonte: Autor

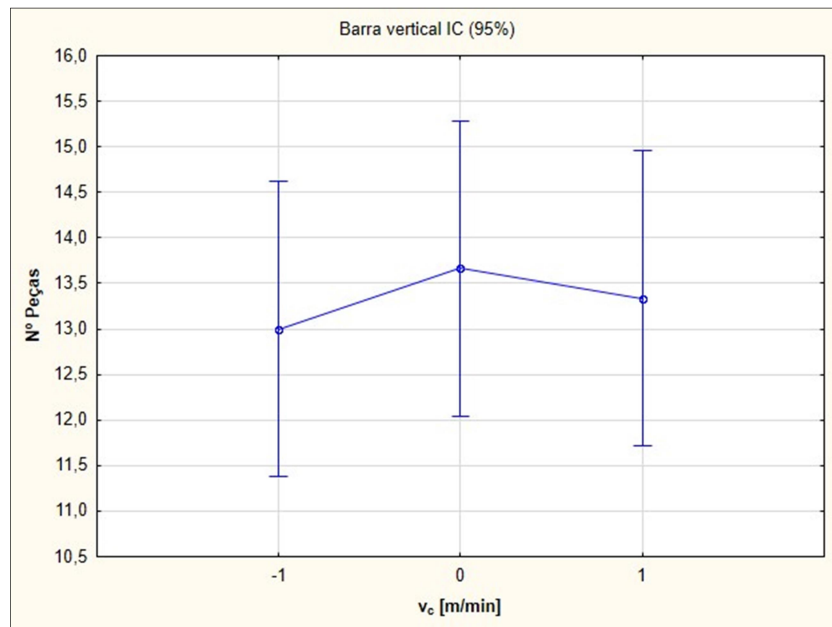
Observando os resultados, é possível perceber que em média consegue-se produzir 13 peças. A variável avanço (f), termo linear (L), se mostrou significativa, ou seja, o nível de significância estimado (0,069137) ficou abaixo do nível de significância de teste $p = 0,10$. Ela teve o efeito de aumentar em média o número de peças em duas unidades ao variar do -1 ao +1, como pode ser visto na Figura 18, em que no nível -1 tem 12 peças e o nível +1 alcançou 14 peças.

Figura 18 – Gráfico de efeito para a variável f



Fonte: Autor

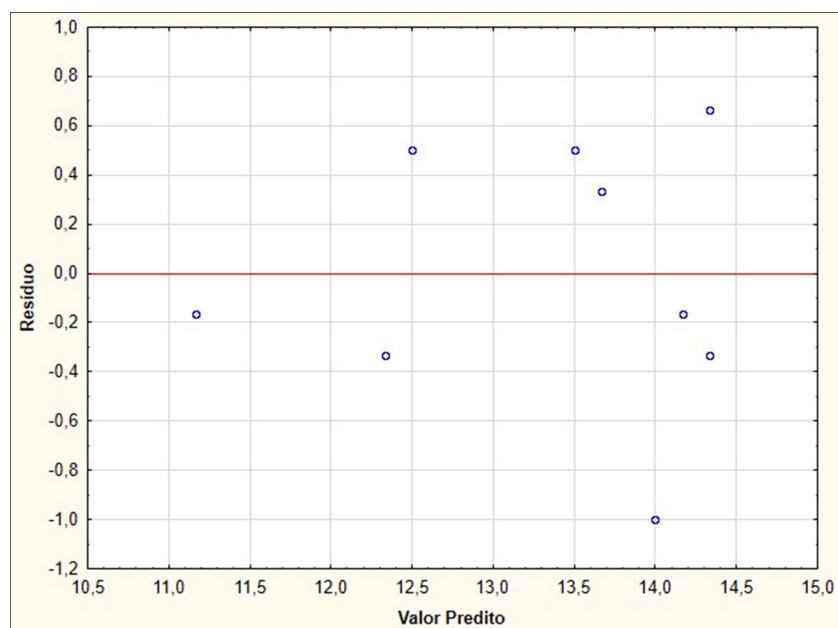
Para a variável v_c não se observou diferença significativa entre os níveis, dado o intervalo de confiança (IC). Portanto, seu efeito foi de aumentar o número de peças em somente 0,5 unidade, como é mostrado na Figura 19.

Figura 19 – Gráfico de efeito para a variável v_c .

Fonte: Autor

Os resíduos, ou seja, a diferença entre os valores experimentais e preditos, estão distribuídos aleatoriamente em torno de zero, exceto o valor de 14 (número de peças), que se encontra um pouco mais afastado do valor observado, correspondendo ao valor de resíduo de -1, como pode ser visto na Figura 20. Isto sugere que os dados possuem uma distribuição normal, livres de erro sistemático.

