

**Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Curso de Engenharia Automotiva**

**TORNEAMENTO DO AÇO SAE 4340 COM MÍNIMA QUANTIDADE DE
LUBRIFICANTE**

**Autor: Rafael de Souza Freitas
Orientador: Prof. Rhander Viana**

**Brasília, DF
2017**



RAFAEL DE SOUZA FREITAS

**TORNEAMENTO DO AÇO SAE 4340 COM MÍNIMA QUANTIDADE DE
LUBRIFICANTE**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Automotiva da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em engenharia automotiva.
Orientador: Prof. Rhander Viana

**Brasília, DF
2017**

CIP – Catalogação Internacional da Publicação*

Freitas, Rafael de Souza

Torneamento do aço SAE 4340 com mínima quantidade de lubrificante. / Rafael de Souza Freitas. Brasília: UnB, 2016. 48 p.: il.; 29,5 cm.

Monografia (Bacharel em Engenharia Automotiva) –
Universidade de Brasília

Faculdade do Gama, Brasília, 2016. Orientação: Rhander Viana

1. Torneamento. 2. Aço SAE 4340. 3. Mínima quantidade de lubrificante. Viana, Rhander. Torneamento do aço SAE 4340 com mínima quantidade de lubrificante.

CDU Classificação

**TORNEAMENTO DO AÇO SAE 4340 COM MÍNIMA QUANTIDADE DE
LUBRIFICANTE**

Rafael de Souza Freitas

Monografia submetida como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva da Faculdade UnB Gama - FGA, da Universidade de Brasília, em 06/12/2016 apresentada e aprovada pela banca examinadora abaixo assinada:

Prof. Rhander Viana, UnB/ FGA
Orientador

Prof. Rodrigo Arbey Muñoz Meneses, UnB/ FGA
Membro Convidado

Me. Danilo dos Santos Oliveira, UnB/ FGA
Membro Convidado

Brasília, DF
2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço principalmente a meus pais, meu irmão e minha namorada que estão ao meu lado, e me ajudaram durante todo esse processo de execução desse trabalho.

Agradeço também a orientação do professor Rhander Viana por guiar e me ajudar durante a execução do trabalho, sem isso o trabalho seria impossível.

RESUMO

Este trabalho consiste em uma análise do comportamento de um aço SAE 4340 durante o processo de torneamento, a escolha por esse aço foi feita por sua grande utilização em componentes mecânicos, principalmente na indústria automotiva. Na análise deste trabalho foram variados alguns parâmetros do processo de usinagem no torneamento, para verificar a resposta que o material tem a essas mudanças e a relação que essas variações têm entre si. Os três parâmetros que foram variados têm relação com o tipo de lubrificação que será utilizado, são eles: torneamento a seco (sem lubrificante), torneamento usando mínima quantidade de lubrificante (MQL) e o torneamento com lubrificação abundante ou jorro (método convencional). Com a variação desses parâmetros o trabalho busca verificar a mudança em aspectos como acabamento superficial da peça e a potência elétrica utilizada no corte durante o torneamento. O trabalho é focado principalmente na implementação da técnica de mínima quantidade de lubrificante, mostrando os efeitos proporcionados pela técnica durante um processo de torneamento. O MQL, como é chamado usualmente, vem se tornando popular dentro da indústria e por isso uma análise dos parâmetros apresentados por esse tipo de técnica é importante. O trabalho mostra que o uso do MQL altera os valores de rugosidade e de potência durante o torneamento, porém trabalha de forma mais eficiente com algumas condições de corte.

Palavras-chave: Torneamento; mínima quantidade de lubrificante; Aço SAE 4340.

ABSTRACT

This paper is about the analysis of the behavior of a steel classified as SAE 4340 during the turning, the choosing of this steel was because of his great use in mechanical components mainly in the automobile industries. Will be change in this analysis some of the machining process parameters to check the material answers related to the changes and how this changes interacted with each other. The three parameters that will be variated concerns lubrication, they are: dry turning (without lubricant), turning using minimum quantity lubrication (MQL), and conventional turning with a wet of lubricant. With the variating of these parameters, the paper seeks to check some aspects like surface roughness and electric power during turning. The paper is focused mainly in the implementation of the minimum quantity of lubrication, showing which effects it has in a turning process. The MQL is becoming more popular in industries, that why is important to study its behavior. **O trabalho mostra que o uso do MQL altera os valores de rugosidade e de potência durante o torneamento, porém trabalha de forma mais eficiente com algumas condições de corte.**

Keywords: Turning; Minimum quantity lubrication; Steel SAE 4340.

Lista de tabelas

Tabela 2.1 - Matriz de planejamento

Tabela 3.1 - Variáveis de interesse em dois níveis para planejamento fatorial 2^3

Tabela 3.2 - Matriz das condições de corte para o planejamento fatorial 2^3

Tabela 4.1 – Resultados para medição de dureza.

Tabela 5.1 - Cronograma de execução do trabalho proposto distribuído em meses no primeiro semestre de 2017.

Lista de figuras

Figura 2.1 - Principais grandezas de corte no torneamento cilíndrico

Figura 2.2 - Ilustração da obtenção do parâmetro de amplitude R_a

Figura 2.3 - Ilustração da obtenção do parâmetro de amplitude R_z

Figura 2.4 - Força de usinagem no torneamento cilíndrico externo

Figura 2.5 - Sistema convencional por jorro atuando na usinagem

Figura 2.6 - Sistema MQL atuando na usinagem

Figura 2.7 - Custos de usinagem

Figura 2.8 - (a) Aplicação externa; (b) Aplicação interna

Figura 2.9 - Comparação de emissão de partículas poluentes

Figura 3.1 - Fluxograma dos procedimentos experimentais realizados

Figura 3.2 – Superfície atacada com Nital 2%.

Figura 3.3 – Funcionamento do microdurômetro durante o ensaio

Figura 3.4 – Superfície da amostra após o ensaio.

Figura 4.1 - Superfície de resposta - Profundidade x Velocidade corte (R_a)

Figura 4.2 - Superfície de resposta – Profundidade x Avanço (R_a).

Figura 4.3 - Superfície de resposta – Avanço X Velocidade de Corte (R_a)

Figura 4.4 - Superfície de resposta – Profundidade x Velocidade de corte (R_z).

Figura 4.5 - Superfície de resposta – Avanço x Velocidade (R_z).

Figura 4.6 - Superfície de resposta – Avanço x Profundidade (R_z)

Figura 4.7 - Superfície de resposta – Profundidade x Velocidade de corte (R_a)

Figura 4.8 - Superfície de resposta – Avanço x Velocidade corte (R_a).

Figura 4.9 - Superfície de resposta – Avanço x Profundidade (R_a).

Figura 4.10 - Superfície de resposta – Profundidade x Avanço (R_z).

Figura 4.11 - Superfície de resposta – Avanço x Velocidade de corte (R_z).

Figura 4.12 - Superfície de resposta – Profundidade x Velocidade de corte (R_z).

Figura 4.13 - Superfície de resposta – Profundidade x Velocidade (R_z).

Figura 4.14 - Superfície de resposta – Avanço x Velocidade (R_z).

Figura 4.15 - Superfície de resposta – Avanço x Profundidade (R_z).

Figura 4.16 - Superfície de resposta – Profundidade x Velocidade de corte (R_a).

Figura 4.17 - Superfície de resposta – Profundidade x Avanço (R_a)

Figura 4.18 - Superfície de resposta – Avanço x Velocidade de corte (R_a).

Figura 4.19 – Potência ativa do torno para a variação de profundidade

Figura 4.20 – Comportamento da potência durante a usinagem a jorro.

Figura 4.21 – Média de potência durante a usinagem a jorro.

Figura 4.22 – Potência ativa do torno para a variação de profundidade

Figura 4.23 – Comportamento da potência durante a usinagem a seco.

Figura 4.24 – Média de potência durante a usinagem a seco.

Figura 4.25 – Potência ativa do torno para a variação de profundidade

Figura 4.26 – Comportamento da potência durante a usinagem com MQL.

Figura 4.27 – Média de potência durante a usinagem com MQL.

Figura 4.28 – Potência ativa do torno para a variação de velocidade de corte

Figura 4.29 – Comportamento da potência durante a usinagem a jorro.

Figura 4.30 – Média de potência durante a usinagem a jorro.

Figura 4.31 – Potência ativa do torno para a variação de velocidade de corte

Figura 4.32 – Comportamento da potência durante a usinagem a seco

Figura 4.33 – Média de potência durante a usinagem a seco.

Figura 4.34 – Potência ativa do torno para a variação de velocidade de corte.

Figura 4.35 – Comportamento da potência durante a usinagem com MQL.

Figura 4.36 – Média de potência durante a usinagem com MQL.

Figura 4.37 – Potência ativa do torno para a variação de avanço

Figura 4.38 – Comportamento da potência durante a usinagem a jorro

Figura 4.39 – Média de potência durante a usinagem a jorro

Figura 4.40 – Potência ativa do torno para a variação de avanço.

Figura 4.41 – Comportamento da potência durante a usinagem a seco.

Figura 4.42 – Média de potência durante a usinagem a seco.

Figura 4.43 – Potência ativa do torno para a variação de avanço.

Figura 4.44 – Comportamento da potência durante a usinagem com MQL

Figura 4.45 – Média de potência durante a usinagem com MQL

Figura 4.46 – Comparação variando a profundidade.

Figura 4.47 – Comparação variando a velocidade de corte.

Figura 4.48 – Comparação variando o avanço.

Figura 4.49 – Imagem de microscópio da superfície usinada do aço SAE 4340

Lista de equações

Eq. 2.1 – Velocidade de corte

Eq. 2.2 – Potência de corte com avanço

Eq. 2.3 – Potência de corte com força de avanço

Eq. 2.4 – Valor de significância

Eq. 2.5 – Erro padrão dos efeitos de significância

Lista de histogramas

Histograma 4.1 – Resultados para a condição de corte 1

Histograma 4.2 – Resultados para a condição de corte 2

Histograma 4.3 – Resultados para a condição de corte 3

Histograma 4.4 – Resultados para a condição de corte 4

Histograma 4.5 – Resultados para a condição de corte 5

Histograma 4.6 – Resultados para a condição de corte 6

Histograma 4.7 – Resultados para a condição de corte 7

Histograma 4.8 – Resultados para a condição de corte 8

Sumário

1. INTRODUÇÃO	13
1.1 - Aspectos gerais	13
1.2 - Objetivo	14
1.2.1 - Objetivos Gerais	14
1.2.2 - Objetivos específicos.....	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1 - Conceitos de usinagem	15 a 17
2.2 - Fundamentos do processo de torneamento	17
2.2.1 - Grandezas de corte no torneamento.....	17 e 18
2.3 - Acabamento superficial	18 e 21
2.4 - Força e potência de usinagem	22
2.4.1 - Força de usinagem	22
2.4.2 - Potência de usinagem.....	22 e 23
2.5 - Fluidos de corte	24
2.5.1 - Aspectos Gerais.....	24 e 25
2.5.2 - Aplicação da técnica de MQL.....	25 a 27
2.5.3 - Torneamento com MQL	28 a 31
2.6 - Planejamento de experimentos	31
2.6.1 - Planejamento fatorial	32
2.6.2 - Planejamento fatorial completo 2^K	33
2.6.3 - Análise da significância dos efeitos.....	34
2.6.4 - Modelo de previsão de variável resposta.....	34 e 35
3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....	36
3.1 - Aspectos gerais.....	36 e 37
3.2 - Ensaio de potência elétrica no torneamento.....	37
3.2.1 – Variação da Velocidade de corte (V_c) em m/min	38
3.2.2 – Variação de avanço (f) em mm/rot	38
3.2.3 – Variação da profundidade de corte (A_p) em mm.....	38
3.3 - Ensaio de rugosidade	39 e 40
3.4 - Caracterização do aço SAE 4340	41
3.4.1. Ensaio metalográfico do aço SAE 4340	41
3.4.2. Ensaio de dureza Rockwell do aço SAE 4340	41 e 42

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	43
4.1 – Resultados para a rugosidade.....	43
4.1.1 – Resultados de rugosidade (Ra, Rz e Rq)	43 a 47
4.1.2 – Superfície de resposta Ra e Rz.....	48 a 58
4.2 – Resultados para a potência	59
4.2.1 - Potência variando ap com jorro, seco e MQL	59
4.2.1.1 – Lubrificação a Jorro	60
4.2.1.2 – Lubrificação a seco	61
4.2.1.3 – Lubrificação MQL.....	62
4.2.2 - Potência variando vc com jorro, a seco e com MQL	63
4.2.2.1 – Lubrificação a Jorro	64
4.2.2.2 – Lubrificação a seco	65
4.2.2.3 – Lubrificação MQL.....	66
4.2.3 - Potência variando f com jorro, seco e MQL	67
4.2.3.1 – Lubrificação a Jorro	68
4.2.3.2 – Lubrificação a seco	69
4.2.3.3 – Lubrificação MQL.....	70
4.2.4 – Comparativos entre as potências das condições de corte	71
4.3 – Resultados de metalografia	72
4.4 – Resultados de ensaio de dureza	73
5. CRONOGRAMA DE EXECUÇÃO	74
6. CONCLUSÕES	75
6.1 – Análise final do trabalho	75
6.2 – Resultados obtidos e resultados esperados.....	75
6.3 - Trabalhos futuros	75 e 76
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77 e 79

Capítulo I

INTRODUÇÃO

1.1 - Aspectos gerais

A fabricação de peças é um dos processos mais difíceis de lidar dentro de um processo produtivo, por isso, foram desenvolvidos diversos métodos com o intuito de aumentar a qualidade das peças fabricadas. Dentro dessa diversidade de processos, os que possuem formação de resíduos são classificados como usinagem. Existem diversos tipos de usinagem e esse processo é extremamente importante para a fabricação de peças.

O torneamento é um desses processos classificados como usinagem, e possui um aspecto muito importante em sua implementação, que é a lubrificação e/ou refrigeração durante o corte. Desenvolver tecnologias para melhorar o sistema de lubrificação é essencial, pensando nisso surgiu um sistema chamado de MQL, mínima quantidade de lubrificante, que além da economia de lubrificante oferece uma melhora em aspectos como qualidade da superfície usinada, diminuição das forças de corte e aumento da vida da ferramenta com a diminuição do desgaste. Além desses fatores, a aplicação de MQL visa diminuir a quantidade de resíduos despejados no meio ambiente.

Para a realização de um estudo relacionado à aplicação do sistema de lubrificação com mínima quantidade de lubrificante é necessário entender diversos aspectos relacionados a torneamento, como parâmetros de corte, tipos possíveis de lubrificação, maquinário utilizado e aspectos finais de uma peça torneada.

Este documento apresenta um relato teórico sobre as condições usinagem, sempre focando no processo de torneamento e também os diversos aspectos relacionados ao sistema de lubri-refrigeração focando principalmente nas características do processo de lubrificação por MQL.

1.2 – Objetivo

1.2.1 – Objetivos Gerais

O procedimento feito neste trabalho tem o propósito de determinar a melhor condição de corte para o torneamento do Aço SAE 4340, utilizando diferentes sistemas de lubri-refrigeração.

1.2.2 – Objetivos específicos

Os parâmetros finais das peças serão medidos de forma quantitativa, por meio de ensaios de potência elétrica e rugosidade.

Capítulo II

Revisão Bibliográfica

2.1 - Conceitos de usinagem

De acordo com Chiaverini (1986), dentro de um processo de fabricação é muito comum ver diversos tipos de processos metalúrgicos combinando entre si para a obtenção de peças. Cada processo tem suas próprias particularidades que se adaptam em diferentes situações.

Processos como fundição e forjamento são bastante úteis, porém, muitas vezes peças forjadas e fundidas tem superfícies grosseiras e com acabamento ruim. Em virtude disso é inevitável a utilização de um processo de usinagem, pois além de atuar no acabamento de peças já confeccionadas em processos de fabricação anteriores, a usinagem permite obter uma série de peculiaridades, como determinados tipos de saliências, furos e roscas.

O que mais diferencia os processos de usinagem de outros processos de fabricação mecânica é a formação de resíduos, chamados de cavaco, ou seja, todos os processos de usinagem produzem cavacos. Sendo que para ocorrer à retirada de material, independentemente do tipo de usinagem, o material utilizado na ferramenta de corte deve ter maior dureza que a peça a ser usinada por causa disso existem diversos tipos de materiais empregados em ferramentas de corte, são eles:

- Aço ferramenta: material mais simples e o mais antigo empregado na fabricação de ferramentas de corte, por isso seu uso hoje em dia se limita a reparos mais simples e em ferramentas que serão utilizadas somente uma ou poucas vezes. Sua composição varia de 0.8 até 1.5% de carbono e possui uma temperatura de trabalho que vai até 250°C, depois disso, sua dureza começa a diminuir (FERRARESI, 1977).
- Aço rápido: Surgiu para substituir o aço ferramenta em aplicações mais complexas, possui diversos elementos de liga, como tungstênio, cromo e vanádio que previnem a fragilidade da peça. Na liga pode ser adicionada o cobalto para o aumento da dureza e da resistência ao desgaste. Sua temperatura de trabalho varia entre 520°C até 600°C (FERRARESI, 1977).

- Ligas fundidas: Possuem alta resistência a temperatura com sua temperatura de trabalho variando entre 700°C e 800°C. Possuem em sua composição elementos como tungstênio, cromo e vanádio (FERRARESI, 1977).
- Metal duro: composto de carbonetos e cobalto, esse tipo de material possui alta dureza e tenacidade. Tem em sua composição 81% de tungstênio, 6% de carbono e 13 % cobalto (FERRARESI, 1977).
- Cermet: é um material formado por cerâmica e metal, o cermet é uma espécie de metal duro à base de titânio. Possui alta resistência a temperatura, boa resistência ao desgaste e a corrosão (FERRARESI, 1977).
- Cerâmica: Possuem basicamente dois tipos, a base de óxido de alumínio e base de nitreto de silício. Por serem cerâmicas, possuem alta resistência a temperatura, não reagem quimicamente com o aço além de serem bastante leves (FERRARESI, 1977).
- Nitreto de boro cúbico cristalino: dureza elevada, alta resistência a temperatura e um alto custo. É bastante aplicado na usinagem de aços duros e em desbaste e acabamento (FERRARESI, 1977).
- Diamante: é utilizado em usinagem finas e com necessidade de acabamentos muito bons. É extremamente caro por ser o material de maior dureza encontrado. Seu problema está relacionado com a alta afinidade que o diamante tem com o carbono (FERRARESI, 1977).

Dentro do próprio conceito de usinagem, existem vários métodos que são utilizados em diferentes situações e para diferentes aplicações na confecção de peças. Dentre os mais comuns destacam-se:

- Torneamento: Utilizado principalmente na usinagem de peças de revolução, onde a peça está presa a placa do torno em movimento de rotação e a ferramenta monocortante desloca-se longitudinalmente ou transversalmente em relação ao eixo da peça.
- Fresamento: Utilizado na usinagem de superfícies prismáticas. A retirada de material no processo de fresamento se dá através de dois movimentos que são executados ao mesmo tempo: o movimento rotativo da ferramenta,

chamada fresa, e o movimento de avanço da mesa da máquina, onde a peça está fixada.

- Furação: O processo tem como objetivo a usinagem de furos em uma peça, passantes ou cegos, utilizando ferramentas chamadas de brocas. É um processo intermediário ou preliminar a outros, já que tem como objetivo abrir furos para criar diâmetros internos com bom acabamento e abrir roscas em peças.

2.2 - Fundamentos do processo de torneamento

Segundo Ferraresi (1977), o processo de torneamento consiste em colocar a peça a ser usinada em uma base giratória e fazer com que a ferramenta de corte passe sobre a peça em giro fazendo assim com que a peça seja usinada. Esse processo pode ser feito de maneira manual, em tornos comuns que são chamados usualmente de tornos universais, ou de maneira automatizada utilizando um torno CNC (do inglês, *Computer Numeric Control*), esse processo é bem mais complexo, mas dentro de uma indústria é bastante utilizado pela repetitividade que o processo dá para as peças usinadas. A fabricação de peças utilizando tornos universais é bastante usual para reparos rápidos e fabricação de peças de reposição rápida, o que também acaba sendo bastante interessante também para a indústria.

Como o processo de torneamento se dá através da rotação da peça a ser usinada, é importante que o torno seja capaz de girar a peça em velocidades diferentes e que o operador da máquina tenha controle dessa rotação, já que essa velocidade é um parâmetro de usinagem muito importante que define o diâmetro final de uma peça e o seu acabamento.

2.2.1 - Grandezas de corte no torneamento

Segundo Chiaverini (1986), as principais grandezas de corte no processo de torneamento são:

- Velocidade de Corte (v_c): velocidade tangencial ou periférica da peça em relação à ferramenta, sendo medida em metros por minuto (m/min). Seu cálculo é dado pela equação 2.1:

$$v_c = \frac{\pi \times d \times n}{1000} \quad \text{Eq. (2.1)}$$

Onde: d = diâmetro da peça a ser usinada - [mm];

n = rotação da peça a ser usinada - [rpm].

- Avanço (f): avanço é a velocidade linear na qual a ferramenta passa pela peça, é medido em milímetros por rotação (mm/rot), ou seja, quantos milímetros a ferramenta avança para cada rotação da máquina.
- Profundidade de corte (a_p): medida em milímetros, é a quantidade que a ferramenta de corte penetra na peça a ser usinada.

A Figura (2.1) mostra a identificação das principais grandezas de corte no torneamento, especificamente, no torneamento cilíndrico externo. Essas grandezas de corte influenciam diretamente na força e potência de usinagem, e, principalmente, no acabamento superficial da peça usinada.

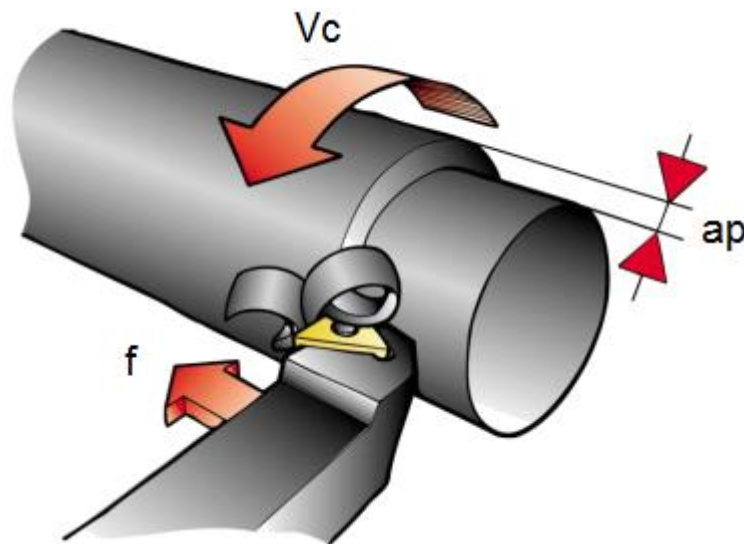


Figura 2.1 - Identificação das principais grandezas de corte no torneamento cilíndrico externo. (Fonte: Adaptado de Kennametal, 2014).

2.3 - Acabamento superficial

O resultado da deformação plástica e posteriormente a ruptura do material é o que causa o acabamento superficial de uma peça na usinagem. Segundo Machado *et al.* (2009), durante o processo de usinagem de uma peça, fatores como altas

temperaturas, vibrações e reações químicas alteram a superfície e a própria estrutura final da peça usinada.

O acabamento de uma peça pode ser medido e qualificado através de três aspectos, são eles:

- Rugosidade: é composta de erros micro geométricos originados do próprio processo de corte. A medida da rugosidade pode ser realizada por diversos parâmetros, que podem ser examinados depois da usinagem, ou mesmo durante, pois de acordo com o projeto, pode ser considerado uma variável crítica. Os parâmetros de rugosidade podem ser: de amplitude (picos e vales na superfície); de espaço (espaçamentos longitudinais na superfície); híbridos (combinam variações longitudinais e de superfície) (MACHADO *et al.*, 2009).
- Ondulações: são irregularidades superficiais maiores do que as encontradas no âmbito da rugosidade, elas podem ser ocasionadas por vibrações, mal posicionamento da ferramenta, temperatura de corte, entre outros (MACHADO *et al.*, 2009).
- Falhas: Já as falhas são descontinuidades na superfície causadas pelo próprio processo de obtenção da peça, por exemplo, fundição, essas podem ser bolhas, trincas e inclusões (MACHADO *et al.*, 2009).

A determinação de cada parâmetro na superfície final de uma peça usinada tem relação com o projeto da peça e a sua utilização. Por exemplo, mancais e calibradores devem ser bastante lisos, para que possam obter o mínimo de atrito possível, já em sistemas de freio uma superfície mais rugosa é importante, porque se deseja adquirir um maior atrito entre as peças (MACHADO *et al.*, 2009).

Dos três aspectos citados anteriormente, que compõem o acabamento de uma superfície, com certeza o mais estudado e utilizado pela indústria para diferenciar peças usinadas é a rugosidade.

A medida da rugosidade, dada em micrômetros (μm), pode ser realizada por diversos parâmetros, que são examinados depois da usinagem, ou até mesmo durante, pois de acordo com o projeto, pode ser considerada uma variável crítica. O parâmetro mais utilizado na indústria é o de amplitude R_a que mostra o desvio aritmético médio da superfície dada por picos e vales, conforme mostrado na Fig. 3.1. É bastante empregado como controle do processo de usinagem, pois alterações

no seu valor representam uma forma de observar o desgaste da ferramenta de corte. A sua popularidade na indústria também está ligada a simplicidade do funcionamento dos seus instrumentos de medição (FERRARESI, 1977).

Outro parâmetro de amplitude utilizado para o cálculo da rugosidade é o Rz, que mostra a altura média das dez maiores distâncias pico-vale da superfície usinada, a Fig. 3.2 mostra uma ilustração da obtenção deste parâmetro.

O equipamento que mede a rugosidade é o rugosímetro. Existem dois tipos de teste para realizar a medição, por contato ou sem contato. Na medição feita por contato existe um apalpador que percorre a superfície da peça em linha reta em um comprimento definido. O deslocamento vertical durante o comprimento estabelecido do apalpador envia sinais elétricos, que por sua vez são lidos e geram um gráfico ou números referentes à altura dos picos, porém esse instrumento de medição possui alguns erros associados a ponta de diamante. O raio da ponta que exhibe o perfil de uma forma mais suave que a realidade, sofre desgaste medindo superfícies de materiais muito duros e causa danos na face de materiais moles (MACHADO *et al.*,2009).

