

## **Análise dos efeitos do uso de óleos vegetais aplicados na forma MQF na usabilidade do aço AISI 316**

### **Analysis of the effects of using vegetable oils applied in MQF form on the usability of AISI 316 steel**

DOI:10.34117/bjdv8n5-263

Recebimento dos originais: 21/03/2022

Aceitação para publicação: 29/04/2022

#### **Hellen Cristina Pires Souza**

Departamento de Mecânica e Materiais (DMM)

Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão (IFMA)

Endereço: Avenida Getúlio Vargas, Nº 04, Monte Castelo, São Luís – MA, Brasil

CEP: 65030-005

E-mail: hellen\_pires@hotmail.com

#### **Antonio Santos Araújo Junior**

Departamento de Mecânica e Materiais (DMM)

Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão (IFMA)

Endereço institucional (Avenida Getúlio Vargas, Nº 04, Monte Castelo, São Luís – MA

Brasil, CEP: 65030-005

E-mail: asaraujojr@ifma.edu.br

#### **Washington Silva do Nascimento**

Mestre em Engenharia Mecânica

Rua projetada II Qd C Casa 23, Conjunto Parque Guanabara, Bairro Aurora

CEP: 65060-224

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão (IFMA)

E-mail: nasciws.engenharia@gmail.com

#### **Mauro Araujo Medeiros**

Doutor em Engenharia Mecânica.

Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão (IFMA/MTC)

Endereço: Avenida Getúlio Vargas, 04, Monte Castelo, CEP: 65030-005, São Luís Maranhão

E-mail: mauro@ifma.edu.br

#### **Rosália Sousa Andrade**

Mestranda em Engenharia Mecânica

Instituição: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Maranhão – IFMA

Endereço: Av. Getúlio Vargas, 04 - Monte Castelo, São Luís - MA, CEP: 65030-005 Brasil

E-mail: rosaliaandrade@acad.ifma.edu.br

#### **RESUMO**

O estudo da usinabilidade de um material avalia o resultado da interação do material com a operação de usinagem. Desta forma, o presente trabalho propôs investigar a

usinabilidade do aço AISI 316 através do processo de usinagem convencional de torneamento cilíndrico externo, por meio de uma série abrangente de experimentos dispostos através de um planejamento fatorial completo (DOE - Design of Experiments) de 03 fatores em 2 níveis ( $2^3$ ), considerando as variáveis de entrada: velocidade ( $v_c$ ), avanço ( $f$ ) e profundidade de corte ( $a_p$ ) e 01 fator qualitativo de comparação, que são fluidos de corte de base vegetal (comercial, algodão e canola) e também a condição a seco, utilizando para aplicação a técnica da Mínima Quantidade de Fluidos (MQF) com uma vazão de 90 ml/h, totalizando 32 ensaios, onde todos foram analisados quanto a seus efeitos nas forças e potência de corte, acabamento superficial e vibração do conjunto, de modo a auxiliar na determinação dos parâmetros ótimos de operação. O método proposto para realização dos ensaios experimentais MQF mostrou-se bastante eficiente, trazendo respostas coerentes às variáveis de saída estudadas. O avanço demonstrou ser um parâmetro chave na redução das forças de corte e consumo de potência. Com relação ao uso de óleos vegetais de algodão e canola foi possível observar um desempenho satisfatório, pois as forças de usinagem e potências de corte foram mais baixas quando estes óleos foram empregados. Além disso o óleo de algodão apresentou o melhor desempenho em relação ao critério de rugosidade média ( $R_a$ ), produzindo um acabamento superficial da peça adequado e baixas vibrações para as condições de corte analisadas.

**Palavras-chave:** usinabilidade, torneamento, fluidos vegetais, mqf.

## ABSTRACT

The study of the machinability of a material evaluates the result of the interaction of the material with the machining operation. Thus, the present work proposed to investigate the machinability of AISI 316 steel through the conventional machining process of external cylindrical turning, by means of a comprehensive series of experiments arranged through a complete factorial design (DOE - Design of Experiments) of 03 factors in 2 levels ( $2^3$ ), considering the input variables: speed ( $v_c$ ), feed ( $f$ ) and cutting depth ( $a_p$ ) and 01 qualitative comparison factor, which are vegetable-based cutting fluids (commercial, cotton and canola) and also the dry condition, using for application the Minimum Quantity Fluid (MQF) technique with a flow rate of 90 ml/h, totaling 32 trials, where all were analyzed for their effects on cutting forces and power, surface finish and vibration of the set, in order to assist in determining the optimal operating parameters. The proposed method for carrying out the MQF experimental tests proved to be very efficient, bringing consistent responses to the output variables studied. The feed rate proved to be a key parameter in reducing cutting forces and power consumption. With regard to the use of cotton and canola vegetable oils, it was possible to observe satisfactory performance, as the machining forces and cutting power were lower when these oils were used. Furthermore, cottonseed oil presented the best performance in relation to the average roughness criterion ( $R_a$ ), producing an adequate surface finish on the part and low vibrations for the cutting conditions analyzed.

**Keywords:** machinability, turning, vegetable fluids, mqf.

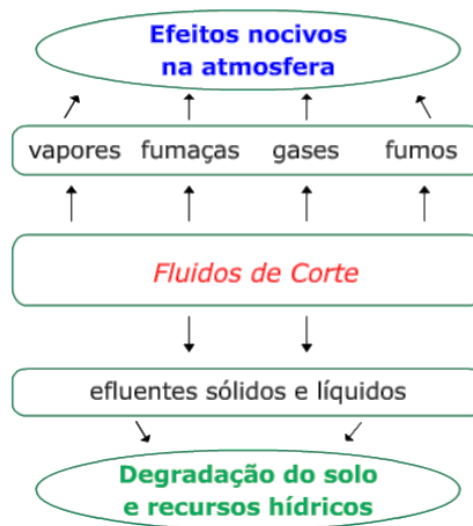
## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos tem-se observado uma preocupação mais acentuada em relação à melhoria contínua de métodos, processos e aspectos técnicos dos produtos

manufaturados. Os processos de fabricação por usinagem são essenciais na indústria metal mecânica, pois grande parte dos produtos sofrem alguma operação de usinagem em algumas de suas etapas de produção. Neste contexto, o torneamento surge como um processo mecânico de usinagem destinado a obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas. (FERRARESI, 2009).

Os fluidos de corte são vistos como intrínsecos a este processo, uma vez que são empregados na usinagem para potencializar a produtividade e vem ganhando maior destaque pois, em muitos processos, são essenciais para obtenção da qualidade exigida nas peças produzidas. Contudo, os custos referentes aos fluidos de corte, o perigo à saúde do operador e a crescente severidade da legislação quanto aos descartes industriais em um cenário de preocupação mundial com o meio ambiente faz com que surja uma necessidade de a indústria mecânica adequar seus processos, visando a minimização desse impacto gerado. Desta forma, uma alternativa para minimizar este problema é trabalhar de preferência com fluidos não agressivos ao meio ambiente e, com uma aplicação mínima de quantidade de fluido (MQF) na região de corte. (ARAÚJO JUNIOR, 2013). A Figura 1 demonstra os aspectos ambientais relacionados à utilização de fluidos de corte em processos de usinagem.