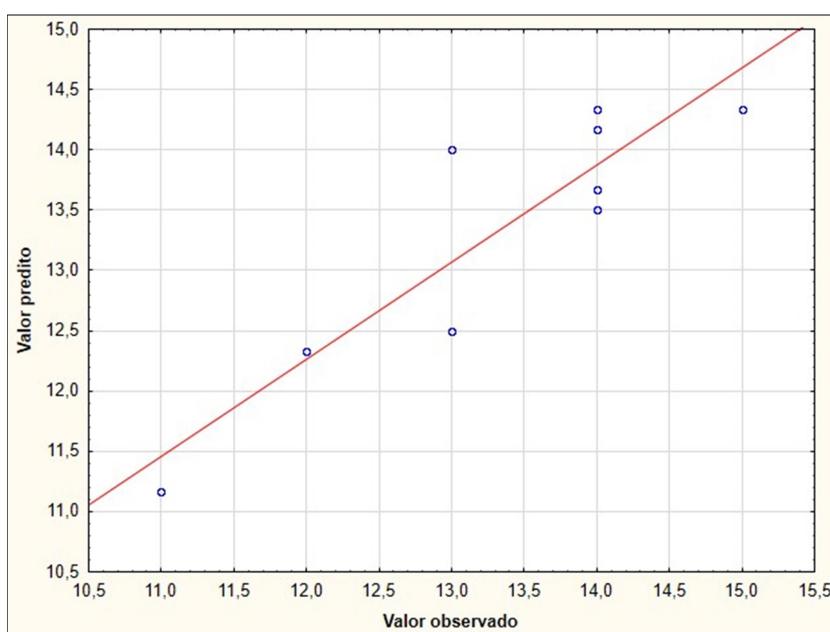
Figura 20 – Distribuição dos resíduos



Fonte: Autor

O ajuste dos dados também pode ser notado pela Figura 21, sendo que a linha vermelha é o ajuste entre os valores experimentais e preditos. Nota-se que para os valores observados 13, um deles está afastado da linha de ajuste em aproximadamente 1 unidade, com valor predito em 14, como citado na figura anterior. A partir dos gráficos das Figuras 20 e 21 pode-se admitir que os valores observados seguem uma distribuição normal, dessa forma o tratamento estatístico utilizado está correto.

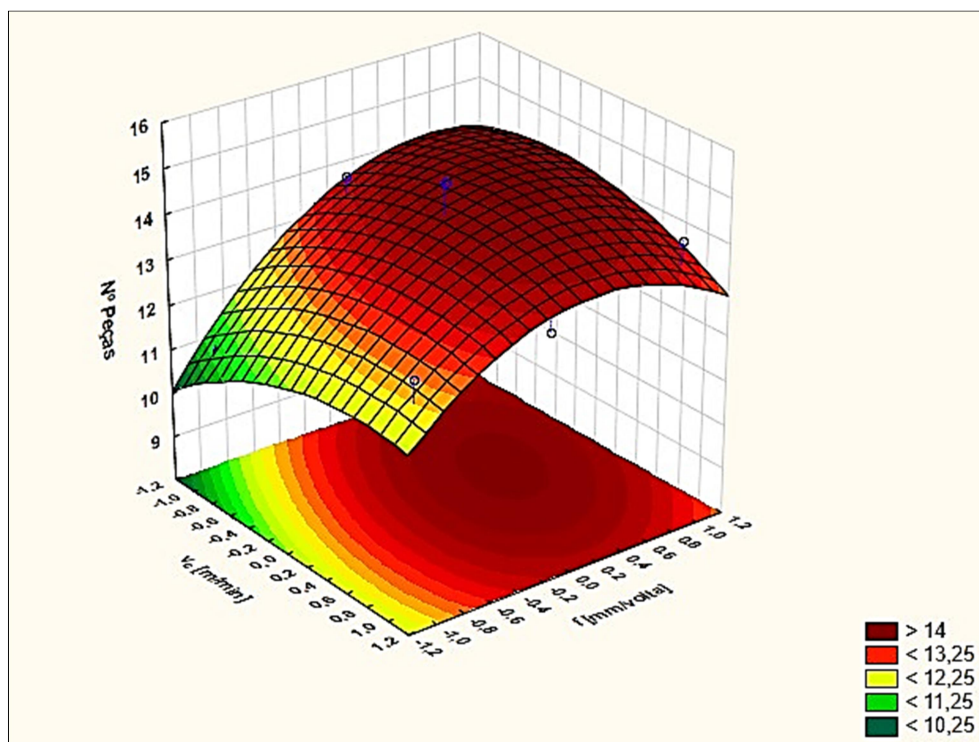
Figura 21 – Ajuste de dados entre valores experimentais e preditos



Fonte: Autor

Com as variáveis v_c e f foi possível gerar uma superfície de resposta, ajustada para os níveis codificados (-1, 0 e +1) com um coeficiente de correlação $R^2 = 80,56\%$. Essa superfície resultou em uma parábola, portanto possui um ponto ótimo (de máximo) em que é possível determinar as condições de corte de maior eficiência para se ter o maior número de peças produzidas.