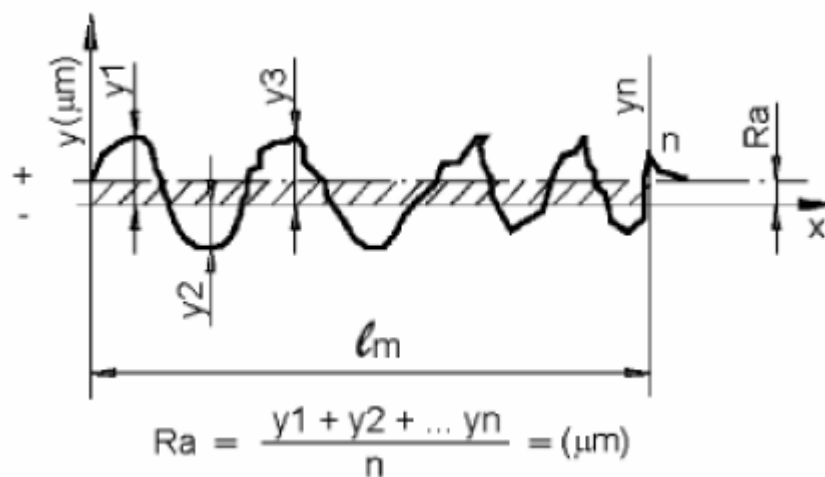


Figura 2.2 - Ilustração da obtenção do parâmetro de amplitude R_a . Fonte: Rosa (2009).

$$R_z = R_p + R_v$$

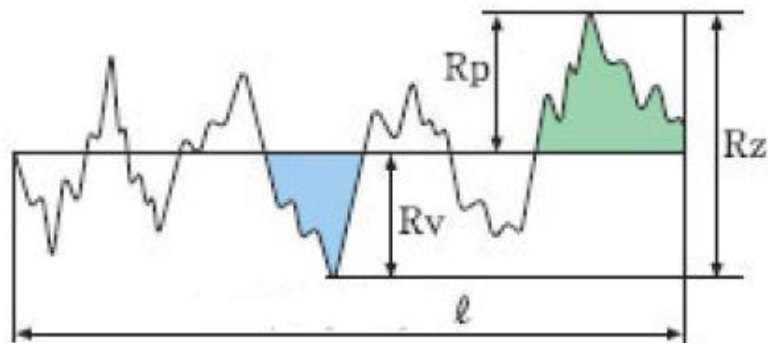


Figura 2.3 - Ilustração da obtenção do parâmetro de amplitude R_z . Fonte: Machado *et al.*, 2009.

2.4 - Força e potência de usinagem

2.4.1 - Força de usinagem

A força de usinagem (F_u) é um parâmetro fundamental para projetar uma máquina-ferramenta, pois é a partir dela que se determina a quantidade de potência necessária no sistema máquina-ferramenta, ou seja, é a força de usinagem que fornece informação para o dimensionamento do motor elétrico principal da máquina (MACHADO *et al.*, 2009).

De acordo com Ferraresi (1977) e Machado *et al.* (2009) os três componentes básicos da força de usinagem são:

- Força de corte ou força principal de corte (F_c): é a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de corte, dada pela velocidade de corte.
- Força de avanço (F_f): é a projeção da força de usinagem sobre o plano de trabalho, na direção de avanço, dada pela velocidade de avanço.
- Força passiva ou força de profundidade (F_p): é a projeção da força de usinagem perpendicular ao plano de trabalho.

A Figura 4.1 mostra as três componentes da força de usinagem decompostas no processo de torneamento cilíndrico externo.

As componentes F_c e F_f são facilmente determinadas, pois elas agem em direções conhecidas. Dinamômetros, principalmente, à base de cristais piezoelétricos ou extensômetros elétricos, são utilizados para este fim.

Dessas duas componentes, F_c e F_f , a força de corte é a de maior importância na usinagem, uma vez que ela é responsável pela maior parcela da potência de usinagem (Machado *et al.*, 2009). Sendo a força de corte influenciada diretamente pelas grandezas de corte (v_c , f e a_p) e pelo desgaste da ferramenta.

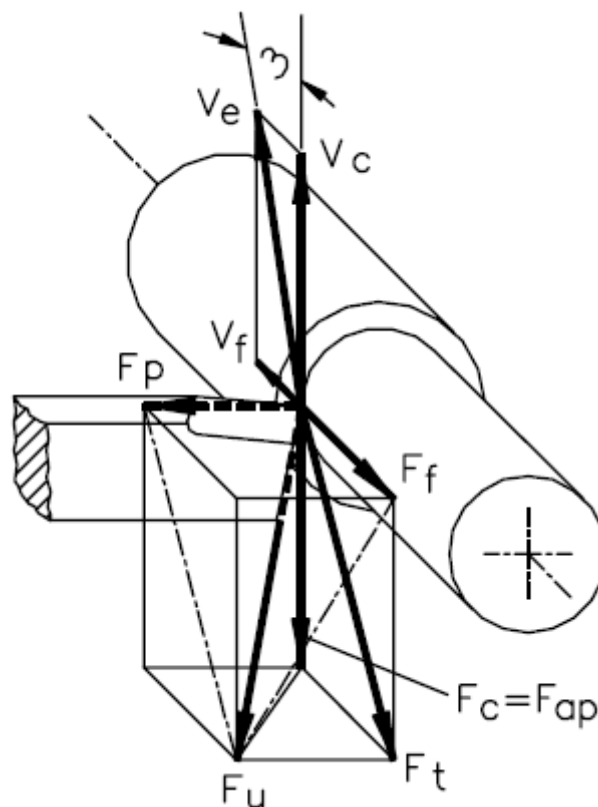


Figura 2.4 - Decomposição da força de usinagem no torneamento cilíndrico externo (Machado *et al.*, 2009).

2.4.2 - Potência de usinagem

Na usinagem a potência é uma resultante do produto das componentes da força de usinagem pelas respectivas componentes de velocidade em cada direção. As equações 4.1 e 4.2 mostram o cálculo das componentes da potência de corte (P_c) e avanço (P_f) (MACHADO *et al.*, 2009).

$$P_c = \frac{F_c \times v_c}{60 \times 75} \quad \text{Eq. (2.2)}$$

$$P_c = \frac{F_f \times v_f}{1000 \times 60 \times 75} \quad \text{Eq. (2.3)}$$

Onde: F_c = força de corte - [N];

v_c = velocidade de corte - m/min];

F_f = força de avanço - [N];

v_f = velocidade de avanço - [mm/min];

P_c e P_f dados em [CV].

Além da potência de usinagem ser um fator preponderante no projeto de uma máquina-ferramenta, o seu monitoramento durante o processo de corte é de suma importância, uma vez que é possível relacionar o estado da ferramenta de corte, mais precisamente o seu desgaste, com o sinal da potência.

Atualmente máquinas-ferramenta mais modernas contam com o monitoramento em tempo real da potência elétrica utilizada durante a usinagem, informando ao operador o momento ideal da troca de ferramenta. A potência elétrica pode ser relacionada com a potência de usinagem à medida que se tem o rendimento do motor elétrico da máquina-ferramenta.

Já uma alternativa prática e de baixo custo é monitorar a potência elétrica durante a usinagem medindo-se a corrente elétrica na entrada da máquina-ferramenta com sensores de efeito *Hall*. O princípio de funcionamento do sensor de efeito Hall baseia-se na passagem de uma corrente elétrica através de uma placa sob o efeito de um campo magnético perpendicular a sua superfície, gerando uma diferença de potencial proporcional a corrente medida entre suas extremidades (HALLIDAY *et al.*, 2001).

Numa primeira montagem o sensor é instalado em uma das fases de alimentação da máquina-ferramenta, e posteriormente ligado a um transdutor de corrente. O sensor de efeito *Hall* envia o sinal em milivolts (mV) para o transdutor que o converte em Volts (V). Uma placa de aquisição de dados é conectada ao

transdutor de corrente, que via *software* registra os dados da medição (CHAVES *et al.*, 2014).

Numa segunda montagem é possível diminuir ainda mais o custo para aquisição da potência elétrica, utilizando-se o sensor de efeito *Hall* juntamente com uma plataforma eletrônica de *hardware* livre com somente uma placa.

Essas são maneiras mais baratas, que, provavelmente, podem ser plenas e robustas para relacionar diretamente a potência elétrica ou a potência de usinagem com o desgaste da ferramenta de corte, e mesmo a influência de outros parâmetros de usinagem, como a utilização de fluidos de corte.

2.5 - Fluidos de corte

2.5.1 - Aspectos Gerais

A utilização de fluidos de corte na usinagem é mais um parâmetro importante na usinagem, uma vez que a sua aplicação possibilita maiores benefícios ao corte.

A escolha adequada de um fluido de corte deve incidir naquele que possui composição química e propriedades corretas, para enfrentar as tantas adversidades de um processo de usinagem. O fluido deve ser aplicado utilizando um método que permita a sua maior proximidade da aresta de corte da ferramenta, para que ele possa exercer suas funções. As principais funções dos fluidos de corte são lubrificar à baixas velocidades de corte e refrigerar à altas velocidades de corte. As funções secundárias são no auxílio da retirada de cavaco da zona de corte e proteção da máquina-ferramenta e da peça contra a corrosão atmosférica (FERRARESI, 1977; DINIZ *et al.*, 2001; MACHADO *et al.*, 2009).

De acordo com Machado *et al.* (2009) o principal objetivo de se usar fluido de corte é reduzir o custo total das peças usinadas ou aumentar a taxa de produção. Tal propósito pode ser atingido quando se consegue uma ou mais vantagens que os fluidos de corte podem proporcionar:

- Aumentar a vida da ferramenta de corte pela lubrificação e refrigeração;
- Reduzir as forças de usinagem devido à lubrificação, com redução da potência de usinagem;
- Melhorar o acabamento da peça usinada.

Quando se usa fluido de corte não basta apenas conhecer os principais tipos - emulsões, sintético, semi-sintético, óleos vegetais e minerais - é necessário também conhecer os métodos de aplicação, uma vez que eles podem fazer a diferença em seu desempenho durante o corte.

Existem basicamente três métodos de aplicação do fluido de corte durante a usinagem (MACHADO et al., 2009):

- Fluido em abundância - jorro de fluido à baixa pressão;
- Pulverização de fluido;
- Aplicação de fluido à alta pressão.

A aplicação de fluido em abundância é muito usual na indústria devido a sua facilidade de uso e simplicidade. Já a nebulização oferece vantagens em relação ao primeiro método, pois possibilita uma maior penetração e velocidade do fluido. O último método, a alta pressão, é mais difícil de ser implementado na indústria e envolve maiores custos (MACHADO, 1990).

Atualmente a indústria tem trabalhado fortemente na tentativa de reduzir custos e tornar o processo de usinagem cada vez menos agressivo ao meio ambiente. Por isso, existe uma necessidade cada vez maior da usinagem a seco, sem aplicação de fluido de corte. No entanto, como isso ainda não é inteiramente possível para diversos processos de usinagem, novas técnicas de aplicação de fluido de corte em baixos volumes estão sendo investigadas.

Nesta técnica o fluido de corte em baixa quantidade é aplicado juntamente com um fluxo de ar, método da pulverização com ar comprimido. Geralmente, a pulverização de ar comprimido com baixa quantidade de fluido de corte é direcionada contra a saída do cavaco, ou entre a superfície de folga da ferramenta e a peça (DINIZ *et al.*, 2001). Essa técnica é conhecida e difundida atualmente como Mínima Quantidade de Lubrificante - MQL.

2.5.2 - Aplicação da técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL)

O sistema de lubrificação e refrigeração convencional por jorro de um processo de usinagem possui uma série de problemas, muitas vezes os fluidos utilizados prejudicam a saúde dos operadores que ficam expostos aos produtos durante longos períodos em grandes quantidades, não são nada práticos com relação à limpeza do ambiente de trabalho, necessitam de um cuidado especial na

hora do descarte, que se feito da maneira incorreta, pode trazer uma série de riscos ao meio ambiente e com isso problemas sérios para a indústria, e em grande quantidade ocupam muito espaço no chão de fábrica onerando ainda mais a produção.

Pensando nos problemas causados pelo sistema convencional, foi desenvolvida uma técnica diferente de lubri-refrigeração que sana vários desses problemas e melhora as condições de produção, essa técnica é chamada de MQL (mínima quantidade de lubrificante), esse método atua de maneira diferente do sistema convencional de lubrificação na usinagem de peças. Em um processo usando MQL o fluido de corte é misturado com ar comprimido e injetado em uma determinada pressão no sistema a ser lubrificado, a quantidade de fluido utilizado nesse processo pode variar de 5 ml/h até 50 ml/h, medidas que são para uso geral, uma vez que dependendo do tamanho da ferramenta, no caso de ferramentas com diâmetros superiores a 40 mm, a quantidade de fluido pode ser superior a 150 ml/h (MGUV, 2010). A título de comparação, o método de lubri-refrigeração usual, por jorro, impõe uma vazão média de fluido de corte no processo de usinagem de 20 l/min (THAI *et al.*, 2014).

Os processos usuais de lubrificação e refrigeração atuam na usinagem como agentes reparadores, isso quer dizer que o processo de cisalhamento do cavaco já começou e o aquecimento excessivo da peça já está acontecendo, nesse momento o fluido de corte no método convencional começa a dissipar o calor e diminuir o atrito na usinagem, ou seja, o sistema convencional só trabalha no sintoma do problema e não é eficaz para concertar de fato o problema. Já com o sistema MQL, a atuação do lubrificante é feita através da criação de uma camada lubrificante de alta qualidade que irá atuar tanto na peça como na ferramenta, fazendo com que o contato entre peça e ferramenta já esteja devidamente lubrificado e protegido antes que o cisalhamento do cavaco inicie, ou seja, o método MQL evita o problema de aquecimento excessivo do sistema, trabalhando na causa do problema, que seria o atrito entre as peças metálicas.

Essa camada de proteção do contato é feita através da polarização das moléculas do fluido, que através da diferença de polaridade se unem em nível molecular formando uma camada de alta qualidade em volta de todo o contato, com esse tipo de solução basicamente grande parte do calor dissipado fica no cavaco,

deixando a peça final e a ferramenta mais protegidas da elevada temperatura do processo de corte. Por isso, usando o sistema MQL, além de economizar na quantidade de lubrificante utilizado na fabricação, os resultados da usinagem serão melhores em aspectos como, formação do cavaco, temperatura de usinagem e qualidade do acabamento da peça usinada. O funcionamento das duas técnicas, jorro e MQL, podem ser vistos nas ilustrações das Figs. (5.1) e (5.2) (MGUV, 2010).

O sistema MQL possui uma diversidade de vantagens em relação ao sistema de lubrificação tradicional. Essas vantagens atuam em diversas frentes, como: melhor refrigeração e lubrificação do sistema, aqui é importante destacar que altas temperaturas em um processo de usinagem podem causar um maior nível de desgaste da ferramenta; além de facilidade no descarte do fluido devido a pouca quantidade de fluido utilizado, facilidade na reutilização do fluido de corte, já que pela mínima quantidade usada não é necessário que o fluido já usado seja decantado ou filtrado, a utilização de pouca quantidade de lubrificante pode representar uma redução no custo de produção, já que os gastos com fluidos de corte chegam a ser de 16% do custo total de um processo de usinagem, além disso, o fluido utilizado em MQL não necessita de tantos aditivos, principalmente, os relacionados a prevenção de ataque de bactérias (MGUV, 2010). A Figura (5.3) mostra alguns custos relacionados aos fluidos de corte em usinagem.

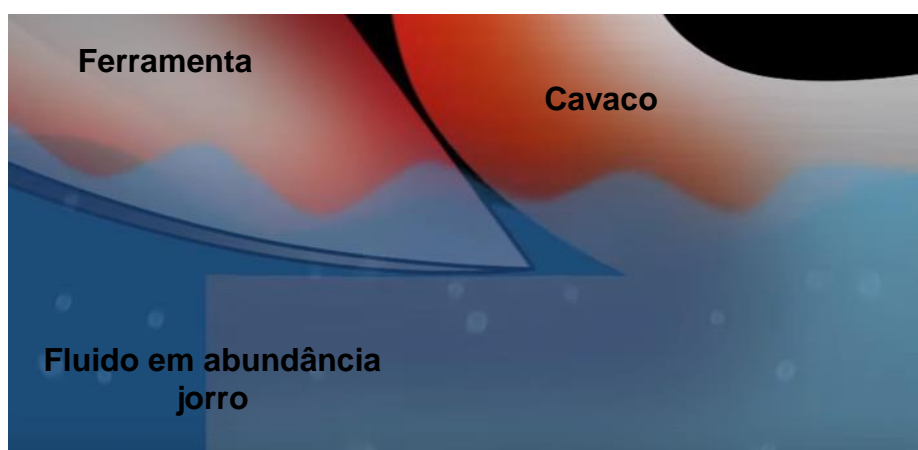


Figura 2.5 - Sistema convencional por jorro atuando na usinagem. Fonte: MGUV, 2010.

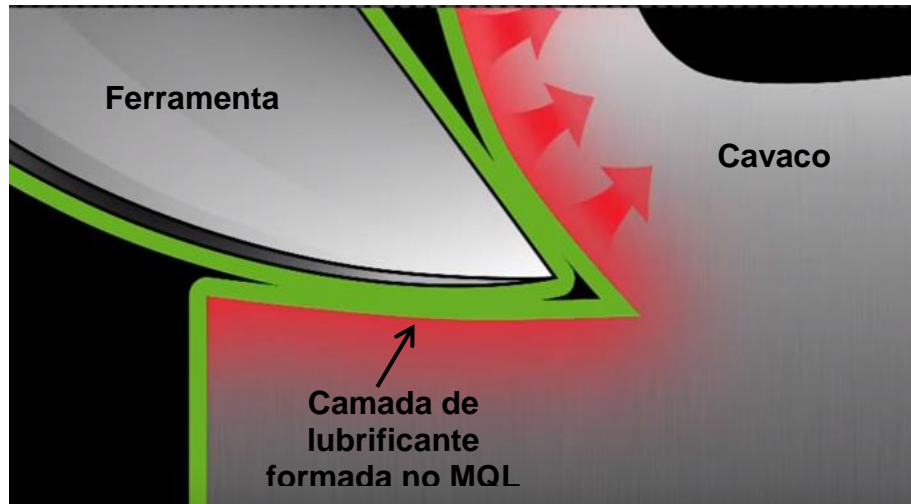


Figura 2.6 - Sistema MQL atuando na usinagem. Fonte: MGUV, 2010.

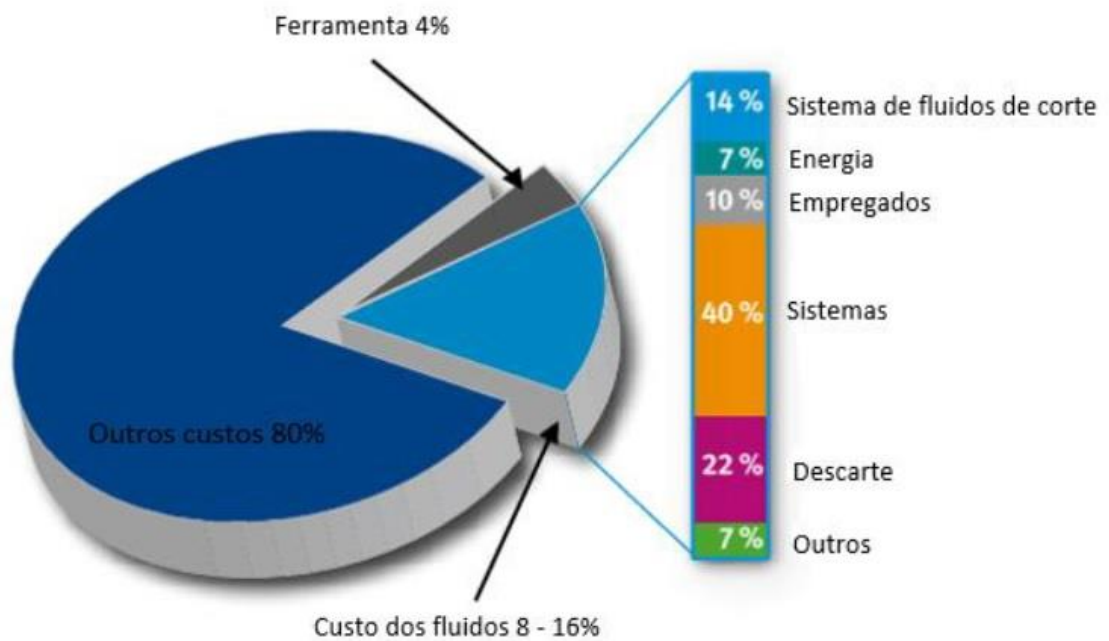


Figura 2.7 - Custos de usinagem. Fonte: MGUV, 2010 (modificado)

No dia a dia de uma indústria, uma preocupação cada vez maior é sobre o meio ambiente, a cada dia que passa são criadas e implementadas novas leis ambientais e com essas leis vem diversas restrições e novos cuidados que as empresas tem que tomar. O descarte do fluido de corte é um desses cuidados que a indústria tem que estar atenta. Daí vem uma grande vantagem do sistema MQL, que tem o descarte de material quase nulo.

Por todas essas vantagens apresentadas no uso do MQL, esse processo se tornou essencial nas plantas da Ford, por exemplo, na usinagem de transmissões e árvores de manivelas de aços ligados, blocos de motor de ferro fundido e cabeçotes em alumínio (THAI *et al.*, 2014).

2.5.3 - Torneamento com mínima quantidade de lubrificante

Existem dois tipos de aplicação de MQL, externa (aerossol) e interna. A aplicação externa de MQL é mais utilizada, já que ela possibilita o uso do sistema em diversas máquinas. Já o sistema interno só pode ser feito quando a máquina já foi construída com o sistema embutido (THAI *et al.*, 2014). Na Figura (5.4) é mostrada uma ilustração com os dois tipos de aplicação para o processo de furação.

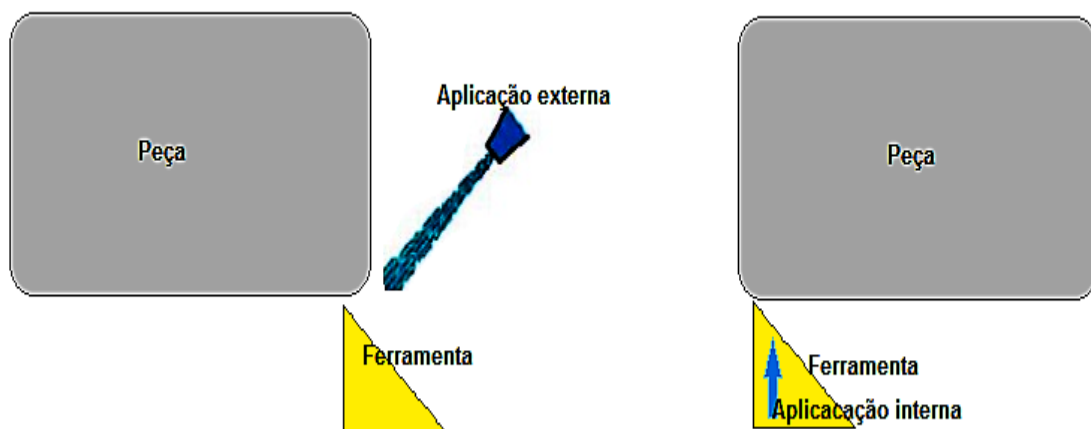


Figura 2.8 - (a) Aplicação externa; (b) Aplicação interna. Fonte: Thai *et al.*, 2014 (Adaptado).

O método de MQL é muito aplicado no torneamento, atualmente diversos equipamentos de MQL já vem com sistemas de adaptação para o uso em vários tipos de máquinas-ferramenta, com aplicação externa ou interna, seja em tornos universais, automáticos ou com comando numérico (THAI *et al.*, 2014).

Muitos experimentos já foram realizados para analisar as diferenças em processos de torneamento com lubrificação convencional e lubrificação através de MQL.

Tai *et al.* (2014), realizaram uma comparação entre o MQL e o sistema convencional por jorro, e como essa diferença afeta diversos aspectos dos componentes de *powertrain* da indústria automotiva. Uma das partes do estudo trata

da relação entre o uso do MQL e a emissão de partículas poluentes no ar. Segundo os pesquisadores, o processo de MQL é visto como um processo de baixa emissão, concluindo que o nível de emissão é proporcional à quantidade de fluido que entra no sistema, isso quer dizer que, com a otimização do fluxo de fluido no processo de torneamento melhora-se a qualidade do ar, como mostra o gráfico comparativo dado na Fig. (5.5(a)). A Figura (5.5(b)) mostra que a variação na viscosidade do fluido aplicado no MQL pode influenciar na emissão de poluentes, fluidos com viscosidade menor do que 20 mm²/s geram maior emissão de poluentes, tanto na zona de corte quanto para o meio ambiente.

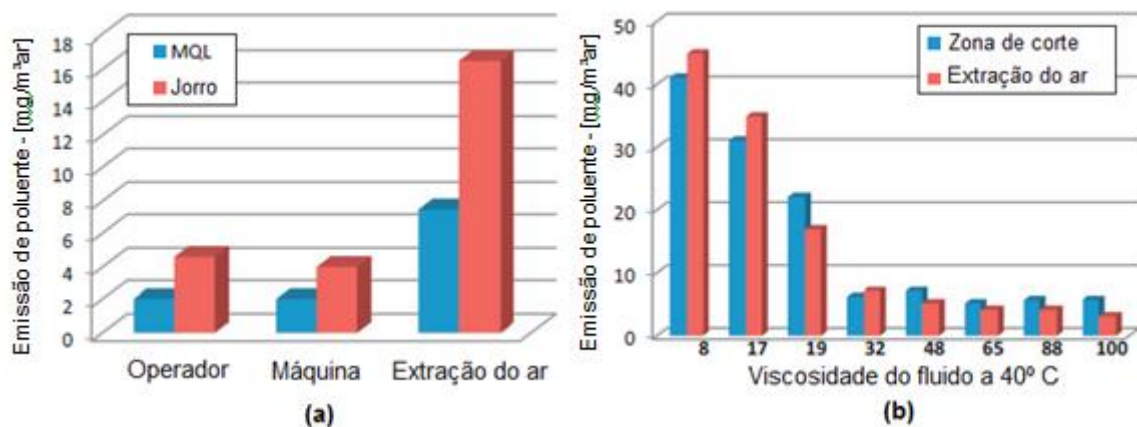


Figura 2.9 - Comparação de emissão de partículas poluentes.

Em (a) Jorro X MQL e em (b) entre diversas viscosidades de fluido aplicados no sistema MQL: Fonte: Tai *et al.* 2014 (modificado).

Outro experimento envolvendo o uso comparativo de MQL foi realizado por Silva *et al.* (2013), nesse experimento foi utilizado um fluido de origem vegetal no MQL, em comparação com a usinagem a seco (sem nenhum lubrificante) de um aço SAE 1050 em condições de torneamento diferentes. Silva *et al.* (2013), verificaram que para velocidades de corte de 200 m/min e 350 m/min, a aplicação de óleo vegetal por MQL teve um desempenho melhor do que na usinagem a seco, uma vez que a aplicação de MQL aumentou a vida da ferramenta de metal duro. Além disso, no corte a seco a ferramenta experimentou uma intensa deformação plástica da aresta, causando sua falha catastrófica, ao passo que com a aplicação de MQL o

mecanismo de desgaste atuante na ferramenta foi a adesão e arrastamento de material, *attrition*.

No experimento de Dhar *et al.* (2006), também foi utilizado a técnica de MQL para torneiar um aço de médio carbono, concluiu-se em seu experimento que para melhorar a eficiência do processo de MQL, podem ser feitas alterações no próprio fluido de trabalho, como por exemplo, a utilização de uma mistura de ar com óleo solúvel. Essa mistura é uma opção mais eficiente do que simplesmente o uso do óleo solúvel sozinho.

Segundo Itoigawa *et al.* 2006, o processo de MQL melhora a rugosidade de peças de alumínio torneadas em tornos CNC. No experimento realizado por eles foram utilizados dois tipos de lubrificante, um óleo vegetal e um sintético. Foi verificado que com o óleo vegetal o sistema MQL tem um rendimento de lubrificação pequeno em baixas condições de torneamento. Já quando o óleo sintético é utilizado pode se verificar uma boa lubrificação, porém a vida útil da ferramenta diminui. Para sanar esse efeito negativo na ferramenta, o óleo pode ser misturado com pequenas quantidades de água.