Figura 1 - Classificação de acabamento da superfície usinada

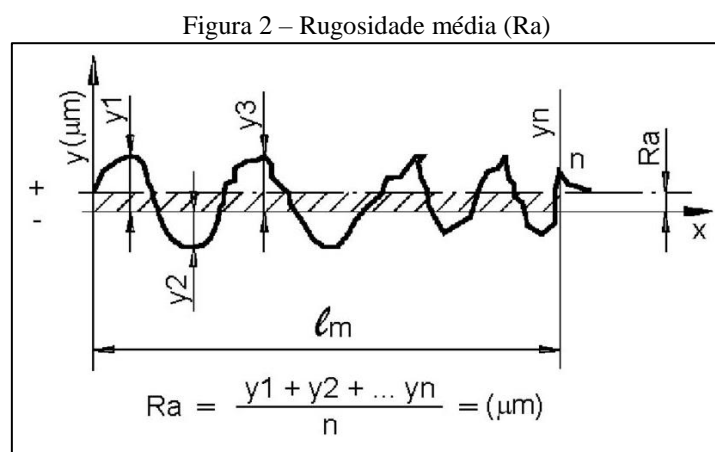


Fonte: Adaptado de ARAÚJO JÚNIOR (2013)

Neste sentido, estudo de características de usinabilidade dos aços, o conhecimento da força e potência de usinagem para determinação dos parâmetros dos processos na área de fabricação. Variáveis como forças e potência de corte, rugosidade da superfície e

vibrações são fatores que afetam o custo, o tempo, o design e qualidade das operações de fabricação. (AL-AHMARI, 2001).

A rugosidade ou textura primária é formada por marcas deixadas pela ferramenta que atuou sobre a superfície da peça, encontrando-se superposta ao perfil de ondulação. Essas marcas aparecem quando a máquina ferramenta está usinando um material com uma ferramenta de corte. (KALPAKJIAN, SCHMID, 2010). A rugosidade média é aplicada na maioria dos processos de fabricação, é também conhecida como Ra (roughness average) ou CLA (center line average) que significa centro da linha média. (NOGUEIRA, 2018). Na Figura 2 é possível visualizar essa grandeza no comprimento de um percurso de medição.



Fonte: Adaptado de Nogueira, 2018

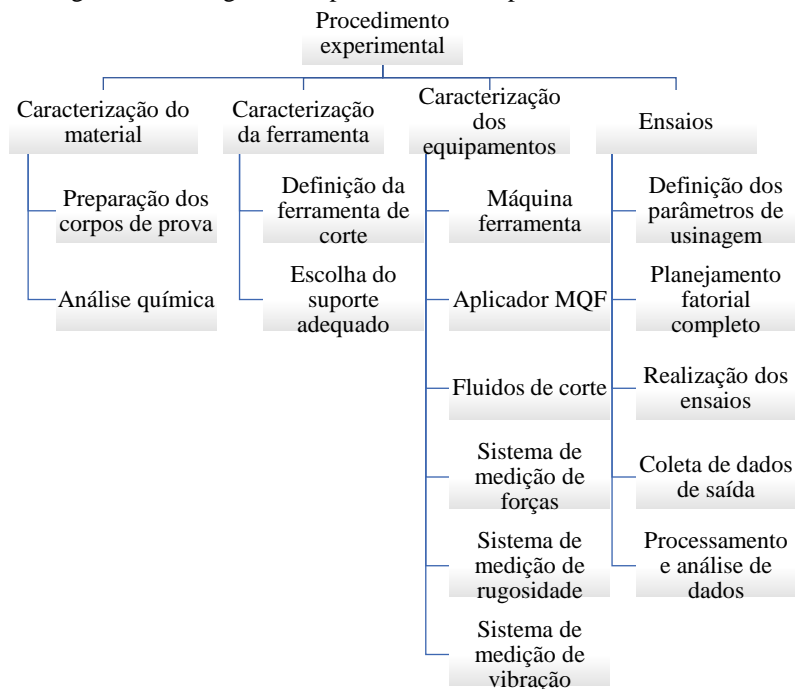
Assim, o presente trabalho se propôs a estudar a usinabilidade de um aço AISI 316, nas condições a seco, com fluido de corte comercial e com fluidos de corte de base vegetal, considerados ambientalmente corretos, no processo de torneamento cilíndrico externo, com aplicação através do método MQF, utilizando a metodologia do planejamento fatorial (DOE) com o objetivo de determinar as melhores condições de desempenho técnico dos componentes usinados, por meio de avaliações de forças, potência de corte, rugosidade das superfícies usinadas e vibração do conjunto.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O fluxograma apresentado na Figura 3 demonstra a sequência de ações e recursos definidos e utilizados no presente trabalho.

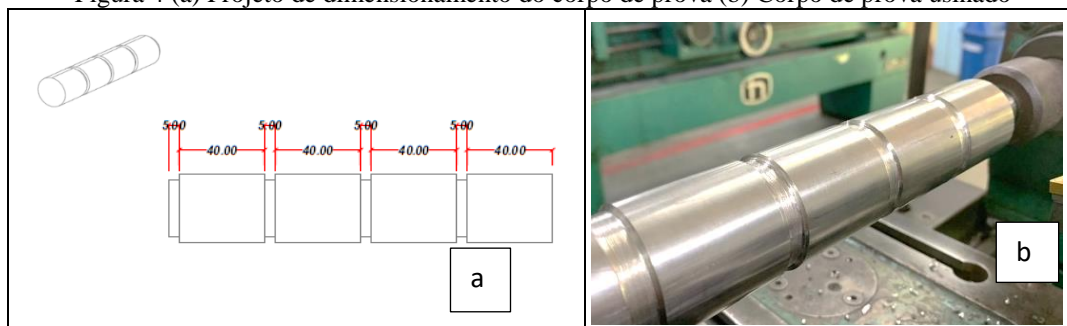
Figura 3 - Fluxograma do procedimento experimental



## 2.2 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL E FERRAMENTAS

Para realização dos ensaios de usinagem foi utilizada uma barra de aço AISI 316 com seção circular de 38mm de diâmetro, que foi desmembrada em 04 corpos de prova de 200mm de comprimento cada, onde cada corpo de prova foi destinado a uma condição de ensaio (a seco, com óleo comercial, com óleo vegetal de canola, com óleo vegetal de algodão). A ilustração dos corpos de prova segue demonstrada na Figura 4.

Figura 4 (a) Projeto de dimensionamento do corpo de prova (b) Corpo de prova usinado



Para análise química do material foi realizado ensaio via espectrometria óptica no Laboratório Metalúrgico LABTESTE, conforme norma ASTM A751:20. Os resultados obtidos na análise da composição química da amostra usada estão descritos no Quadro 1.

Quadro Erro! Nenhum texto com o estilo especificado foi encontrado no documento..1 Análise da composição química da amostra de aço utilizada

Elementos	C Carbono	Si Silício	Mn Manganês	P Fósforo	S Enxofre	Cr Cromo	Mo Molibdênio	Ni Níquel	Al Alumínio	Co Cobalto
Concentração média obtida (%)	0,039	0,46	1,77	0,044	0,024	16,95	2,49	10,9	0,001	0,20
Especificação	0,08 Máximo	1,00 Máximo	2,00 Máximo	0,045 Máximo	0,030 Máximo	16,0-18,0	2,00-3,00	10,0-14,0	---	---
Incerteza expandida, U*	± 0,001	± 0,007	± 0,051	± 0,006	± 0,0054	± 0,064	± 0,048	± 0,278	---	± 0,006

Elementos	Cu Cobre	Nb Nióbio	Ti Titânio	V Vanádio	W Tungstênio	Pb Chumbo	Sn Estanho	B Boro	N Nitrogênio	Fe Ferro
Concentração média obtida (%)	0,36	0,005	0,005	0,081	0,011	0,005	0,012	0,001	0,018	66,6
Especificação	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Incerteza expandida, U*	± 0,01	± 0,001	± 0,0006	± 0,0011	± 0,001	---	± 0,001	---	---	± 0,412

