

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

**TORNEAMENTO DO AÇO SAE 4340 COM DIFERENTES SISTEMAS DE
LUBRIFRIGERAÇÃO (A SECO, JORRO E 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 07/07/2017 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 os parâmetros de corte (velocidade de corte, profundidade e avanço) por meio de um planejamento fatorial 2^3 no torneamento do aço SAE 4340, para verificar a resposta que o material tem a essas mudanças e a relação que essas variações têm entre si, aplicando ainda ao processo de usinagem o uso da técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL), aplicação de fluido de corte em abundância por jorro e torneamento a seco, sem uso de fluido de corte. As variáveis de saída analisadas foram a rugosidade média da superfície torneada e a potência elétrica ativa adquirida durante o torneamento. Os resultados mostraram um equilíbrio entre os diferentes sistemas de lubrificação para as condições de corte impostas no torneamento do aço SAE 4340, a técnica utilizando MQL não se destaca das outras, uma vez que teve basicamente, o mesmo desempenho no acabamento superficial da peça quando comparado com jorro e com o torneamento a seco. Nos ensaios de potência apenas com a variação do avanço a técnica de MQL teve um desempenho melhor do que no torneamento a seco, e igual na aplicação com jorro.

Palavras-chave: Torneamento, Aço SAE 4340, Planejamento Fatorial, MQL.

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 analyzed outputs were the average roughness and the electric power during the turning process. The results showed a balance between the different lubrication systems for the SAE 4340 steel, the MQL system doesn't stand out in comparison to the other systems of lubrication. In the electric power experiment, the MQL system had better results than the others had systems of lubrication.

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

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 (Rz).
Figura 4.13 - Superfície de resposta – Profundidade x Velocidade (Rz).
Figura 4.14 - Superfície de resposta – Avanço x Velocidade (Rz).
Figura 4.15 - Superfície de resposta – Avanço x Profundidade (Rz).
Figura 4.16 - Superfície de resposta – Profundidade x Velocidade de corte (Ra).
Figura 4.17 - Superfície de resposta – Profundidade x Avanço (Ra)
Figura 4.18 - Superfície de resposta – Avanço x Velocidade de corte (Ra).
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 19
2.4 - Força e potência de usinagem	20
2.4.1 - Força de usinagem	20 e 21
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 28
2.5.3 - Torneamento com MQL	29 a 31
2.6 - Planejamento de experimentos	31 e 32
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.....	37
3.2 - Ensaio de rugosidade	37
3.3 - Ensaio de potência elétrica ativa	40
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	43
4.1 - Resultados do ensaio de rugosidade	43
4.1.1 - Aspectos gerais da influência dos parâmetros de corte na rugosidade	43
4.1.2 - Análise estatística por Pareto e superfície de resposta	48

4.1.2.1 - Gráficos de Pareto na análise de Ra.....	48
4.1.2.2 - Superfície de resposta para Ra.....	52
4.2 - Resultados do ensaio de potência elétrica ativa	58
6. CONCLUSÕES	62
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

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 (CHIAVERINI,1986).

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 (CHIAVERINI,1986).

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. (FERRARESI,1977).

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 - Objetivo geral

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, jorro, MQL e torneamento a seco.

1.2.2 - Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho são os seguintes:

- Utilizar a técnica de aplicação de mínima quantidade lubrificante no torneamento do aço SAE 4340;
- Utilizar um planejamento fatorial 2^3 com a variação da velocidade de corte, profundidade de corte e avanço;
- Utilizar um rugosímetro para a medição da rugosidade média da superfície torneada, como inferência de uma variável de saída do planejamento fatorial 2^3 proposto;
- Utilizar um sistema de aquisição de potência elétrica ativa para verificar a variação do sinal com a variação dos parâmetros de corte (velocidade de corte, avanço e profundidade).

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.

Segundo Chiaverini (1986), 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, a 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). Os experimentos realizados nesse trabalho foram realizados com esse tipo de ferramenta.
- 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.

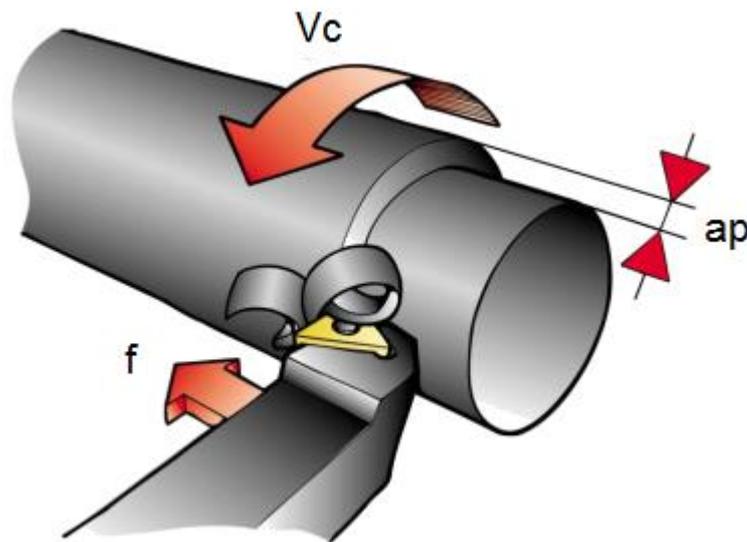


Figura 2.1 - Principais grandezas de corte no torneamento. Velocidade de corte (v_c), profundidade (a_p) e avanço (f). (Fonte: Adaptado de Kennametal, 2014).

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).

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).

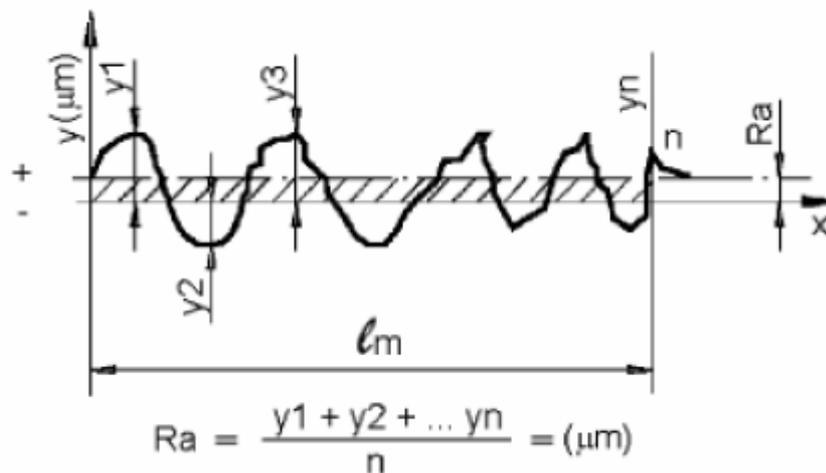


Figura 2.2 - Ilustração da obtenção do parâmetro de amplitude Ra. Fonte: Rosa (2009).

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.

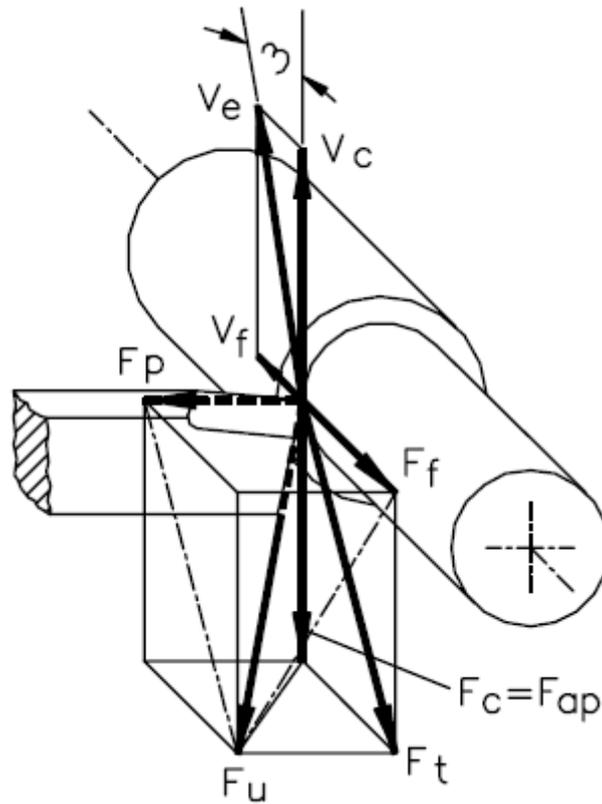


Figura 2.4 - Decomposição da força de usinagem no torneamento cilíndrico externo (Machado *et al.*, 2009).

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).

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

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

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.

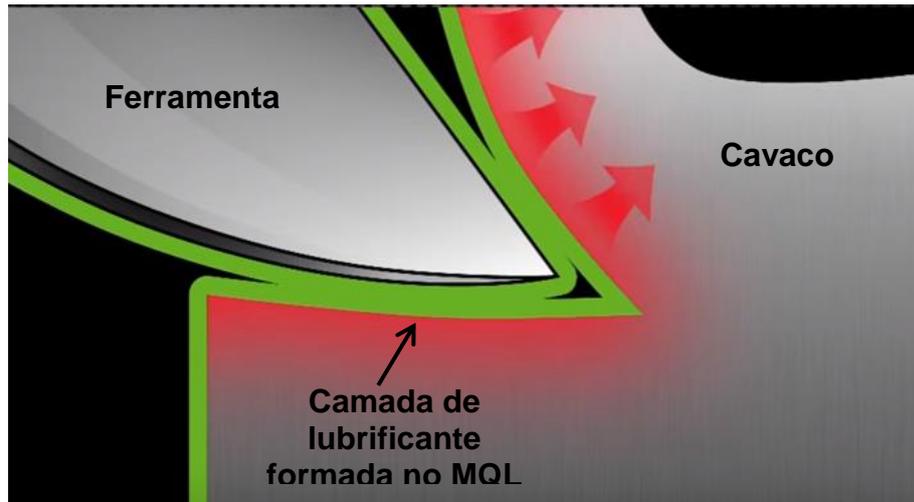


Figura 2.6 - Sistema MQL atuando na usinagem. Fonte: MGUV, 2010.

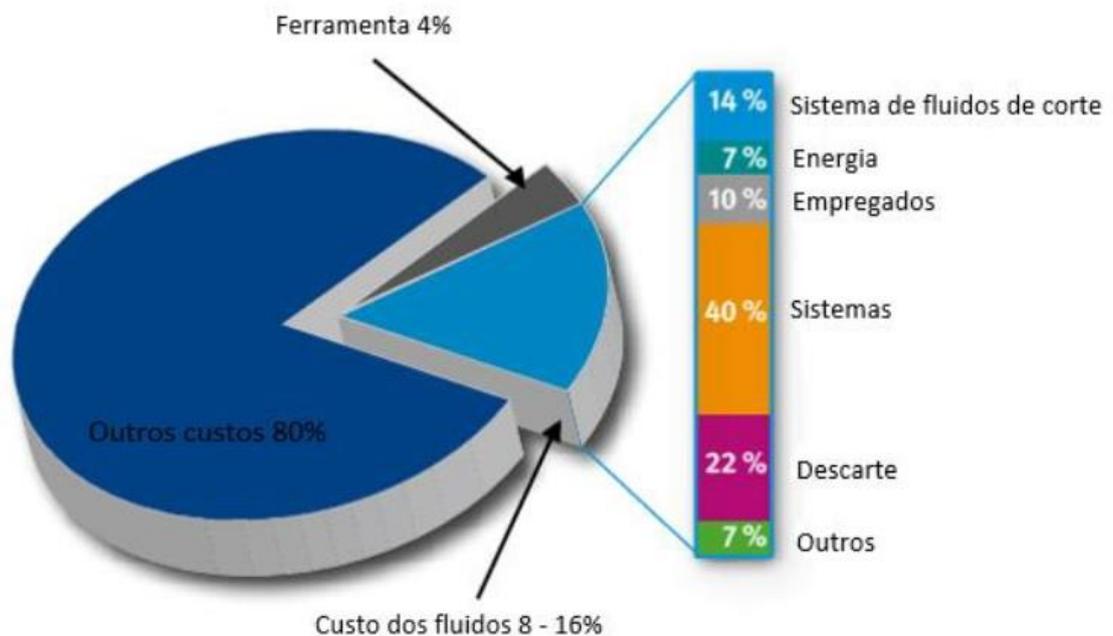


Figura 2.7 - Custos de usinagem. Fonte: MGUV, 2010 (modificado)

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.