Nos estudos realizados por Lakic *et al.* (2013), conclui-se que o sistema MQL é uma excelente opção para se melhorar os processos de torneamento na indústria em diversos aspectos. Em sua análise, é citado a importância que o custo de operação de uma máquina e a saúde de seus operadores tem dentro de qualquer indústria. Por isso, é importante otimizar esse custo em máquinas de torneamento, diminuindo as forças de corte, aumentando a vida útil das ferramentas usadas e melhorando a qualidade das peças torneadas. Por isso é importante investir em tecnologias com baixo custo e eficientes, como é caso do sistema de lubrificação por MQL.

2.6 - Planejamento de experimentos

Planejar bem experimentos é de extrema importância, tanto na indústria quanto no meio científico. Quando se planeja bem o que vem a ser experimentado, as chances de o resultado mostrado ao final ser verdadeiro é bem maior. Uma das técnicas mais utilizadas para executar experimentos é dividir as variáveis que se

deseja avaliar em fatores, cada fator deverá possuir níveis que serão avaliados e identificados suas influencias na resposta final do experimento.

Ao longo do tempo foram criadas diversas técnicas de planejamentos de experimentos que tem como função variar todos os níveis de todos os fatores, ao mesmo tempo, e aí sim verificar a influência dessas múltiplas variações na resposta final do experimento (BARROS NETO *et al.*, 2001).

Alguma dessas técnicas são bastante obvias, enquanto outras possuem um grau de complexidade muito maior. Fica claro que muitas vezes em experimentos de alta complexidade com diversos fatores e níveis, o custo que se teria para gerenciar todos esses experimentos é muito grande, por isso, as técnicas que são usadas em planejamento de experimentos usam de conhecimentos estatísticos para alcançar seus resultados (BARROS NETO *et al.*, 2001).

A técnica que será utilizada neste trabalho será a de planejamento fatorial, utilizando esse método é possível alcançar informações extremamente úteis com um número reduzido de experimentos avaliados.

2.6.1 - Planejamento fatorial

Na hora de realizar um experimento, a primeira coisa que se deve saber é o que se procura descobrir com ele, pode parecer meio óbvio, mas muitas vezes é uma pergunta complexa. Para que um experimento dê certo é muito importante que o experimentador tenha consciência do que ele deve fazer, quais os fatores de influencia no experimento e qual resultado ele busca alcançar (BARROS NETO *et al.*, 2001).

Muitas vezes a filtragem de fatores de influencia no experimento não é tão simples assim, é aí que entra um método chamado planejamento fatorial fracionário, esse método usa de dados estatísticos para filtrar os fatores que não terão influência no resultado final do experimento. Mas isso não é o bastante, como complemento a essa técnica é usado uma técnica chamada de planejamento fatorial completo, esse procedimento dará o resultado que cada variação dos níveis de cada fator irá ter nas respostas finais do experimento (BARROS NETO *et al.*, 2001).

Dito isso, monta-se o passo a passo de como um experimento pode ser planejado de maneira correta:

- Decidir qual é a resposta que gostaria de saber;

- Escolher bem os fatores que serão utilizados nas análises estatísticas através da filtragem do próprio operador;
- Realizar um planejamento fatorial incompleto quando o número de fatores for muito grande. Essa análise irá analisar somente os efeitos principais;
- Com os fatores e os níveis determinados, utilizar um planejamento fatorial completo para determinar a influência que cada variação tem na resposta final.

2.6.2 - Planejamento fatorial completo 2^K

Para fazer um experimento, a escolha dos fatores e as respostas que se deseja obter são o primeiro passo que se deve considerar para fazer planejamento fatorial. Os experimentos podem ser encaixar em dois grandes grupos: os experimentos simples e os experimentos fatoriais. Os experimentos simples são aqueles que possuem somente um fator a ser considerado, o que simplifica as análises, porém são utilizados somente em situações pouco complexas e bastante específicas. O normal é que se trabalhe com mais de um fator variando durante o experimento, na técnica de planejamento fatorial os fatores podem ser qualitativos como é o caso do tipo de lubrificante utilizado na usinagem (jorro ou MQL) ou podem ser quantitativos como é o caso da velocidade de corte e o ângulo de saída da ferramenta (BARROS NETO *et al.*, 2001).

Na hora de executar um planejamento fatorial completo, a primeira coisa que se deve fazer é determinar quais são os níveis (valores para fatores quantitativos ou classes para fatores qualitativos) para cada fator escolhido.

Usando dois níveis em cada variável, o primeiro nível é chamado de nível superior (+1) e o segundo nível é chamado de nível inferior (-1). A Tabela (6.1) mostra a formação de uma matriz de planejamento, que é a representação de todos os níveis de cada fator juntamente com a matriz de resposta. Em sua primeira coluna é representado a sequência dos 2^K testes. Na segunda coluna estão os valores médio para cada análise. Os valores das colunas k_1 , k_2 e k_3 representam as combinações que são possíveis dos “k” fatores. Os valores das colunas K_1K_2 , K_1K_3 e K_2K_3 apresentam as interações entre cada um dos fatores. A última coluna mostra as saídas, que são necessárias para obter a matriz de resposta do problema (SILVA, 2011).

Tabela 2.1 - Matriz de planejamento. Fonte: Silva, 2011.

Nº Ens	M	Variáveis de entrada					Interação entre duas variáveis					Respostas			
		k ₁	k ₂	k ₃	.....	k _n	k ₁ k ₂	k ₁ k ₃	k ₂ k ₃	.....	k _(n-1) k _n	y ₁	y ₂	.....	y _n
1	+1	-1	-1	-1	.....	-1	+1	+1	+1	.....		y ₁₁	y ₂₁	.....	y _{n1}
2	+1	+1	-1	-1	.....	-1	-1	-1	+1	.....		y ₁₂	y ₂₂	.....	y _{n2}
3	+1	-1	+1	-1	.....	-1	-1	+1	-1	.....		y ₁₃	y ₂₃	.....	y _{n3}
4	+1	+1	+1	-1	.....	-1	+1	-1	-1	.....		y ₁₄	y ₂₄	.....	y _{n4}
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮		⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮		⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮		⋮	⋮	⋮	⋮
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮		⋮	⋮	⋮	⋮
2 ^k	+1	+1	+1	+1	.....	+1	+1	+1	+1	.....		y _{12^k}	y _{22^k}	.....	y _{n2^k}

2.6.3 - Análise da significância dos efeitos

Dentro de um planejamento fatorial, pode ser feito o estudo de dois tipos de efeitos, os efeitos principais e os efeitos de interações (BARROS NETO *et al.*, 2001):

- Efeito principal: é o efeito que cada fator possui no resultado final, sem levar em consideração os outros efeitos;
- Efeito de interações: é o efeito que surge da interação de dois ou mais fatores que podem influenciar o resultado final. Quando se observam os efeitos de interação pode-se ter duas respostas:
 - Interações de não significância: é quando um fator não interfere no comportamento de outro.
 - Interações de significância: é quando a variação de um fator muda o comportamento de outro fator.

2.6.4 - Modelo para previsão da magnitude da variável resposta

A análise da significância que as variáveis de entrada possuem nas variáveis de saída, são chamadas de efeitos. A importância que cada efeito tem, decorrente das interações dos fatores, é calculada de forma numérica através da Eq. (2.4) matricial (SILVA, 2011):

$$Y_n = X.t.Y \quad \text{Eq. (2.4)}$$

Onde:

Y_n = valor da significância;

X = matriz do coeficiente de contraste;

Y = matriz dos resultados.

O erro padrão dos efeitos (*S-efeito*) é determinado segundo a Eq. (2.5):

$$S_{\text{efeito}} = \sqrt{s^2 \cdot Nn} \quad \text{Eq. (2.5)}$$

Onde:

S-efeito = erro padrão dos efeitos;

s^2 = média aritmética das variâncias;

Nn = número de repetições para cada ensaio

Outra ferramenta que ajuda a entender o comportamento das variáveis, e utiliza os valores de efeito de cada parâmetro são os gráficos de Pareto, nesse tipo de gráfico todos os efeitos são calculados e comparados, para que se possa analisar qual parâmetro é mais importante e qual interação entre parâmetros tem maior influência na variável dependente.

Capítulo III

PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

3.1 - Aspectos gerais

Neste capítulo são apresentadas as condições dos experimentos de usinagem no torneamento com mínima quantidade de lubrificante. A organização dos experimentos segue a seguinte ordem:

- Ensaio de Rugosidade
 - A seco - sem aplicação de fluido de corte;
 - Jorro - com aplicação de fluido de corte em abundância;
 - MQL - com aplicação de mínima quantidade de lubrificante.

- Ensaio de Potência Elétrica no Torneamento
 - A seco - sem aplicação de fluido de corte;
 - Jorro - com aplicação de fluido de corte em abundância;
 - MQL - com aplicação de mínima quantidade de lubrificante.

- Caracterização do Aço SAE 4340
 - Metalografia do aço SAE 4340.
 - Ensaio de dureza Rockwell do aço SAE 4340.

O fluxograma da Fig. (3.1) a seguir mostra a organização adotada para execução dos ensaios propostos.

Conforme a Fig. 3.1, a execução do trabalho iniciará com os ensaios de rugosidade das peças com três variações - a seco, com jorro e com aplicação de mínima quantidade de lubrificante (MQL). A seguir serão executados ensaios de medição de potência elétrica, também com três variações no torneamento - a seco, com jorro e com aplicação de mínima quantidade de lubrificante (MQL). Na finalização dos procedimentos experimentais será realizada a caracterização do aço SAE 4340 por meio de ensaios de metalografia e dureza Rockwell.

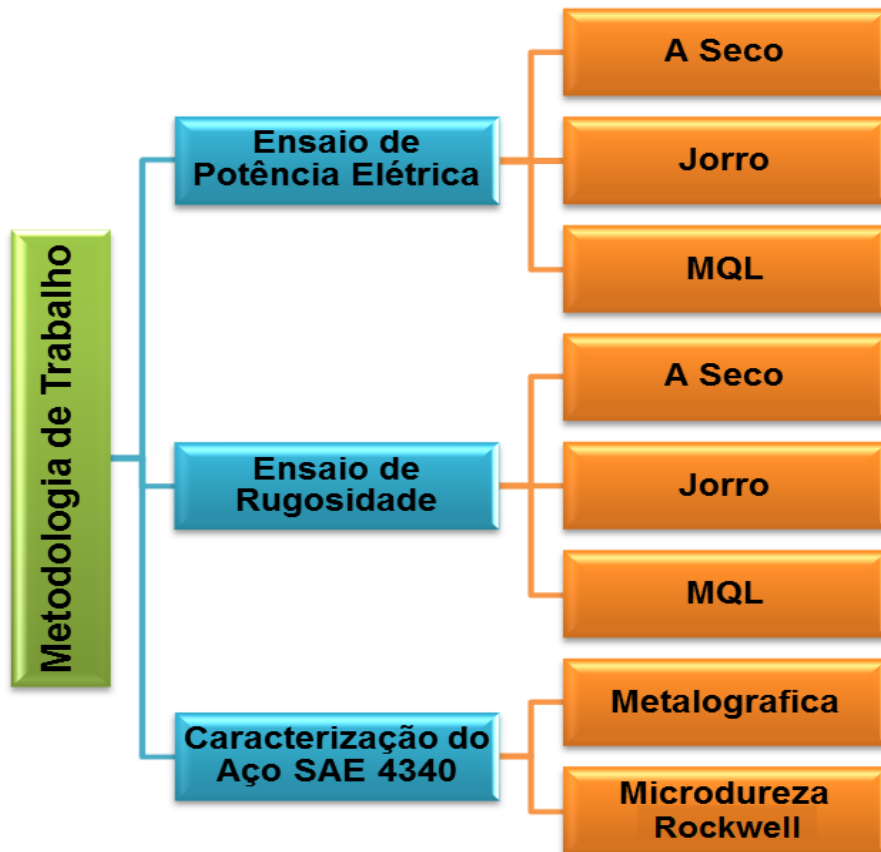


Figura 3.1 - Fluxograma dos procedimentos experimentais realizados.

Fonte: Próprio autor.

3.2 - Ensaio de potência elétrica no torneamento

A etapa seguinte tem como propósito obter a potência de elétrica durante o torneamento cilíndrico externo do aço SAE 4340, com aplicação de mínima quantidade de lubrificante, jorro e a seco, de acordo com as seguintes condições de corte: $V_c = 275$ e 425 m/min, $f = 0,10$ e $0,20$ mm/rot e $a_p = 1,0$ e $2,0$ mm. Os parâmetros de corte foram estabelecidos dentro da faixa de trabalho da ferramenta de metal duro, conforme as especificações do fabricante. Cada relação entre os parâmetros foi feita para um tipo de lubrificação diferente, seguindo as condições apresentadas abaixo:

3.2.1 – Variação da Velocidade de corte (V_c) em m/min

Velocidade de corte 1 (V_{c1})	200 m/min
Velocidade de corte 2 (V_{c2})	400 m/min
Velocidade de avanço (V_f)	200 m/min
Profundidade (a_p)	1,0 mm
Comprimento de usinagem (l)	50 mm
Taguro de aço 4340	2 polegadas
Tempo de usinagem V_{c1}	20 segundos
Tempo de usinagem V_{c2}	20 segundos

Tabela X – Dados do experimento da velocidade de corte.

3.2.2 – Variação de avanço (f) em mm/rot

Avanço 1 (f_1)	0,2 mm/rot
Avanço 2 (f_2)	0,4 mm/rot
Velocidade de corte (V_f)	250 m/min
Profundidade (a_p)	1,00 mm
Tempo de usinagem f_1	12 segundos
Tempo de usinagem f_2	8 segundos

Tabela X – Dados do experimento de avanço.

3.2.3 – Variação da profundidade de corte (A_p) em mm

Profundidade 1 (a_{p1})	1,0 mm
Profundidade 2 (a_{p2})	2,0 mm
Avanço (f)	0,2 mm/rot
Velocidade de corte (V_f)	250 m/min
Tempo de usinagem a_{p1}	12 segundos
Tempo de usinagem a_{p2}	12 segundos

Tabela X – Dados do experimento de profundidade.

A potência elétrica foi adquirida por meio de um sistema de aquisição e processamento de dados composto por sensores de efeito *Hall*, ligados nas fases do torno CNC para aquisição da corrente elétrica, e uma plataforma eletrônica de *hardware* livre com placa simples, Arduino®. Foram realizadas três medições de

potência para cada condição de corte explicitada acima. A escolha da sequência de condições de corte na usinagem foi feita de maneira aleatória para diminuir os erros. O equipamento utilizado para aquisição da potência elétrica foi desenvolvido pelo Laboratório de Processos de Fabricação da UnB-FGA.

As ferramentas de corte utilizadas nos ensaios têm insertos de metal duro da classe P revestidos de $Al_2O_3 + TiN$ por MTCVD com duas arestas de corte fabricados pela Sandvik, especificação CNMG 12 04 12-KRR 3215. Para alojar os insertos de metal duro foi utilizado um suporte porta-ferramentas de aço endurecido fabricado pela Sandvik. Os insertos e o suporte porta-ferramentas pertencem ao Laboratório de Processos de Fabricação da UnB-FGA.

O corpo de prova de aço SAE 4340 que foi utilizado possui 2 polegadas de diâmetro e 200 mm de comprimento, sem tratamento térmico posterior, apenas beneficiado.

Na aplicação do método de mínima quantidade de lubrificante será utilizado um nebulizador com dois bocais de aplicação, com variação de pressão de 0,5 a 6,0 bar, fabricado pela Quimatic, equipamento pertencente ao Laboratório de Processos de Fabricação da UnB-FGA.

3.3 - Ensaio de rugosidade

Neste ensaio o objetivo é obter a rugosidade da superfície torneada, tanto a seco quanto com aplicação de MQL e jorro, para a análise dos dados foi utilizado um planejamento estatístico a dois níveis (+1 e -1) e três variáveis de entrada (v_c , a_p e f), gerando oito combinações de usinagem no torneamento cilíndrico externo.

Após o torneamento do corpo de prova de aço SAE 4340, para cada condição de corte mostrada na tabela 3.2, foram obtidos os parâmetros de rugosidade da superfície usinada, definidos como:

- R_a - desvio aritmético médio da superfície;
- R_z - altura média das dez maiores distâncias pico-vale da superfície.
- R_q – rugosidade quadrática média.

As medições dos parâmetros de rugosidade R_a , R_z e R_q foram executadas conforme recomendações da Norma NBR ISO 4287/2002 que define os termos para

especificação da rugosidade. A norma utilizada na configuração do rugosímetro para aquisição dos parâmetros de rugosidade é a ISO 1997 com comprimento de amostragem de 0,8 mm.

Foram realizadas três medições para cada parâmetro de rugosidade, na direção transversal das linhas de avanço deixadas pela ferramenta de corte sobre o corpo de prova, a superfície era usinada e logo após era instalado o rugosímetro para fazer as respectivas medições, logo após era retirado o rugosímetro para a realizar da próxima condição de contorno.

Na medição dos parâmetros de rugosidade foi utilizado um rugosímetro Mitutoyo modelo SJ-210 pertencente ao SENAI-Gama Rosevarte Alves Souza.

Tabela 3.1 - Variáveis de interesse em dois níveis para o planejamento fatorial 2^3 .

Variáveis	Nível (+)	Nível (-)
Velocidade de corte: V_c (m/min)	425	275
Avanço por dente: f (mm/rot)	0,40	0,20
Profundidade de corte: A_p (mm)	2,0	1,0

Tabela 3.2 - Matriz das condições de corte para o planejamento fatorial 2^3 .

Ordem de realização	Ensaio	V_c (m/min)	f (mm/rot)	A_p (mm)
1	1	425	0,20	1,0
4	2	275	0,20	1,0
3	3	425	0,40	1,0
2	4	275	0,40	1,0
5	5	425	0,20	2,0
7	6	275	0,20	2,0
6	7	425	0,40	2,0
8	8	275	0,40	2,0

3.4 - Caracterização do aço SAE 4340

Nesta etapa foi realizada a caracterização microestrutural e mecânica do aço SAE 4340 de acordo com os métodos a seguir.

3.4.1. Ensaio metalográfico do aço SAE 4340

O objetivo desta etapa é caracterizar a microestrutura do aço SAE 4340 por meio de ensaio metalográfico. A caracterização micro estrutural é efetuada em uma amostra retirada do corpo de prova utilizado nos ensaios de potência elétrica e rugosidade. A preparação das amostras, para análise metalográfico, consiste no lixamento com lixas na sequência de *mesh* 80, 100, 320, 400, 600 e 1200, e polimento com pasta de diamante de granulometria 0,25 μm . Posteriormente as amostras são atacadas com Nital a 2 % com o intuito de revelar a microestrutura do material. O lixamento, polimento, ataque químico com Nital e a análise metalográfica foram realizados no Laboratório de Materiais da UnB-FGA.



Figura 3.2 – Superfície atacada com Nital 2%. Fonte: próprio autor.

3.4.2. Ensaio de dureza Rockwell do aço SAE 4340

O objetivo desta etapa é obter a dureza do aço SAE 4340 por meio de ensaios de dureza Rockwell. O ensaio consiste na aplicação de uma carga inicial de 10 kgf sobre uma amostra de aço SAE 4340 utilizando um microdurômetro com penetrador de cone de diamante. Logo após essa carga inicial o parâmetro de carga escolhido para o ensaio foi o Rockwell tipo C, que aplica uma carga principal de 150 kgf na superfície da peça. Foram realizadas três medições de ao longo da seção da

peça. Cada perfuração na peça dura aproximadamente 10 segundos. Este ensaio foi realizado no Laboratório de Materiais da UnB-FGA utilizando um microdurômetro HMV 700.



Figura 3.3 – Funcionamento do microdurômetro durante o ensaio. Fonte: Próprio autor.



Figura 3.4 – Superfície da amostra após o ensaio. Fonte: Próprio autor.

Capítulo IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

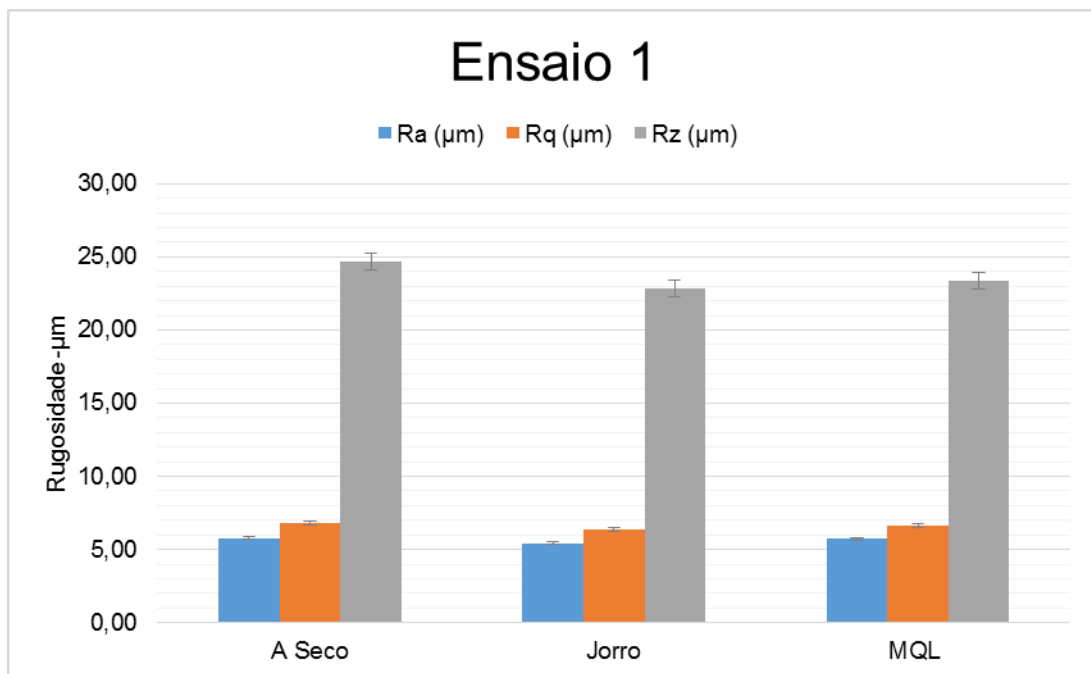
4.1 – Resultados para a rugosidade

O capítulo abaixo mostra os resultados obtidos nos experimentos de rugosidade, onde foram medidos os parâmetros de rugosidade.

4.1.1 – Resultados de rugosidade (Ra, Rz e Rq)

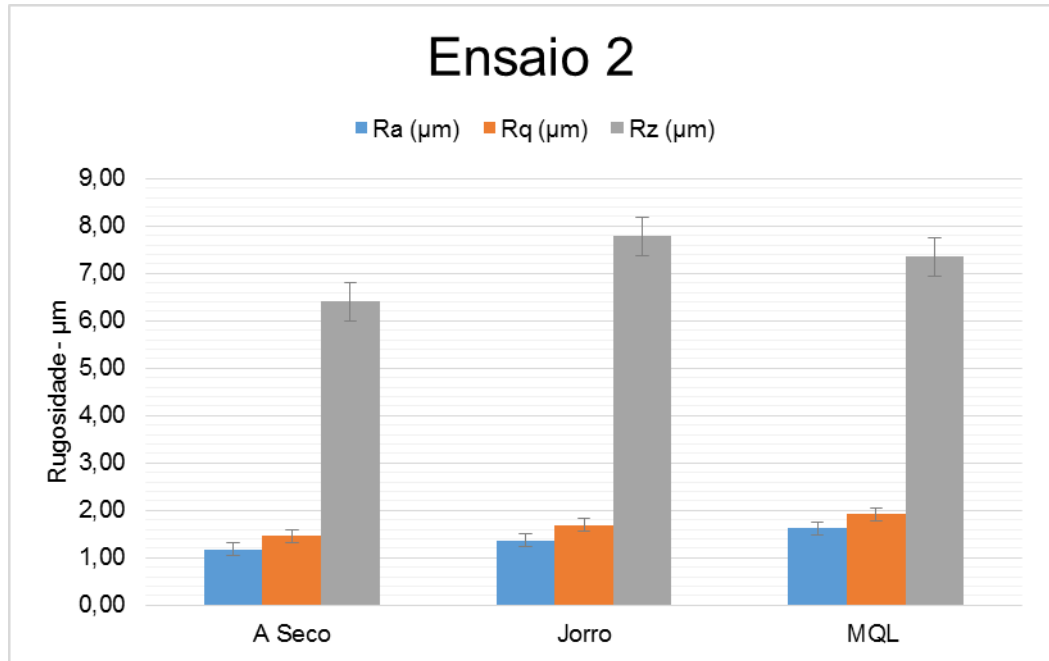
Os gráficos abaixo mostram uma comparação entre três tipos de rugosidade, seus valores para cada condição de corte e seus respectivos sistemas de lubrificação.

- Ensaio 1: $V_c = 425$ m/min; $f = 0,20$ mm/rot; $A_p = 1,0$ mm;



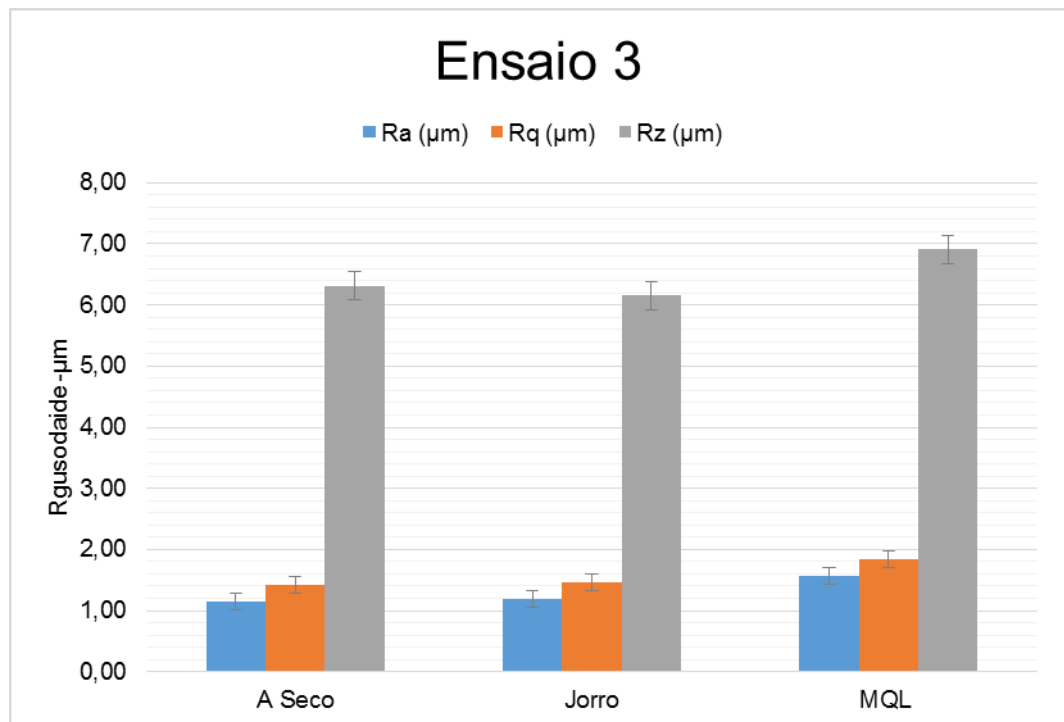
Histograma 1 – Resultados para a condição de corte 1. Fonte: Próprio autor.