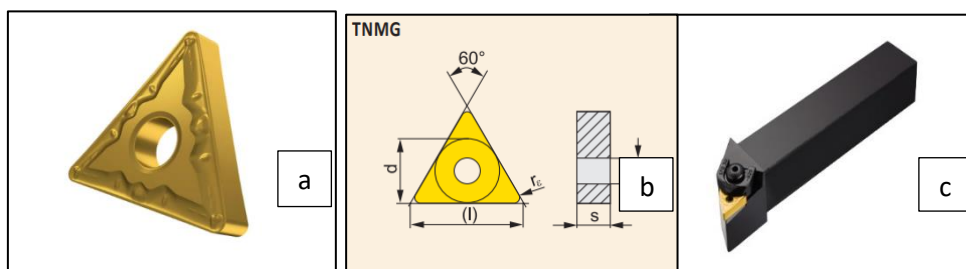
ND - Não Detectado NA - Não Analisado Rest. - Restante --- - Não Aplicável

Fonte: LABTESTE, 2021

Com base no Quadro 1, o material apresentou a composição química típica de um aço inoxidável AISI 316. Esta combinação o classifica na família austenítica, a mais comum e aplicável na indústria. A fase austenítica garante ao aço inoxidável AISI 316 alta resistência à corrosão e elevada tenacidade. (LABTESTE, 2021)

O inserto utilizado para execução do trabalho experimental foi de formato triangular, com 06 (seis) arestas de corte, modelo TNMG 160408, com cobertura TiAlN, nano estruturada pelo método PVD (deposição física a vapor), classe ISO P25M25. Para fixação da pastilha foi utilizado o suporte do tipo MTJNR 2020-K16. A Figura 5 demonstra os itens.

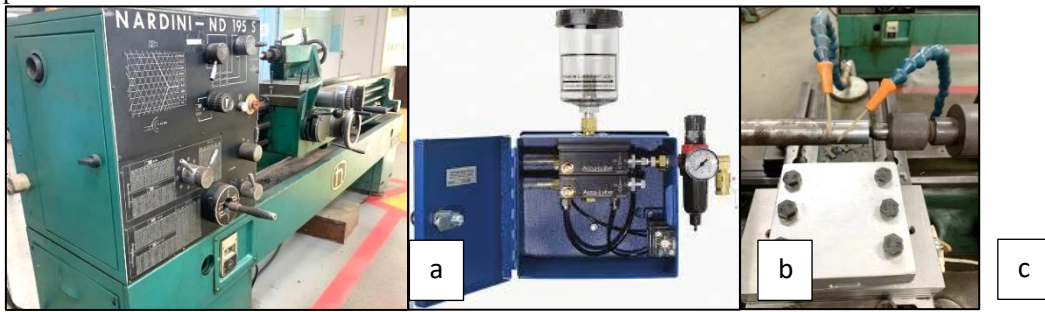
Figura 5 (a) Pastilha em 3D (b) Dimensionamento da pastilha (c) Suporte



Fonte Dormer Pramet

A máquina ferramenta utilizada nos ensaios de usinabilidade foi o torno universal da marca NARDINI, modelo ND 195S, com potência instalada de 6,12 CV e rotação máxima de 1600 RPM. Para aplicação dos fluidos na forma MQF utilizou-se aparelho aplicador de micro- lubrificação, modelo Accu – Lube fabricado pela ITW Chemical, com operação por meio de um fluxo contínuo a ar comprimido, ajustado em torno de 6 Kg/cm<sup>2</sup>, e “spray” intermitente de fluido na frequência de 1 pulso por segundo, ajustado a uma vazão de 90ml/h. Os equipamentos seguem ilustrados na Figura 6.

Figura 6 (a) Máquina Ferramenta (b) Aplicador de mínima quantidade de fluido (MQF) (c) Bicos pulverizadores



### 2.3 SISTEMA DE MEDIÇÃO DE FORÇAS DE USINAGEM

Para aquisição de sinais de força foi utilizado um dinamômetro piezoelétrico, que é um transdutor comumente utilizado para a medição das componentes da força de usinagem ( $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$ ) em processos de torneamento. (KLOCKE, 2011). O dinamômetro utilizado possui três canais de aquisição de dados dispostos nos eixos cartesianos x, y e z, o qual foi montado na máquina-ferramenta de forma a coincidir com os eixos cartesianos e, acoplado ao amplificador de carga multicanal modelo Kistler 5006. Para aquisição de sinais foi utilizada uma placa de conversão analógica, para receber os sinais provenientes do amplificador de carga, modelo USB 1208SF em comunicação com o software *DynoWare* da *Kistler*, durante o tempo de aquisição de 30 segundos, capturando os dados e armazenando estas informações em disco. Em relação à potência de corte, esta foi obtida em função da força de usinagem, sendo produto da força de corte ( $F_c$ ) pela velocidade de corte ( $v_c$ ), conforme Equação 1.

$$P_c = \frac{F_c \cdot v_c}{60 \cdot 10^3} [\text{kW}] * 1,35962 [\text{CV}] \quad (1)$$

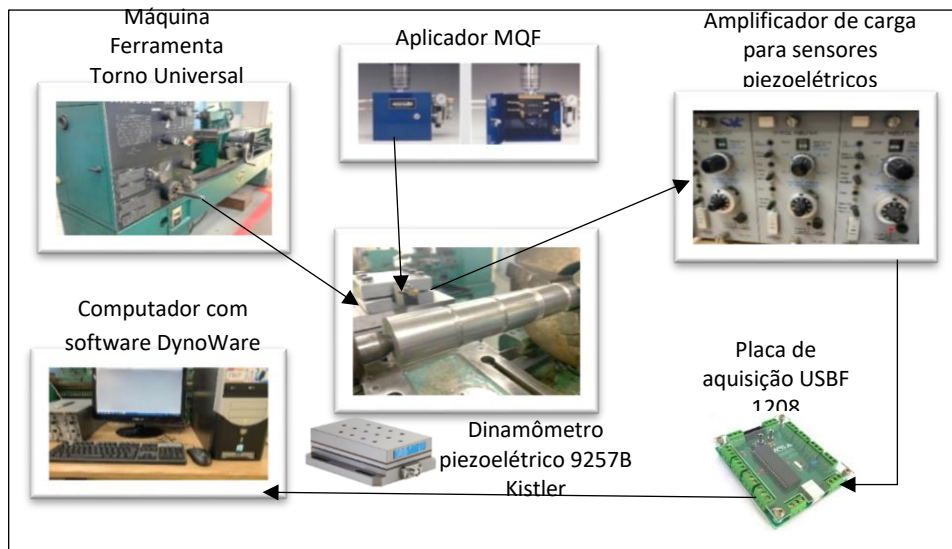
Onde:

$F_c$  = Força de corte (N)

$v_c$  = Velocidade de corte (m/min)

Toda a metodologia utilizada para captação dos sinais de força segue ilustrada conforme Fig. 7.