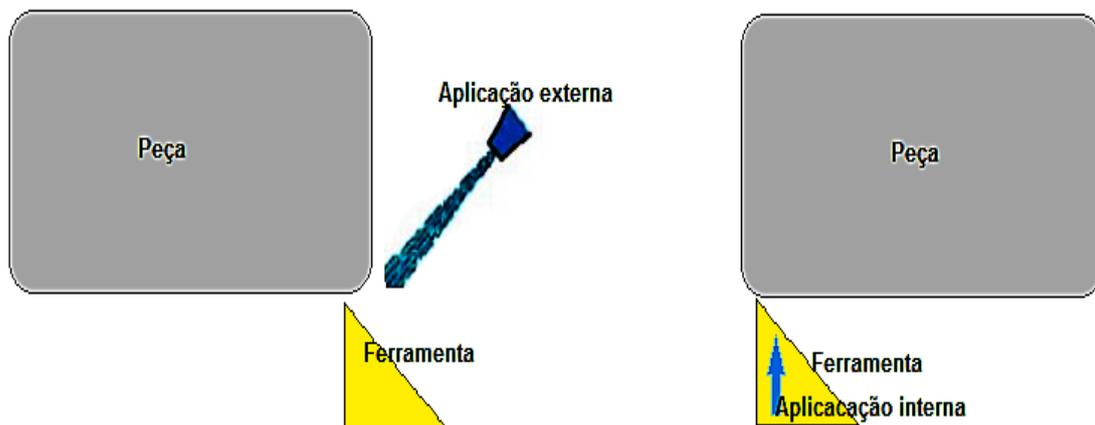


Figura 2.8 - (a) Aplicação externa; (b) Aplicação interna. Fonte: Thai *et al.*, 2014 (Adaptado).

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.

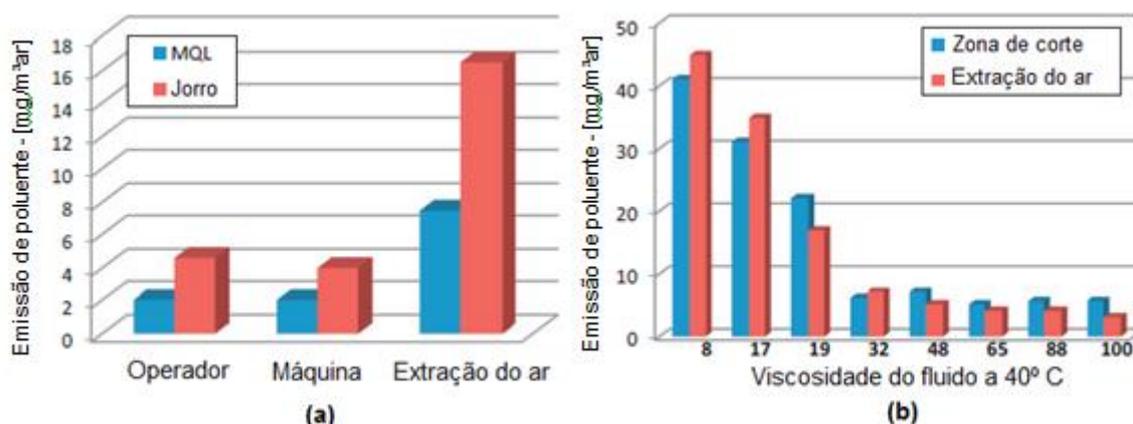


Figura 2.9 - Comparação de emissão de partículas poluentes.

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 influência no experimento e qual resultado ele busca alcançar (BARROS NETO *et al.*, 2001).

Muitas vezes a filtragem de fatores de influência 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_1k_2	k_1k_3	k_2k_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):

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

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. A organização dos experimentos segue a seguinte ordem de ensaios:

- 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 (parafínico).

- Ensaio de Potência Elétrica Ativa
 - 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 (parafínico).

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 iniciou-se com o ensaio de rugosidade da peça com três variações - a seco, com jorro e com aplicação de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL). A seguir foi executado o ensaio de medição de potência elétrica ativa, também com três variações no torneamento - a seco, com jorro e com aplicação de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL).

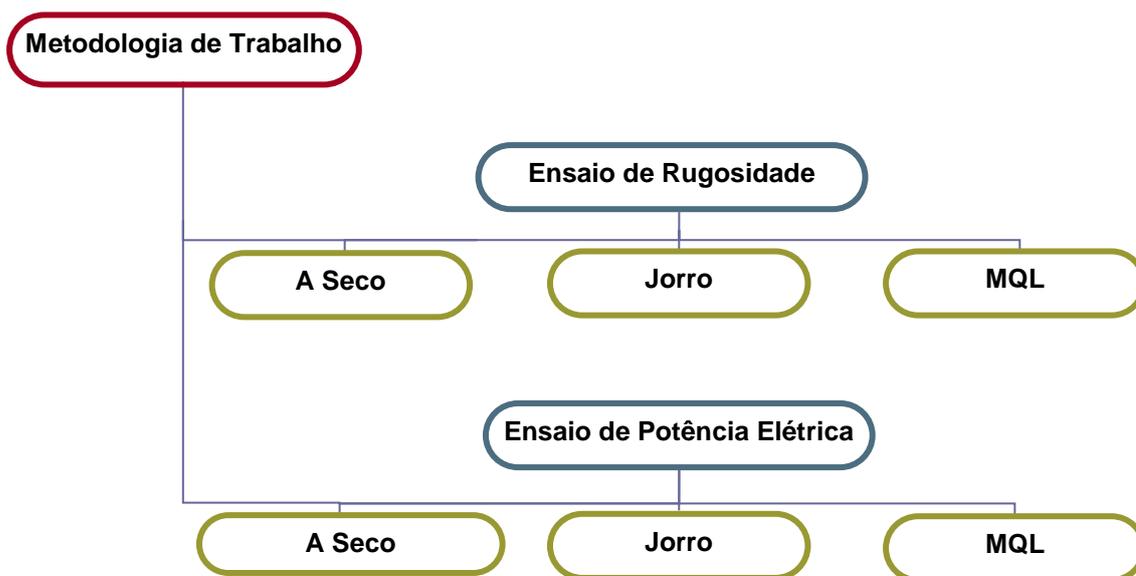


Figura 3.1 - Fluxograma dos procedimentos experimentais realizados.

Fonte: Próprio autor.

3.2 - Ensaio de rugosidade

Neste ensaio o objetivo foi 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 - velocidade de corte (v_c), profundidade de corte (a_p) e avanço (f), gerando oito combinações de usinagem no torneamento cilíndrico externo. A Tabela (3.1) mostra as variáveis de entrada em dois níveis e a Tab. (3.2) as condições de corte dadas pelo planejamento fatorial 2^3 .

As condições de corte foram estabelecidas dentro da faixa de trabalho do inserto de metal duro utilizado, conforme as especificações do fabricante: $v_c = 275$ a 425 m/min, $f = 0,15$ a $0,50$ mm/rot e $a_p = 0,5$ a $6,0$ mm.

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: 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 2³.

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

O inserto de metal duro utilizado foi da classe P para aços, revestido de TiCN + Al₂O₃ + TiN por CVD fabricado pela Sandvik, especificação DNMG 15 06 08-PM 4225. A geometria da ferramenta de corte utilizada, tais como espessura (S), comprimento efetivo da aresta de corte (LE), raio de canto (RE) e diâmetro do círculo inscrito (IC), estão representadas na Fig. (3.2). A Tabela (3.3) indica as dimensões do inserto de metal duro utilizado.

Para alojar o inserto de metal duro foi utilizado um suporte porta-ferramentas de aço endurecido PDJNL 2020K fabricado pela Sandvik.

O inserto de metal duro, o porta-ferramentas e o torno CNC Diplomat Logic 195 VS utilizados no ensaio de rugosidade pertencem ao Laboratório de Processos de Fabricação da UnB-FGA.

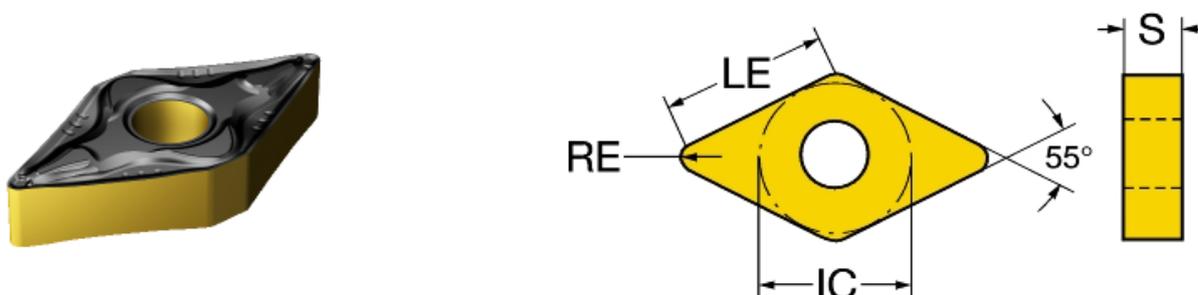


Figura 3.2 - Geometria da ferramenta de corte (Fonte: Sandvik, 2017).

Tabela 3.3 - Dimensões da ferramenta de corte (Fonte: Sandvik, 2017).

Comprimento efetivo da aresta de corte - LE (mm)	Espessura da pastilha - S (mm)	Raio de canto RE (mm)	Diâmetro do círculo inscrito - IC (mm)
14,704	6,35	0,794	12,7

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

- Ra - desvio aritmético médio da superfície;

A medição do parâmetro de rugosidade Ra foi executada 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 foi a ISO 1997 com comprimento de amostragem de 0,8 mm.

Foram realizadas três medições para cada parâmetro de rugosidade a 120° uma da outra, na direção transversal das linhas de avanço deixadas pela ferramenta de corte sobre o corpo de prova, a superfície era usinada e posteriormente era instalado o rugosímetro para fazer as respectivas medições. A ponta de rugosímetro tocava a superfície do corpo de prova uma única vez, para a aquisição das outras duas medições a peça era girada sem a retirada do rugosímetro.

A Figura (3.3) mostra como foram realizadas as medições de rugosidade, para cada condição de corte estabelecida na Tab. (3.2) foi torneado no corpo de prova de aço SAE 4340 um comprimento de usinagem de 15 mm. Todo o procedimento de medição de rugosidade foi repetido para as condições a seco, com aplicação de jorro e mínima quantidade de lubrificante (MQL).

Na medição dos parâmetros de rugosidade foi utilizado um rugosímetro Mitutoyo modelo SJ-210 pertencente ao SENAI Ítalo Bologna de Goiânia.