Figura 22 – Superfície de resposta ajustada para os níveis codificados



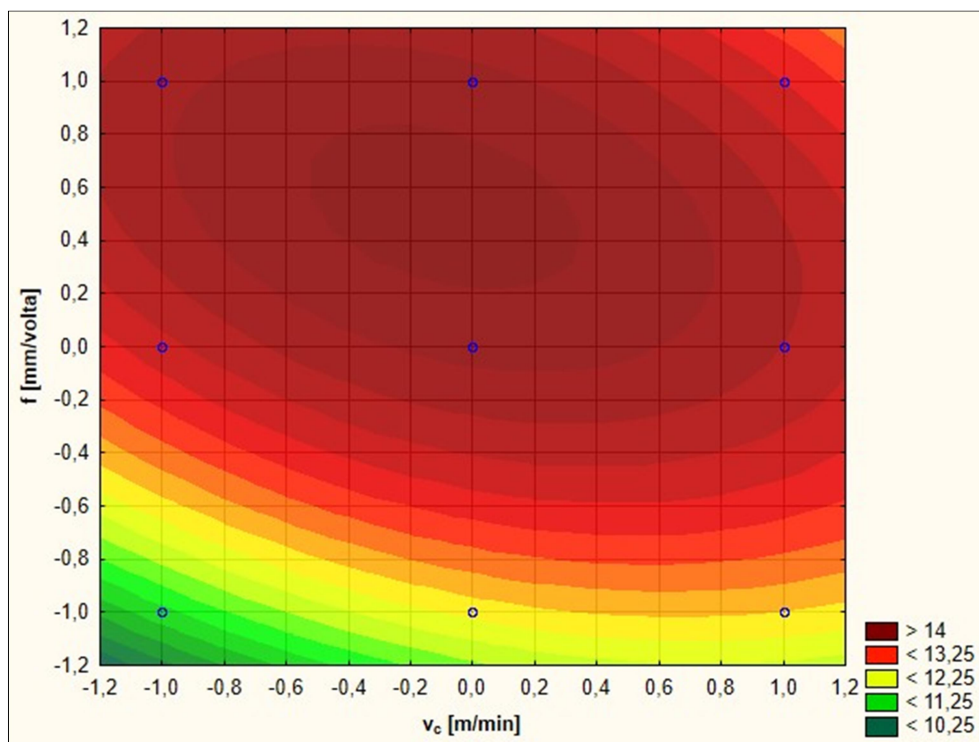
Fonte: Autor

A superfície de resposta pode ser escrita na forma de uma equação contendo termos lineares, quadráticos e de interação (Equação 5).

$$\eta = 14,33 + 0,17v_c - 0,5v_c^2 + 1,0f - 1,0f^2 - 0,5v_cf \quad (5)$$

Na Figura 23, há um gráfico de contorno da superfície de resposta, em que no eixo das coordenadas está v_c e no eixo das abscissas está f , ambas codificadas para os níveis estudados. Os círculos azuis são os pontos dos testes executados em cada nível experimentado. As cores se referem ao número de peças, portanto, de acordo com o gráfico, a região vermelha escura é a que resulta em um maior número de peças produzidas (maior que 14), ou seja, a região de máxima da superfície de resposta.

Figura 23 – Gráfico de contorno da superfície de resposta



Fonte: Autor

É possível perceber que o ponto ótimo está mais deslocado com relação à variável f , assim, próximo do nível (-1) , encontra-se o menor número de peças produzidas e este aumenta em direção ao nível $(+1)$, conforme discutido na Tabela 6 e Figura 18.

Os valores do ponto ótimo codificado foram determinados, a partir da derivação da equação de superfície de resposta e igualando a zero. A Tabela 7 apresenta os valores ótimos codificados e decodificados, fazendo uso da Equação 3.