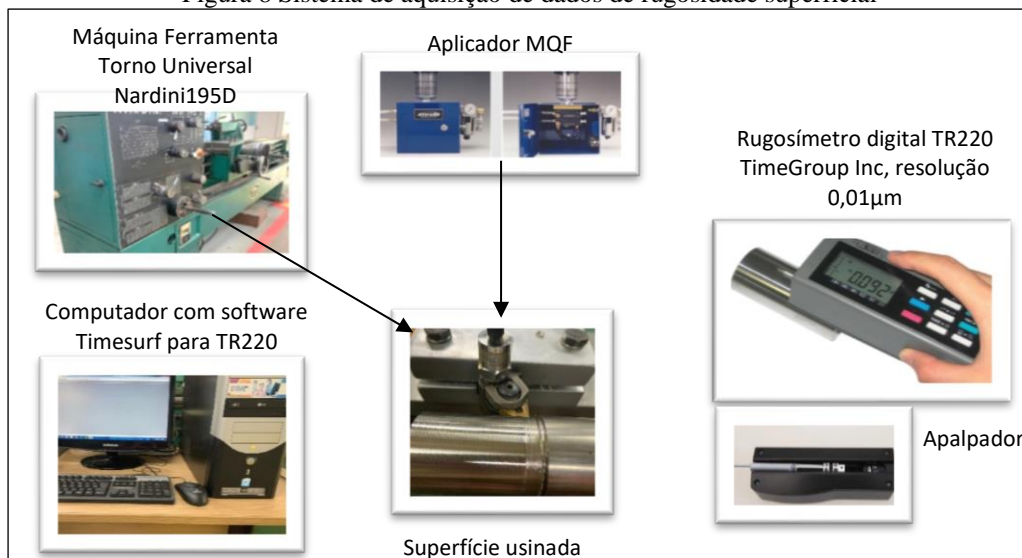
Figura 7 Sistema de aquisição dos sinais de força ( $F_x$ ,  $F_y$  e  $F_z$ )



#### 2.4 SISTEMA DE MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE SUPERFICIAL

A rugosidade média ( $R_a$ ) foi medida na superfície usinada da peça com o auxílio de um rugosímetro digital modelo TR220 da TimeGroup Inc., com resolução de  $0,01\mu\text{m}$  e comprimento de amostragem cut-off ( $l_e$ ) de  $0,25\text{mm}$ . A rugosidade foi medida em 4 pontos distintos da peça, utilizando o método da linha média – M, conforme indica a NBR ISO 4287/2002 e a NBR 8404/1984. O esquema de medições está na Figura 8.

Figura 8 Sistema de aquisição de dados de rugosidade superficial



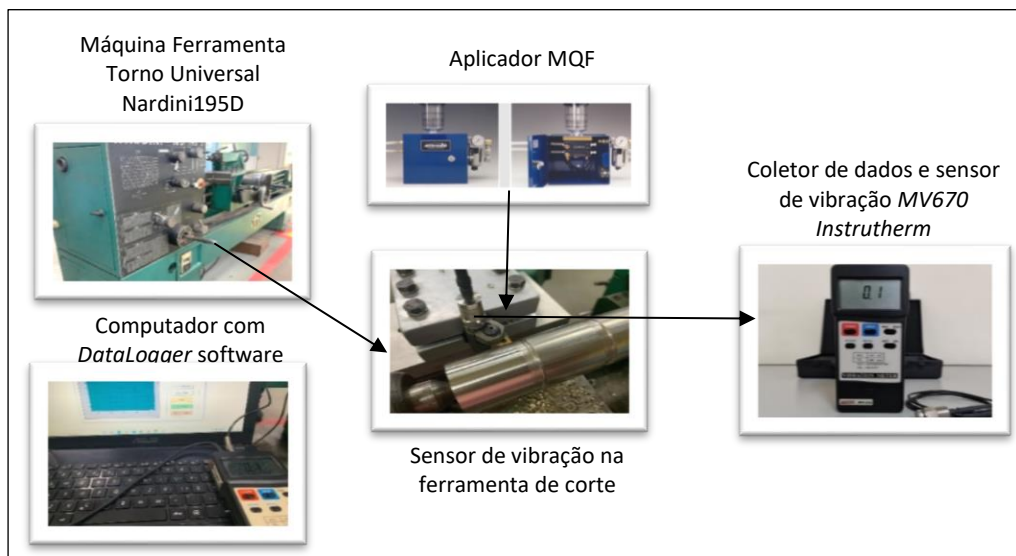
#### 2.5 SISTEMA DE MEDIÇÃO DE VIBRAÇÃO

Para medição dos sinais de vibração que ocorreram durante o processo de usinagem foi utilizado o acelerômetro MV 670 da Instrutherm, composto pelo sensor,



coletor de dados de vibração e software DataLogger 232 ligado via cabo USB a um computador para leitura dos dados. O sensor magnético foi fixado em cima do porta-ferramenta e monitorada a vibração a cada passe realizado. A Figura 9 ilustra essa montagem.

Figura 9 Sistema de aquisição dos sinais de vibração/aceleração



## 2.6 PLANEJAMENTO FATORIAL

O planejamento experimental foi elaborado com base em um planejamento fatorial ( $2^k$ ) completo de 03 fatores ( $2^3$ ), considerando as variáveis de entrada: velocidade de corte ( $v_c$ ), avanço ( $f$ ) e profundidade de corte ( $a_p$ ), com variação a dois níveis cada e 01 fator qualitativo de comparação: condição lubri-refrigerantes, que são:

- Óleos vegetais refinados de algodão e canola;
- Óleo comercial quimatic 3, que é um fluido de corte comercial também ecológico e biodegradável, que contém características necessárias para aplicação em usinagem de metais ferrosos através da técnica MQF;
- Condição a seco, ou seja, sem utilizar qualquer tipo de lubri-refrigerante.

Todos os óleos foram aplicados utilizando a técnica MQF, com vazão de 90ml/h, realizando 8 ensaios combinados para cada condição qualitativa, totalizando 32 ensaios. Os dados adotados no experimento estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Matriz de planejamento para testes específicos de força, potência de corte, rugosidade e vibração

VARIÁVEIS									
ENTRADA				SAÍDA					
QUANTITATIVA			QUALITATIVA	QUANTITATIVA					
$v_c$ (m/min)	f (mm/rot)	$a_p$ (mm)	Fluidos de corte	Forças de corte			Potência de corte (CV)	Rugosidade	Vibração/Aceleração (mm/s <sup>2</sup> )
				$F_x$	$F_y$	$F_z$	$P_c$	$R_a$	RMS
75.8	0.173	1.5	A seco; Fluido vegetal de algodão;						
119.3	0.491	2.0	Fluido vegetal de canola; Fluido comercial ecológico quimatic 3						

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1 EFEITOS DOS PARÂMETROS DE CORTE NA USINAGEM POR TORNEAMENTO EM RELAÇÃO ÀS FORÇAS E POTÊNCIA DE CORTE

De acordo com os dados obtidos é possível verificar que o aumento do avanço é um parâmetro significativo para produzir forças de cortes mais elevadas, além de elevar a potência de corte, independente do fluido empregado na operação. Ferraresi (2003) relata que variando-se o avanço ou a velocidade de corte aumenta-se a taxa de remoção de material, o que faz com que haja um maior desgaste na ferramenta de corte e aumento das forças geradas e potência consumida. As Figuras 10 e 11 representam a interação dos efeitos padronizados.