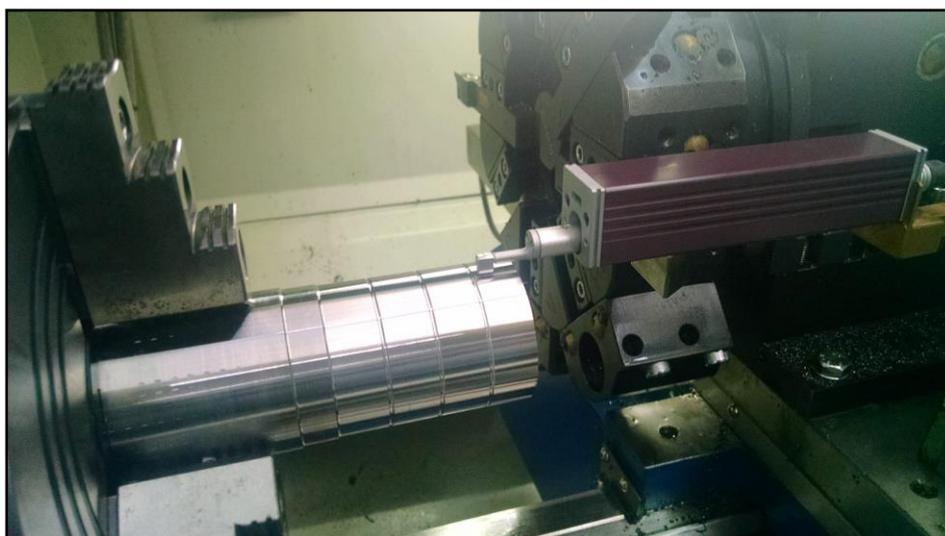


Figura 3.2 - Medição do parâmetro de rugosidade Ra.

Na aplicação do método de mínima quantidade de lubrificante foi 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. Somente um bocal de aplicação de MQL foi utilizado no ensaio com pressão de 5,0 bar e vazão de aproximadamente 120 ml/h, aplicado sobre-cabeça o mais próximo possível da ponta de corte da ferramenta.

3.3 - Ensaio de potência elétrica ativa

Este ensaio teve como propósito obter a potência elétrica ativa durante o torneamento cilíndrico externo do aço SAE 4340, com aplicação de mínima quantidade de lubrificante, jorro e a seco, de acordo com as condições de corte mostradas nas Tabs. (3.4) a (3.6), onde se variou a velocidade de corte (v_c), o avanço (f) e a profundidade de corte (a_p). Os valores que serão medidos para a potência ativa são valores RMS. As condições de corte dadas nas Tabs. (3.4) a (3.6) foram estabelecidas de acordo com as especificações de trabalho do inserto de metal duro utilizado, sempre dobrando o valor do parâmetro de corte analisado, v_c , (f) e a_p , com o intuito de destacar de forma mais clara possível a sua influência na potência elétrica ativa adquirida. Os valores dos parâmetros de corte são diferentes

do ensaio de rugosidade para se poder trabalhar dentro do espectro da ferramenta de corte, espectro esse que é determinado pelo fabricante.

Tabela 3.4 - Variação da velocidade de corte para o ensaio de potência ativa.

Velocidade de corte 1 (v_{c1})	200 m/min
Velocidade de corte 2 (v_{c2})	400 m/min
Velocidade de avanço (v_f)	200 mm/min
Profundidade de corte (a_p)	1,0 mm
Comprimento de usinagem (l)	50 mm
Tempo de usinagem em v_{c1}	20 segundos
Tempo de usinagem em v_{c2}	20 segundos

Tabela 3.5 - Variação do avanço para o ensaio de potência ativa.

Avanço 1 (f_1)	0,2 mm/rot
Avanço 2 (f_2)	0,4 mm/rot
Velocidade de corte (v_c)	250 m/min
Profundidade de corte (a_p)	1,0 mm
Comprimento de usinagem (l)	50 mm
Tempo de usinagem para f_1	12 segundos
Tempo de usinagem para f_2	8 segundos

Tabela 3.6 - Variação da profundidade de corte para o ensaio de potência ativa.

Profundidade de corte 1 (a_{p1})	1,0 mm
Profundidade de corte 2 (a_{p2})	2,0 mm
Avanço de corte (f)	0,2 mm/rot
Velocidade de corte (v_c)	250 m/min
Comprimento de usinagem (l)	50 mm
Tempo de usinagem em a_{p1}	12 segundos
Tempo de usinagem em a_{p2}	12 segundos

A potência elétrica ativa foi adquirida por meio de um sistema de aquisição e processamento de dados composto por um sensor de efeito *Hall*, ligado em uma das

fases do torno CNC para aquisição da corrente elétrica, e uma plataforma eletrônica de *hardware* livre com placa simples, Arduino®. O equipamento utilizado para aquisição da potência elétrica ativa foi desenvolvido pelo Laboratório de Processos de Fabricação da UnB-FGA.

Foram realizadas três medições de potência para cada condição de corte explicitada nas Tabs. (3.4) a (3.6), com variação da condição de lubrificação - a seco, jorro e MQL. A escolha da sequência de usinagem no torneamento foi realizada de maneira aleatória. Para o ensaio de potência elétrica ativa foi utilizado um corpo de prova de aço SAE 4340 com diâmetro inicial de 45 mm e 115 mm de comprimento total, sendo utilizados 50 mm para o torneamento, conforme Fig. (3.3).



Figura 3.3 - Corpo de prova de aço SAE 4340 utilizado no ensaio de potência elétrica ativa.

A especificação do inserto de metal duro, o porta-ferramentas, o sistema de aplicação de MQL e suas especificações, e o torno CNC utilizados, foram os mesmos do ensaio de rugosidade.

Capítulo IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 - Resultados do ensaio de rugosidade

Os resultados obtidos no ensaio de rugosidade foram agrupados e discutidos em dois itens a seguir:

4.1.1 - Aspectos gerais da Influência dos parâmetros de corte na rugosidade, e;

4.1.2 - Análise estatística por Pareto e Superfície de Resposta.

4.1.1 - Aspectos gerais da influência dos parâmetros de corte na rugosidade

As Figuras (4.1) a (4.8) mostram os resultados das medições do parâmetro de rugosidade R_a para as condições de corte dadas na tabela abaixo (Tab. 3.2 adaptada).

Ordem	Ensaio	v_c (m/min)	f (mm/rot)	a_P (mm)	R_a (seco)	R_a (Jorro)	R_a (MQL)
1	1	425	0,20	1,0	5,8 μm	5,4 μm	5,7 μm
4	2	275	0,20	1,0	1,2 μm	1,4 μm	1,6 μm
3	3	425	0,40	1,0	1,2 μm	1,2 μm	1,6 μm
2	4	275	0,40	1,0	5,5 μm	5,6 μm	6,2 μm
5	5	425	0,20	2,0	1,3 μm	1,3 μm	1,5 μm
7	6	275	0,20	2,0	1,5 μm	1,4 μm	1,7 μm
6	7	425	0,40	2,0	5,6 μm	5,4 μm	5,5 μm
8	8	275	0,40	2,0	5,9 μm	6,0 μm	5,8 μm

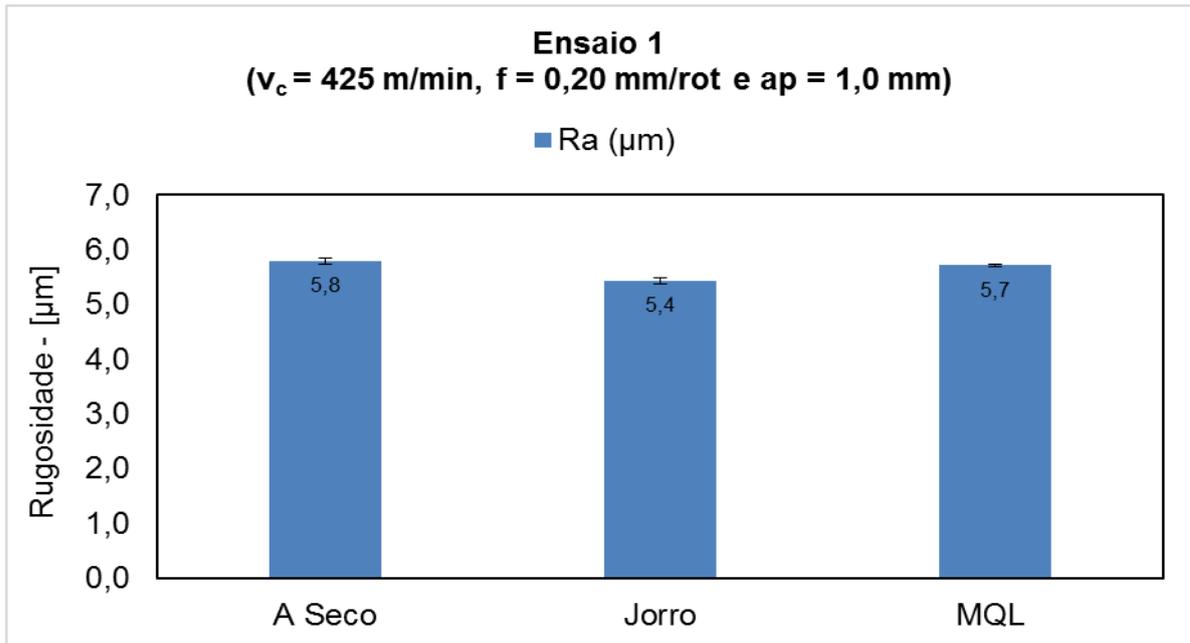


Figura 4.1 - Resultados da rugosidade para o ensaio1 (Fonte: Próprio autor).

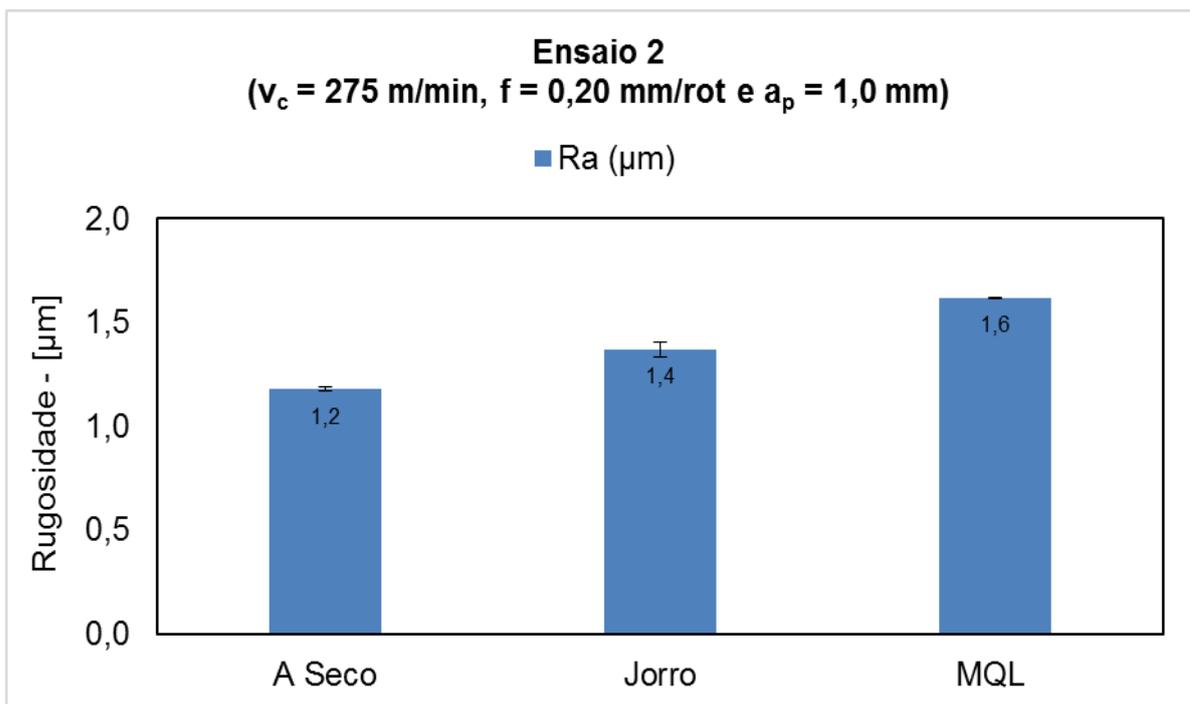


Figura 4.2 - Resultados da rugosidade para o ensaio 2 (Fonte: Próprio autor).