Tabela 7 – Valores codificados e decodificados no ponto ótimo

Ferramenta	Variável	Codificado	Decodificado (escala original)
F1 (WNMG 080412)	v_c	-0,0952	245,24 m/min
F1 (WNMG 080412)	f	+0,524	0,40 mm/volta
F2 (TGMF 508)	v_c	-0,0952	122,62 m/min
F2 (TGMF 508)	f	+0,524	0,18 mm/volta

Fonte: Autor

Ao inserir os pontos de máximo codificados na equação de superfície (Equação 5), obteve-se 14,58 como resposta para o número de peças. Portanto, utilizando as ferramentas especificadas nas condições $v_c = 245,24$ m/min e

$f = 0,40$ mm/volta para a ferramenta F1, e $v_c = 122,62$ m/min e $f = 0,18$ mm/volta para a ferramenta F2, com o mesmo material de peça de trabalho, espera-se fabricar 14 peças em um intervalo de tempo de 30 min, condição de máxima produção.

Visando complementar a análise, o desgaste das ferramentas também foi estudado. A Tabela 8 apresenta o desgaste de flanco médio (VB_B) para a ferramenta F1 (WNMG 080412-M6) em cada experimento.

Tabela 8 – Desgaste de flanco médio para a ferramenta F1

Testes	v_c [m/min]	f [mm/rev]	VB_B [mm]
1	(-1) 200	(-1) 0,25	0,168
2	(-1) 200	(0) 0,35	0,162
3	(-1) 200	(1) 0,45	0,162
4	(0) 250	(-1) 0,25	0,178
5	(0) 250	(0) 0,35	0,159
6	(0) 250	(1) 0,45	0,149
7	(1) 300	(-1) 0,25	0,155
8	(1) 300	(0) 0,35	0,204
9	(1) 300	(1) 0,45	0,162

Fonte: Autor

A análise estatística foi feita para um nível de significância (p) de 0,010 (ou 10%). Conforme mostrado na Tabela 9, as variáveis v_c e f , sejam elas lineares (L), quadráticas (Q) ou de interação, não mostraram efeito significativo sobre a resposta (VB_B).

Tabela 9 – Análise de significância e efeito para o desgaste de flanco médio (VB_B)

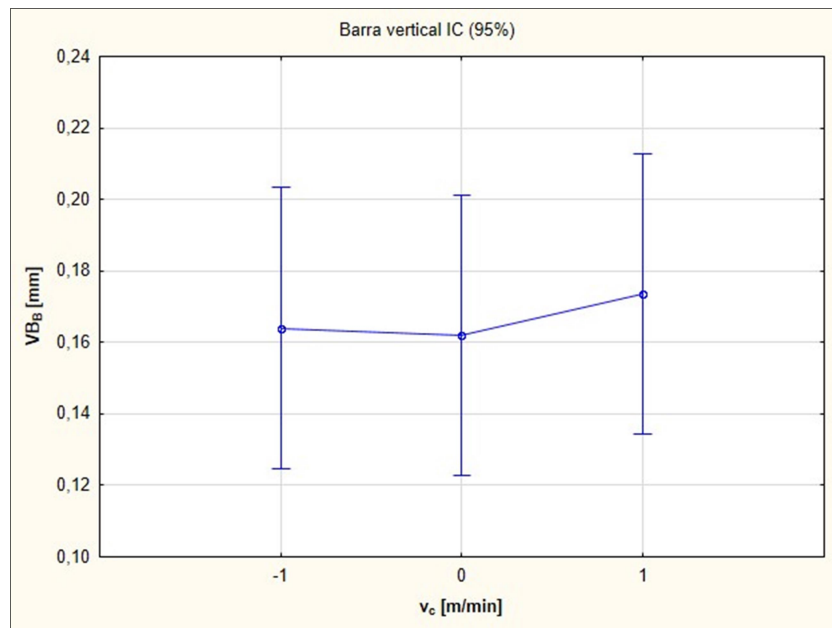
	Efeito	Desvio-padrão	t	p	IC (-95%)	IC (+95%)
Média	0,166556	0,007120	23,39167	0,000171	0,143896	0,189216
(1) v_c [m/min] (L)	0,009667	0,017441	0,55425	0,618047	-0,045839	0,065172
v_c [m/min] (Q)	-0,006833	0,015104	-0,45241	0,681688	-0,054902	0,041236
(2) f [mm/volta] (L)	-0,009333	0,017441	-0,53513	0,629682	-0,064839	0,046172
f [mm/volta] (Q)	0,012667	0,015104	0,83861	0,463248	-0,035402	0,060736
1L x 2L	0,006500	0,021361	0,30429	0,780790	-0,061480	0,074480

Fonte: Autor

Devido ao reduzido tempo de ensaio de modo a não prejudicar a produção da empresa, as ferramentas não obtiveram valores de desgaste que fossem diferentes o suficiente entre si para se tornarem significativos em relação à resposta.

A partir do gráfico de efeito para a variável v_c (Figura 24), é possível observar que os valores médios e o intervalo de confiança (IC) para os níveis testados estão muito próximos, sendo assim, não há diferença entre os resultados.