Figura 10 Gráfico de pareto dos efeitos padronizados para forças de corte

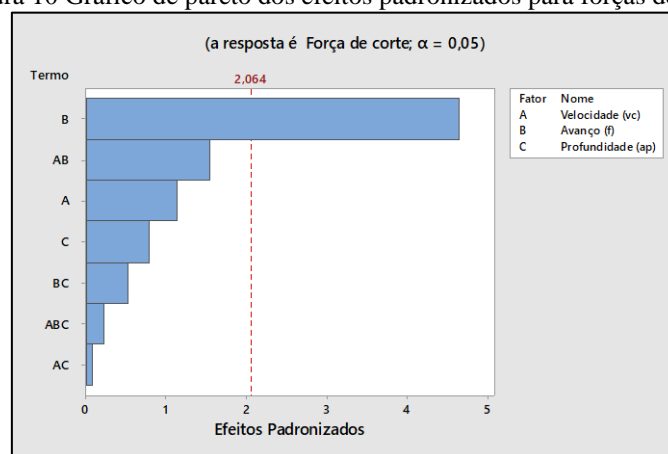
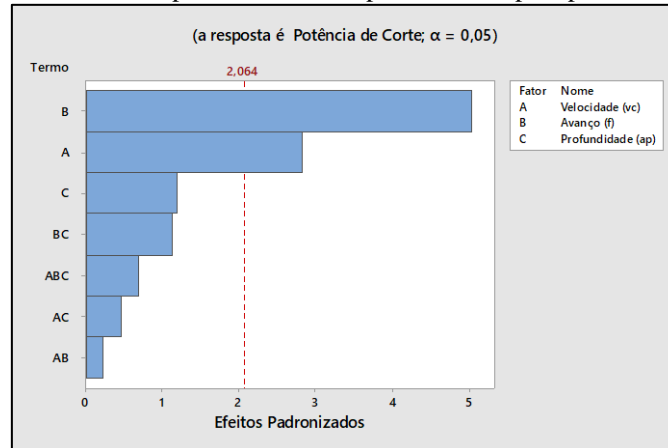


Figura 11 Gráfico de pareto dos efeitos padronizados para potência de corte



### 3.2 DESEMPENHO DOS FLUIDOS DE CORTE DE BASE VEGETAL NA USINAGEM POR TORNEAMENTO EM RELAÇÃO ÀS FORÇAS E POTÊNCIA DE CORTE

Em relação aos efeitos do uso de fluidos de corte, a Figura 12 apresenta o comparativo entre as médias dos valores máximos relativos às forças de corte ( $F_{zm\acute{a}x}$ ), dispostos em cada condição de usinagem estabelecida por meio da matriz de planejamento fatorial da Tabela 1. Quanto à potência de corte, optou-se pela obtenção em função da força de corte. A Figura 13 demonstra os dados comparativos de potência de corte em todas as condições de usinagem pré-estabelecidas.

Figura 12 Comparações de desempenho dos fluidos de corte em relação à força de corte

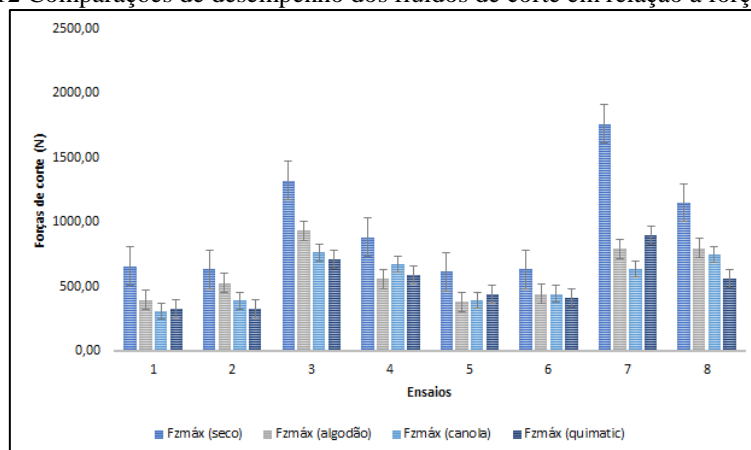
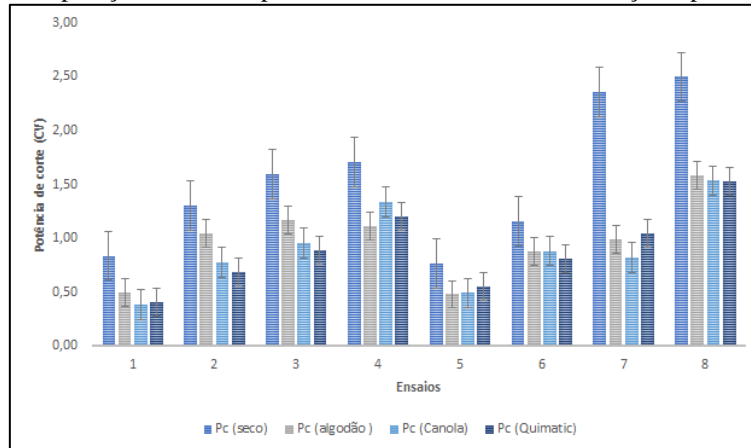


Figura 13 Comparações de desempenho dos fluidos de corte em relação à potência de corte



Ao analisar os resultados apresentados nos gráficos das Figuras 12 e 13, com suas respectivas dispersões é correto afirmar com base dados apresentados por meio das variáveis de saída (forças de usinagem e potência de corte) pode-se afirmar que os fluidos aplicados exercem uma grande influência nestes critérios, pois é possível verificar que com a ação lubrificante do fluido há uma redução significativa das forças empregadas e consequentemente, da potência de corte empregada, o que demonstra um desempenho satisfatório destes óleos, visto que a força de corte é um indicador bastante importante do estado e da qualidade da usinagem, assim como a potência é do consumo de energia. Além disso, no estudo de Machado *et al.* (2015) o autor relata que o fluido de corte para ser efetivo na sua ação lubrificante tem que se fazer presente na interface peça-cavaco-ferramenta, além ter a capacidade de interagir com o material da peça para formar um filme lubrificante eficiente.

De forma análoga, as Figuras 14 e 15 demonstram o gráfico boxplot das médias das forças e potências de corte nas condições qualitativas: a seco, com uso de fluidos de corte vegetais de algodão e canola e com uso de óleo comercial quimatic 3.

Figura 14 Boxplot da média das forças de corte nas diferentes condições qualitativas de usinagem

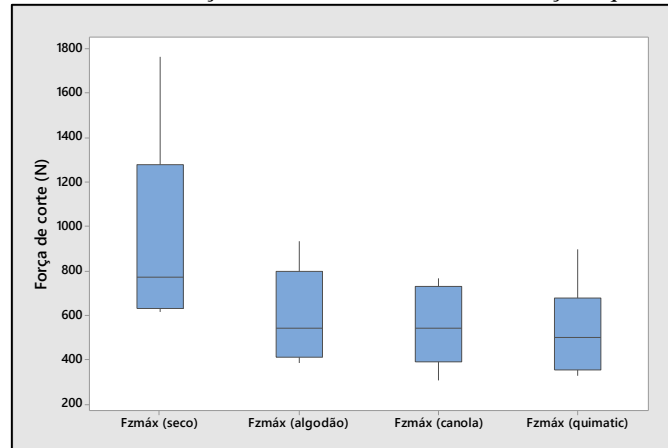
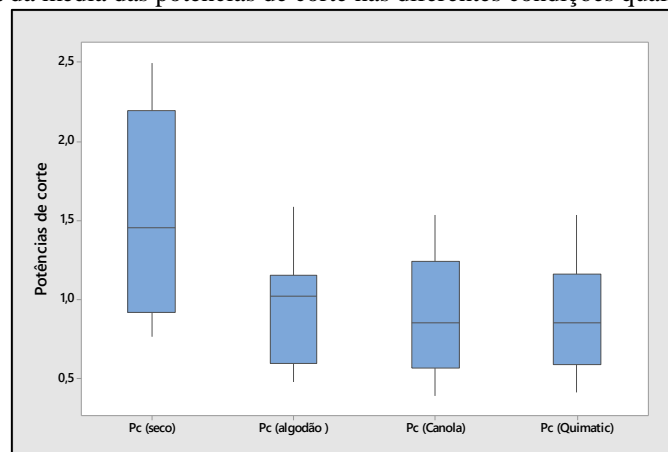


Figura 15 Boxplot da média das potências de corte nas diferentes condições qualitativas de usinagem



Conforme os gráficos ilustrados nas Figuras 14 e 15 é possível observar ainda que o fluido comercial quimatic 3 apresentou pouca variação em relação aos óleos vegetais de algodão e canola, enquanto que na condição a seco houve aumento expressivo nas variáveis de saída, apresentando as maiores médias e os maiores desvios, o que corrobora o estudo de Machado *et al* (2015) que descreve que os fluidos de corte possuem várias funções, entre elas ajudar a refrigerar a região de corte, principalmente em altas velocidades de corte, lubrificar a região de corte, principalmente em baixas velocidades e altas tensões de corte, além reduzir a força e a potência de corte empregadas.