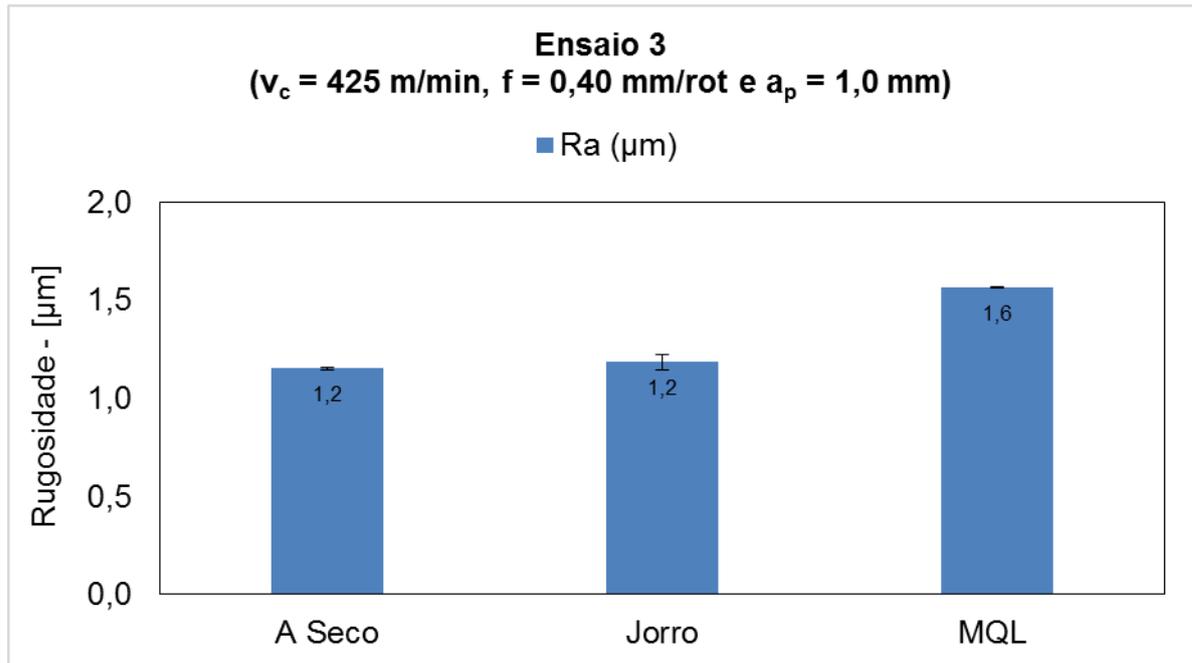


Figura 4.3 - Resultados da rugosidade para o ensaio 3 (Fonte: Próprio autor).

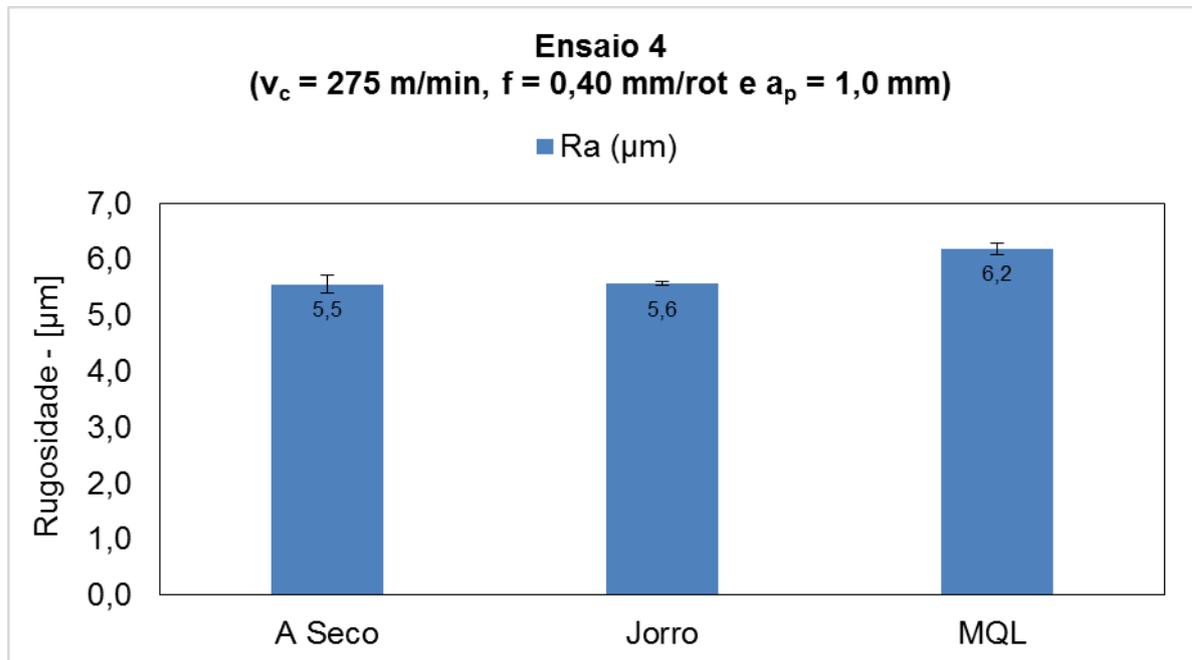


Figura 4.4 - Resultados da rugosidade para o ensaio 4 (Fonte: Próprio autor).

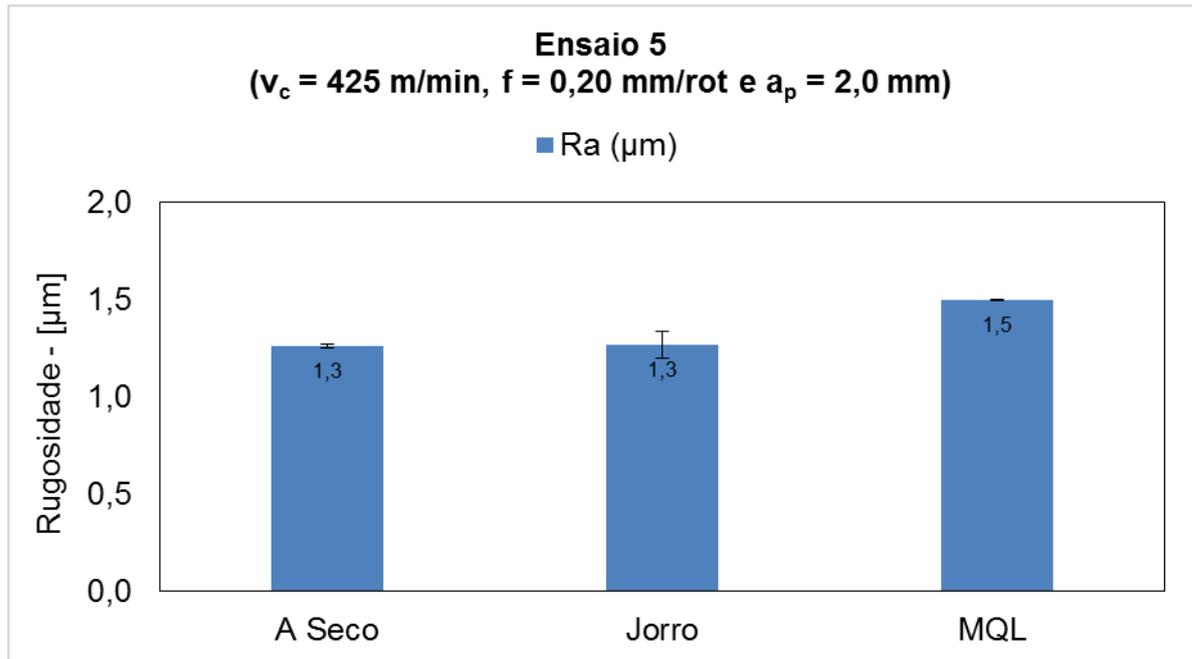


Figura 4.5 - Resultados da rugosidade para o ensaio 5 (Fonte: Próprio autor).

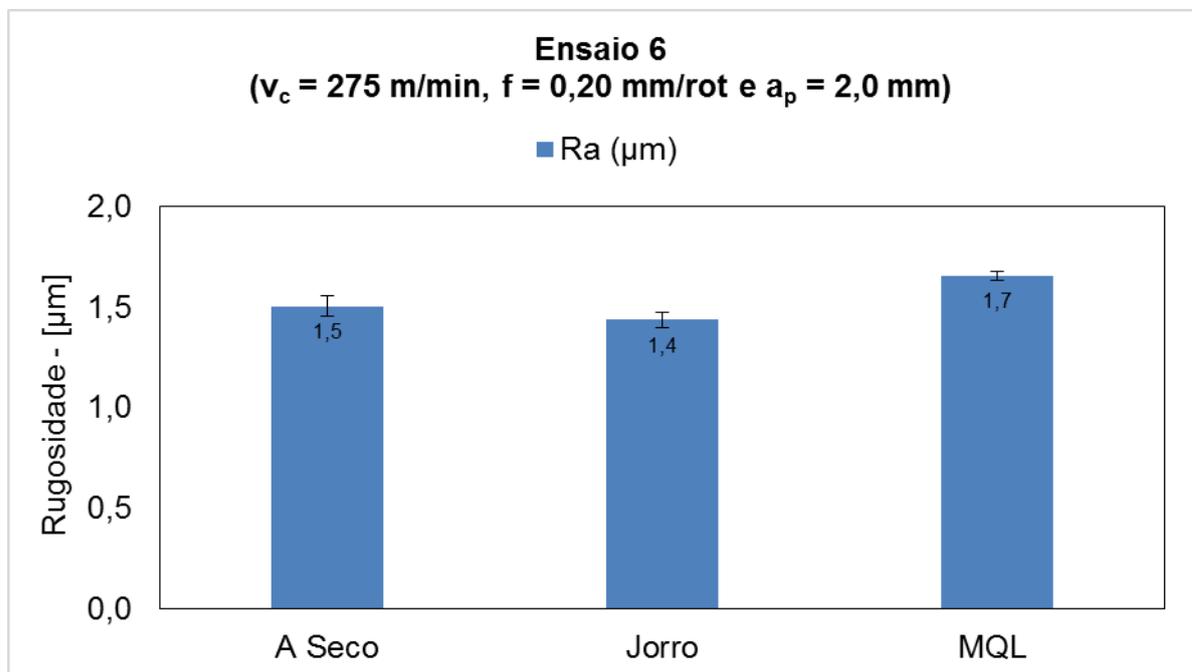


Figura 4.6 - Resultados da rugosidade para o ensaio 6 (Fonte: Próprio autor).

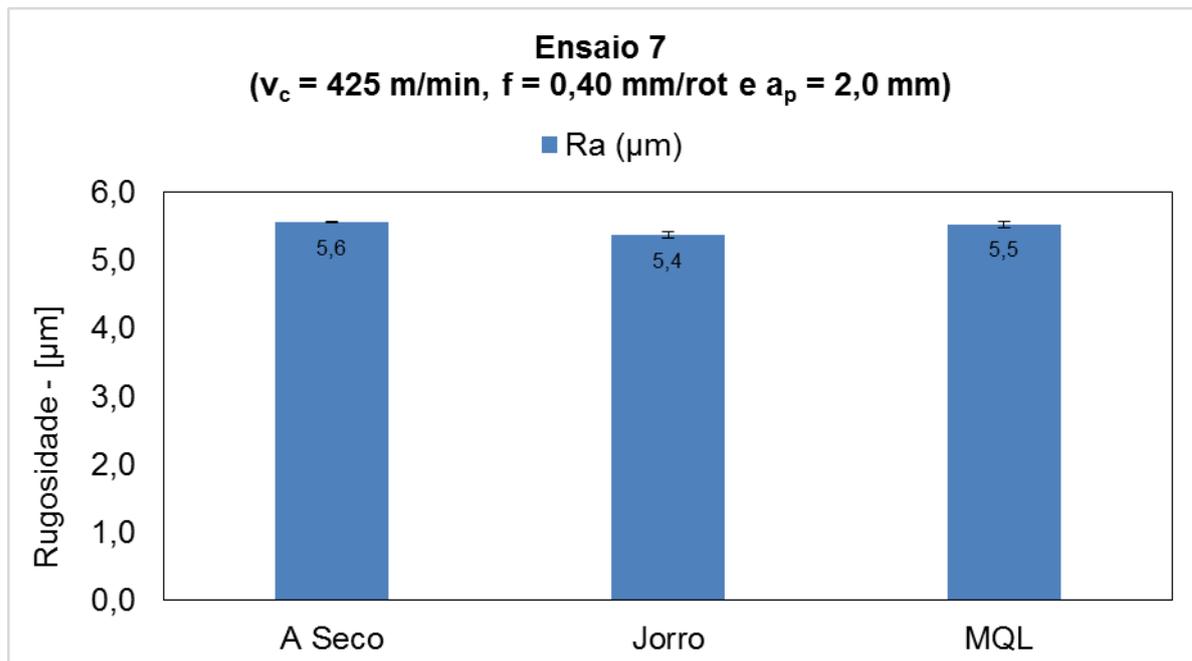


Figura 4.7 - Resultados da rugosidade para o ensaio 7 (Fonte: Próprio autor).