- Ensaio 2: $V_c = 275$ m/min; $f = 0,20$ mm/rot; $A_p = 1,0$ mm;



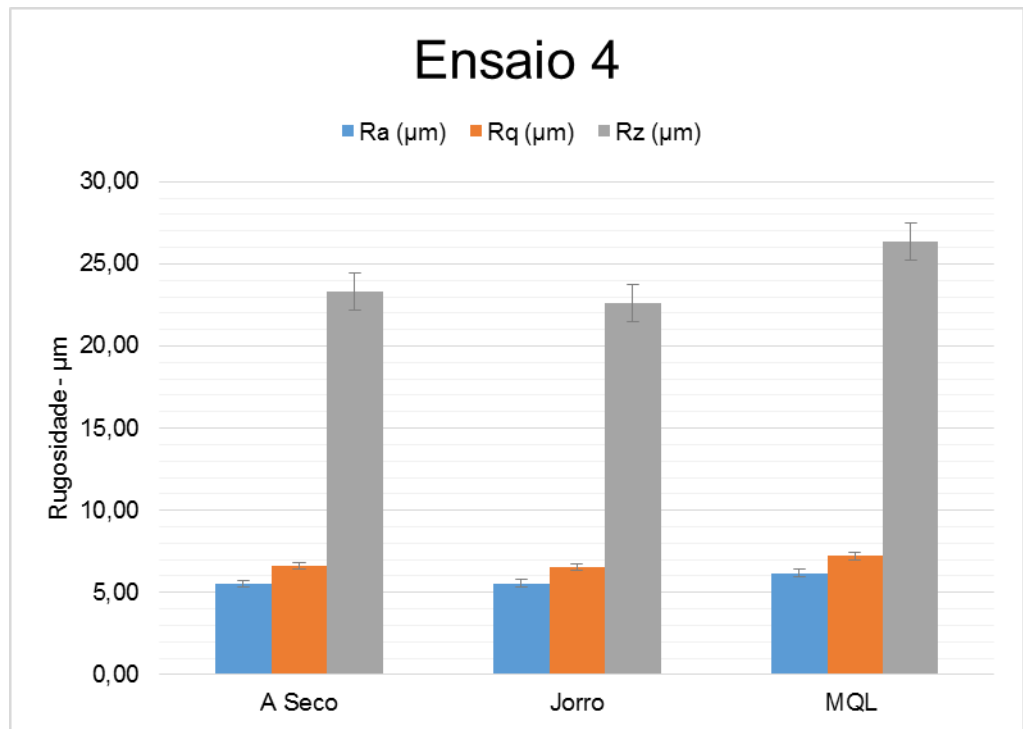
Histograma 2 – Resultados para a condição de corte 2. Fonte: Próprio autor.

- Ensaio 3: $V_c = 425$ m/min; $f = 0,40$ mm/rot; $A_p = 1,0$ mm;



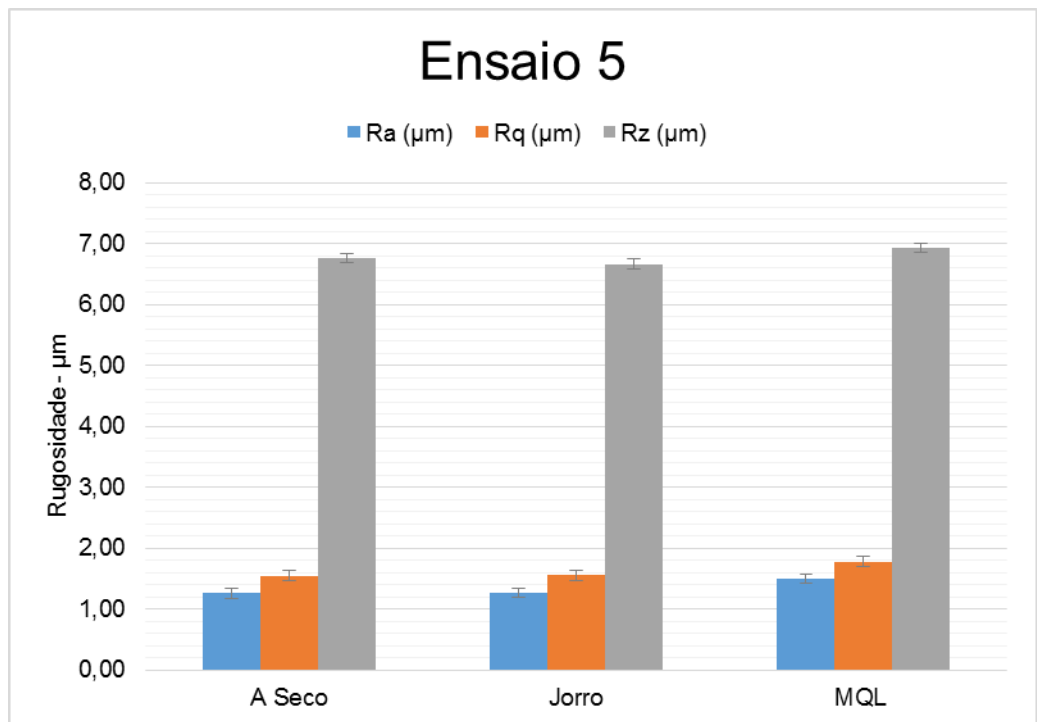
Histograma 3 – Resultados para a condição de corte 3. Fonte: Próprio autor.

- Ensaio 4: $V_c = 275$ m/min; $f = 0,40$ mm/rot; $A_p = 1,0$ mm;



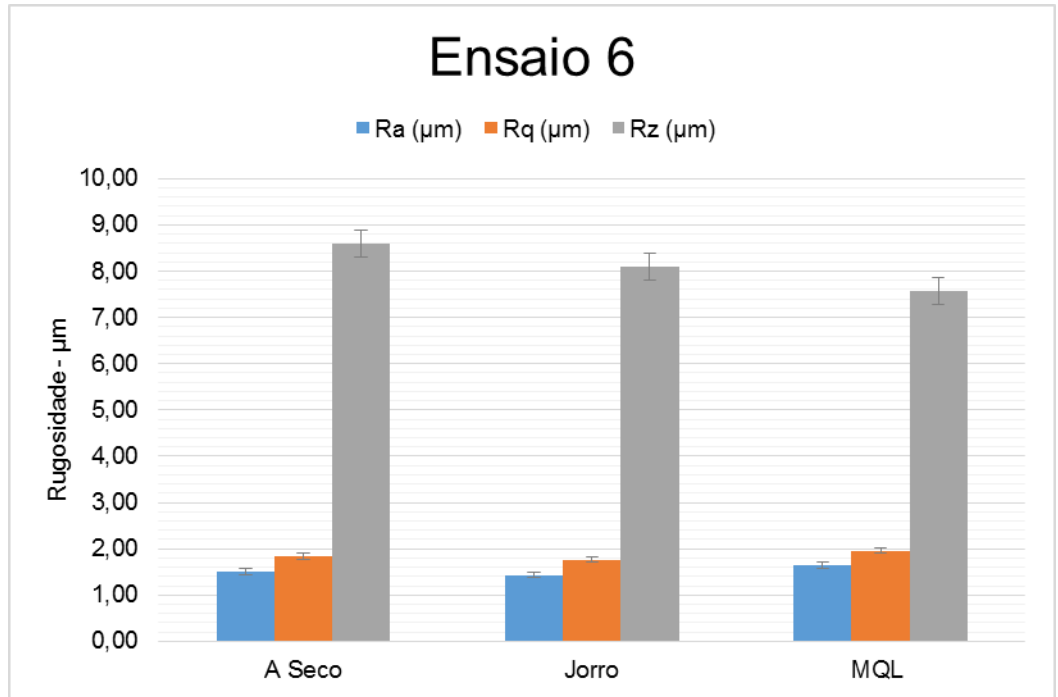
Histograma 4 – Resultados para a condição de corte 4. Fonte: Próprio autor.

- Ensaio 5: $V_c = 425$ m/min; $f = 0,20$ mm/rot; $A_p = 2,0$ mm;



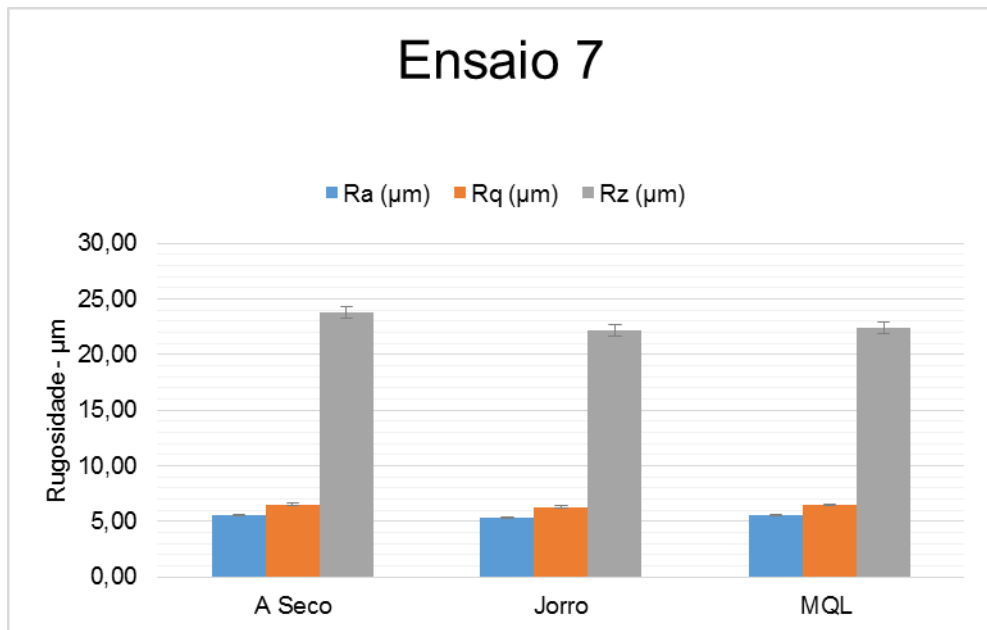
Histograma 5 – Resultados para a condição de corte 5. Fonte: Próprio autor.

- Ensaio 6: $V_c = 275$ m/min; $f = 0,20$ mm/rot; $A_p = 2,0$ mm;



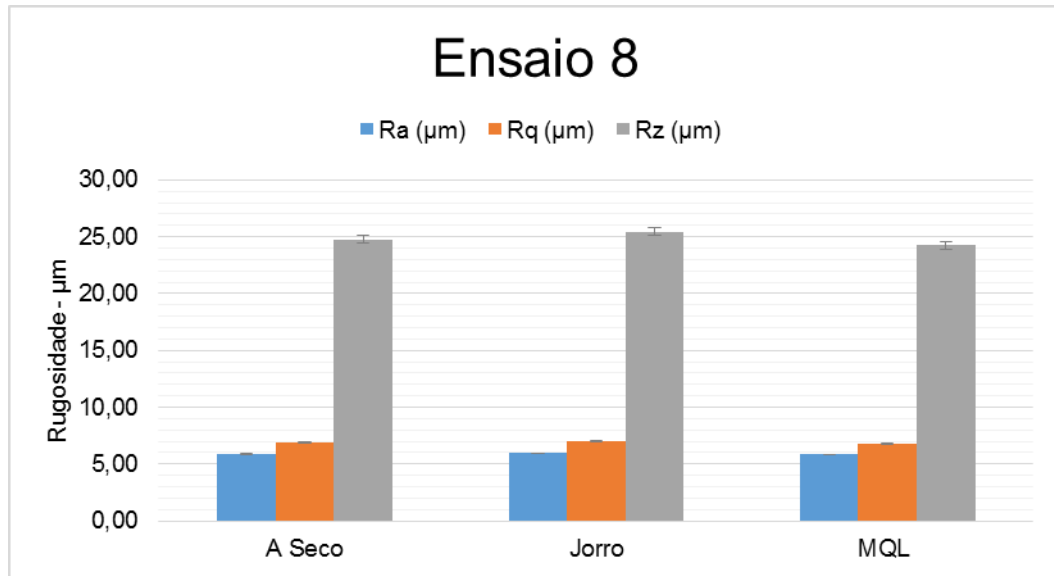
Histograma 6 – Resultados para a condição de corte 6. Fonte: Próprio autor.

- Ensaio 7: $V_c = 425$ m/min; $f = 0,40$ mm/rot; $A_p = 2,0$ mm;



Histograma 7 – Resultados para a condição de corte 7. Fonte: Próprio autor.

- Ensaio 8: $V_c = 275$ m/min; $f = 0,40$ mm/rot; $A_p = 2,0$ mm;



Histograma 8 – Resultados para a condição de corte 8. Fonte: Próprio autor.

Uma das funções do fluido de corte é diminuir o desgaste da ferramenta e o atrito entre ferramenta e a peça, o que tem influência direta no acabamento superficial das peças usinadas. Porém, o fluido atuando como refrigerante pode aumentar a força de usinagem por diminuir a temperatura do processo, o que aumentaria a rugosidade da peça.

Os resultados de rugosidade (Ra, Rz e Rq) mostraram equilíbrio para todos os sistemas de lubrificação. Porém, cada mudança em valores de rugosidade pode ser interessante para aplicações industriais.

Observando os resultados podemos notar que somente em duas condições de corte o sistema MQL se mostrou superior nos resultados de rugosidade, no ensaio 8 e no ensaio 6, o que demonstra que as condições de corte com $V_c = 275$ mm/min e $a_p = 2,0$ mm otimizam a utilização do MQL. Uma velocidade de corte baixa e uma profundidade alta podem dar a peça um aspecto mais rugoso porque aumentam as deflexões durante a usinagem, piorando o acabamento superficial da peça, a aplicação do MQL para essas condições se mostrou mais eficiente por se distribuir melhor no contato entre a peça e a ferramenta de corte, proporcionando uma proteção maior e diminuindo as forças de usinagem.

Os piores resultados para o MQL foram obtidos nos ensaios 2, 3, 4, 5 onde as combinações entre as próprias condições de corte dificultaram o trabalho do sistema. Por possuir melhores características de refrigeração na usinagem o uso do MQL, principalmente com uma profundidade menor, pode ter ocasionado em um aumento da rugosidade das peças.

Os resultados demonstram que o uso do MQL não melhorou a rugosidade em todos os ensaios realizados, muito pelo método de aplicação e por suas características superiores de refrigeração do sistema. A largura de usinagem escolhida para os experimentos pode ter influenciado os resultados, dificultando a ação do sistema MQL.

4.1.2 – Superfície de resposta Ra e Rz

Os gráficos de superfície de resposta mostram a relação de importância que cada parâmetro tem em relação aos outros parâmetros nos valores finais de rugosidade das peças, lembrando que os parâmetros usados nos experimentos foram a profundidade (a_p), a velocidade de corte (v_c) e o avanço (f). Abaixo estão as superfícies de resposta e suas respectivas características.

- Ra – Rugosidade média – Jorro

Na Fig. 4.1 quando comparado os parâmetros profundidade e velocidade de corte a resposta da rugosidade média tem comportamento mais uniforme, tendo valores próximo de $3 \mu\text{m}$. Mostrando que a combinação de alto V_c e alta a_p aumentam a rugosidade média da peça.

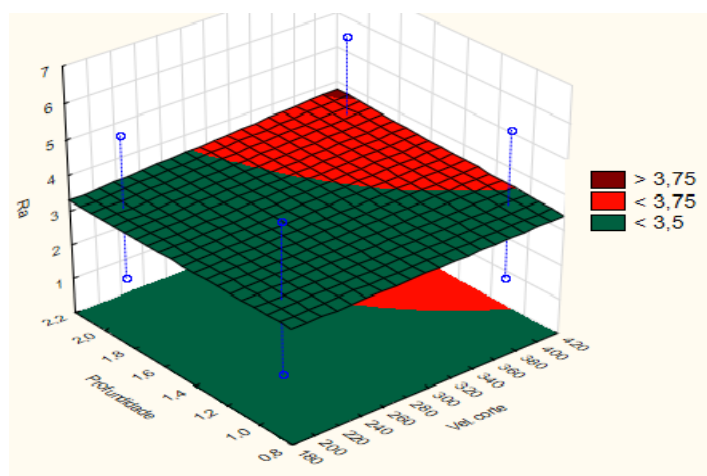


Figura 4.1 - Superfície de resposta - Profundidade x Velocidade corte (Ra). Fonte: Próprio autor.

Na Fig. 4.2 a relação entre os parâmetros profundidade e avanço, a rugosidade média tem um aumento considerável de valores quanto mais aumentamos o avanço e a profundidade. Os valores são mínimos, próximos de 0,5 μm , com profundidade de 2,2 mm e avanço de 0,18 mm/rot. Quando os dois fatores apresentam seus menores resultados, 0,8 mm e 2,2 mm/rot, a rugosidade média fica próximo de 3,5 μm , mostrando uma relação não-linear entre os dois fatores.

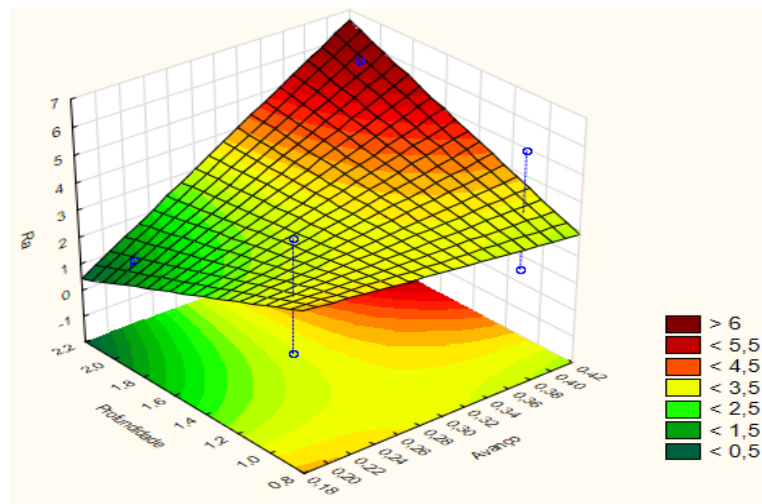


Figura 4.2 - Superfície de resposta – Profundidade x Avanço (Ra). Fonte: Próprio autor.

Na Fig. 4.3 os fatores avanço (f) e velocidade de corte (V_c), tem seu ponto máximo com $R_a = 6\mu\text{m}$, quando velocidade de corte e o avanço são máximos, 420 m/min e 0,42 mm/rot respectivamente. Com alta V_c e baixo f o valor de rugosidade fica próximo de 1,75 μm , com baixo V_c e baixo f a rugosidade fica próxima de 3,75 μm , o mesmo acontece quando se aumenta só o avanço para o $V_c = 180$ m/min, mostrando que nessa velocidade a mudança no avanço não altera muito os resultados.

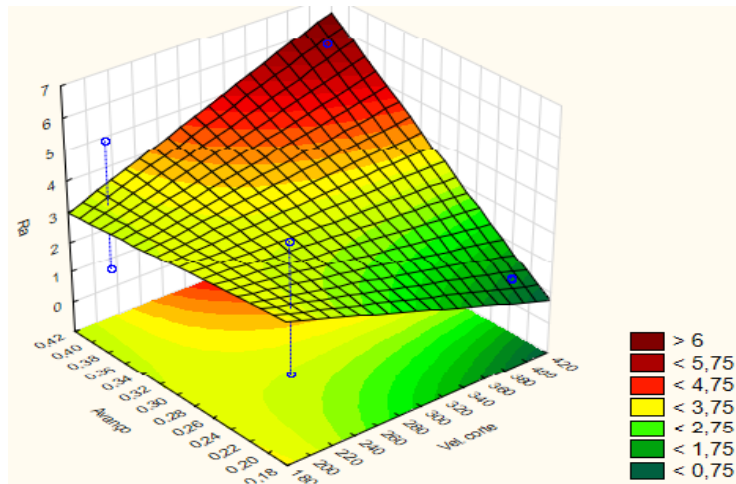


Figura 4.3 - Superfície de resposta – Avanço X Velocidade de Corte (Ra). Fonte: Próprio autor.

- Rz – Rugosidade “pico-vale” – Jorro

Na Fig. 4.4, quando comparado os parâmetros profundidade e velocidade de corte a resposta de Rz tem comportamento mais uniforme, tendo valores próximo de 16 μm , com um pico de funcionamento nos valores mais extremos dos dois fatores, velocidade de corte próximo a 420 m/min e profundidade de 2,2 mm.

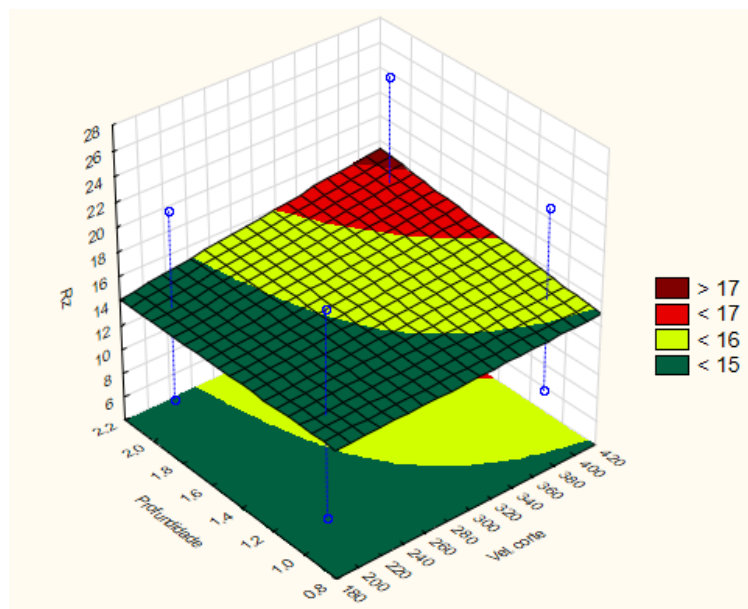


Figura 4.4 - Superfície de resposta – Profundidade x Velocidade de corte (Rz). Fonte: Próprio autor.

A Fig. 4.5 tem a análise dos fatores avanço (f) e velocidade de corte (V_c), o ponto de maior rugosidade, $R_z = 26 \mu\text{m}$ acontece quando velocidade de corte e o avanço estão no máximo, 420 m/min e 0,42 mm/rot respectivamente. Com alta V_c e baixo f o valor de rugosidade fica próximo de 6 μm , com baixo V_c e baixo f a rugosidade fica próxima de 14 μm , o mesmo acontece quando se aumenta só o avanço para o $V_c = 180 \text{ m/min}$, mostrando que nessa velocidade a mudança no avanço não altera muito os resultados.

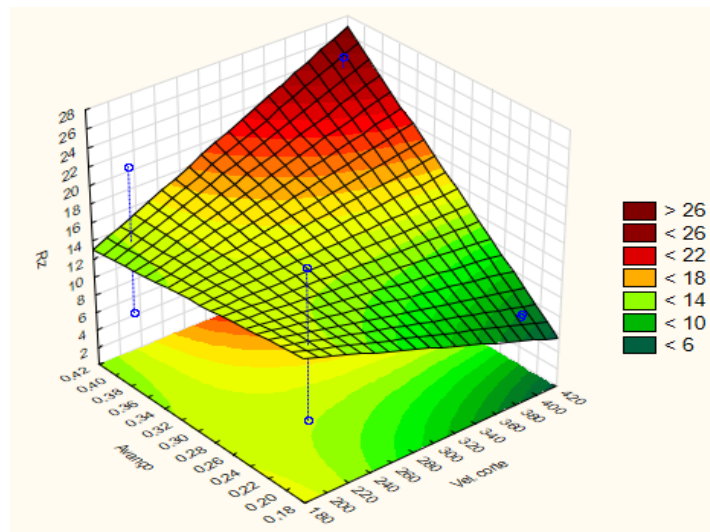


Figura 4.5 - Superfície de resposta – Avanço x Velocidade (R_z). Fonte: Próprio autor.

Na Fig. 4.6 analisando a relação entre os parâmetros profundidade e avanço, a rugosidade R_z tem um aumento considerável de valores quanto mais aumentamos o avanço e a profundidade. Os valores são mínimos, próximos de 4 μm , com profundidade de 2,2 mm e avanço de 0,18 mm/rot. Quando os dois fatores apresentam seus menores resultados, 0,8 mm e 2,2 mm/rot, o valor de R_z fica próximo de 15 μm , mostrando uma relação não-linear entre os dois fatores.

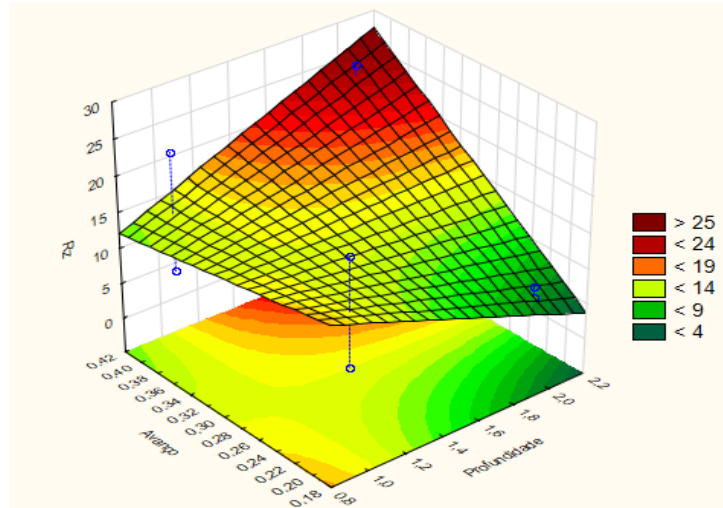


Figura 4.6 - Superfície de resposta – Avanço x Profundidade (Rz). Fonte: Próprio autor.

- Ra – Rugosidade média – MQL

Na Fig. 4.7 comparando os parâmetros profundidade e velocidade de corte, a resposta da rugosidade média tem comportamento mais uniforme, tendo valores próximo de 3 μm , os maiores valores para a rugosidade ficaram dentro dos maiores valores dos parâmetros, velocidade de corte próximo a 420 m/min e profundidade de 2,2 mm.

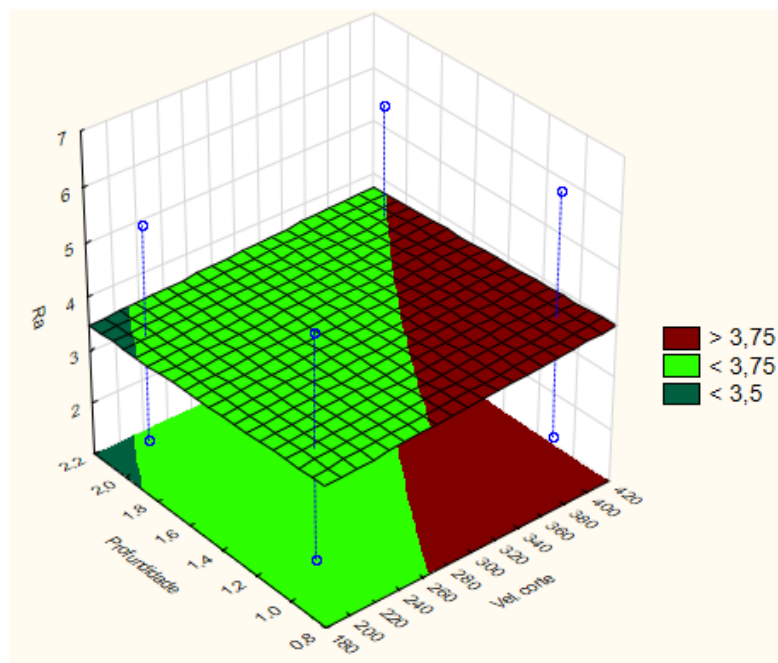


Figura 4.7 - Superfície de resposta – Profundidade x Velocidade de corte (Ra).