Desta forma, para avaliar qual óleo vegetal apresentou um melhor desempenho nesta etapa utilizou-se a inferência estatística aplicada ao critério de força máxima de corte, utilizando o teste t de student para dados pareados (comparação entre  $F_{zmáx}$  obtidas com aplicação de óleos vegetais, com  $F_{zmáx}$  tanto da condição a seco, quanto com aplicação do óleo comercial quimatic 3), considerando duas hipóteses, uma sendo nula, onde não existe diferença significativa entre as médias das forças, independente da

condição qualitativa (a seco/com fluido de corte) e a outra considerada não nula que contrapõe à primeira. (ARAÚJO JÚNIOR, 2013)

Para definir se a hipótese nula deve ser rejeitada ou não, adotamos uma confiabilidade de 95%, ou equivalentemente um nível de significância de 5%. Se a probabilidade do teste (p-valor) for menor que esse nível de significância, a hipótese nula é rejeitada. Caso contrário, a hipótese nula não será rejeitada. Esta análise está apresentada na Tabela 2.

Tabela 2 Análise estatística entre óleos vegetais no critério força de corte utilizando teste de hipótese t de student pareado ao nível de significância de 5 % ( $\alpha = 0,05$ )

ÓLEO VEGETAL	COMPARAÇÃO			3
	A (Valor p)	SECO	QUIMATIC (Valor p)	
ALGODÃO	0,007240		0,170041	
CANOLA	0,007592		0,804506	

Conforme os resultados obtidos nos testes, quando comparamos através do teste t pareado, as médias das forças de corte dos óleos vegetais de algodão e canola, com a condição a seco e com o óleo comercial quimatic 3 observa-se que as médias das forças de corte dos óleos vegetais aplicados como fluidos de corte apresentaram uma diferença significativa na comparação vegetal x seco, ou seja valor  $p < 0,05$ . Portanto, ambos os óleos vegetais apresentaram um desempenho adequado quanto ao critério força de corte. Já quando comparamos os óleos vegetais com o óleo quimatic 3, aceitamos a hipótese nula, pois o valor  $p > 0,5$ , ou seja, não há uma diferença significativa na comparação vegetal x quimatic3, sendo pertinente afirmar que qualquer um desses óleos pode ser utilizado nas condições de corte especificadas. A Tabela 3 apresenta uma estimativa de custo com óleo para o processo de usinagem com uso de óleos vegetais.

Tabela 3 Custo médio do litro de óleo vegetal para utilização em operações de usinagem

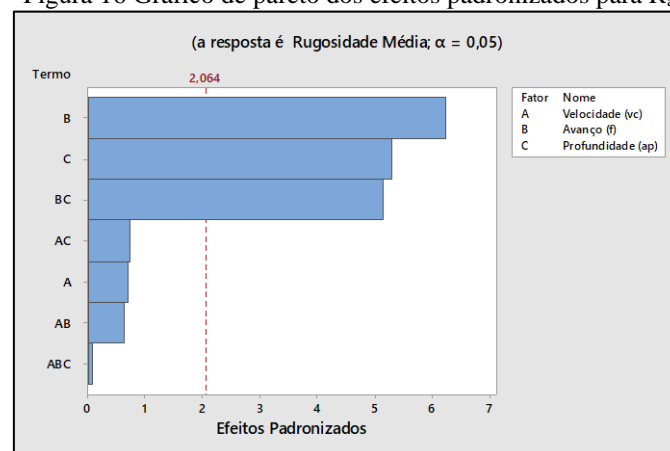
Item	Quantidade utilizada em 1 h de trabalho	Valor médio (l)
Óleo de Algodão	90 ml	R\$ 13,00
Óleo de Canola	90 ml	R\$ 12,00
Óleo Quimatic 3	90 ml	R\$ 60,00

Com base na estimativa apresentada na Tabela 3 é possível verificar que o óleo quimatic 3 (comercial) apresenta um valor 79,16% mais elevado em relação aos óleos vegetais de algodão e canola. Desta forma, há possibilidade de utilização de quantidades mínimas de fluidos de corte vegetais com bom desempenho quanto ao critério de redução de forças de corte, confirmando o estudo de Klafke (2011) que descreve que fluidos de corte base vegetal podem ser usados como uma alternativa na usinagem dos metais, com resultados semelhantes ao fluido comercial, assim como Araújo Júnior (2013), que relata em seu trabalho que, de maneira geral, as forças e potências de corte foram mais baixas quando empregados os óleos de algodão e canola.

### 3.3 EFEITOS DOS PARÂMETROS DE CORTE NA USINAGEM POR TORNEAMENTO EM RELAÇÃO À RUGOSIDADE MÉDIA ( $R_a$ )

A rugosidade superficial influencia não apenas a precisão dimensional das peças usinadas, mas também suas propriedades. A irregularidade de uma superfície é o resultado do processo de usinagem, incluindo a seleção ideal das condições de corte. Além disso, a rugosidade superficial final obtida durante uma operação de usinagem pode ser considerada como a soma de dois efeitos independentes: a rugosidade superficial “ideal”, a qual é um resultado da geometria da ferramenta e do avanço da ferramenta (MUHL, 2019). De acordo com o gráfico de Pareto, apresentado na Figura 16 é possível identificar os fatores significativos e os fatores não significativos da análise para rugosidade média ( $R_a$ ).

Figura 16 Gráfico de pareto dos efeitos padronizados para  $R_a$



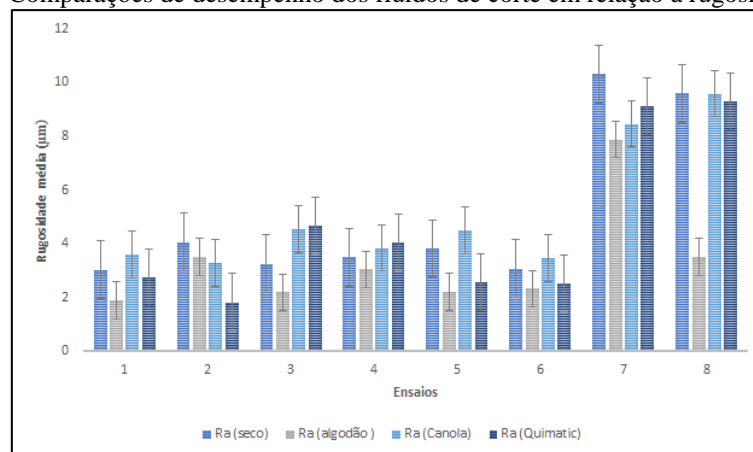
Adotando uma ordem decrescente temos o avanço (f), a profundidade de corte ( $a_p$ ) e a interação entre ambos (f x  $a_p$ ) como estatisticamente significativos, ou seja,

apresentam valores de  $p < 0,05$ . Os demais fatores contidos no gráfico não são estatisticamente significativos, ou seja, a velocidade de corte ( $v_c$ ) apresenta pouca influência nos resultados obtidos. Conforme Machado *et al.* (2015), o avanço é o parâmetro mais influente sobre a rugosidade. Assim sendo, para atingir valores de rugosidade mais baixos deve-se empregar baixos valores de avanço, associados com baixas profundidades de corte, conforme os parâmetros pré-estabelecidos no planejamento fatorial, o que confirma o estudo apresentado por Xiao *et al.* (2016), onde os autores mencionam que ao utilizar valores elevados de avanço, há um aumento acentuado da rugosidade, uma vez que o cavaco tende a ser arrancado ao invés de cisalhar o material.