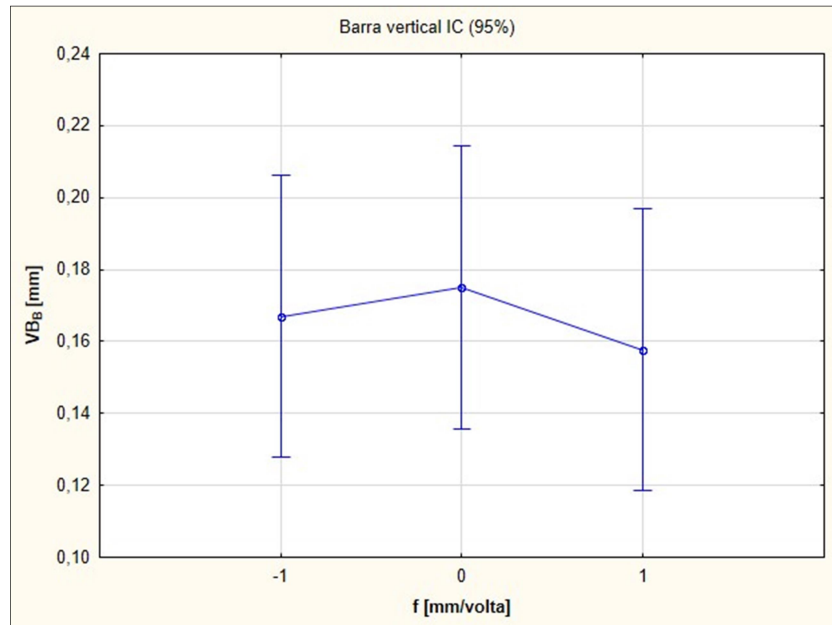
Figura 24 – Gráfico de efeito para a variável v_c



Fonte: Autor

Para a variável f , o gráfico de efeito (Figura 25) também possui valores médios e intervalos de confiança muito próximos, não sendo significativo sobre a resposta.

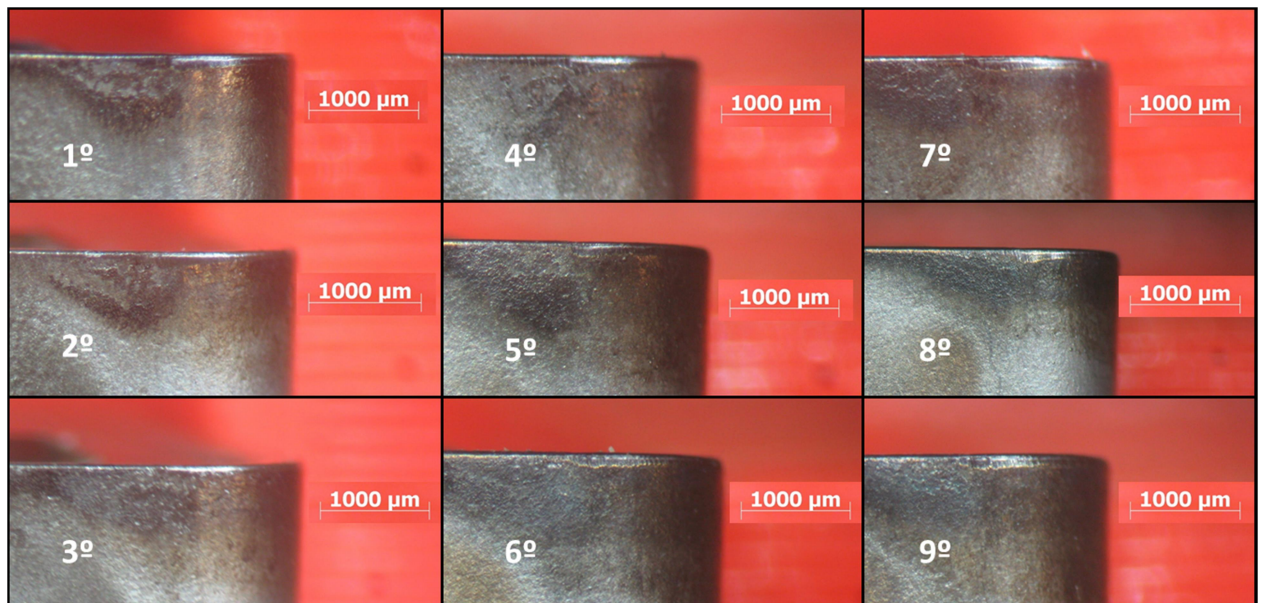
Figura 25 – Gráfico de efeito para a variável f



Fonte: Autor

As fotos dos desgastes de flanco da F1 podem ser vistas na Figura 26.