Fonte: Próprio autor.

Na figura 4.8 na análise dos fatores avanço (f) e velocidade de corte (V_c), o ponto de maior rugosidade, $R_a = 6 \mu\text{m}$ acontece quando a velocidade de corte e avanço estão em, 180 m/min e 0,42 mm/rot respectivamente. Com alta V_c e baixo f o valor de rugosidade fica próximo de 4 μm , com baixo V_c e baixo f a rugosidade fica próxima de 1 μm . Com velocidade de corte de 420 m/min variar o avanço não tem muito efeito na rugosidade

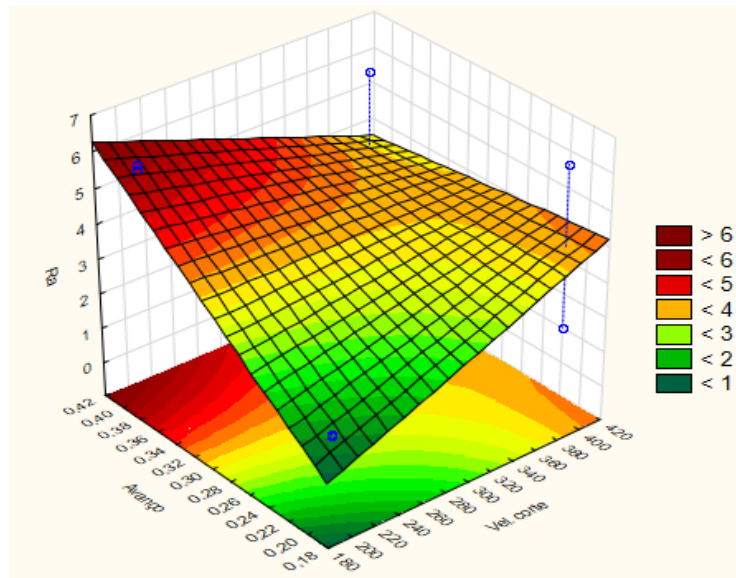


Figura 4.8 - Superfície de resposta – Avanço x Velocidade corte (R_a). Fonte: Próprio autor.

Na Fig. 4.9 o ponto mínimo para a rugosidade média se encontra no momento em que a profundidade está em seu valor máximo de 2,2 mm e o avanço em seu valor mínimo de 0,18 mm/rot. Quando a profundidade está em 0,8 mm, variar o avanço não altera de forma considerável a rugosidade.

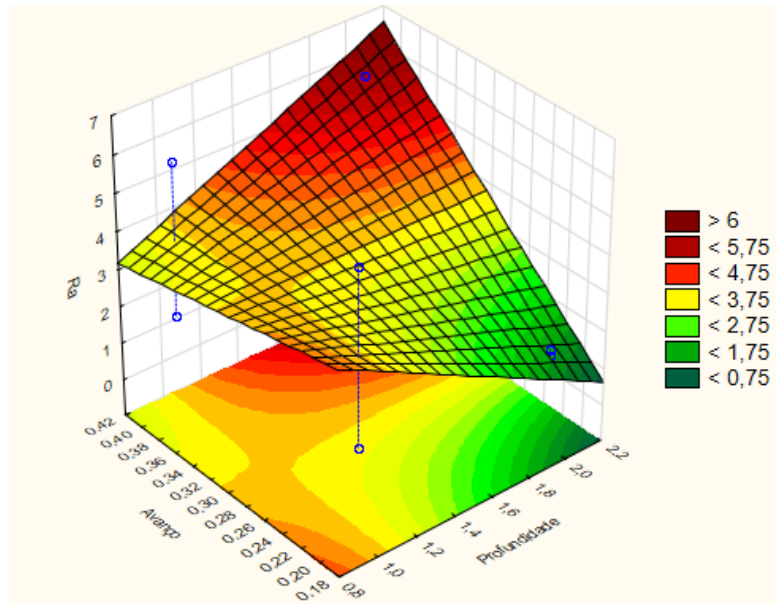


Figura 4.9 - Superfície de resposta – Avanço x Profundidade (Ra). Fonte: Próprio autor.

- Rz – Rugosidade “pico-vale” – MQL

Na Fig. 4.10 o valor de Rz resultante dessa análise começa a ter grande variação e diminuir seus valores, quando o avanço diminui para valores próximos de 0,18 mm/rot e a profundidade aumenta para 2,2 mm.

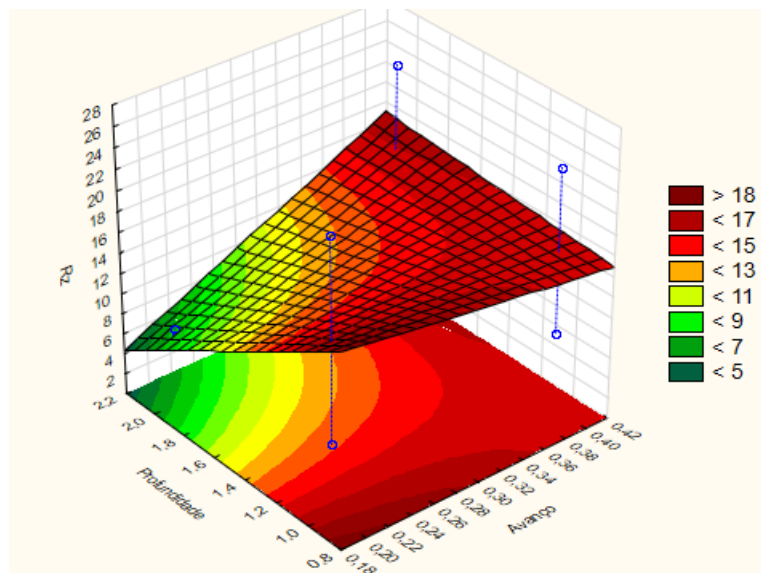


Figura 4.10 - Superfície de resposta – Profundidade x Avanço (Rz). Fonte: Próprio autor.

Na Fig. 4.11, a análise dos fatores avanço (f) e velocidade de corte (Vc), o ponto de maior rugosidade, $Rz = 18\mu\text{m}$, acontece quando velocidade de corte e avanço estão em, 420 m/min e 0,18 mm/rot respectivamente. Dentro das diferentes

mudanças nos parâmetros, as respostas se mantêm estáveis com exceção do resultado para os valores mínimos de f e V_c , onde R_z ficou próximo de $5 \mu\text{m}$.

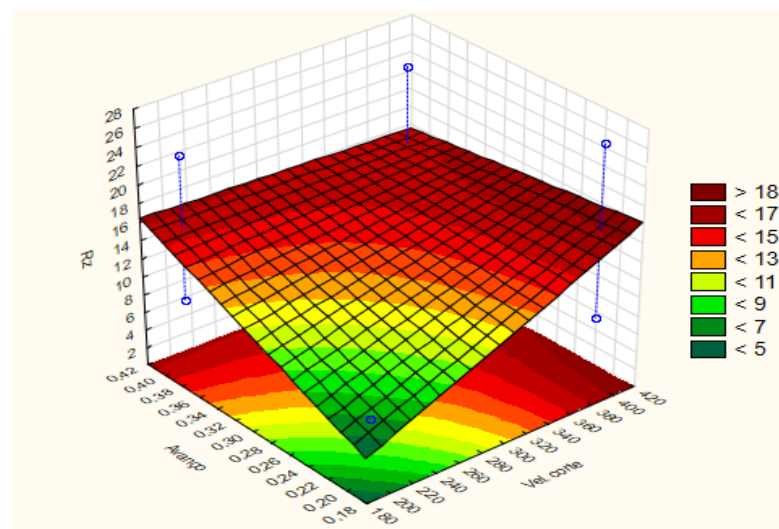


Figura 4.11 - Superfície de resposta – Avanço x Velocidade de corte (R_z). Fonte: Próprio autor.

Na Fig. 4.12 quando comparado os parâmetros profundidade e velocidade de corte, a resposta de R_z tem comportamento mais uniforme. A grande diferença está quando a velocidade de corte é mínima e a profundidade é máxima, porque apresentam uma rugosidade baixa, com valores próximos de $5 \mu\text{m}$.

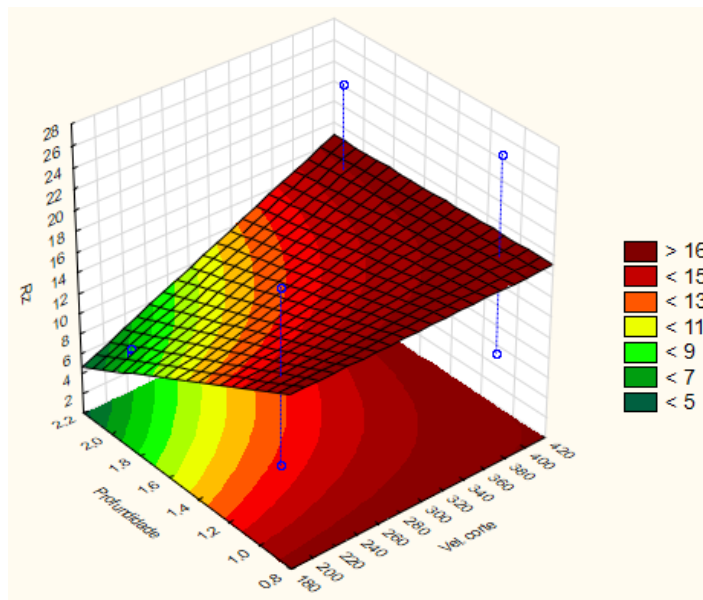


Figura 4.12 - Superfície de resposta – Profundidade x Velocidade de corte (R_z). Fonte: Próprio autor.

- Rz – rugosidade “pico-vale” – Seco

Na Fig. 4.13 na análise dos parâmetros de profundidade e velocidade de corte pode ser visto uma superfície de resposta mais uniforme e com poucas variações, onde a maior rugosidade registrada é encontrada quando a profundidade e a velocidade de corte são máximas. A menor rugosidade fica na região onde a velocidade de corte é máxima e a profundidade é mínima.

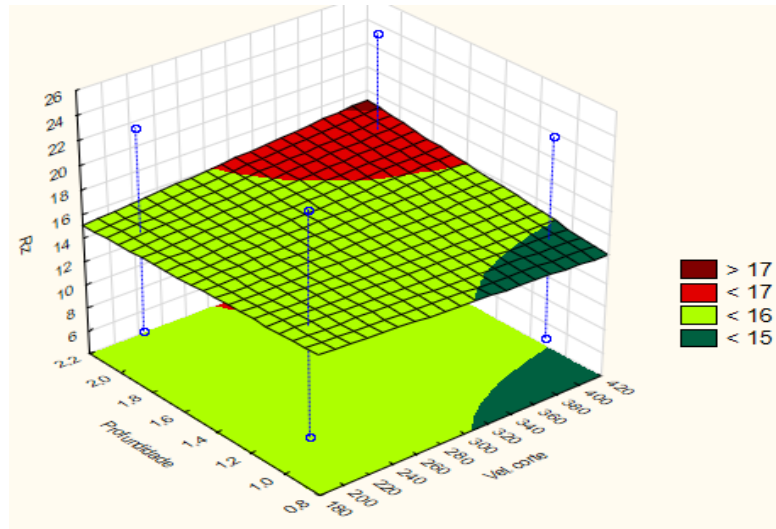


Figura 4.13 - Superfície de resposta – Profundidade x Velocidade (Rz). Fonte: Próprio autor.

Na Fig. 4.14 a análise dos parâmetros de avanço e velocidade de corte, a condição onde os dois parâmetros são máximos, apresenta a maior rugosidade, com valores próximos 26 μm . A menor rugosidade é mostrada quando a velocidade de corte é máxima e a avanço é mínimo, com valor para Ra próximo a 5 μm .

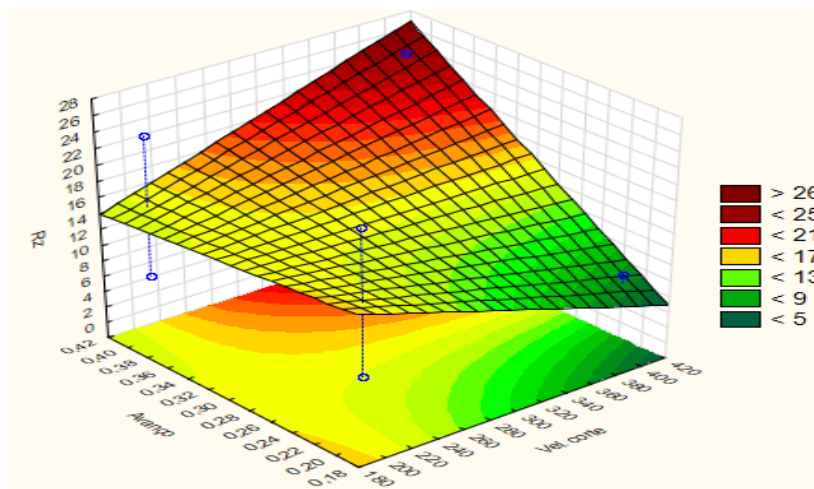


Figura 4.14 - Superfície de resposta – Avanço x Velocidade (Rz). Fonte: Próprio autor.

Na Fig. 4.15 analisando os parâmetros de avanço e profundidade, os valores para a rugosidade são máximos quando os parâmetros são valores maiores. A condição ótima para uma menor rugosidade é quando a profundidade é máxima e o avanço é mínimo.

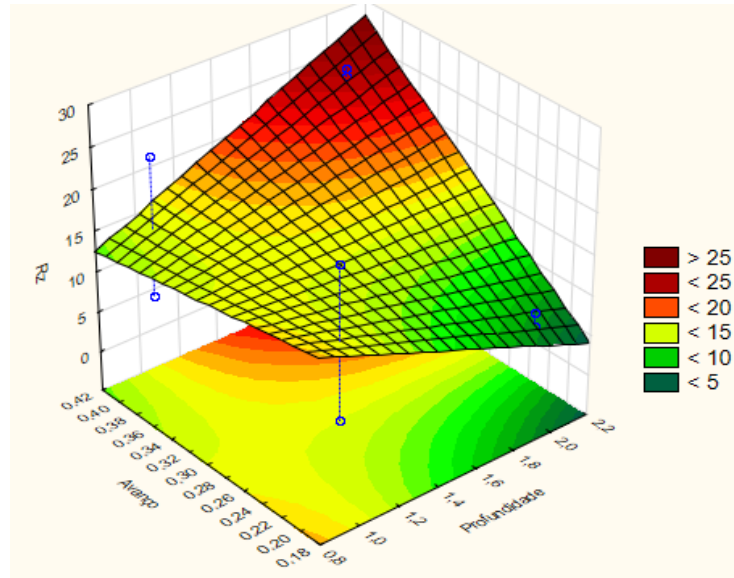


Figura 4.15 - Superfície de resposta – Avanço x Profundidade (Rz). Fonte: Próprio autor.

- Ra – rugosidade média – Seco

Na Fig. 4.16 com a análise dos parâmetros de profundidade e velocidade de corte pode ser visto uma superfície de resposta uniforme e com valores próximos de $3,5 \mu\text{m}$, onde a maior rugosidade registrada é encontrada quando a profundidade e a velocidade de corte são máximas. A menor rugosidade, abaixo de $3,5 \mu\text{m}$, é encontrada em diversos pontos do gráfico.

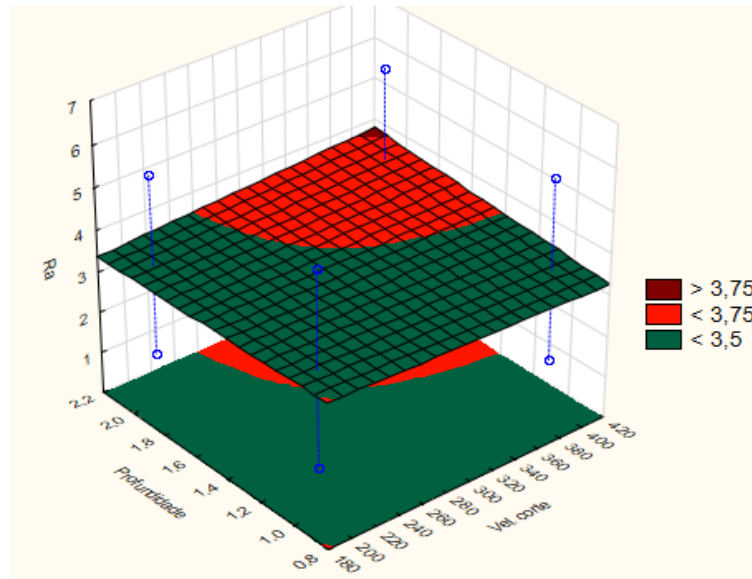


Figura 4.16 - Superfície de resposta – Profundidade x Velocidade de corte (Ra).

Fonte: Próprio autor.

Na Fig. 4.17 analisando os parâmetros de avanço e profundidade, os valores para a rugosidade são máximos quando os parâmetros são valores maiores. A condição ótima para uma menor rugosidade é quando a profundidade é máxima e o avanço é mínimo.

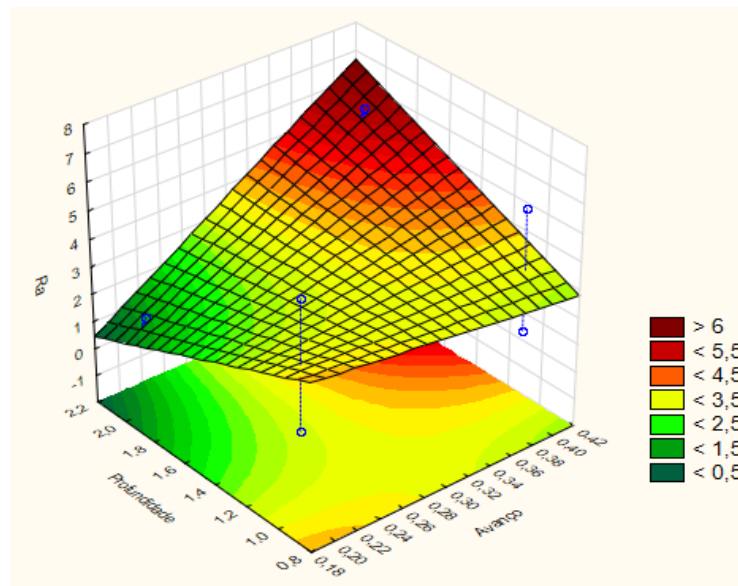


Figura 4.17 - Superfície de resposta – Profundidade x Avanço (Ra). Fonte: Próprio autor.

Na Fig. 4.18 na análise dos parâmetros de avanço e velocidade de corte, a condição onde os dois parâmetros são máximos, apresenta a maior rugosidade, com valores próximos 6 μm . A menor rugosidade é mostrada quando a velocidade de corte é máxima e a avanço é mínimo, com valor para Ra próximo a 0,75 μm .

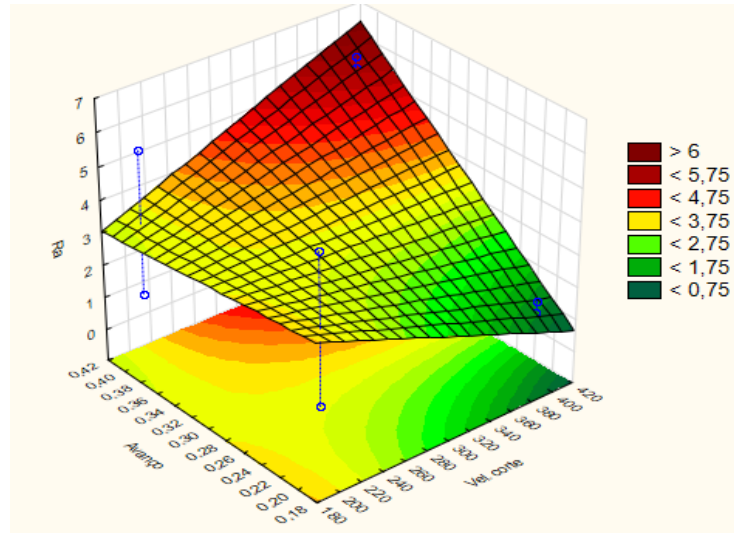


Figura 4.18 - Superfície de resposta – Avanço x Velocidade de corte (Ra). Fonte: Próprio autor.

4.1.3 – Gráficos de Pareto (Ra e Rz)

As imagens abaixo mostram os gráficos de Pareto para Ra e Rz. Os gráficos de Pareto mostram a importância que cada parâmetro tem no experimento, além de mostrar qual combinação de parâmetros é mais importante para os valores de rugosidade. As barras horizontais mostram os efeitos que cada variável ou combinação de variáveis independentes têm para influenciar o valor da variável dependente (Ra ou Rz). Cada variável independente é simbolizada por um número, e as interações entre as variáveis são simbolizadas pela palavra *by*. As variáveis independentes dos experimentos foram velocidade de corte (V_c), profundidade (a_p) e avanço (f). Enquanto as variáveis dependentes foram as rugosidades Ra e Rz.

- Gráfico de Pareto Ra a seco

O gráfico 4.1 mostra que o avanço é a variável independente que mais influencia nos valores finais de Ra enquanto a velocidade de corte tem a menor importância. A relação entre os parâmetros de avanço e velocidade de corte tem o maior efeito negativo e a relação entre avanço e profundidade tem efeito positivo maior que a combinação do efeito entre a velocidade de corte e a profundidade, tudo isso resultado do grande efeito causado pela variação do avanço.

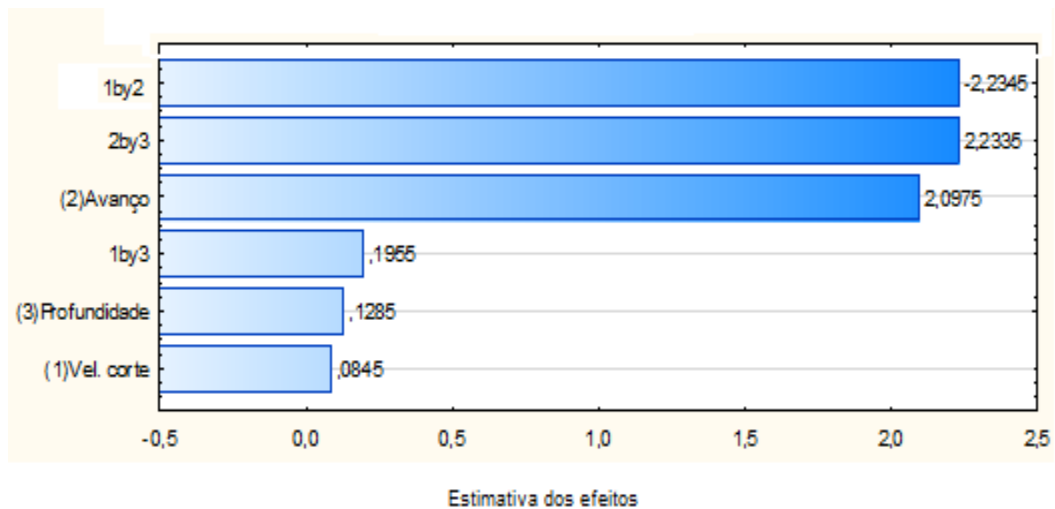


Gráfico 4.1 - Pareto para Ra (Seco). Fonte: Próprio autor.

O gráfico 4.2 mostra que o avanço é a variável independente que mais influencia nos valores finais de Rz enquanto a velocidade de corte tem a menor importância. A relação entre os parâmetros de avanço e profundidade tem o maior efeito positivo, a relação entre velocidade de corte e avanço também tem efeito positivo. A relação entre velocidade de corte e a profundidade tem efeito positivo, porém, bem menor que as outras relações.

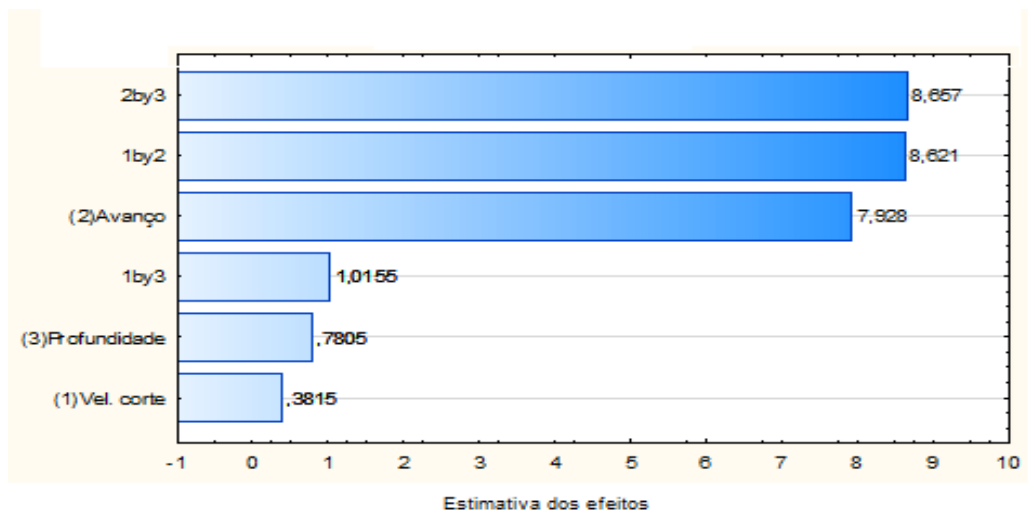


Gráfico 4.2 - Pareto para Rz (Seco). Fonte: Próprio autor.

- Gráfico de Pareto Ra e Rz a jorro

O gráfico 4.3 mostra que o avanço é a variável independente que mais influencia nos valores finais de Ra enquanto a profundidade tem a menor influência. A relação entre os parâmetros de avanço e velocidade de corte tem o maior efeito positivo, a relação entre avanço e profundidade tem efeito positivo maior que a combinação do efeito entre a velocidade de corte e a profundidade, resultado do grande efeito causado pela variação do avanço.

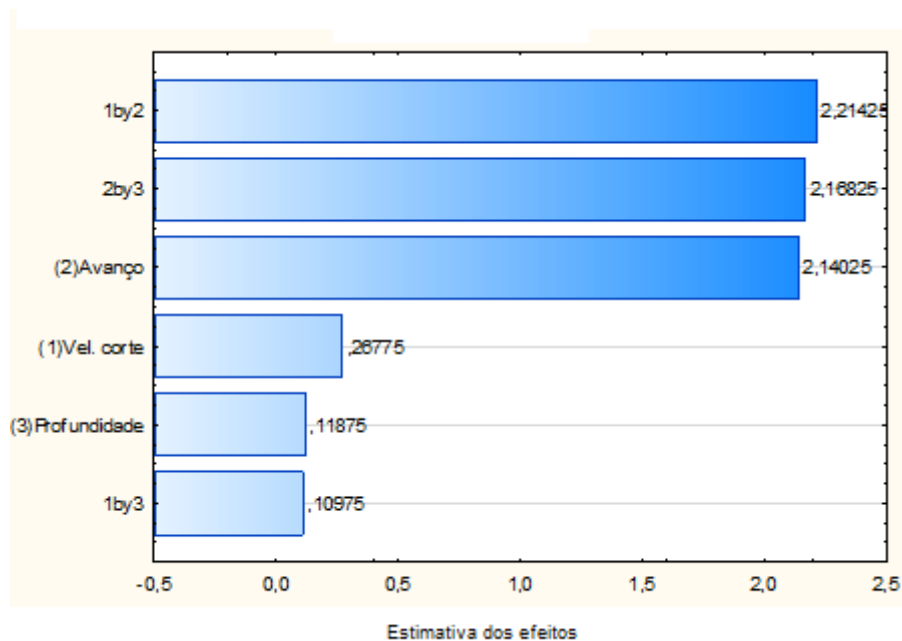


Gráfico 4.3 - Pareto para Ra (Jorro). Fonte: Próprio autor.