### 3.4 DESEMPENHO DOS FLUIDOS DE CORTE DE BASE VEGETAL NA USINAGEM POR TORNEAMENTO EM RELAÇÃO À RUGOSIDADE MÉDIA ( $R_a$ )

A utilização de fluidos de corte também influencia de forma efetiva o acabamento superficial de peças usinadas pelo processo de torneamento, uma vez que promove uma redução nas forças de usinagem geradas e amenização das vibrações do conjunto máquina-ferramenta. (ARAÚJO JÚNIOR, 2013). A Figura 17 mostra graficamente o comportamento da rugosidade média ( $R_a$ ) em relação às variações das condições de corte e dos fluidos de base vegetal e comercial analisados.

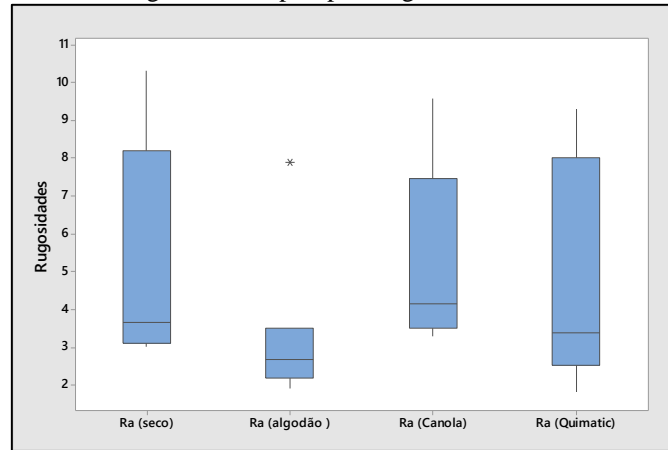
Figura 17 Comparações de desempenho dos fluidos de corte em relação à rugosidade média



A Figura 17 confirma que na maioria das condições de corte, a condição a seco apresentou o pior desempenho, elevando de forma significativa a rugosidade superficial em termos de  $R_a$ , obtendo condições de acabamento superficial inadequadas. A Figura 18 ilustra o gráfico boxplot para comparação entre as médias obtidas em cada condição.



Figura 18 Boxplot para rugosidade média



Por meio da Figura 18, pode-se analisar que a condição com uso de óleo comercial quimatic 3 apresentou maior variabilidade. Já na condição com uso de óleo de algodão obteve-se um acabamento superficial com valores menores de rugosidade.

Assim, para avaliar qual óleo vegetal apresentou um melhor desempenho nesta etapa novamente utilizou-se a inferência estatística aplicada ao critério de rugosidade média, utilizando o teste t de student para dados pareados (comparação entre  $R_a$  obtida com aplicação de óleos vegetais, com  $R_a$  tanto da condição a seco, quanto com aplicação do óleo comercial quimatic 3). Esta análise está apresentada na Tabela 4.

Tabela 4 Análise estatística entre óleos vegetais no critério rugosidade média ( $R_a$ ) com teste de hipótese t de student pareado ao nível de significância de 5 % ( $\alpha = 0,05$ )

ÓLEO VEGETAL	COMPARAÇÃO		3
	$\alpha=0,05$		
	A (Valor p)	SECO QUIMATIC (Valor p)	
<b>ALGODÃO</b>	0,032305	0,119406	
<b>CANOLA</b>	0,666210	0,115701	

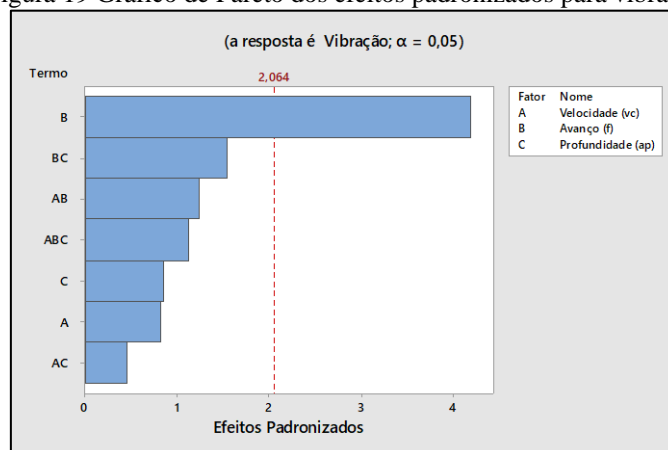
Ao analisar a comparação quanto ao uso de óleo vegetal ou a seco, através do teste t pareado, observou-se que para o critério de rugosidade média ( $R_a$ ) apenas o óleo de algodão apresenta uma diferença significativa entre as médias obtidas (valor  $p < 0,032305 < 0,05$ ). Já na comparação vegetal x comercial (quimatic3), não há diferença significativa entre as médias, ou seja, o tipo de fluido de corte não exerceu influência sobre a rugosidade superficial. Neste caso, o uso do óleo de algodão apresenta desempenho

satisfatório quando comparado com a condição a seco e além disso não produz consequências nocivas tanto para os operadores quanto para o meio ambiente.

### 3.5 EFEITOS DOS PARÂMETROS DE CORTE NA USINAGEM POR TORNEAMENTO EM RELAÇÃO À VIBRAÇÃO

As deformações e o atrito entre o cavaco, a ferramenta de corte e a peça produzem vibrações. As oscilações da força de corte também contribuem com o processo. (ARAÚJO JÚNIOR, 2013). Deste modo, a Figura 19 demonstra através do gráfico de pareto que o parâmetro que mais influenciou para que houvesse crescimento nos sinais de vibração durante o processo de usinagem foi o avanço. Isso pode ser justificado pelo fato de o avanço elevar a frequência de excitação do sistema ferramenta-peça, o que faz com que a vibração também aumente.