Figura 26 – Desgastes de flanco médio na F1 para cada ensaio

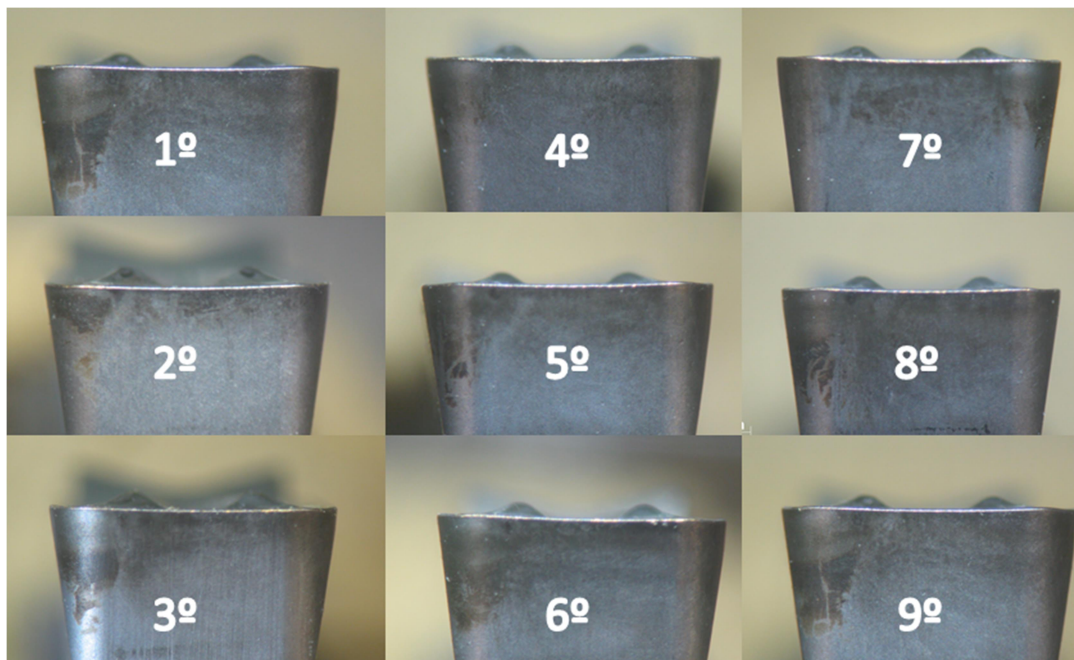


Fonte: Autor

Para F2 (TGMF 508), não foi possível realizar uma análise estatística para o desgaste, visto que este foi tão pequeno que não seria significativo para o estudo.

Na Figura 27, é possível ver que as arestas de corte da ferramenta ainda estão bem preservadas, devido ao reduzido tempo de experimentação.

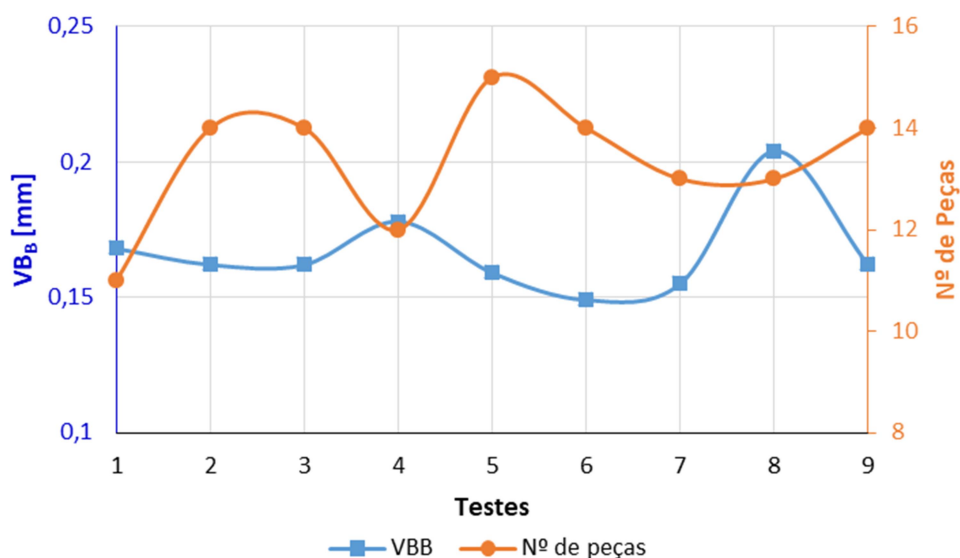
Figura 27 – Desgastes de flanco médio na F2 para cada ensaio