O gráfico 4.4 mostra que o avanço é a variável independente que mais influencia nos valores finais de Rz enquanto a profundidade tem a menor influência. A relação entre os parâmetros de avanço e profundidade tem o maior efeito positivo e a relação entre avanço e velocidade de corte tem efeito positivo maior que a combinação do efeito entre a velocidade de corte e a profundidade, resultado do grande efeito causado pela variação do avanço.

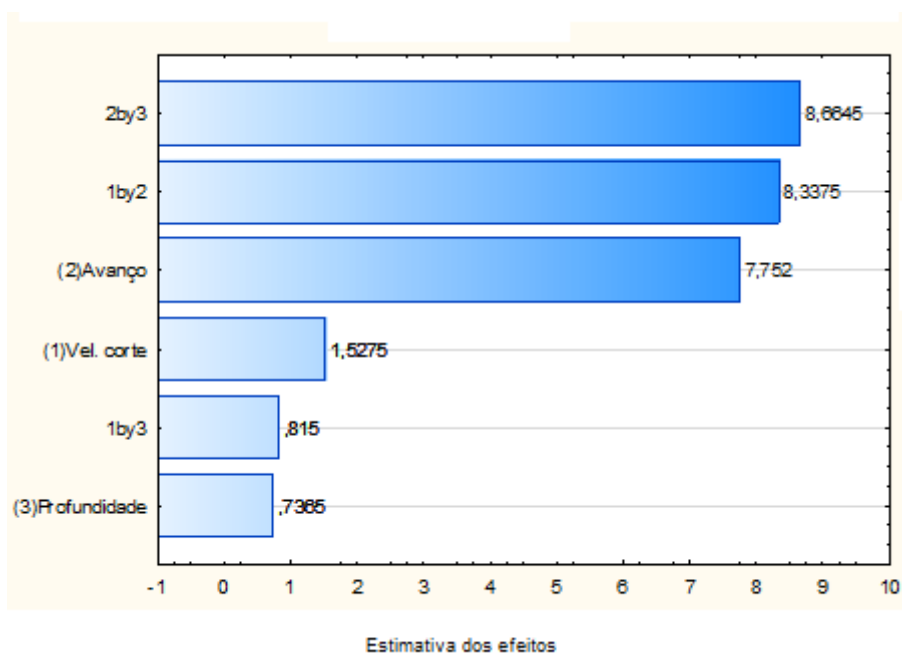


Gráfico 4.4 - Pareto para Rz (Jorro). Fonte: Próprio autor.

- Gráfico de Pareto Ra e Rz MQL

O gráfico 4.5 mostra que o avanço é a variável independente que mais influencia nos valores finais de Ra enquanto a profundidade tem a menor influência. A relação entre os parâmetros de avanço e profundidade tem o maior efeito positivo e a relação entre avanço e velocidade de corte tem efeito positivo maior que a combinação do efeito entre a velocidade de corte e a profundidade que é negativo, resultado do grande efeito causado pela variação do avanço.

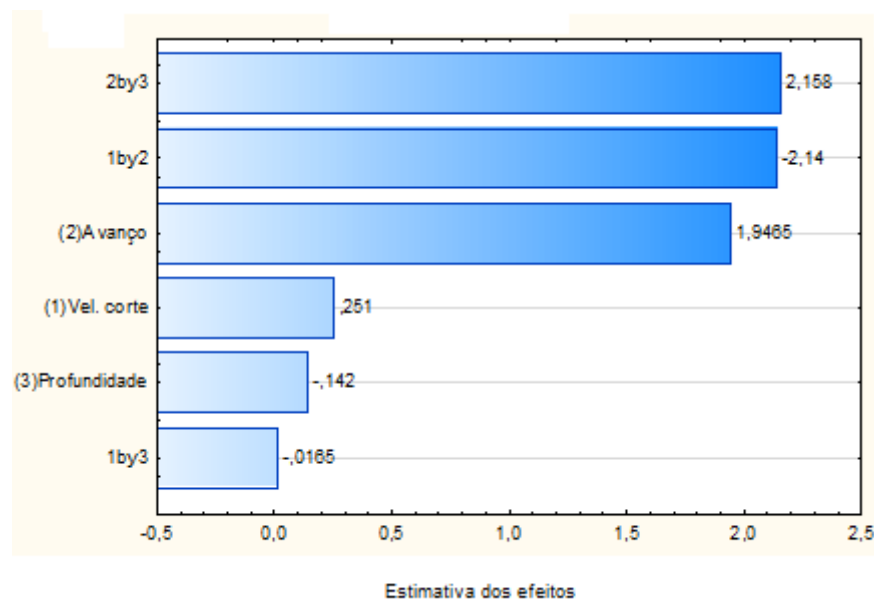


Gráfico 4.5 - Pareto para Ra (MQL). Fonte: Próprio autor.

O gráfico 4.6 mostra que a velocidade de corte é a variável independente que mais influencia nos valores finais de Rz enquanto o avanço tem o menor efeito negativo. A relação entre os parâmetros de avanço e profundidade tem o maior efeito positivo, a relação entre velocidade de corte e avanço tem efeito negativo maior que a combinação do efeito entre a velocidade de corte e a profundidade.

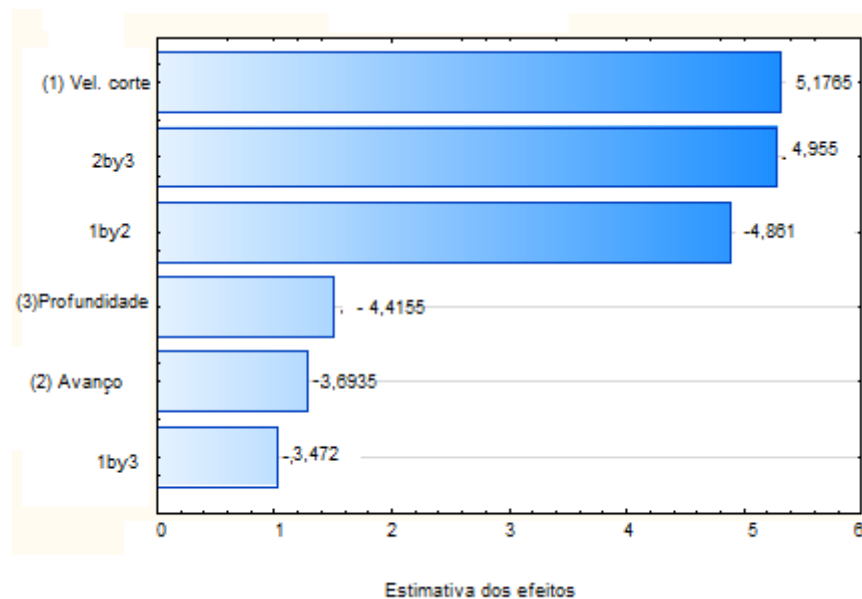


Gráfico 4.6 - Pareto para Rz (MQL). Fonte: Próprio autor.

Os gráficos acima mostram que o avanço tem a maior influência em grande parte dos experimentos de rugosidade. De acordo com Machado et al. (2004), baixas velocidades de corte dão um aspecto rugoso a peça, resultado que aliado a um alto valor de avanço pioram ainda mais os valores de rugosidade. O aumento da profundidade e do avanço durante um processo de usinagem aumentam as forças aplicadas no processo, o que aumenta as deflexões durante o processo, esse aumento piora o acabamento superficial e de acordo com Machado et al. (2004) alguns resultados experimentais mostram que o avanço tem maior influência que a profundidade para piorar o acabamento superficial das peças usinadas já que o aumento do avanço aumenta a altura dos picos e a profundidade dos vales, resultado que foi verificado nos experimentos realizados nesse trabalho.

4.2 – Resultados para a potência

O capítulo abaixo mostra os resultados obtidos nos experimentos de potência elétrica do torno, onde foram medidas as correntes ativas através de sensores de efeito *hall* conectados aos terminais do torno. Com os valores de corrente foram encontrados a quantidade de potência utilizada.

4.2.1 - Potência variando ap com lubrificação a jorro, seco e MQL

Nas Fig. 4.19, 4.22 e 4.25 a região “A” representa o motor do torno ainda desligado e com potência constante com valores próximos de 3 kW. A região “B” mostra um pico de potência no momento em que o motor do torno é ligado e tem valores acima de 25kW. A região “C” representa o período de usinagem da peça e tem no começo e no final picos próximos de 15 kW que representam o momento de entrada e saída da ferramenta na peça usinada. A região “D” representa o momento em que o motor é desligado e apresenta um pico de potência, resultado do acionamento do freio magnético da máquina, que deve parar o motor o mais rápido possível e não de forma gradual. As Fig. 4.20, 4.23 e 4.26 mostram o comportamento da corrente somente no período em que a peça está sendo usinada, e seus respectivos pontos de entrada e saída de ferramenta. As Fig. 4.21, 4.24 e 4.27 mostram os valores médios de potência utilizadas no torno para as condições ap1 e ap2. O resultado mostra para a segunda condição de corte, um aumento da potência ativa utilizada pelo torno, isso ocorreu pelo fato de que ao aumentar a profundidade de corte a área de cisalhamento cresce, o que tem resultado direto na força de usinagem, aumentando assim a potência necessária para toronar a peça.

4.2.1.1 – Lubrificação a Jorro

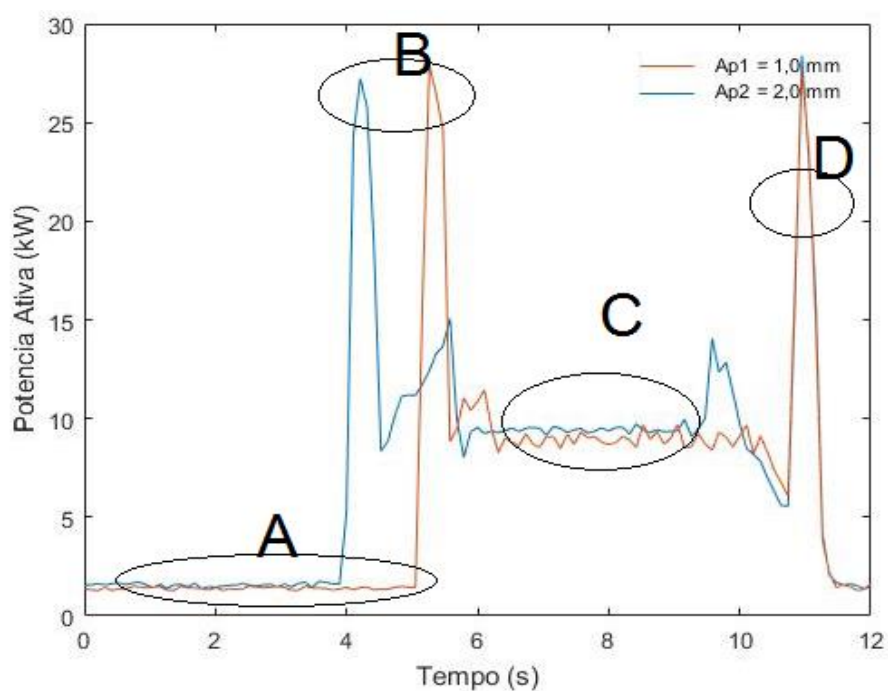


Figura 4.19 – Potência ativa do torno para a variação de profundidade. Fonte: Próprio autor.

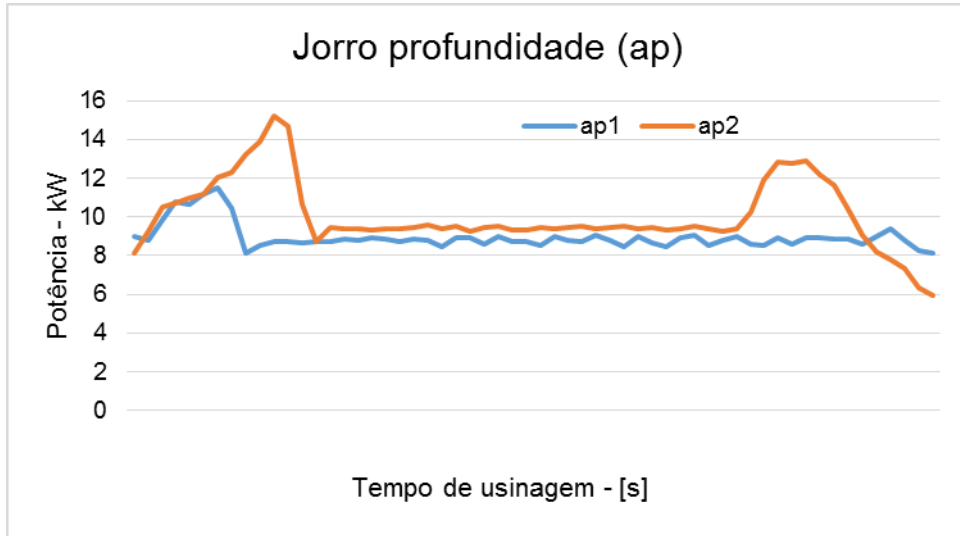


Figura 4.20 – Comportamento da potência durante a usinagem a jorro. Fonte: Próprio autor.

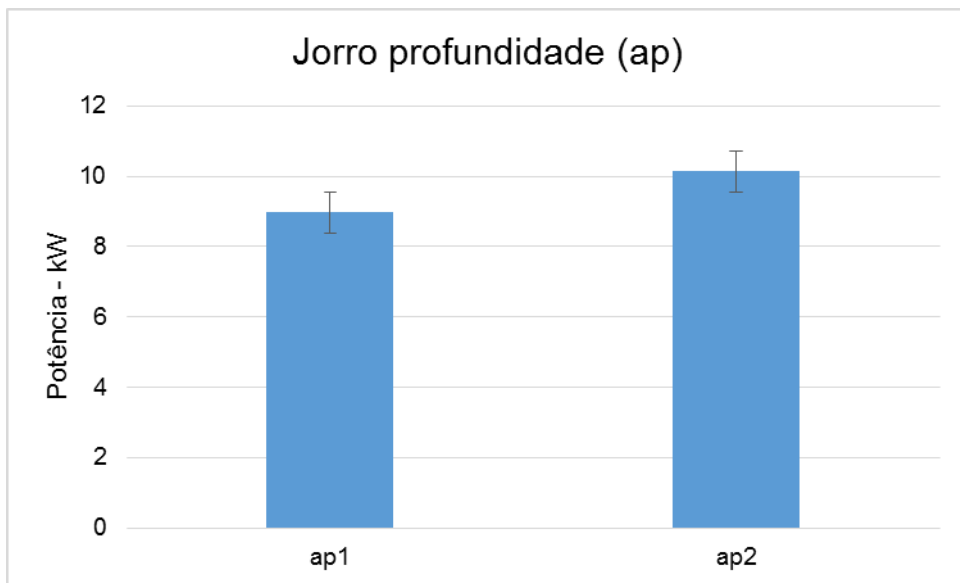


Figura 4.21 – Média de potência durante a usinagem a jorro. Fonte: Próprio autor.

4.2.1.2 – Lubrificação a seco

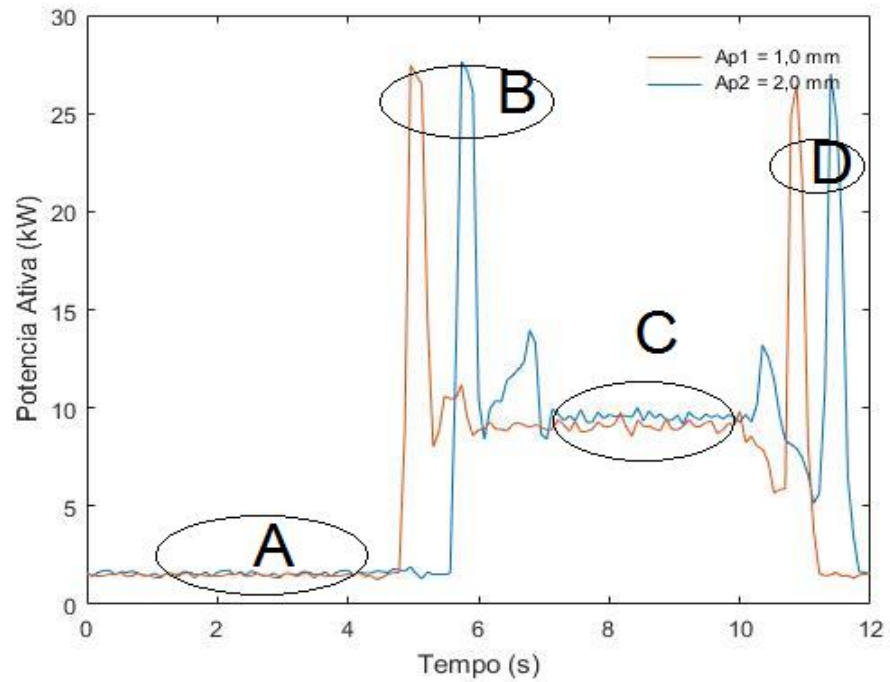


Figura 4.22 – Potência ativa do torno para a variação de profundidade. Fonte: Próprio autor.

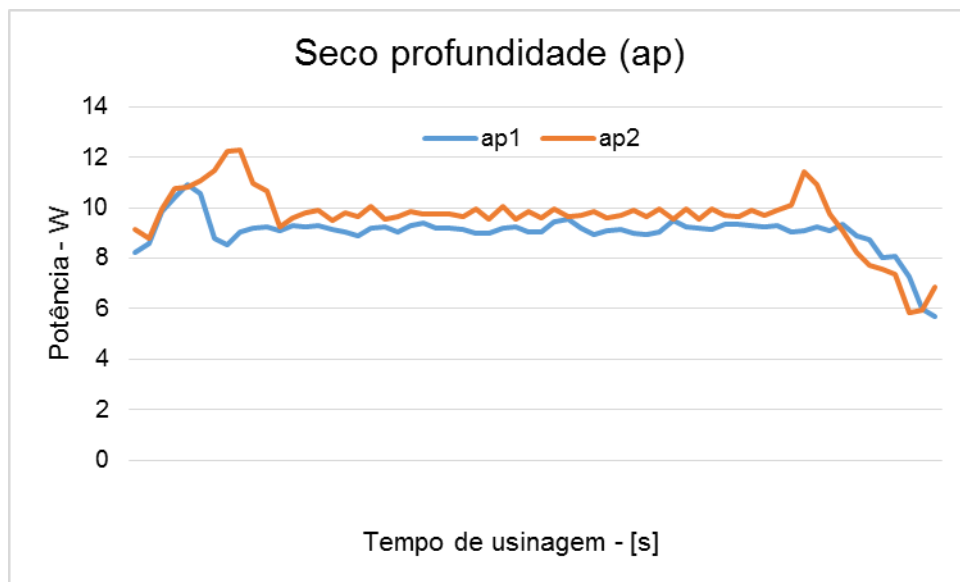


Figura 4.23 – Comportamento da potência durante a usinagem a seco. Fonte: Próprio autor.

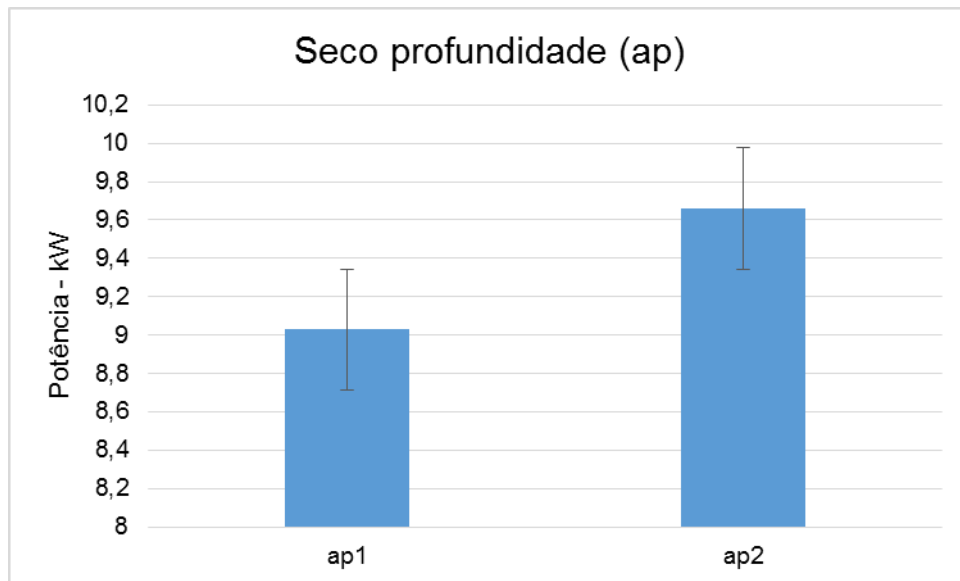


Figura 4.24 – Média de potência durante a usinagem a seco. Fonte: Próprio autor.

4.2.1.3 – Lubrificação MQL

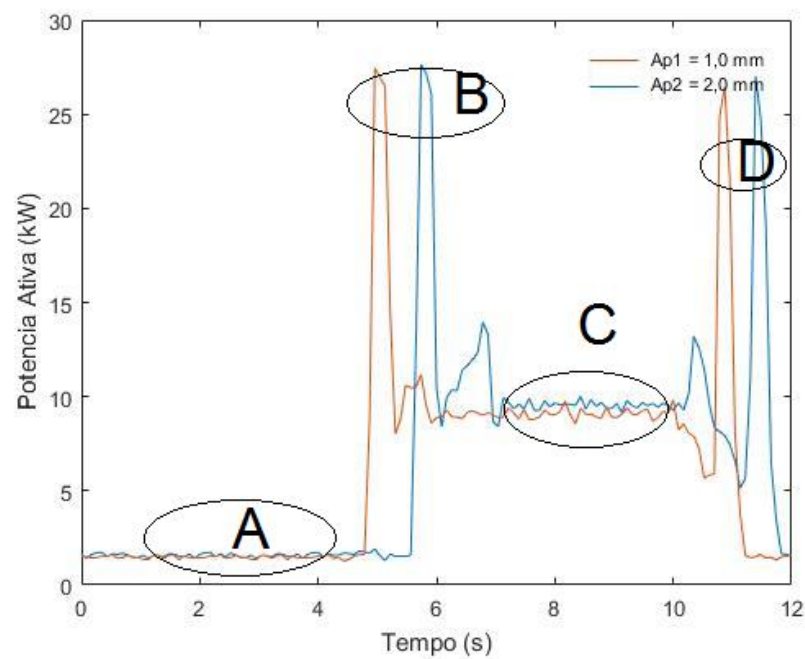


Figura 4.25 – Potência ativa do torno para a variação de profundidade. Fonte: Próprio autor.

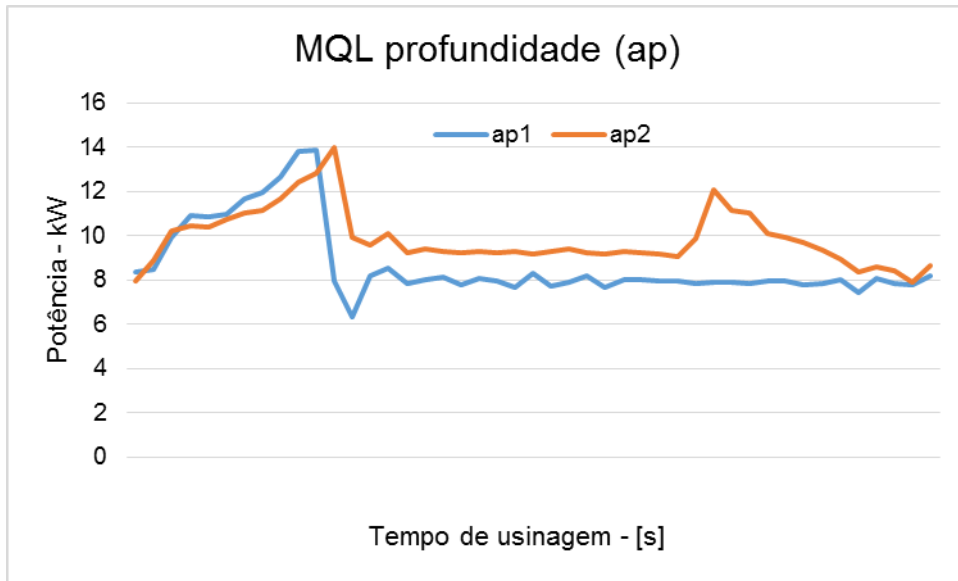


Figura 4.26 – Comportamento da potência durante a usinagem com MQL. Fonte: Próprio autor.

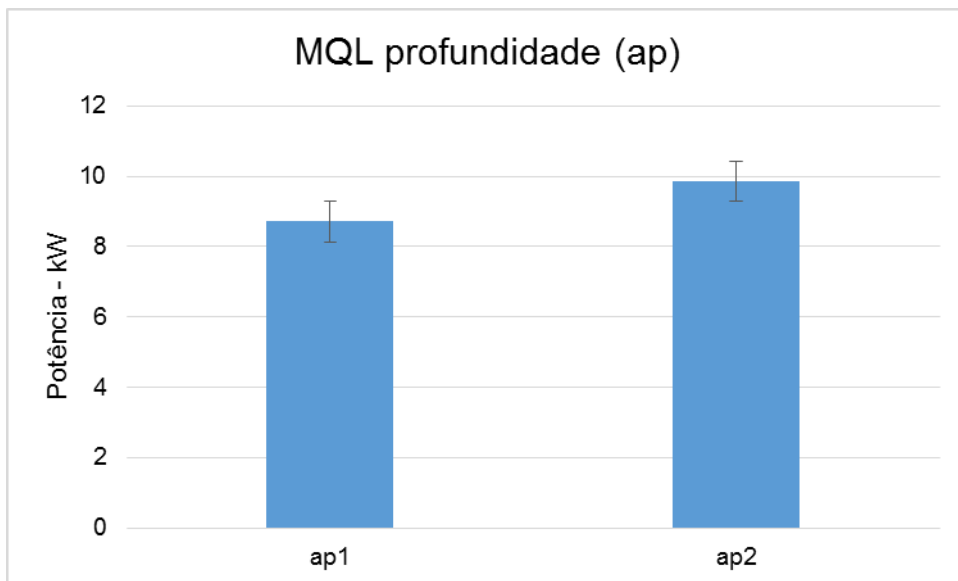


Figura 4.27 – Média de potência durante a usinagem com MQL. Fonte: Próprio autor.

