

**LÚCIA DE ALMEIDA RIBEIRO**

**Aplicação de ferramentas cerâmicas à base de óxido de alumínio  
no torneamento da superliga VAT 32<sup>®</sup>**

**Lúcia de Almeida Ribeiro**

**Aplicação de ferramentas cerâmicas à base de óxido de alumínio  
no torneamento da superliga VAT 32<sup>®</sup>**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Área de Concentração - Materiais, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Guaratinguetá.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro  
Coorientador: Prof. Dr. José Vitor Cândido de Souza


R484a	<p>Ribeiro, Lúcia de Almeida</p> <p>Aplicação de ferramentas cerâmicas à base de óxido de alumínio no torneamento da superliga VAT 32® / Lúcia de Almeida Ribeiro – Guaratinguetá, 2020.</p> <p>128 f : il.</p> <p>Bibliografia: f. 121-128</p> <p>Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2020.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro</p> <p>Coorientador: Prof. Dr. José Vitor Cândido de Souza</p> <p>1. Usinagem. 2. Taguchi, Métodos (Controle de qualidade). 3. Aspereza de superfície. 4. Material cerâmico.</p> <p>I. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDU 621.9(043)</p>
-------	---

**LÚCIA DE ALMEIDA RIBEIRO**


**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

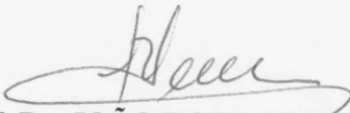
**PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA**  
**CURSO: MESTRADO**

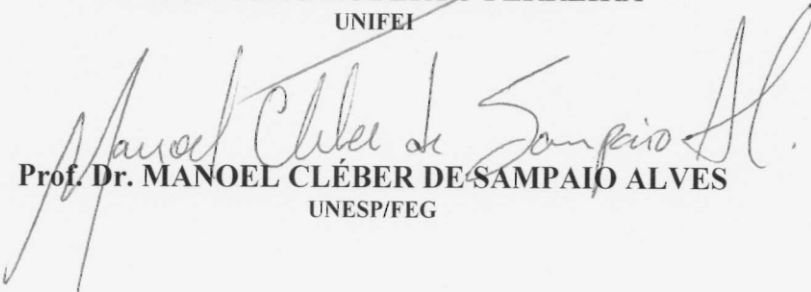
**APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**

  
**Prof. Dr. Ivonete Ávila**  
Coordenadora

**BANCA EXAMINADORA:**

  
**Prof. Dr. MARCOS VALÉRIO RIBEIRO**  
Orientador / UNESP/FEG

  
**Prof. Dr. JOÃO ROBERTO FERREIRA**  
UNIFEI

  
**Prof. Dr. MANOEL CLÉBER DE SAMPAIO ALVES**  
UNESP/FEG

## **DADOS CURRICULARES**

### **LÚCIA DE ALMEIDA RIBEIRO**

<b>NASCIMENTO</b>	22.11.1978 – TAUBATÉ/SP
<b>FILIAÇÃO</b>	Geraldo Honório Ribeiro Cleusa Maria de Almeida Ribeiro
<b>2004/2008</b>	Curso de Graduação em Engenharia de Produção Mecânica, Universidade de Taubaté
<b>2014/2017</b>	Curso de Pós-graduação em Gerenciamento de Projetos, Nível de Especialização na Universidade Estácio de Sá, UNISEB
<b>2019/2020</b>	Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Nível de Mestrado na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, UNESP

Ao meu marido Leandro Luiz da Silva Roque e meu filho, Matheus Ribeiro Roque, e em memória a minha querida mãe, Cleusa Maria de Almeida, pelo incentivo constante, paciência e pelo amor incondicional.

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar agradeço a Deus, que me fortaleceu nos momentos difíceis, me deu forças para continuar mesmo diante de tantos obstáculos, me capacitou para concluir este trabalho com dignidade;

ao meu orientador, Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro, que me ajudou na conclusão dessa etapa da minha vida, obrigado por toda dedicação e orientação;

ao professor Prof. Dr. José Vitor Candido de Souza FEG/UNESP por toda ajuda e auxílio técnico;

a todos os docentes da FEG, pelo apoio e aprendizado obtido;

a Villares Metals, em especial aos Dr. Paulo Haddad e Dr. Alexandre Farina, pela doação dos materiais desta pesquisa;

a SECO Tools, em especial ao MSc. Fábio Ricardo da Silva, pela doação de suportes;

a todos os servidores técnicos do DMT por todo auxílio, em especial ao técnico que me ajudou na realização dos ensaios práticos, José Manoel Bernardes.