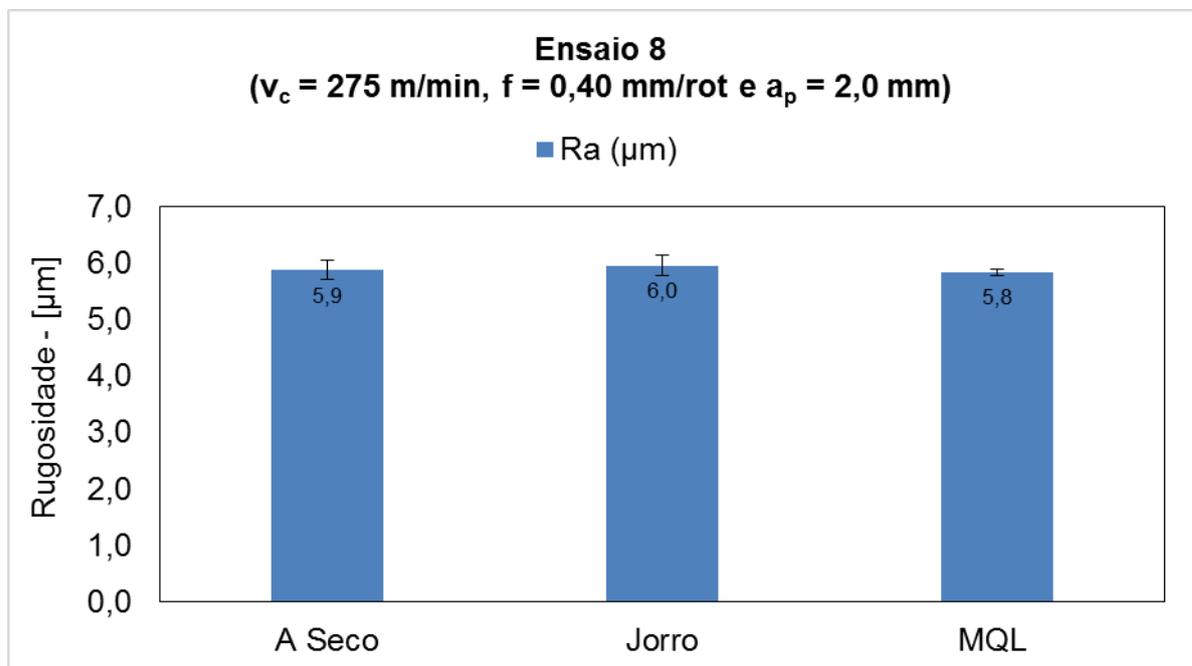


Figura 4.8 - Resultados da rugosidade para o ensaio 8 (Fonte: Próprio autor).

Em ensaios experimentais, como estes realizados para medição da rugosidade, é comum que alguns valores medidos em certos experimentos extrapolem a tendência dominante. No entanto, conforme os resultados mostrados nas Figs. (4.2) a (4.8), observa-se numa primeira análise que houve pouca dispersão das medições da rugosidade média (R_a), provavelmente, em virtude da maneira como os ensaios foram realizados, pois manteve-se a agulha do rugosímetro sempre apoiada no corpo de prova, rotacionando apenas o corpo de prova a cada 120° para as três medições em cada condição de corte dada na Tab. (3.2). Outro fator que corrobora para que a dispersão dos resultados seja pequena, é o próprio processo de corte utilizado. No torneamento, o processo de corte é contínuo, a ferramenta toca a peça uma única vez com parâmetros de corte controlados, e somente sai da peça quando o comprimento de usinagem pré-estabelecido é finalizado, evitando assim choques mecânicos intermitentes que poderiam causar pequenos lascamentos prematuros da aresta de corte da ferramenta ou um desgaste excessivo, que eventualmente causaria uma rugosidade acentuada.

Com os resultados mostrados nos gráficos anteriores foi possível estabelecer uma análise primária da influência dos parâmetros de corte (v_c , f e a_p) na rugosidade média do corpo de prova de aço SAE 4340. Basicamente, nota-se que o avanço foi o parâmetro de maior influência, uma vez que o seu aumento de 0,2 para 0,4 mm/rot teve efeito acentuado na rugosidade média ao se comparar os ensaios - 2 x 4, 5 x 7 e 6 x 8. A velocidade de corte e a profundidade de corte tiveram efeitos acentuados na rugosidade média apenas em uma comparação cada, nos ensaios 3 x 4 para v_c , e nos ensaios 3 x 7 para a_p . Ao se comparar os ensaios 1 x 2 para v_c , 1 x 3 para f e 1 x 5 para a_p , observa-se que o aumento dos parâmetros de corte influenciam de maneira contrária na rugosidade média, uma vez que era esperado que o aumento de v_c diminuísse R_a , e os aumentos de f e a_p aumentassem R_a .

Os gráficos anteriores também mostraram, estatisticamente, que para a rugosidade R_a , os três sistemas de lubrificação se equilibram. O melhor resultado, portanto, fica em função da aplicação do processo de usinagem. O sistema a seco economiza muito na questão de lubrificação, porém diminui a vida útil da ferramenta. O sistema a jorro é mais utilizado e difundido, porém possui diversos problemas de operação e de descarte. O sistema MQL é um meio termo entre os dois citados acima, porque economiza lubrificante e tem efeitos que amenizam o desgaste da ferramenta. Alguns fatores relevantes podem ser levantados com o intuito de melhorar o desempenho do sistema de MQL, como o método de aplicação escolhido, sobre-cabeça, mostrado na Fig. (3.3), em que o bocal do nebulizador é colocado acima da superfície de saída da ferramenta. Nessa aplicação, possivelmente, durante a formação do cavaco a ponta da ferramenta fica “escondida” pelo dorso do cavaco, o jato

pulverizador de ar + óleo impelidos não consegue penetrar na área de corte, pois é repelido pela dorso do cavaco, formando o chamado efeito guarda-chuva. Outra hipótese, diz respeito à regulação do bico nebulizador, uma vez que se observou durante os ensaios, a dificuldade de regulação da vazão de ar + óleo e sua manutenção, mantendo constantes as duas partes. Necessariamente, a falta de óleo na nebulização, e apenas a aplicação de ar, poderia causar uma dificuldade na formação do cavaco, uma vez que o efeito lubrificante do óleo é de suma importância para facilitar o cisalhamento do cavaco e seu escorregamento sob a superfície de saída da ferramenta, somente a injeção de ar poderia apenas resfriar a área de corte, e, posteriormente, causaria um encruamento localizado de material, aumentando a força de usinagem, e, posteriormente, causaria o aumento da rugosidade média da peça. A otimização desses parâmetros pode melhorar os resultados para o sistema MQL

Nos itens posteriores será realizada uma avaliação estatística dos parâmetros de corte e dos sistemas de lubrificação como influência na rugosidade média, empregando gráficos de Pareto e superfícies de resposta.

4.1.2 - Análise estatística por Pareto e superfície de resposta

4.1.2.1 - Gráficos de Pareto na análise de Ra

Para a análise de Ra utilizaram-se gráficos de Pareto, Figs. (4.9) a (4.11), os quais indicam através de barras horizontais a influência das variáveis independentes do processo (parâmetros de corte - v_c , f e a_p) na variável dependente do processo, rugosidade média.

A ordem em que as barras horizontais estão dispostas nas Figs. (4.9) a (4.11), corresponde ao tamanho dos efeitos principais das variáveis independentes e suas interações. Cada barra horizontal mostra um valor que representa o tamanho da influência da variável independente na variável dependente. As interações entre as variáveis independentes são representadas pelo termo *by* ("com"), por exemplo, a interação (1)*by*(2) significa a interação entre a velocidade de corte (v_c) e o avanço (f), e assim por diante. 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 Ra

Os gráficos de Pareto foram confeccionados para a análise dos efeitos dos parâmetros de corte em Ra para as três condições de lubri-refrigeração ensaiadas, a seco, jorro e MQL.

A Figura (4.9) mostra o gráfico de Pareto de Ra para o torneamento a seco, observa-se que o avanço é a variável independente que mais influencia nos valores finais de Ra, ao passo que 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.

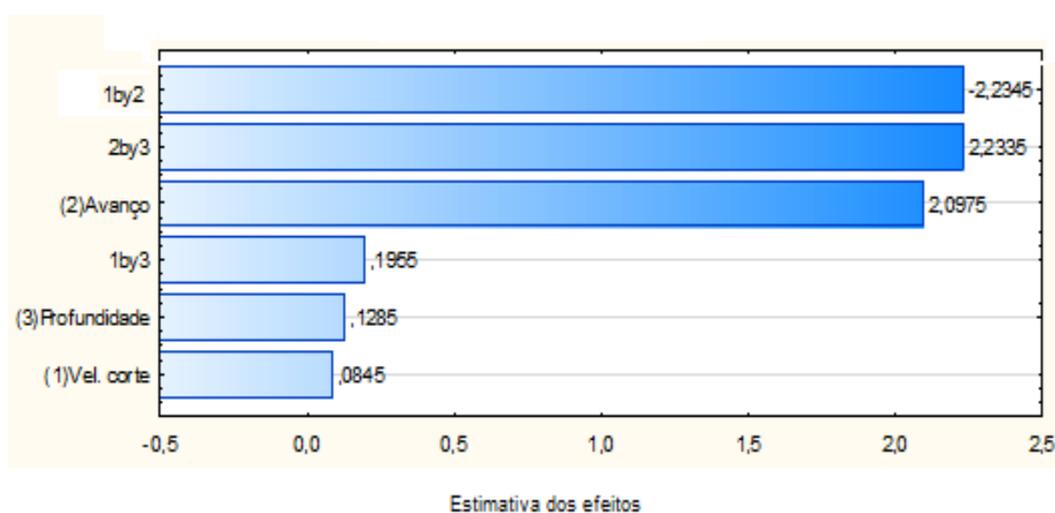


Figura 4.9 - Pareto para Ra no torneamento a seco (Fonte: Próprio autor).

A Figura (4.10) mostra o gráfico de Pareto de Ra para o torneamento com jorro, o avanço também foi a variável independente que mais influenciou nos valores finais de Ra, enquanto que a profundidade teve 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.