4.2.2 - Potência variando v_c com lubrificação a Jorro, a seco e com MQL

Nas Fig. 4.28, 4.31 e 4.34 a região “A” representa o motor do torno ainda desligado e com potência constante com valores próximos de 3 kW. A região “B” mostra um pico de potência no momento em que o motor do torno é ligado e tem

valores acima de 25kW. A região “C” representa o período de usinagem da peça e tem no começo e no final picos próximos de 10 kW que representam o momento de entrada e saída da ferramenta na peça usinada. A região “D” representa o momento em que o motor é desligado e apresenta um pico de potência pelo funcionamento do freio magnético da máquina, que deve parar o motor o mais rápido possível e não de forma gradual. As Fig. 4.29, 4.32 e 4.35 mostram o comportamento da potência no período em que a peça está sendo usinada, e os pontos de entrada e saída de ferramenta. As Fig. 4.30, 4.33 e 4.35 mostram os valores médios de potência utilizadas no torno para as condições v_{c1} e v_{c2} . Considerando que tanto v_{c1} e v_{c2} estão dentro da zona de formação de APC (aresta postiça de corte) que para o aço que de acordo com Machado et al. (2004) começa a ser formado com $V_c = 200$ m/min, os resultados para potência são bastante equilibrados e com vantagem pequena para as velocidades de corte maiores. Dentro da zona de formação de APC, quanto maior o valor de V_c menor será a potência utilizada.

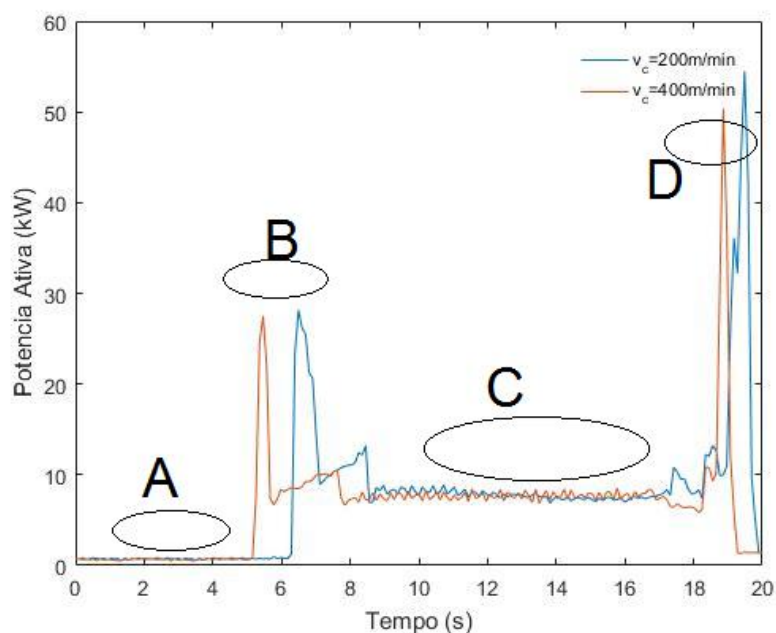


Figura 4.28 – Potência ativa do torno para a variação de velocidade de corte. Fonte: Próprio autor.

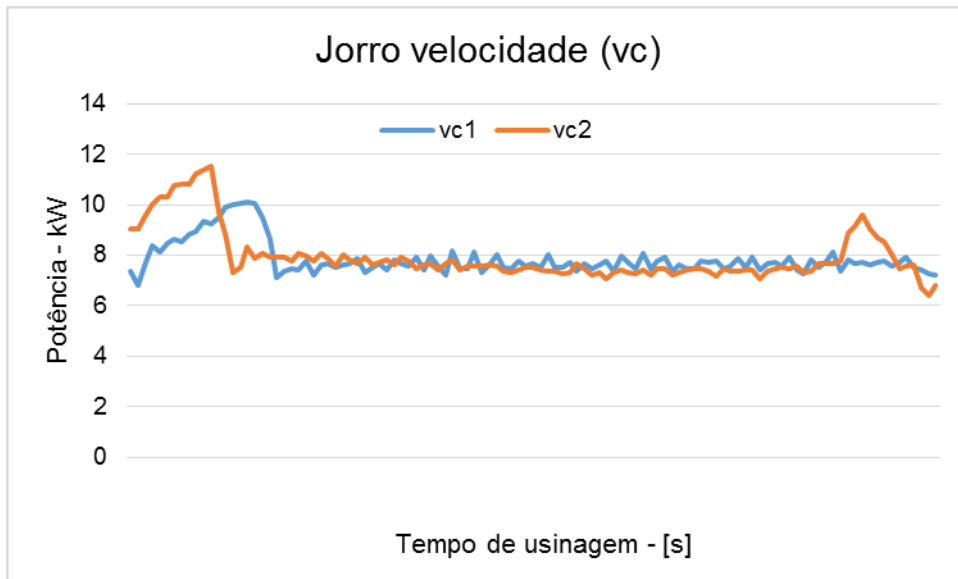


Figura 4.29 – Comportamento da potência durante a usinagem a jorro. Fonte: Próprio autor.

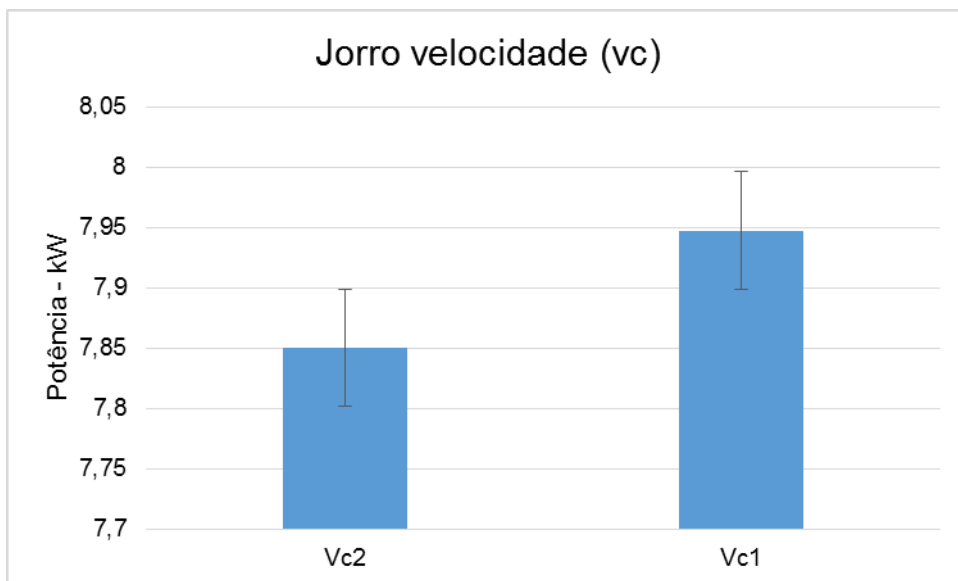


Figura 4.30 – Média de potência durante a usinagem a jorro. Fonte: Próprio autor.

4.2.2.1 - Lubrificação a seco

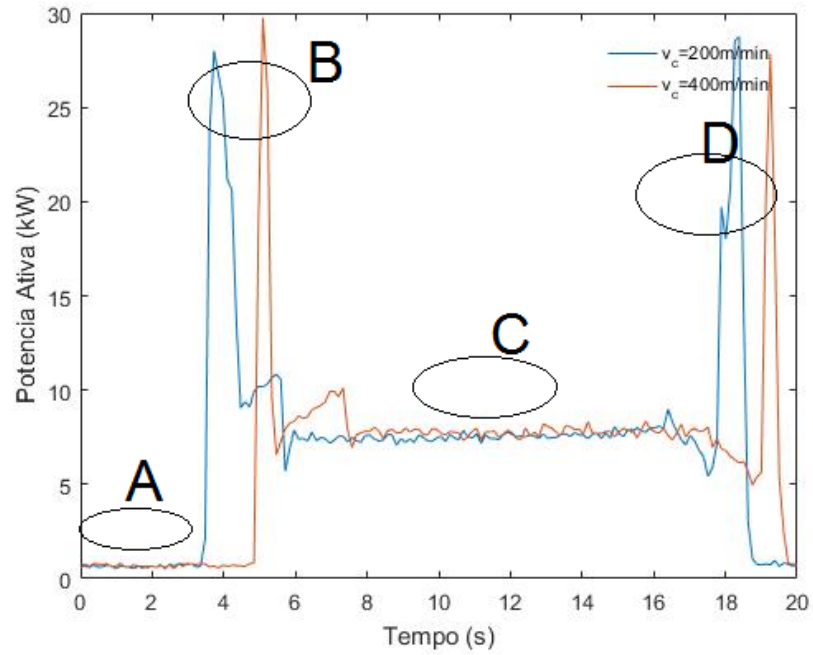


Figura 4.31 – Potência ativa do torno para a variação de velocidade de corte Fonte: Próprio autor.

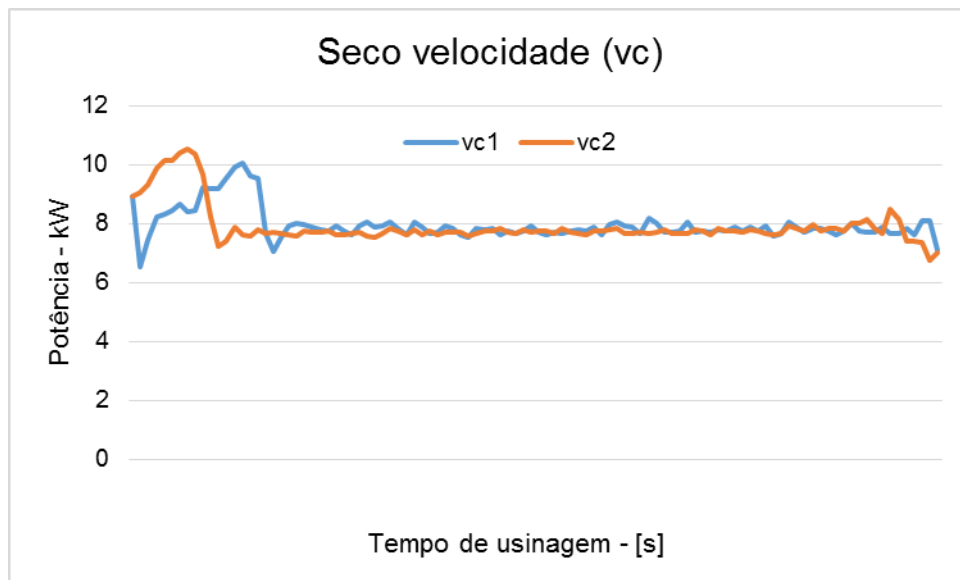


Figura 4.32 – Comportamento da potência durante a usinagem a seco Fonte: Próprio autor.

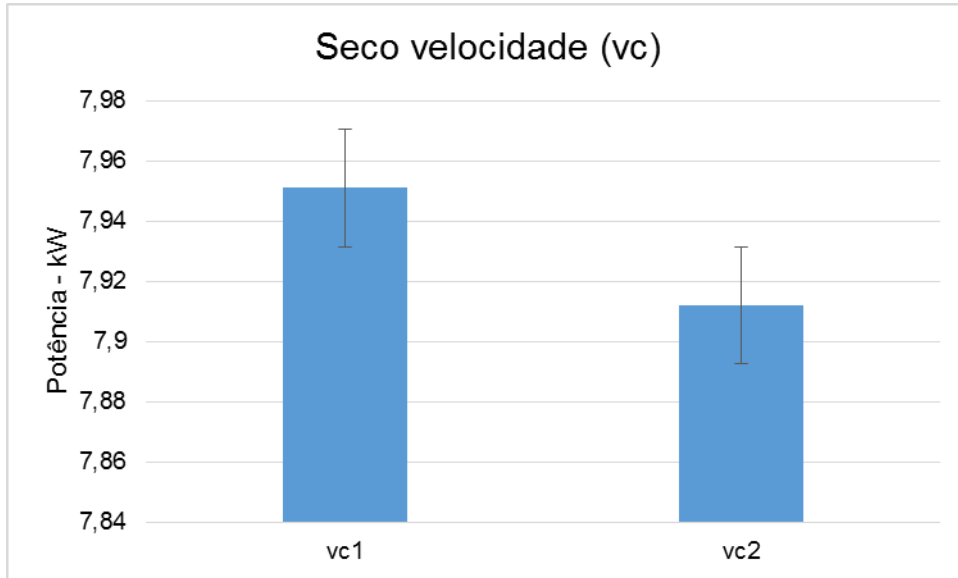


Figura 4.33 – Média de potência durante a usinagem a seco Fonte: Próprio autor.

4.2.2.3 - Lubrificação com MQL

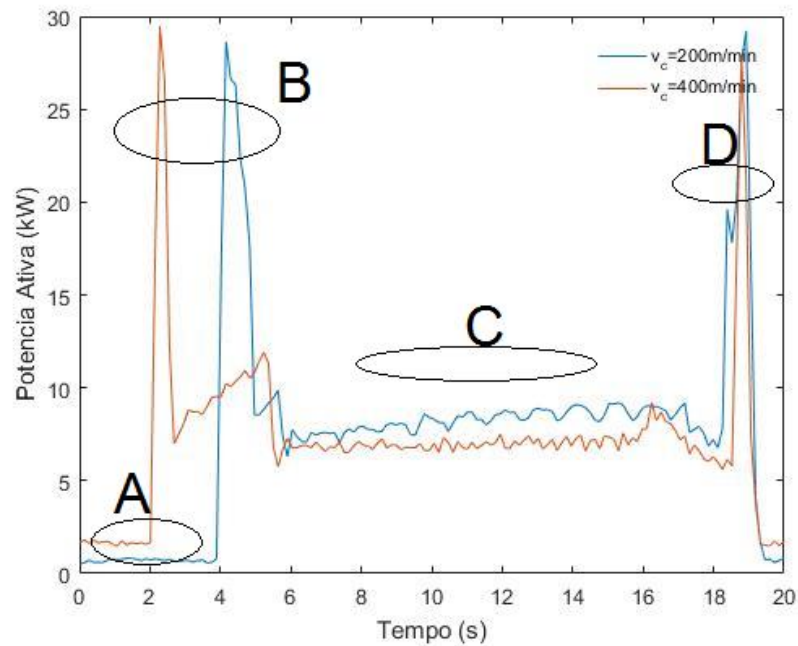


Figura 4.34 – Potência ativa do torno para a variação de velocidade de corte. Fonte: Próprio autor.

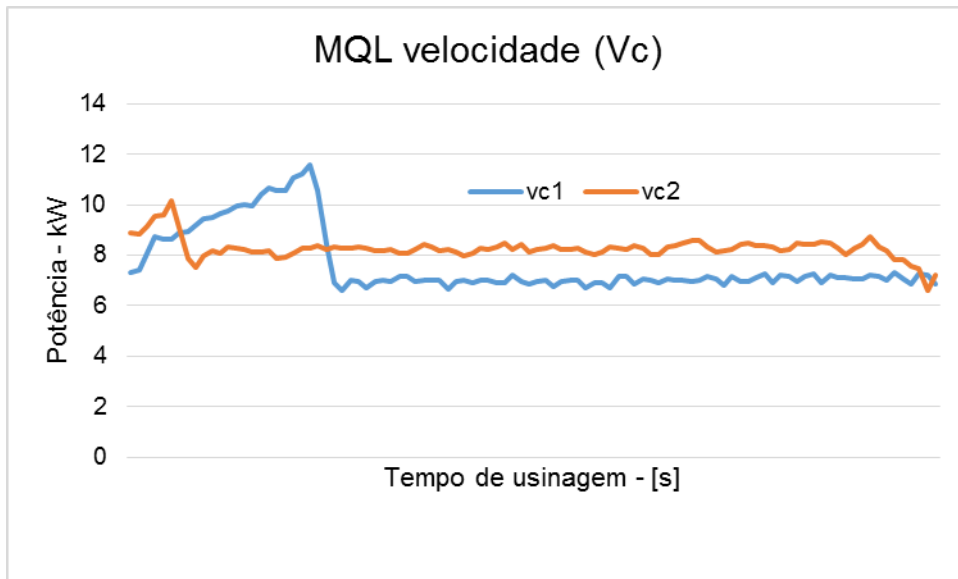


Figura 4.35 – Comportamento da potência durante a usinagem com MQL. Fonte: Próprio autor.

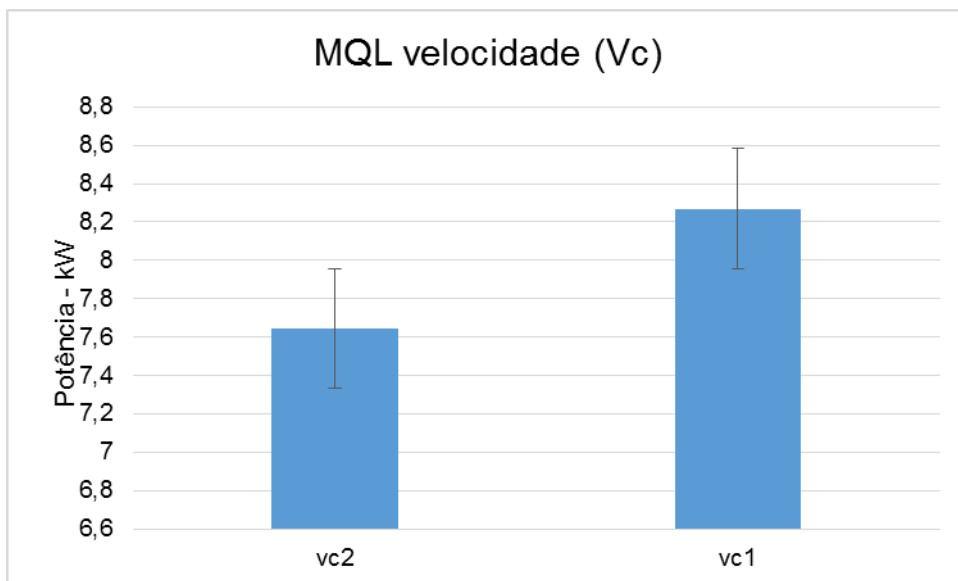


Figura 4.36 – Média de potência durante a usinagem com MQL. Fonte: Próprio autor.

4.2.3 - Potência variando f com lubrificação a jorro

Nas Fig. 4.37, 4.40 e 4.43 a região “A” representa o motor do torno ainda desligado e com potência constante com valores próximos de 3 kW. A região “B” mostra um pico de potência no momento em que o motor do torno é ligado e tem valores acima de 25kW. A região “C” representa o período de usinagem da peça e

tem no começo e no final pequenos picos próximos de 15 kW que representam o momento de entrada e saída da ferramenta na peça usinada. A região “D” representa o momento em que o motor é desligado e apresenta um pico de potência pelo funcionamento do freio magnético da máquina, que deve parar o motor o mais rápido possível e não de forma gradual. As Fig. 4.38, 4.41 e 4.44 mostram o comportamento da corrente somente no período em que a peça está sendo usinada, e seus respectivos pontos de entrada e saída de ferramenta. As Fig. 4.39, 4.42 e 4.45 mostram os valores médios de potência utilizadas no torno para as condições f_1 e f_2 , o avanço tem a mesma relação com a força se usinagem que a profundidade, ou seja, quanto maior for o avanço maior será a força de usinagem porque aumenta a área de cisalhamento no momento da usinagem e de acordo com Machado et al. (2004), os efeitos causados pelo aumento do avanço são ainda maiores que os causados pela profundidade.

4.2.3.1 – Lubrificação a Jorro

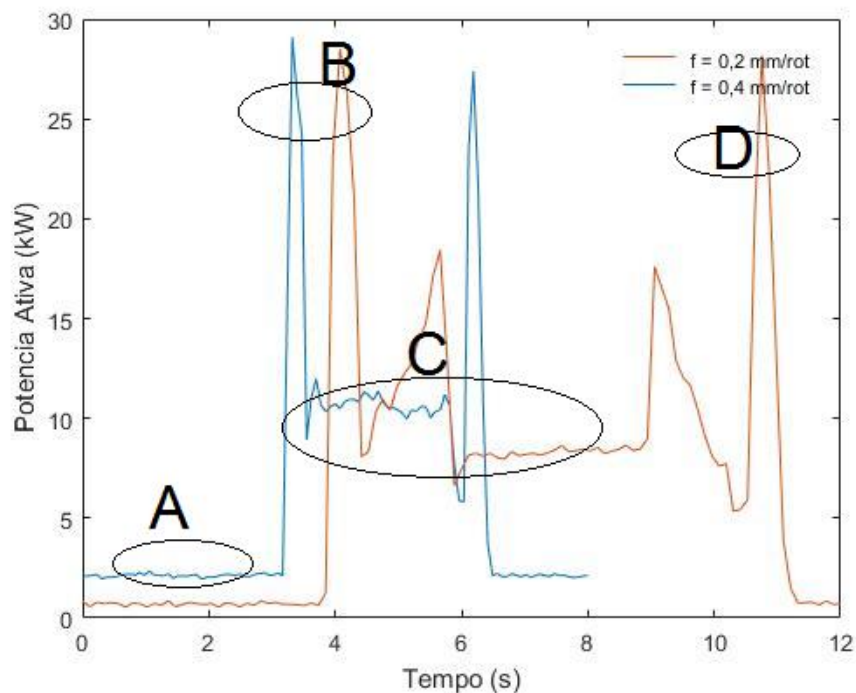


Figura 4.37 – Potência ativa do torno para a variação de avanço Fonte: Próprio autor.

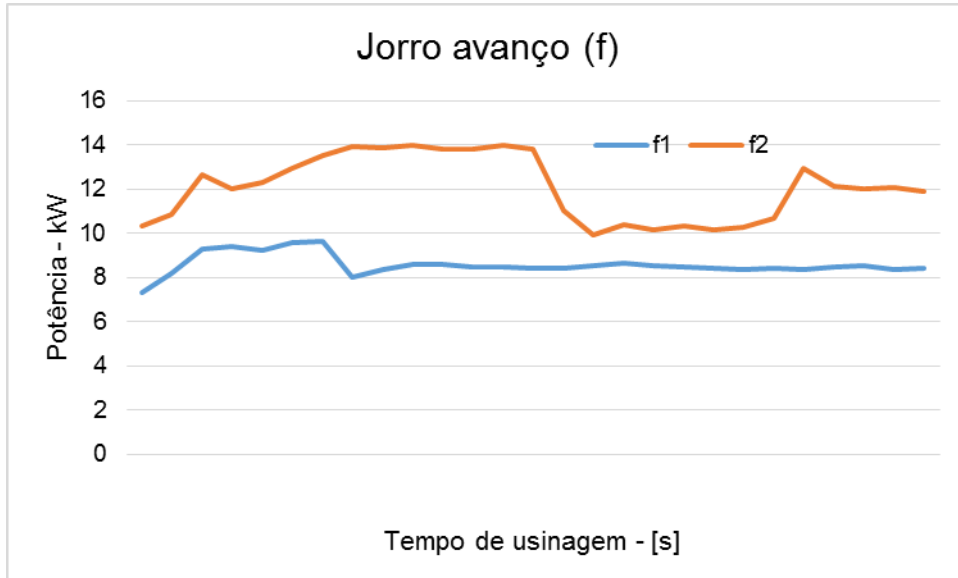


Figura 4.38 – Comportamento da potência durante a usinagem a jorro Fonte: Próprio autor.

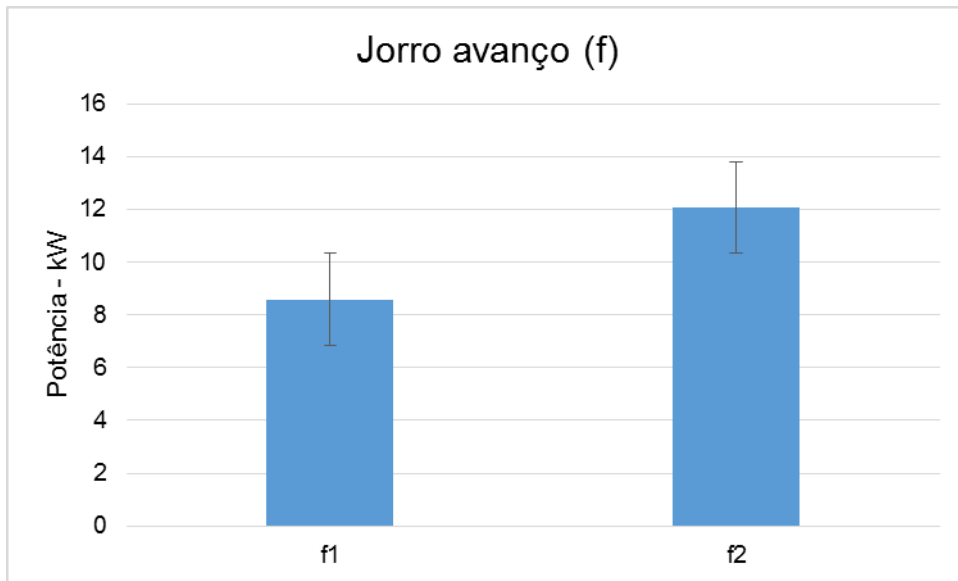


Figura 4.39 – Média de potência durante a usinagem a jorro Fonte: Próprio autor.

4.2.3.1 – Lubrificação a Seco

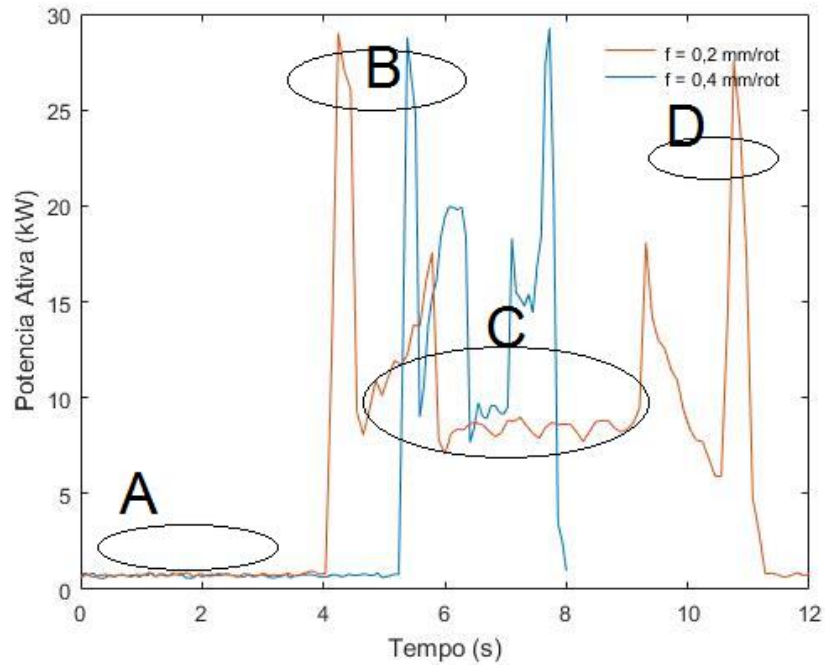


Figura 4.40 – Potência ativa do torno para a variação de avanço.

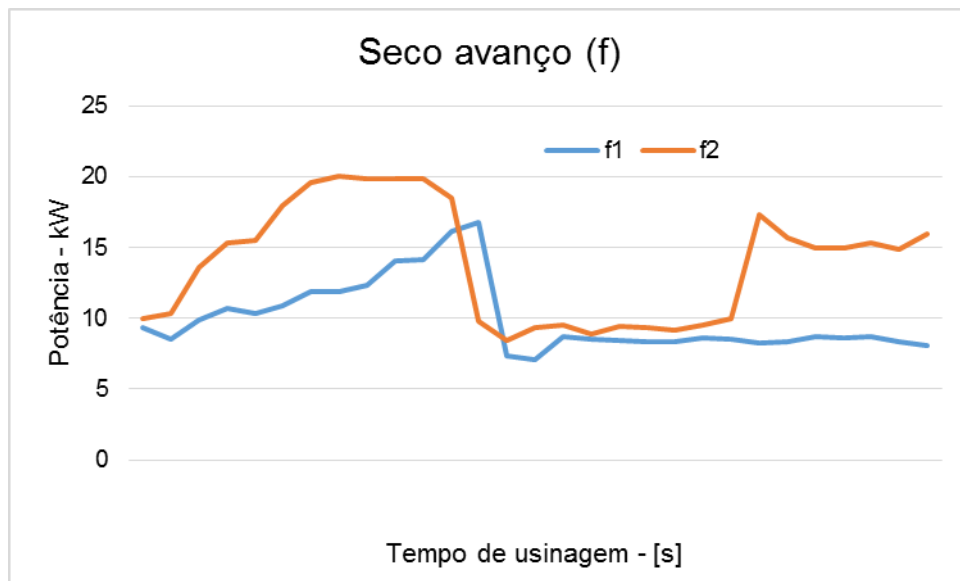


Figura 4.41 – Comportamento da potência durante a usinagem a seco. Fonte: Próprio autor.