Fonte: Autor

A relação entre o desgaste de flanco médio (VB_B) para a ferramenta F1 e o número de peças produzidas em função dos testes executados pode ser vista no gráfico da Figura 28. Através dos dados apresentados, é possível observar que o maior número de peças ocorre no Teste 5, em que os níveis codificados estão em zero, correspondendo a $v_c = 250$ m/min e $f = 0,35$ mm/volta para F1 e $v_c = 125$ m/min e $f = 0,15$ mm/volta para F2. Também é possível observar que o valor do desgaste para este teste está entre os menores. Dessa forma, os resultados sugerem que para o ponto de máxima produção, para a ferramenta F1 ($v_c = 245,24$ m/min e $f = 0,40$ mm/volta) e para a ferramenta F2 ($v_c = 122,62$ m/min e $f = 0,18$ mm/volta), os níveis de desgaste devem se assemelhar ao do Teste 5.

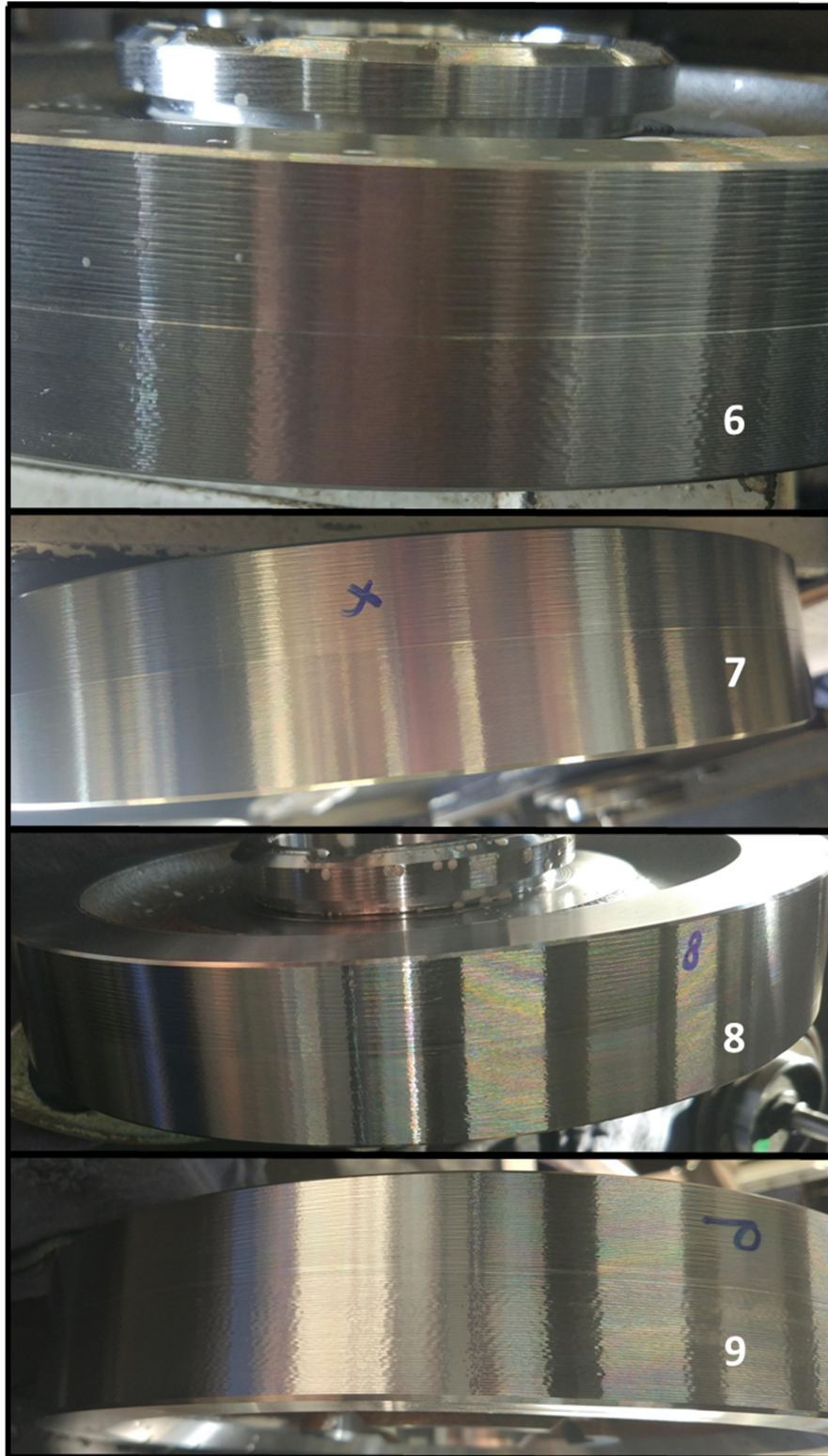
Figura 28 – Relação do desgaste de flanco médio da F1 e do número de peças fabricadas em função dos testes executados