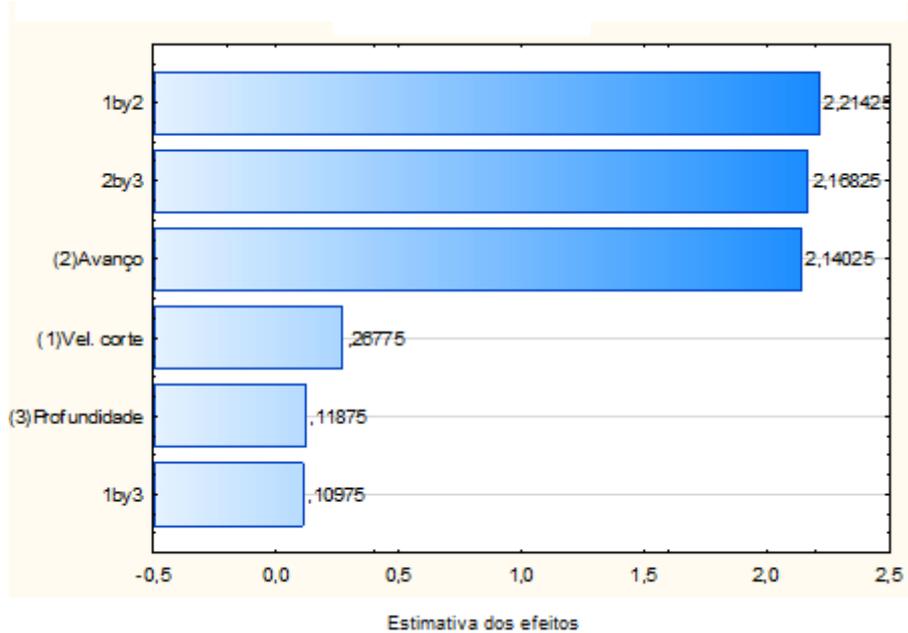


Figura 4.10 - Pareto para Ra no torneamento com jorro (Fonte: Próprio autor).

A Figura (4.11) mostra o gráfico de Pareto de Ra para o torneamento com MQL, o resultado também mostra que o avanço é a variável independente que mais influencia nos valores finais de Ra, e a profundidade teve a menor influência. A relação entre os parâmetros de avanço e profundidade teve 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.

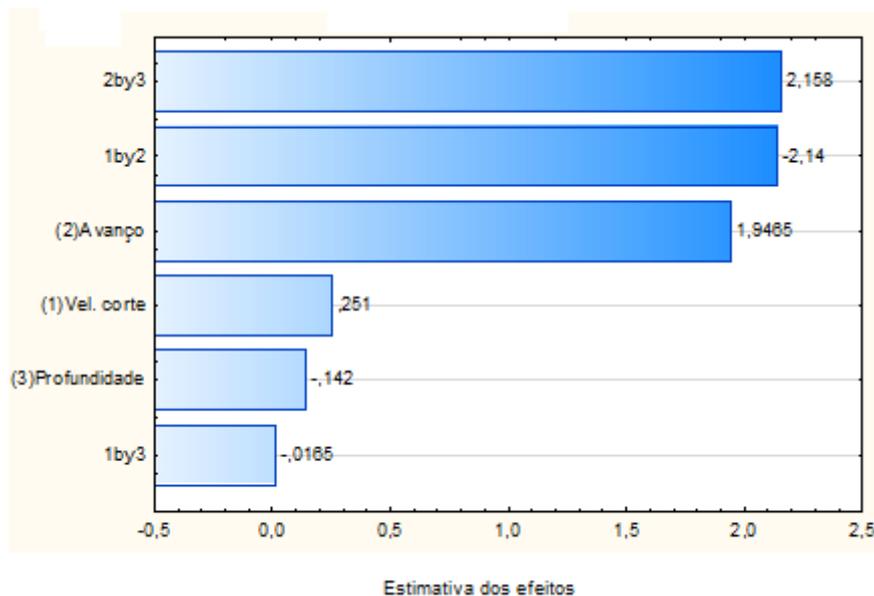


Figura 4.11 - Pareto para Ra no torneamento com MQL (Fonte: Próprio autor).

Os gráficos anteriores de Pareto servem para justificar os resultados obtidos nas Figs. (4.1) a (4.8), em que o avanço teve 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 aumenta a força de usinagem, pois há um aumento das áreas dos planos de cisalhamento primário e secundário, o que aumenta as deflexões durante o processo, esse aumento piora o acabamento da peça. Conforme Machado *et al.* (2004) alguns resultados experimentais mostram que o avanço tem maior influência que a profundidade para no aumento da rugosidade de peças usinadas, já que o aumento do avanço aumenta a altura dos picos e a profundidade dos vales da superfície, resultado que foi verificado nos experimentos realizados nesse trabalho.

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

4.1.2.2 - Superfície de resposta para Ra

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 Ra da peça, lembrando que os parâmetros utilizados nos experimentos foram a profundidade (a_p), a velocidade de corte (v_c) e o avanço (f).

As Figuras (4.12) a (4.14) se referem ao torneamento com jorro, as Figs. (4.15) a (4.17) ao torneamento com MQL e as Figs. (4.18) a (4.20) ao torneamento a seco.

Na Fig. (4.12) quando comparado os parâmetros profundidade e velocidade de corte a resposta da rugosidade média tem comportamento mais uniforme, tendo valor próximo de $3 \mu\text{m}$. Mostrando que a combinação de elevada v_c e elevada a_p aumenta a rugosidade média da peça, provavelmente, com maior efeito provocado pela profundidade de corte.

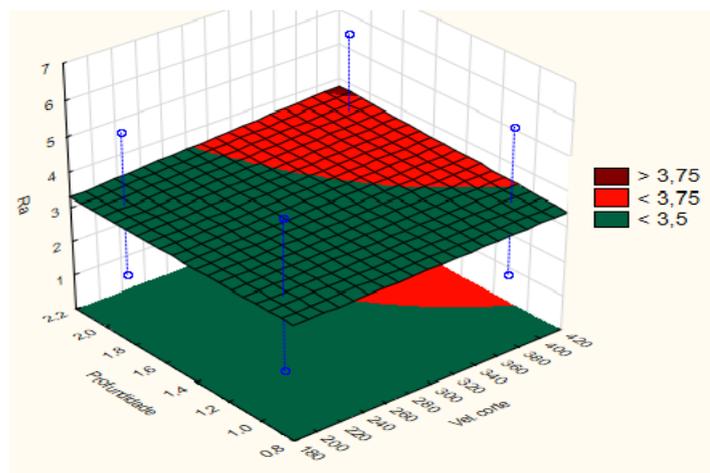


Figura 4.12 - Superfície de resposta - Profundidade x Velocidade corte em (Ra) com jorro (Fonte: Próprio autor).

Na Fig. (4.13) a relação entre os parâmetros profundidade e avanço, a rugosidade média tem um aumento considerável de valores quanto mais aumenta-se o avanço e a profundidade. Os valores são mínimos, próximos de $0,5 \mu\text{m}$, com profundidade de $2,2 \text{ mm}$ e avanço de $0,18 \text{ mm/rot}$. Quando os dois fatores apresentam seus menores resultados, $0,8 \text{ mm}$ e $2,2 \text{ mm/rot}$, a rugosidade média fica próxima de $3,5 \mu\text{m}$, mostrando uma relação não-linear entre os dois fatores.

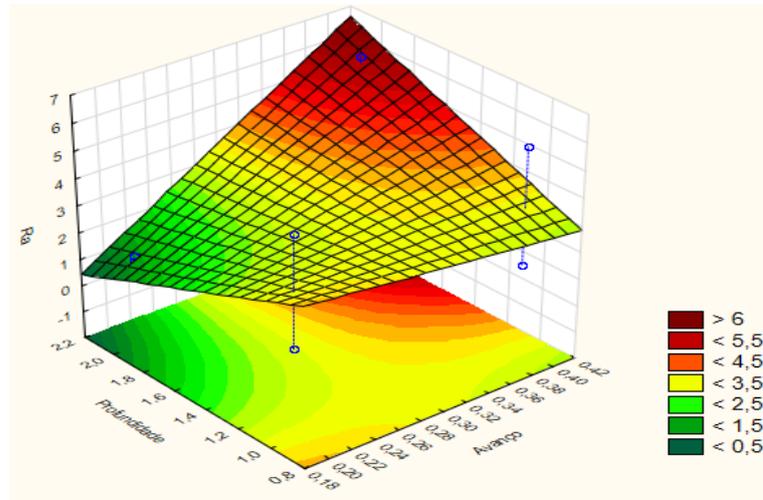


Figura 4.13 - Superfície de resposta - Profundidade x Avanço em (Ra) com jorro (Fonte: Próprio autor).

Na Fig. (4.14) os fatores avanço (f) e velocidade de corte (v_c), tem seu ponto máximo com $Ra = 6\mu\text{m}$, quando velocidade de corte e o avanço são máximos, 420 m/min e 0,42 mm/rot, respectivamente. Com elevada v_c e baixo f o valor da rugosidade fica próximo de $1,75\mu\text{m}$, com baixa v_c e baixo f a rugosidade fica próxima de $3,75\mu\text{m}$, o mesmo acontece quando se aumenta só o avanço para $v_c = 180\text{ m/min}$, mostrando que nessa velocidade a mudança no avanço não altera muito os resultados.

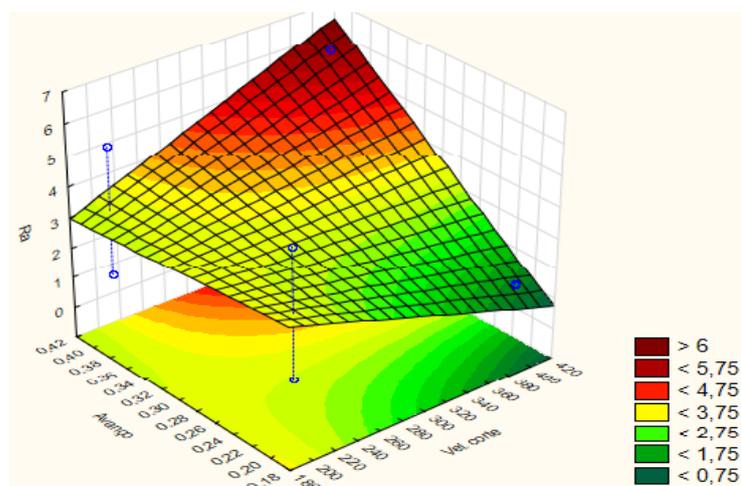


Figura 4.14 - Superfície de resposta - Avanço X Velocidade de Corte em (Ra) com jorro (Fonte: Próprio autor).

Na Fig. (4.15) comparando os parâmetros profundidade e velocidade de corte, a resposta da rugosidade média tem comportamento mais uniforme, tendo valor 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.

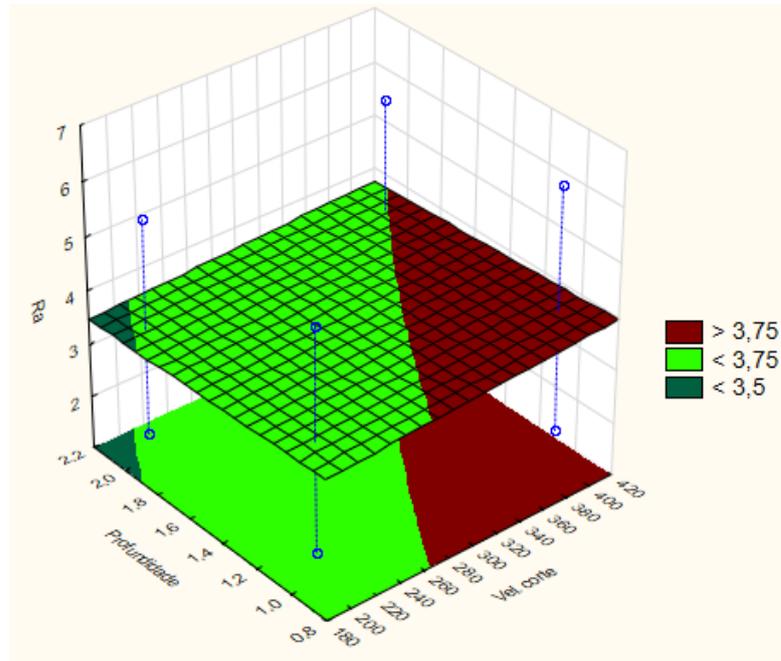


Figura 4.15 - Superfície de resposta - Profundidade x Velocidade de corte em (Ra) com MQL (Fonte: Próprio autor).