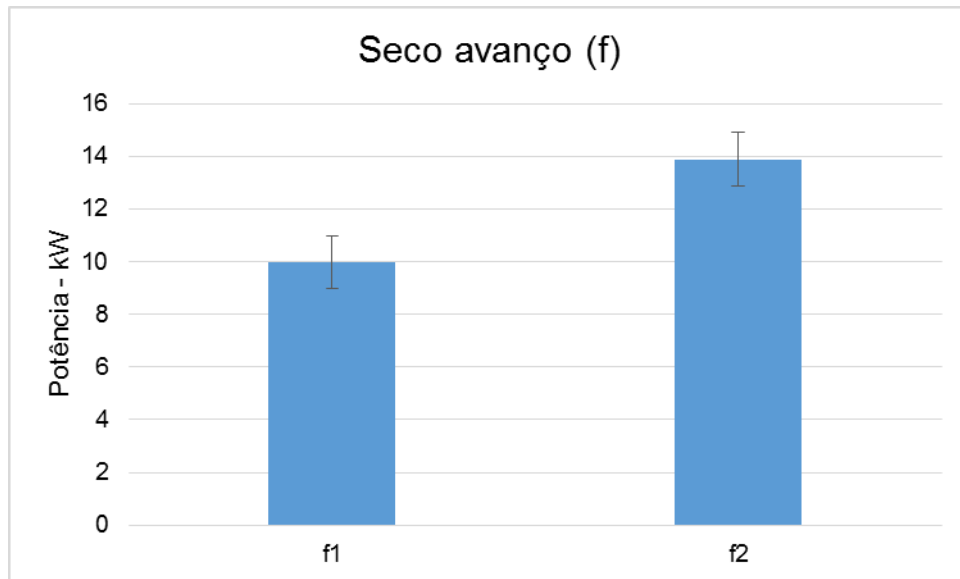


Figura 4.42 – Média de potência durante a usinagem a seco. Fonte: Próprio autor.

4.2.3.1 – Lubrificação com MQL

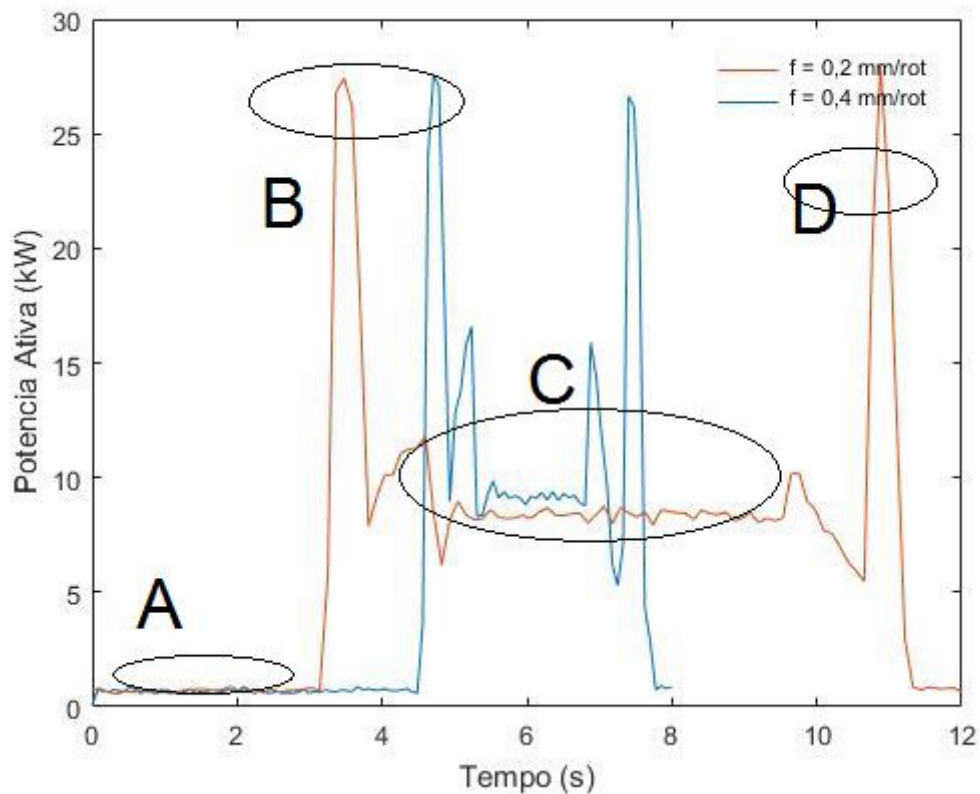


Figura 4.43 – Potência ativa do torno para a variação de avanço. Fonte: Próprio autor.

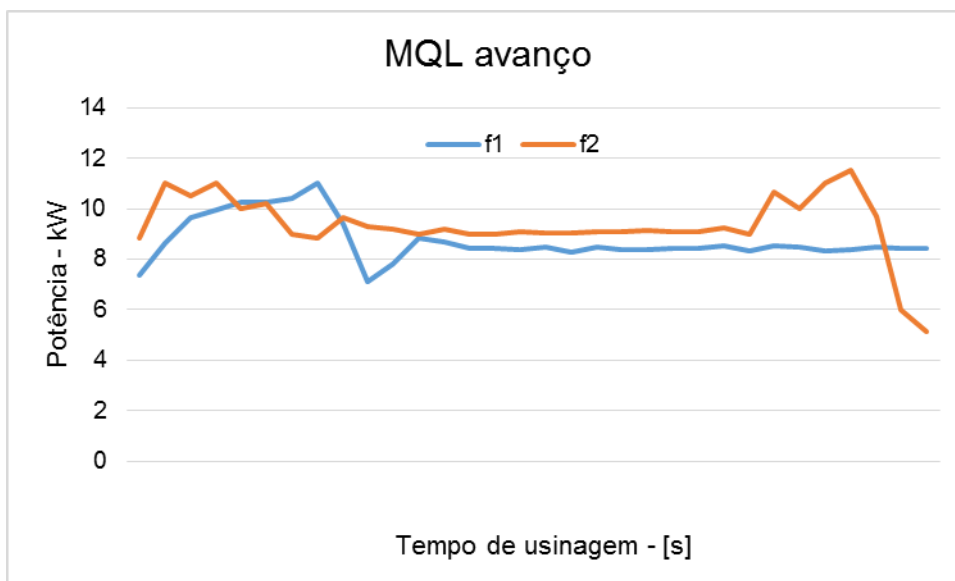


Figura 4.44 – Comportamento da potência durante a usinagem com MQL Fonte: Próprio autor.

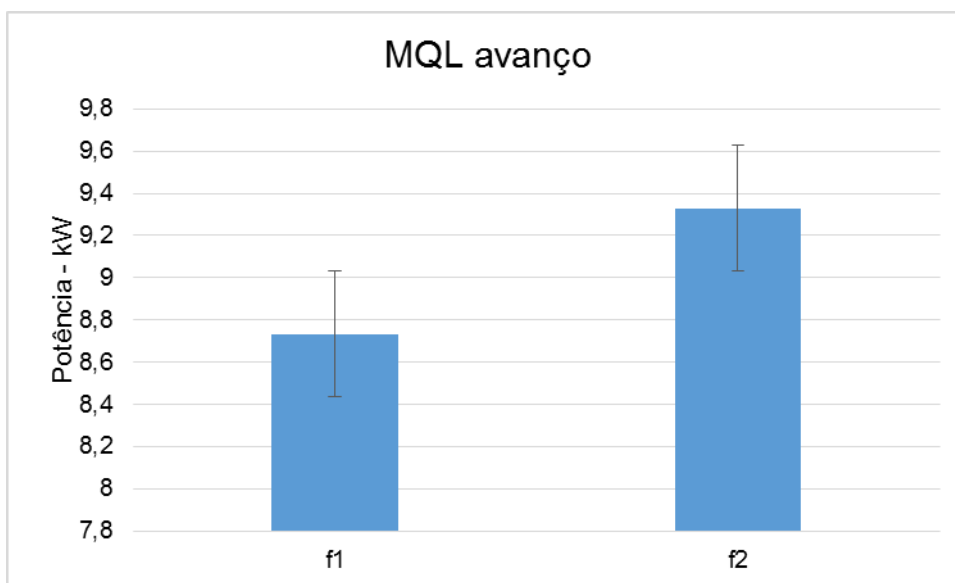


Figura 4.45 – Média de potência durante a usinagem com MQL Fonte: Próprio autor.

4.2.3 – Comparativos entre as potências médias das condições de corte

Os gráficos abaixo mostram as comparações dos valores de potência média durante o período de usinagem para cada parâmetro (velocidade de corte, avanço e profundidade) e para todos os tipos de lubrificação (jorro, seco e MQL).

A ação de um fluido lubrificante acaba por reduzir a área de contato entre o cavaco e a ferramenta, o que gera uma diminuição da força de usinagem, conseqüentemente a potência ativa utilizada pelo torno. Porém, quando analisado o quesito de refrigeração, o fluido de corte pode aumentar essa força, já que promove diminui a temperatura no momento da usinagem, o que gera uma resistência maior ao cisalhamento do material.

Na Fig. 4.46 a menor potência foi verificada com lubrificação MQL e ap1, com valor próximo de 8,75kW . A potência mais elevada foi verificada para o sistema a jorro e ap2 com valores próximos de 10,25 kW. Todos os experimentos com ap2 utilizaram mais potência que ap1, porque com maior profundidade temos um aumento da força de usinagem devido a maior área de cisalhamento. Com relação a lubrificação, o MQL por gerar uma camada de proteção maior entre peça e ferramenta proporcionou uma diminuição do uso de potência durante o ensaio.

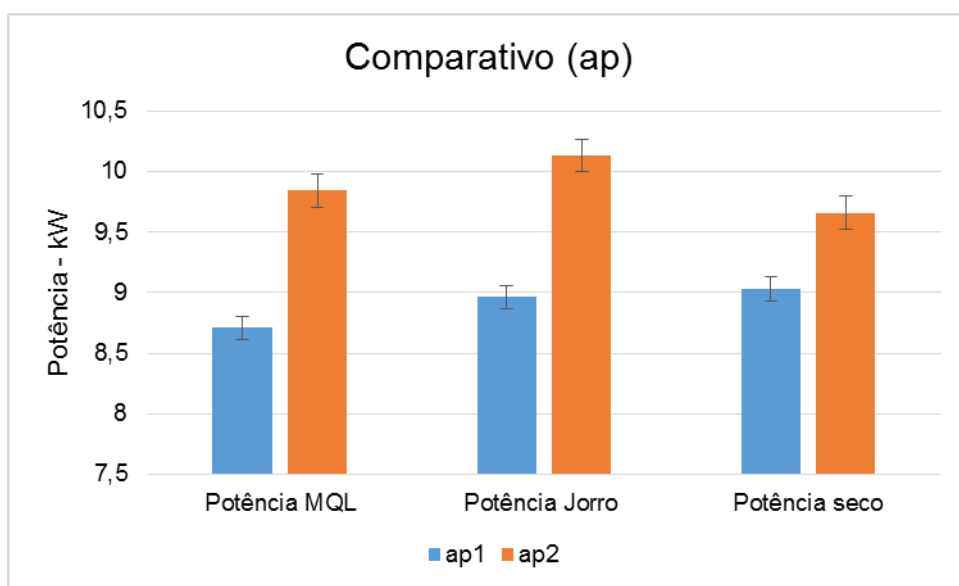


Figura 4.46 – Comparação variando a profundidade para diversos pontos de lubrificação. Fonte: Próprio autor.

Na Fig. 4.47, a menor potência utilizada foi para o sistema MQL com vc1, com valores próximos de 7,6kW. A maior potência registrada foi para o sistema MQL com vc2, com valores próximos de 8,4 kW. Esse resultado mostra uma interação boa que o MQL tem com velocidade de corte maiores, o que não aconteceu quando foi diminuída a velocidade. Como já foi colocado anteriormente, a variação de Vc não apresenta muitas mudanças nos valores de potência, já que ambas as velocidades estão dentro da zona de formação de APC.

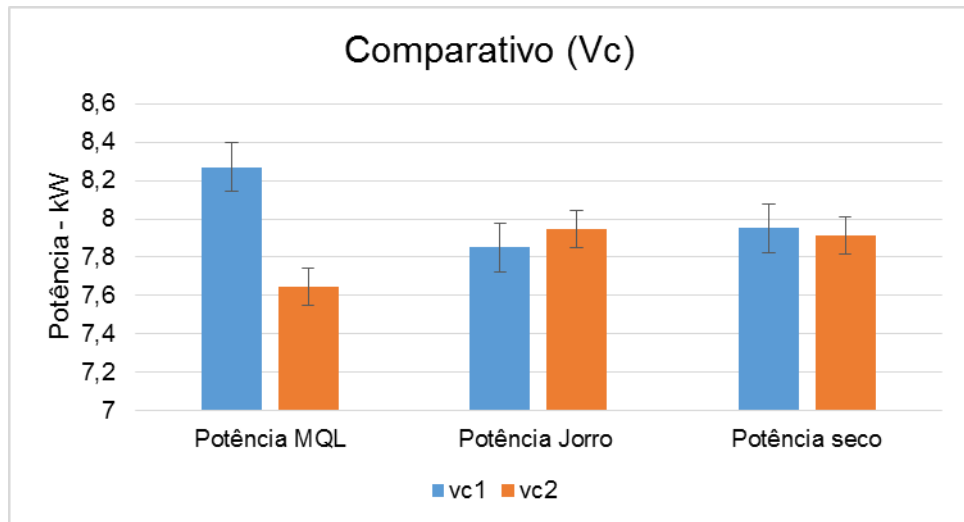


Figura 4.47 – Comparação variando a velocidade de corte para diversos pontos de lubrificação. Fonte: Próprio autor.

Na Fig. 4.48 o menor valor de potência foi registrado para o sistema MQL, com valores próximos de 9kW. O maior valor de potência foi para o sistema a seco e f2, com valores próximos de 25 kW. Resultado esperado, já que a ausência de lubrificação e um avanço elevado são parâmetros que podem aumentar a força de usinagem e conseqüentemente a potência utilizada.

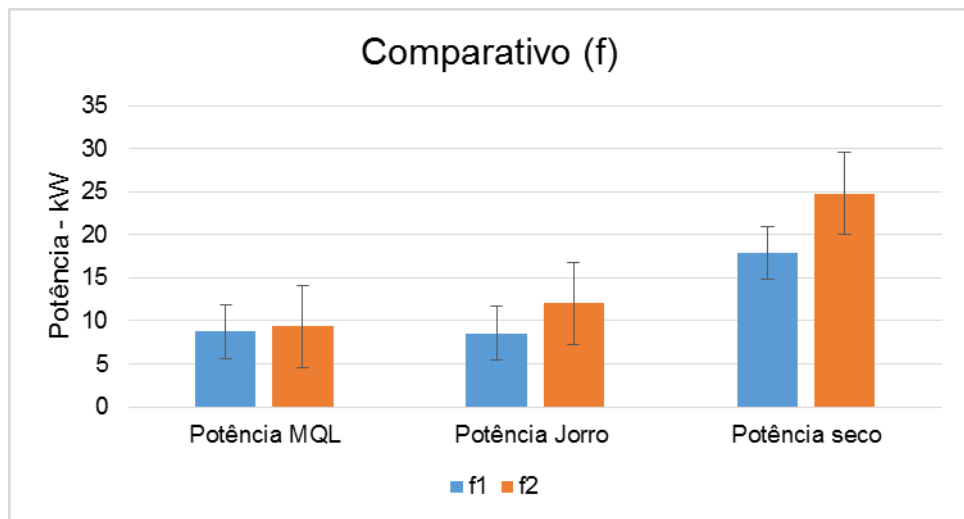


Figura 4.48 – Comparação variando o avanço para diversos pontos de lubrificação. Fonte: Próprio autor.

4.3 – Resultados de metalografia

O tópico a seguir mostra os resultados obtidos na primeira fase de caracterização do aço SAE 4340, onde foi realizado a metalografia do material após a usinagem.

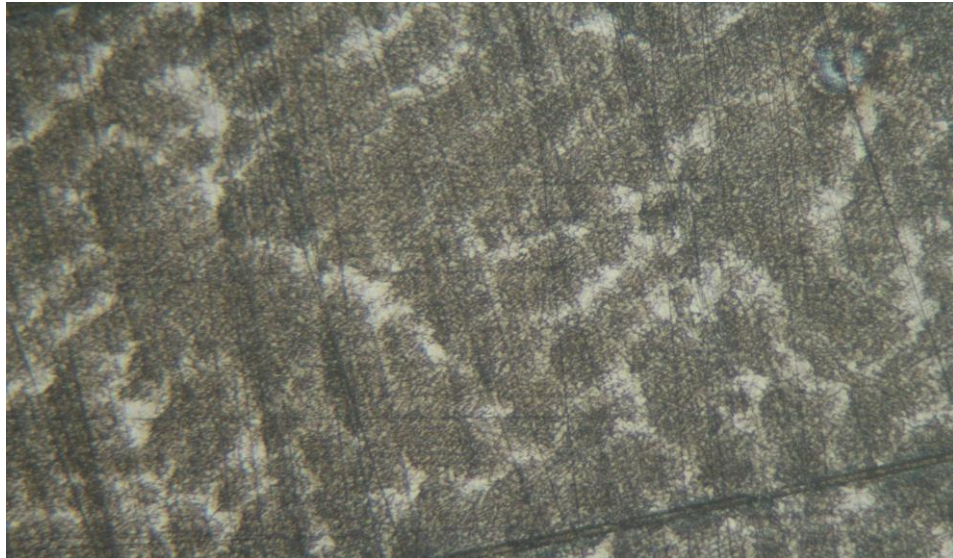


Figura 4.49 – Imagem de microscópio da superfície usinada do aço SAE 4340.

Fonte: Próprio autor.

A região mais clara da foto representa a ferrita que é composta por ferro e com baixo teor de carbono. A região mais escura representa a perlita, composto muito importante em aços ligados e é composta de ferro e 0,8% de carbono. As partes mais escuras da estrutura representam a grafita, material com dureza baixa.

4.4 – Resultados de ensaio de dureza

O tópico a seguir mostra os resultados obtidos da realização do ensaio de dureza Rockwell realizada na superfície usinada de uma amostra do aço SAE 4340. O parâmetro de carga escolhido para o ensaio foi o Rockwell C, que tem uma carga inicial de 10 kgf e uma carga principal de 150 kgf aplicados na superfície da amostra através de um perfurador de cone de diamante.

Tabela 4.1 – Resultados para medição de dureza. Fonte: Próprio autor.

Medições de dureza (HBC)	Média (HRC)	Desvio padrão
26,4	27,4	0,725
28,1	-	-
27,7	-	-

Por se tratar de um aço ligado com cromo-níquel-molibdênio a amostra de aço SAE 4340 mostrou uma baixa dureza no ensaio Rockwell C. De acordo com o catálogo de aços da *Ggd Metals*, esse aço pode alcançar uma dureza de até 55 HBC após passar por um tratamento térmico de têmpera.

Capítulo V

CRONOGRAMA DE EXECUÇÃO

O cronograma mostrado na Tab. (5.1) estabelece como serão distribuídos em meses os ensaios previstos no capítulo 3 para o primeiro semestre de 2017.

Tabela 5.1 - Cronograma de execução do trabalho proposto distribuído em meses no primeiro semestre de 2017.

Atividade	Janeiro	Fevereiro	Março	Abril	Maió	Junho
Correções do TCC1	X					
Revisão Bibliográfica	X	X	X	X	X	
Potência de elétrica a seco	X					
Potência de elétrica com jorro		X				
Potência de elétrica com MQL		X				
Ensaio de rugosidade a seco		X				
Ensaio de rugosidade com jorro			X			
Ensaio de rugosidade com MQL			X			
Ensaio metalográfico do Aço SAE 4340				X		
Ensaio de dureza do Aço SAE 4340					X	
Confecção de artigo para congressos - ECT 2017 e CONEM 2018				X	X	X
Confecção do TCC2		X	X	X	X	
Defesa do TCC2						X

Capítulo VI

CONCLUSÕES

6.1 – Análise final do trabalho

Através das análises produzidas foi verificado que o aço SAE 4340 possui boas propriedades para um aço ligado, por isso tem alta utilização na indústria automotiva. Possui uma boa usinabilidade com a formação de cavacos longos para grande parte das condições de corte, resistência mecânica de acordo com os padrões para o tipo de material (aço ligado com cromo).

Os diferentes tipos de sistema de lubrificação mostraram equilíbrio em seus resultados finais de rugosidade da peça e de potência elétrica utilizada pelo torno durante a usinagem. Cada condição de corte diferente favorecia um tipo de lubrificação diferente.

O trabalho foi focado principalmente na implementação do sistema de lubrificação utilizando mínima quantidade de lubrificante, que mostrou durante os ensaios com algumas condições de corte, melhores resultados que os outros métodos, por proteger melhor o contato entre a peça e a ferramenta. Embora não tenha sido unânime na hora de influenciar os resultados o sistema MQL se mostra de muita utilidade na execução dos ensaios, melhorado a higiene do ambiente de trabalho. Depois de uma instalação correta, facilita o trabalho do operador da máquina, já que o mesmo não tem que lidar com grandes quantidades de lubrificante durante o torneamento. O sistema MQL mostra diversas vantagens em relação aos outros tipos de lubrificação, porém é importante que se desenvolva mais conhecimento para que essa tecnologia se torne cada vez mais presente na indústria.

6.2 – Resultados obtidos e resultados esperados

Como resultados esperados durante o início dos trabalhos foram colocadas as seguintes expectativas:

- O conhecimento de técnicas de usinagem, focado na parte de torneamento.
- Identificar a influência dos parâmetros de corte (v_c , a_p e f) na potência elétrica e acabamento superficial de uma peça torneada.

- Colaborar com novas investigações e fornecer dados que darão suporte técnico na viabilização do uso do MQL no processo de torneamento.
- Dominar o uso do *software Statistica*[®], como uma ferramenta para aplicação industrial.

Com o final do trabalho é possível verificar que os resultados esperados foram alcançados durante toda a realização do trabalho. A análise dos parâmetros de usinagem foi realizada, o levantamento de informações e a verificação do comportamento do sistema MQL mostrou possíveis avanços para a implementação da tecnologia *software Statistica*[®] foi utilizado nas análises de planejamento de experimentos.

6.3 – Trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, podem ser realizados medições de temperatura durante a usinagem para os diversos tipos de lubrificação, onde pode ser analisado a eficiência de cada tipo de lubrificação na dissipação do calor gerado pela usinagem. Na parte de potência elétrica do torno do Laboratório de usinagem da FGA/UnB é importante a elaboração de um sistema estabilizador da rede elétrica e alguns filtros de sinais para que as medições de parâmetros das máquinas se tornem mais simples e corretas.

Capítulo VII

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT, Associação Brasileira de normas técnicas. **NBR 6006(102)** classificação dos aços-carbono e de baixo teor em liga segundo os critérios adotados pela AISI e SAE. Novembro de 1994.
- ANDRÉ LUÍS DE BRITO BAPTISTA. **Aspectos metalúrgicos na avaliação da usinabilidade de aços**. *Revista Escola de Minas, Vol. 55 no. 2*. Ouro Preto, 2002.
- ARFELD, E. D., HANUM, A. L. **Aços de corte fácil de baixo carbono**. *Metalurgia - ABM*, v. 33, n. 241, p.773-776, dezembro de 1977.
- CATÁLOGO GGD metals disponível em: <http://www.ggdmetals.com.br/aco-construcao-mecanica/sae-8640/> acessado dia 25/09/2016.
- DE BARROS NETO B.; SCARMINIO S. I.; BRUNS E.R. **Como fazer experimentos, pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria 2**. Ed. São Paulo: Unicamp, 2001.
- DEUTSCHE GESETZLICHE UNFALLVERSICHERUNG. **Minimum quantity lubrication for machining operations**. German: 2010.
- DINIZ, A.E., MICARONI, R., 2002. **Cutting conditions for finish turning process aiming: the use of dry cutting**, *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 42, pp. 899-904.
- EUGENE A. AVALLONE e THEODORE BAUMEISTER, **Mark's standard handbook for mechanical engineers**. 8. Ed. Estados Unidos, 1978.
- FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Blucher, 1977.

- F. ITOIGAWA, T. H. C. CHILDS, T. NAKAMURA, AND W. BELLUCO, **Effects and mechanisms in minimal quantity lubrication machining of an aluminum alloy.** *Wear*, vol. 260, pp.339-344, 2006.
- G. GLOBOČKI LAKIĆ A, B. SREDANOVIĆ A, D. KRAMAR B, B. NEDIĆ C, J. KOPAČ B. **Experimental Research Using of MQL in Metal Cutting.** *Tribology in Industry*, Vol. 35, No. 4 (2013) pp. 276-285.
- JOÃO LUIZ FAVARI. **Obtenção de dados de usinagem visando a otimização de processo de usinagem em cenário de fabricação flexível.** *15º Congresso de iniciação científica.* Piracicaba, 2007.
- JOSÉ ROBERTO BANIN JUNIOR. **Análise de tensões residuais, integridade superficial e forças de usinagem no fresamento de topo de aço SAE 4340 endurecido.** São Paulo: Centro Universitário da FEI, 2009.
- KHAN M.M.A., DHAR N.R., 2006. **Performance evaluation of minimum quantity lubrication by vegetable oil in terms of cutting force, cutting zone temperature, tool wear, job dimension and surface finish in turning AISI-1060 steel.** *Journal of Zhejiang University science* aissn 1009-3095 1862-1775.
- MACHADO, R, A; ABRÃO, M, A; COELHO, T, R; SILVA, B, M. **Teoria da Usinagem Dos Materiais.** São Paulo: Blucher, 2009.
- REDDY, M.R., KUMAR, P.R., RAO, G.K. M. 2011. **Effect of Feed Rate on the Generation of Surface Roughness in Turning.** *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*, ISSN: 0975-5462 Vol. 3, No. 11, pp. 8099-8105.

- SILVA, L. C. **Comportamento da rebarba no fresamento de faceamento do aço inoxidável PH 13 8Mo**. Tese (Pós-Graduação em Engenharia Mecânica). Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia.
- TAI, B. L.; STEPHENSON, D. A.; FURNESS, R. J.; SHIH, A. J. **Minimum Quantity Lubrication (MQL) in Automotive Powertrain Machining**. 6. Ed. CIRP International Conference on High Performance Cutting, 2014, USA.
- VICENTE CHIAVERINI. **Tecnologia de Mecânica, processos de fabricação e tratamento**. 2. ed. São Paulo: Mc Graw hill, 1986.