Fonte: Autor

Por fim, os acabamentos das peças foram analisados qualitativamente. Notou-se que os acabamentos começaram a ser prejudicados a partir do 6º ensaio, em que se observou maior vibração da máquina, devido às condições de corte elevadas, gerando um acabamento ruim, impactando na qualidade do produto. Estes acabamentos podem ser vistos na Figura 29, onde é possível comparar o acabamento ruim da primeira estação de usinagem (lado que possui o número do ensaio em branco), com o acabamento bom, da segunda estação de usinagem, em que foram mantidas as condições de corte de referência da fábrica.

Figura 29 – Acabamentos prejudicados pelas altas condições de usinagem



Fonte: Autor

5. CONCLUSÃO

Através dos dados apresentados, foi possível observar que com relação ao número de peças, apenas a variável f linear influenciou significativamente. Com os dados, foi possível gerar uma superfície de resposta, que resultou em uma parábola, encontrando, portanto, o ponto de máxima, ou seja, o ponto de maior produção. Este corresponde à $v_c = 245,24$ m/min e $f = 0,40$ mm/volta para a ferramenta F1, e $v_c = 122,62$ m/min e $f = 0,18$ mm/volta para a ferramenta F2, gerando 14 peças a cada 30 min.

Pôde-se observar também que a análise do desgaste da ferramenta não influenciou a resposta devido ao curto tempo de ensaio. Quanto ao acabamento, observou-se que quanto mais alta as condições de usinagem, em especial o avanço, maior a vibração e conseqüentemente pior o acabamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOSTINHO, O.L.; VILELLA, R.C.; BUTTON, S.T. Processos de fabricação e planejamento de processos. Campinas: Apostila do programa de graduação da UNICAMP, 2004. 98p.

BARROZO, M.A.S. **Planejamento de experimentos**. Uberlândia: Apostila do programa de pós-graduação em engenharia química da UFU, 2010. 89 p.

CHILDS, T.; KATSUHIRO, M.; TOSHIYUKI, O.; YASUO, Y. **Metal Machining; theory and applications**. London: Arnold, 2000. 408 p.

DINIZ, A.E., MARCODES, F.C., COPPINI, N.L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 9ª ed. São Paulo: Artliber, 2014. 270 p.

EMAG. Disponível em: <<https://www.emag.com/machines/turning-machines/production-vsc.html>>. Acesso em 11 ago. 2018.

FERRARESI, D.; **Fundamentos da usinagem dos metais**. 9º ed. São Paulo: Edgard Bluecher, 1995. 751 p.

FREIRE, J.M. **Tecnologia Mecânica**. Rio de Janeiro: Livros técnicos e científicos, 1984. 202 p.

GROOVER, M.P. **Fundamentals of modern manufacturing: materials, processes and systems**. 4th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2010. 1022 p.

HUTCHINGS, I.M. **Tribology: friction and wear of engineering of materials**. London: Arnold, p. 272, 1992.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 3685:1993. **Tool-life testing with single-point turning tools**. 2nd ed. 1993.

ISCAR. Disponível em: < <https://www.iscardobrasil.com.br>>. Acesso em 15 out. 2018.

KALPAKJIAN, S. **Manufacturing, Engineering and Technology**. 6th ed. London: Prentice Hall, 1995. 1295 p.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 3^a ed. São Paulo: Edgard Bluecher, 2015. 408 p.

MACHADO, A.R.; da SILVA, M.B. **Usinagem dos metais**. 8^a v. Uberlândia: Apostila do curso de graduação em engenharia mecânica da UFU, 2004. 257 p.

NETO, B.B.; SCARMINIO, S.I.; BRUNS, R.E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. 2^a ed. Campinas: Editora da Unicamp, 2001. 401 p.

SECO. Disponível em: <www.secotools.com>. Acesso em: 15 out. 2018.

SINDIPEÇAS. Desempenho da Indústria Brasileira de Autopeças. 2018. Disponível em: <https://www.sindipecas.org.br/sindinews/Economia/2018/Desempenho_Projecoes_2017-2018_Setembro_2018.pdf>. Acesso em: 05 nov. 2018.

TÖNSHOFF, H.K.; KÖNIG, W. Machining of Holes: developments in drilling technology. In: SCIENTIFIC TECHNICAL COMMITTEES. **CIRP Annals**, v. 43, p. 551-561, 1994.

TRENT, E.; WRIGHT, P. **Metal Cutting**. 4th ed. Boston: Butterworth-Heinemann, 2000. 446 p.