Na Fig. (4.16) 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 se encontram em, 180 m/min e 0,42 mm/rot, respectivamente. Com elevada 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

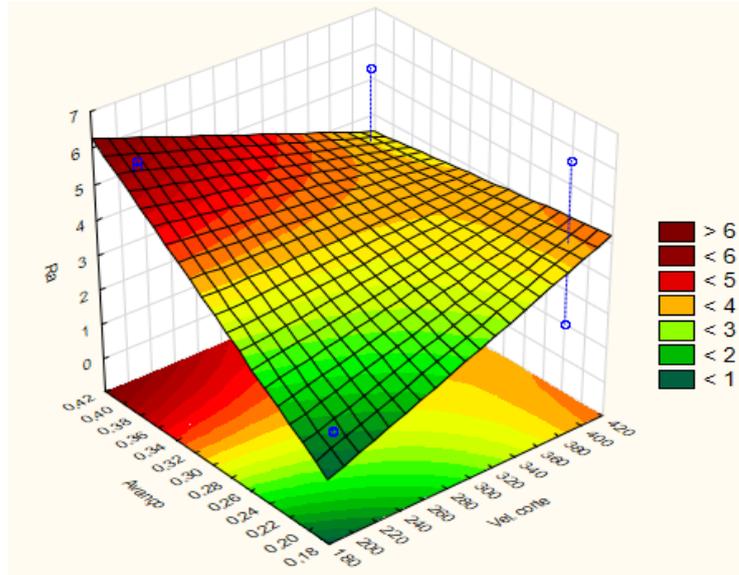


Figura 4.16 - Superfície de resposta - Avanço x Velocidade corte em (Ra) com MQL
(Fonte: Próprio autor).

Na Fig. (4.17) 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.

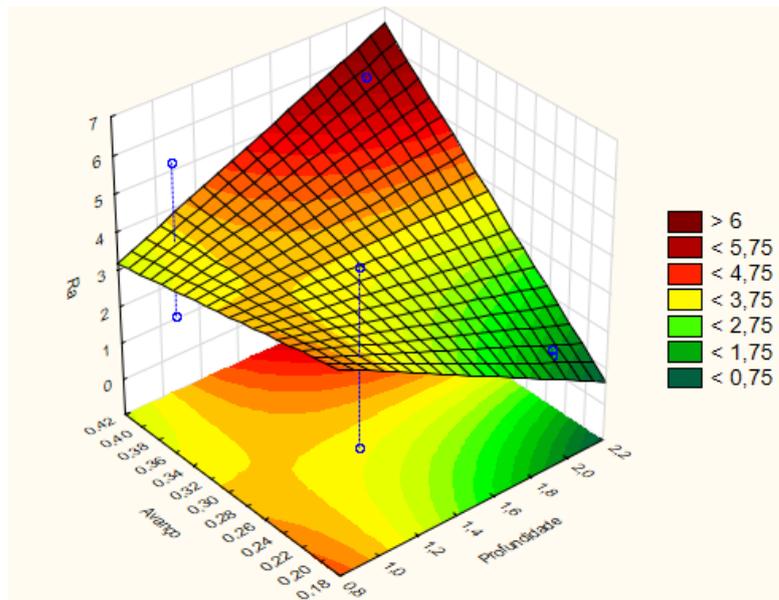


Figura 4.17 - Superfície de resposta - Avanço x Profundidade em (Ra) com MQL
(Fonte: Próprio autor).

Na Fig. (4.18) 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 observada em diversos pontos do gráfico.

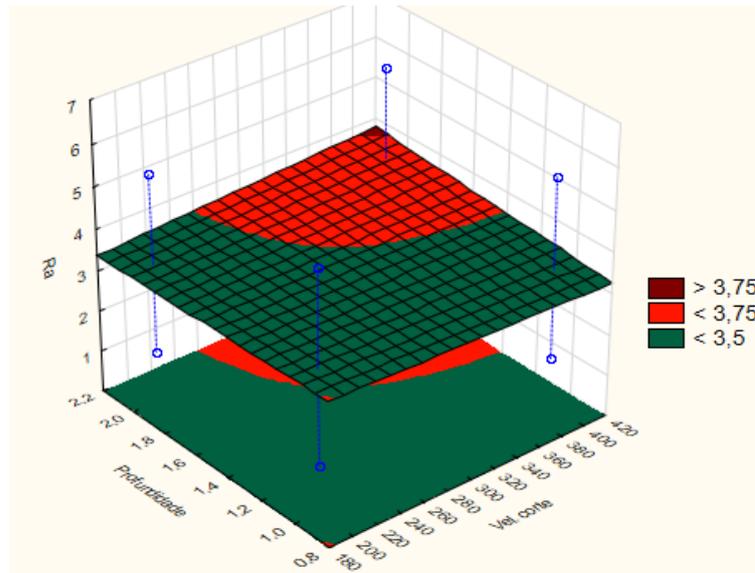


Figura 4.18 - Superfície de resposta - Profundidade x Velocidade de corte em (Ra) a seco (Fonte: Próprio autor).

Na Fig. (4.19) analisando os parâmetros de avanço e profundidade, os valores para a rugosidade são máximos quando os parâmetros são máximos. A condição ótima para uma menor rugosidade é quando a profundidade é máxima e o avanço é mínimo.

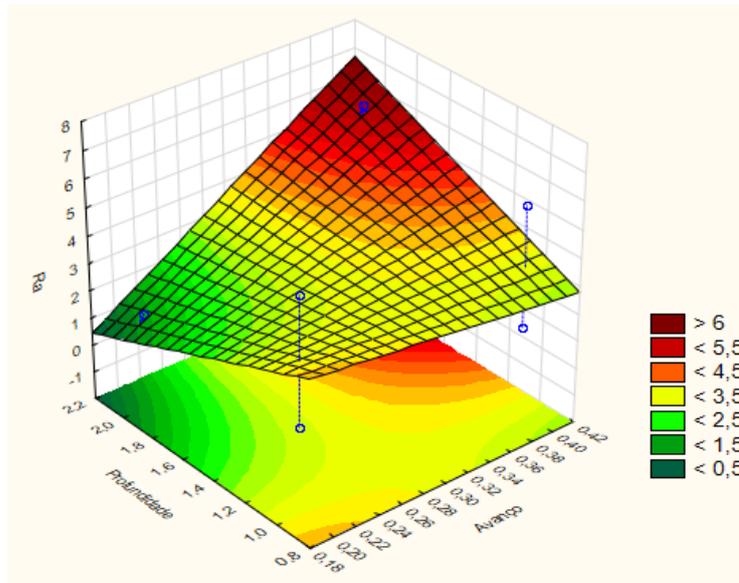


Figura 4.19 - Superfície de resposta - Profundidade x Avanço em (Ra) a seco (Fonte: Próprio autor).

Na Fig. (4.20) 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 de 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 .

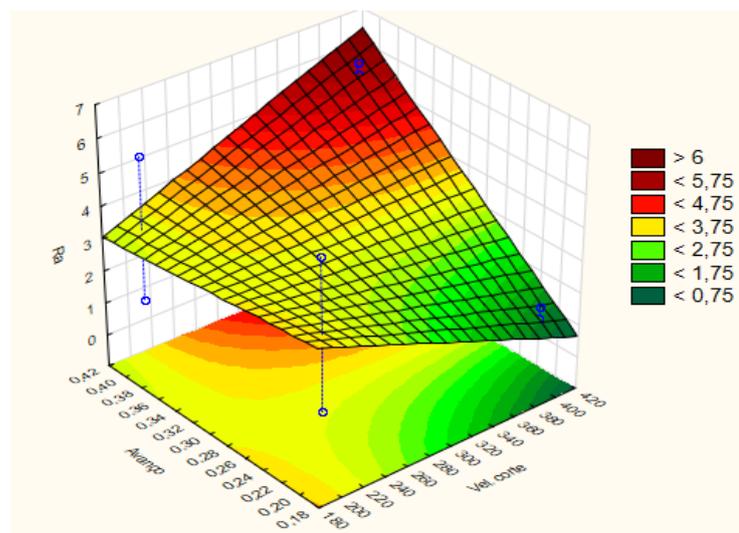


Figura 4.20 - Superfície de resposta - Avanço x Velocidade de corte em (Ra) a seco (Fonte: Próprio autor).

Os resultados mostrados pelas superfícies de resposta também ratificam os resultados discutidos nas Figs. (4.1) a (4.8)

4.2 - Resultados do ensaio de potência elétrica ativa

A Figura (4.21) mostra a curva típica de potência elétrica ativa adquirida nos ensaios. O comportamento da curva apresenta quatro regiões bem distintas, como indicado nas marcações **A**, **B**, **C** e **D**.

A região **A** representa o motor do torno ainda desligado e com potência constante com valores próximos de 3 kW. A região **B** representa o pico máximo da potência que ocorre na partida do motor com valores acima de 25 kW. Após a partida do motor, e antes de iniciar o processo de corte, o motor diminui para a sua potência nominal. Quando se inicia o torneamento, a potência ativa aumenta, e isso é mostrado na região **C**, que representa a peça sendo usinada, ou seja, aumenta o trabalho a ser realizado pelo motor. Após a usinagem o motor volta a trabalhar em vazio, isto é, está em funcionamento, mas não usina a peça, neste caso existe o consumo da sua potência nominal. Finalmente, a região **D** mostra o que ocorre quando é acionado o desligamento do motor, existe um aumento súbito da potência devido ao aumento da corrente, e em seguida, a potência consumida pelo motor atinge valores de potência da região A, ou seja, o motor está desligado.

Os dados de análise da potência elétrica ativa foram tomados apenas na região **C**, na região de usinagem, variando as condições de corte dadas nas Tabs. (3.4) a (3.6), assim como as condições de lubrificação.

Os gráficos das Figs. (4.22) a (4.24) mostram os valores de potência média adquiridos durante o período de usinagem na região C, para cada parâmetro de corte estudado (velocidade de corte, avanço e profundidade), e com a aplicação do sistema lubrificante com MQL, jorro e a seco.

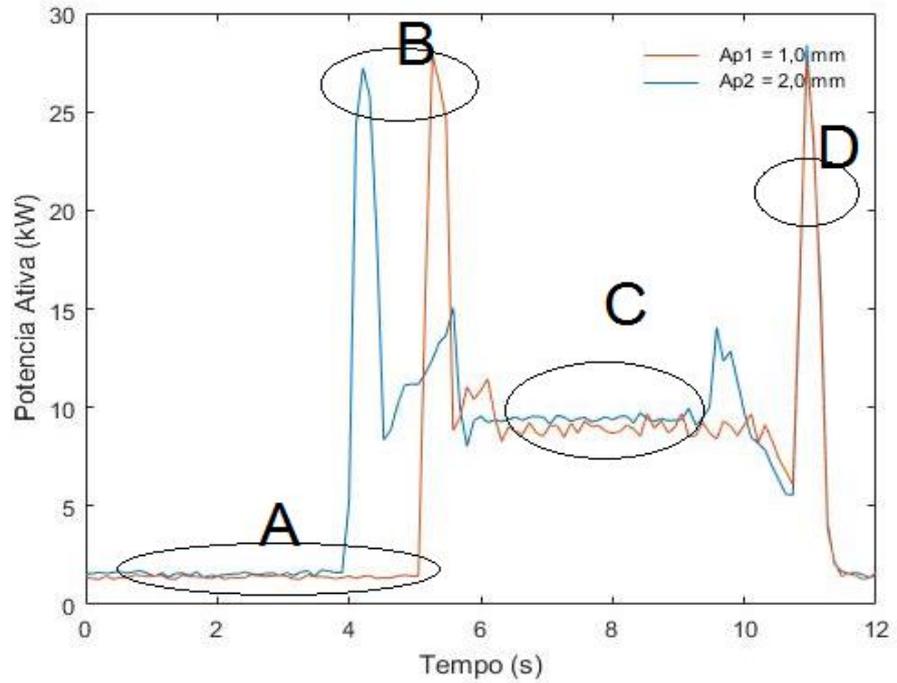


Figura 4.21 - Sinal típico de potência elétrica ativa adquirido no ensaio (Fonte: Próprio Autor).