Figura 19 Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para vibração



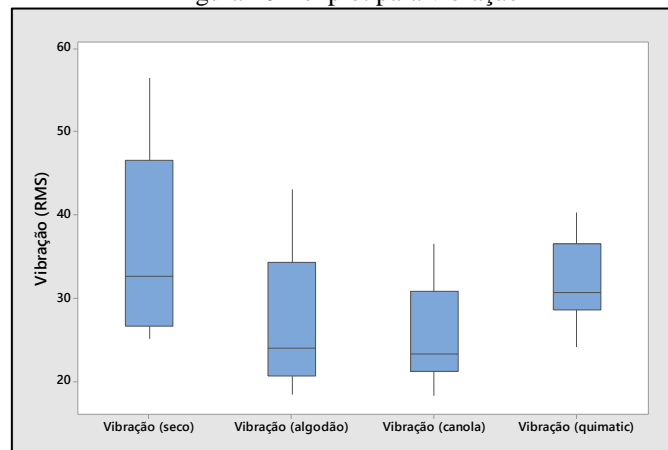
Além do avanço, com a mudança da profundidade de corte também se observou que o aumento deste parâmetro produz um aumento na amplitude da vibração. A presença de vibração no processo de usinagem tende a aumentar a tensão residual da superfície usinada de maneira não regular, com influência do avanço e da profundidade de corte sobre o valor da tensão e o tipo da tensão residual, compressão ou tração, o que acarreta a redução da vida em fadiga. (DAVIM, 2008).

### 3.6 DESEMPENHO DOS FLUIDOS DE CORTE DE BASE VEGETAL NA USINAGEM POR TORNEAMENTO EM RELAÇÃO À VIBRAÇÃO

As vibrações são proporcionais às forças de corte, largura do corte e profundidade, bem como à dureza do material. (KALPAKJIAN, SCHMID, 2010). Logo, pode ser

observado através da Figura 20, que as melhores condições encontradas para atenuar as vibrações são as com uso de fluidos de corte, o que corrobora a vantagem na aplicação de fluidos vegetais em operações de usinagem, pois a realização de usinagem com elevados níveis de vibração é prejudicial tanto para o sistema ferramenta-peça quanto para o acabamento superficial da mesma, visto que menores níveis de vibração favorecem integridade da ferramenta de corte, reduzem os níveis de força empregados, favorecendo a usinagem da peça, com menor desgaste e defeitos superficiais no material.

Figura 20 Boxplot para vibração



Nagendramma e Kaul (2012) relatam em seu trabalho que os óleos vegetais fornecem filmes lubrificantes de alta resistência que interagem fortemente com as superfícies metálicas, reduzindo o atrito e o desgaste, o que reduz também os níveis de vibrações forçadas. O que torna o uso destes óleos uma alternativa favorável às operações de usinagem, devido às suas excelentes propriedades lubrificantes, que são capazes de reduzir níveis elevados de vibrações, aumentando a qualidade das superfícies usinadas.

#### 4 CONCLUSÃO

Após a realização dos ensaios de usinagem por torneamento cilíndrico externo do aço AISI 316, sob diversas condições de corte e lubrificação, além da condição a seco e conforme a análise dos resultados obtidos, as seguintes conclusões foram alcançadas:

- O método proposto para realização dos ensaios experimentais, determinação dos principais parâmetros que afetam a usinabilidade do aço AISI 316 e a análise do desempenho dos fluidos de corte vegetais aplicados através da técnica MQF mostrou-se bastante eficiente, trazendo respostas coerentes às variáveis de saída estudadas.

- O avanço demonstrou ser um parâmetro chave na redução das forças de corte e consumo de potência, além disso, avanços menores são responsáveis por um bom acabamento superficial no processo de torneamento cilíndrico externo do aço AISI 316.
- A condição a seco mostrou-se de pior desempenho, visto que foi observado um aumento substancial em relação à todas as variáveis estudadas, proporcionando um maior esforço, gasto de energia, vibração no conjunto máquina ferramenta e acabamento superficial ruim em praticamente todas as condições de corte.
- Com relação ao uso de óleos vegetais de algodão e canola foi possível observar um desempenho satisfatório, pois as forças de usinagem e potências de corte foram mais baixas quando estes óleos foram empregados. O óleo de algodão apresentou o melhor desempenho em relação ao critério de rugosidade média ( $R_a$ ), produzindo um acabamento superficial da peça adequado e baixas vibrações para as condições de corte analisadas.
- O fluido quimatic 3 demonstrou-se apropriado para aplicação através do sistema MQF, permitindo uma boa regularidade nas respostas das variáveis de saída em praticamente todas as condições de usinagem, porém seu custo é mais elevado em relação aos óleos vegetais aplicados.
- A vibração também aumenta com o incremento do avanço e da profundidade de corte, o que também contribui para a piora do acabamento superficial da peça.

Deste modo, o uso de fluidos de corte vegetais mostrou-se satisfatório em relação à redução das forças e potência de corte empregadas e, além disso pode ser considerado eficiente quanto à confecção de peças com qualidade superficial adequada, podendo ser empregado nas operações de torneamento cilíndrico externo, trazendo para o processo industrial características de biodegradabilidade, isenção de toxidade e segurança fisiológica para os operadores. Pode-se dizer que os óleos vegetais oferecem um futuro melhor na formulação de lubrificantes e contribuem para processos de fabricação mais limpos.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 4287: Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil – Termos, definições e parâmetros da rugosidade**, Rio de Janeiro, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 8404: Indicação do estado de superfícies em desenhos técnicos – Procedimento**, Rio de Janeiro, 1984.

AL-AHMARI, A.M.A. **Mathematical model for determining machining parameters in multipass turning operations with constraints**. Int. J. Prod. Res. 39, p. 3367–3376. 2001.

ARAÚJO JUNIOR. A. S. **Desempenho de óleos vegetais comestíveis aplicados por MQF no fresamento frontal do aço ABNT 1045**. 162p. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Uberlândia. MG, Brasil, 2013.

ARUNACHALAM R. M., MANNAN M. A., SPOWAGE A. C. Surface Integrity when machining age hardened inconel 718 with coated carbide cutting tools. **International Journal of Machine and Manufacture** 44, p.1481-1491, 2004.

DAVIM, J. P. **Machining: Fundamentals and Recent Advances**. Edição digital, London: Springer Verlag, 2008.

DORMER PRAMET. **Catálogo de soluções para usinagem**. Edição digital Disponível em:<<https://www.dormerpramet.com/downloads/45001%20b%20dormer%20pramet%20brazil.pdf>>. Acesso em: 09/02/2021.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos Metais**. 3 ed. V.1, S.P: Editora Edgard Blücher Ltda, 1970. 13ª Reimpressão (2009), 751p.

KLAFKE, A.L. **Avaliação do uso de ésteres de óleos vegetais em formulações de fluido de corte para operações de torneamento**. 132f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Santa Cruz do Sul, Santa Cruz do Sul, 2011.

KALPAKJIAN, S; SCHMID, S. **Manufacturing, Engineering and Technology**. Editora: Pearson Education, 2010.

KLOCKE, F. **Manufacturing Processes 1 – Cutting**. Aachen: Springer, 2011.

LABTESTE. **Análise química por espectrometria óptica**. Disponível em:<<https://www.labteste.com.br/analise-quimica-espectrometria>>. Acesso em: 09/03/2021.

MACHADO, A. R. et al. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 3.ed. ed. São Paulo: [s.n.], 2015. 384 p.

MUHL, R.T. **Otimização dos parâmetros de usinagem de acabamento através da rugosidade superficial no torneamento do aço ABNT 4340**. Dissertação (mestrado). Universidade de Passo Fundo. RS, 2019.

NAGENDRAMMA, P.; KAUL, S. Development of Ecofriendly/Biodegradable Lubricants: An Overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 16, 764-774, 2012.

NOGUEIRA, R.O. (2018). **Análise da influência da lubrificação com partículas sólidas na estampagem de aços ABNT 1010 e 1020**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de São João del-Rei, São João del-Rei, 2018.

XIAO, Z., et. al. Effect of cutting parameters on surface roughness using orthogonal array in hard turning of AISI 1045 steel with YT5 tool. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, [s.1], v. 90, n. 9-12, p. 2556-2567. 2016.