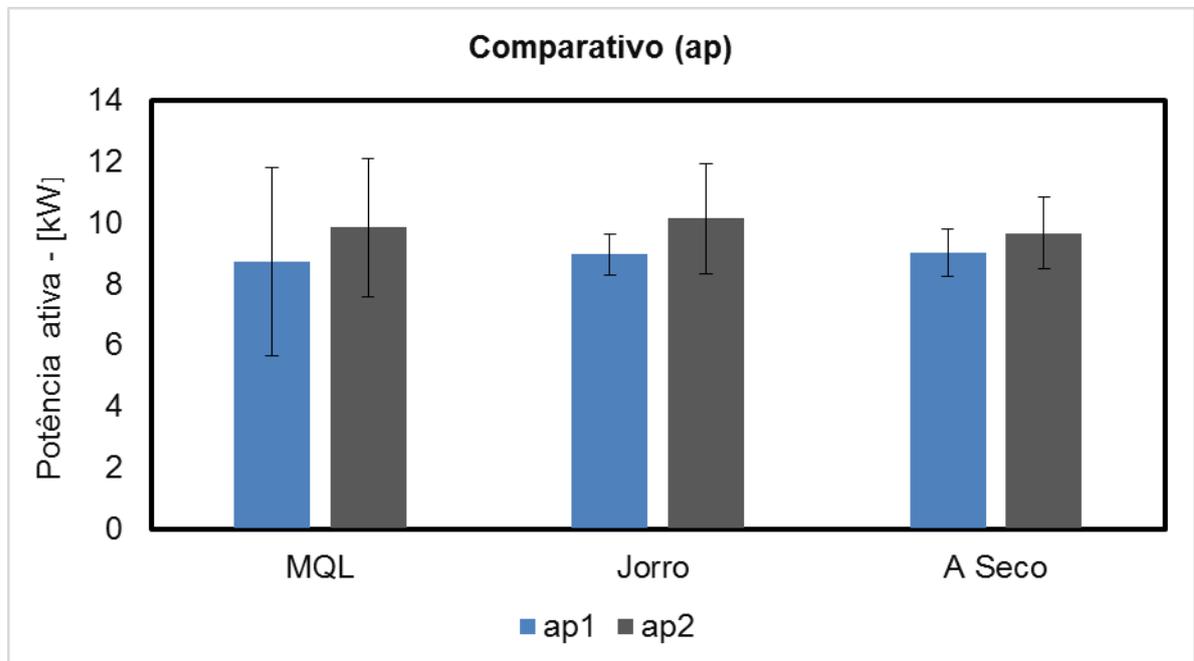


Figura 4.22 - Variação da profundidade de corte (a_p) para MQL, Jorro e a Seco (Fonte: Próprio autor).

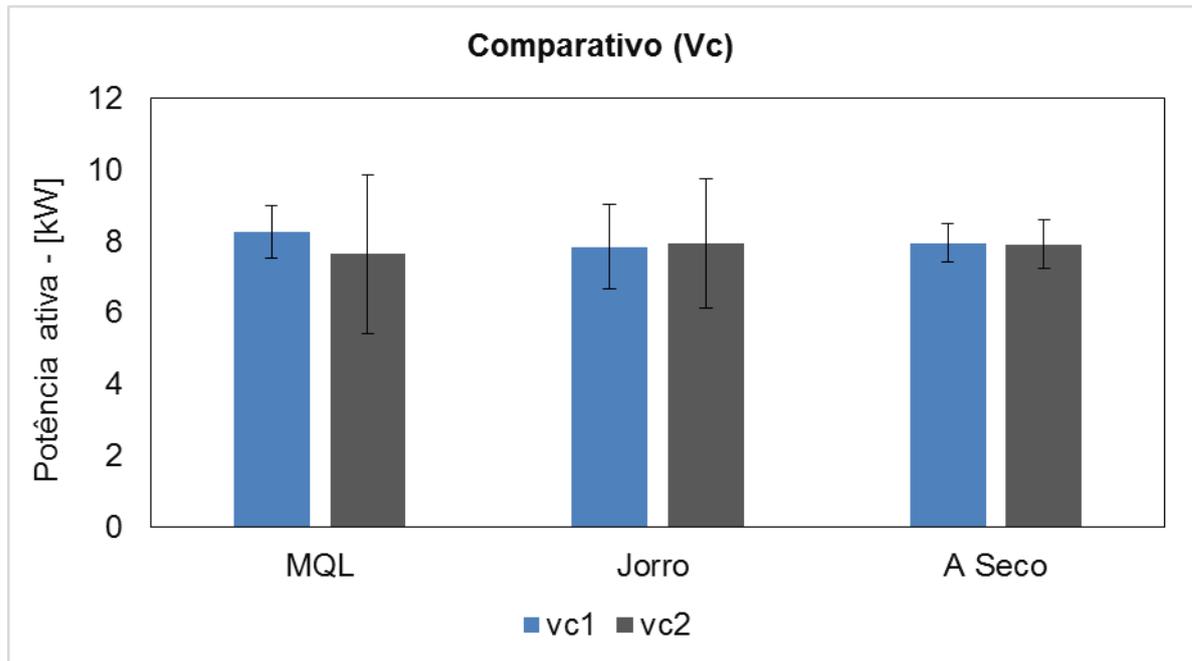


Figura 4.23 - Variação da velocidade de corte (v_c) para MQL, Jorro e a Seco (Fonte: Próprio autor).

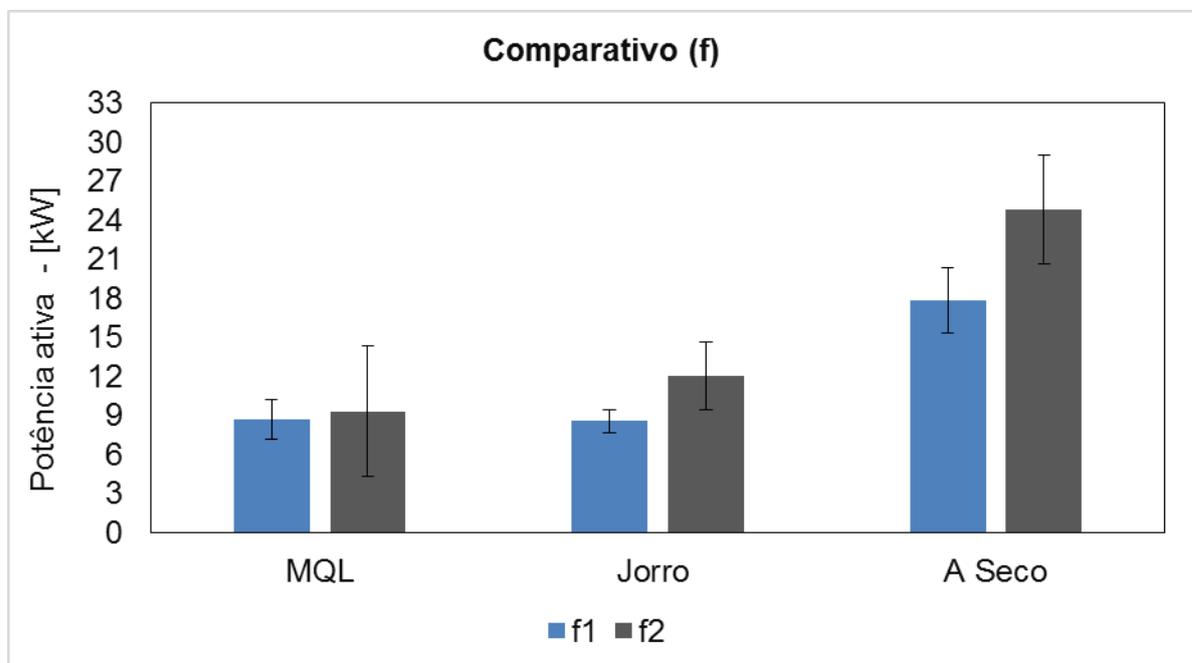


Figura 4.24 - Variação do avanço (f) para MQL, Jorro e a Seco (Fonte: Próprio autor).

As Figs. (4.22) e (4.23) mostram que a variação dos parâmetros de corte (a_p , v_c e f) e o uso dos sistemas de lubrificação (MQL e Jorro) não alteraram de maneira significativa, ou estatisticamente, a potência média consumida durante o torneamento.

Numa análise geral da Fig. (4.22) observa-se que o aumento da profundidade de corte aumentou na média a potência consumida, uma vez que a elevação de a_p causa o aumento da seção de corte (aumento das áreas dos planos de cisalhamento primário e secundário) durante a usinagem, alterando especificamente a largura do cavaco, o que causaria uma elevação da força de usinagem, e conseqüentemente, da potência necessária ao corte, potência elétrica ativa.

A Fig. (4.23) mostra uma tendência de diminuição na média da potência ativa quando se aumentou a velocidade de corte, que pode ser justificado pelo aumento da frequência de contato entre a aresta de corte da ferramenta e a peça, com a elevação da rotação da máquina. Evidentemente, a interação entre o aumento dos choques mecânicos entre a ferramenta e a peça, e o aumento da geração de calor, provocado pelo atrito durante a usinagem com o aumento da rotação (velocidade de corte), aumenta a temperatura de corte na peça, facilitando a remoção de cavaco.

Em relação ao avanço, a Fig. (4.24) mostra que esse parâmetro de corte foi o de maior influência na potência ativa, o seu aumento provocou picos de potência média de aproximadamente 25 kW no torneamento a seco, e mesmo com aplicação de MQL e jorro a potência média foi maior em relação a variação dos outros parâmetros de corte. Como o avanço é a distância linear percorrido pela ferramenta durante o torneamento, quanto maior f maior serão as áreas dos planos de cisalhamento primário e secundário do cavaco formado, elevando significativamente a espessura do cavaco, conseqüentemente, à potência necessária ao corte será maior. A Fig. (4.24) também mostra que apenas o avanço foi o parâmetro de corte capaz de influenciar significativamente a atuação dos sistemas de lubrificação, MQL e jorro, pois estatisticamente proporcionaram menores potências ativas em relação ao torneamento a seco.

Capítulo V

CONCLUSÕES

Com a finalização deste trabalho foi possível adquirir mais 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.

Conhecer e aplicar um *software* para análise estatística, o qual pode ser amplamente utilizado como uma ferramenta para aplicação industrial, utilizando análises por gráficos de Pareto e superfícies de resposta.

Conhecer na prática a aplicação de sistemas de lubrificação para a usinagem, especificamente, a técnica de mínima quantidade de lubrificante MQL, técnica atualmente utilizada pela indústria metalomecânica.

Esse conhecimento na prática do sistema de MQL, discutido em resultados gráficos, mostraram um equilíbrio entre os sistemas de lubrificação aplicados no torneamento do aço SAE 4340 para as condições de corte impostas, o acabamento superficial da peça usinada, o que pode ser justificado pelo fato de que todos os experimentos realizados ficaram dentro da faixa de operação da ferramenta, recomendado pelo fabricante.

Nos ensaios de potência elétrica ativa, os parâmetros de lubrificação também mostraram equilíbrio, mostrando que variar essas condições não altera os valores de potência ativa utilizados pela máquina durante a usinagem.

Os resultados em geral mostram um equilíbrio para os três sistemas de lubrificação, isso mostra que para determinar que tipo de sistema de lubrificação é mais adequado, a parte mais importante a se verificar é justamente o tipo de aplicação que aquele processo de usinagem estará submetido. O sistema MQL tem vantagens na aplicação e ameniza problemas causados pelos outros sistemas de lubrificação, como alto desgaste da ferramenta e descarte de fluido usado.

Capítulo VI

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.