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”.

Marthin Luther King



## RESUMO

A superliga de ferro-níquel VAT 32<sup>®</sup> foi desenvolvida como um substituto da liga de níquel 751 (UNS N07751) usada na fabricação de válvulas automotivas para motores de combustão interna de alto desempenho. A formação de carbonetos de nióbio confere a esta liga elevada resistência ao desgaste, desejada na aplicação em válvulas automotivas, criando-se, porém, uma maior dificuldade na usinagem deste material. Este trabalho estudou o torneamento da liga VAT 32<sup>®</sup> com dois tipos de ferramentas cerâmicas, sendo pastilhas de materiais cerâmicos experimentais, a primeira de  $Al_2O_3 + MgO$  e a segunda de  $Al_2O_3 + Cr_2O_3$ . Por meio do método de Taguchi de planejamento experimental, foram obtidas as combinações e os efeitos principais dos parâmetros de entrada: velocidade de corte, avanço, profundidade de corte para avaliar cada uma das variáveis respostas, sendo elas potência de usinagem, desgaste das ferramentas, qualidade superficial das peças usinadas, e os sinais de emissão acústica e vibração do processo. Foi obtida também, através da análise da razão sinal ruído (S/N) de Taguchi, a composição dos parâmetros de corte em que o processo apresentou menor variabilidade das características de qualidade, o chamado processo robusto. Os tipos de desgaste e tipos de cavaco também foram observados, e foi evidenciado que a pastilha contendo óxido de cromo teve um resultado melhor que a pastilha com óxido de magnésio, sendo superior nos parâmetros de desgaste de flanco ( $V_b$ ), rugosidade ( $R_a$ ), apresentando valores de consumo de Potência e Emissão Acústica menores. Apenas a Vibração apresentou valores aproximados entre as duas pastilhas quando observado as respostas obtidas nos ensaios realizados.

**PALAVRAS-CHAVE:** Usinagem. Rugosidade. Desgaste. Monitoramento. Método Taguchi.

## ABSTRACT

The VAT 32<sup>®</sup> Iron-Nickel Superalloy was developed as a replacement for 751 Nickel Alloy (UNS N07751) in the manufacture of automotive valves for high performance internal combustion engines. The formation of niobium carbides gives this alloy high wear resistance, which is desired for application in automotive valves, but creates greater difficulty in machining this material. This work studied the turning of VAT 32<sup>®</sup> alloy with two types of ceramic tools. Being inserts of experimental ceramic materials, the first of  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$  and the second of  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$ . Using Taguchi's experimental design method, combinations and main effects of the input parameters were obtained: cutting speed, feed rate, depth of cut to evaluate each of the response variables, such as machining power, tool wear, surface quality of the machined parts, and the acoustic emission and process vibration signals. Through the analysis of Taguchi's signal-to-noise ratio (S/N) were also obtained the composition of the cutting parameters in which the process presented less variability of the quality characteristics, the so-called robust process. Wear and chip types were also observed, and it was evidenced that the chromium-containing tablet had a better result than the magnesium oxide tablet. Being superior in the flank wear ( $V_b$ ), roughness ( $R_a$ ) parameters, presenting lower Power and Acoustic Emission consumption values. Only the vibration presented approximate values when analyzing the responses obtained in the performed tests.

**KEYWORDS:** Machining. Roughness. Tool wear. Monitoring. Taguchi method.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Microscopia eletrônica de varredura (MEV) do VAT32 <sup>®</sup> , ampliação de 500X ....	26
Figura 2 – Processos de torneamento .....	29
Figura3 – Desvio médio aritmético .....	31
Figura 4 – Altura máxima das irregularidades.....	32
Figura5 – Comprimento de amostragem .....	33
Figura 6 – Rugosidade e ondulação.....	34
Figura7 – Plano de cisalhamento .....	36
Figura8 – Formas de cavaco conforme o mecanismo de formação de cavaco .....	38
Figura9 – Classificação detalhada da forma dos cavacos segundo a Norma ISO 3685(8) .....	40
Figura 10 – Componentes de força .....	52
Figura 11 – Comparação dos diferentes tipos de materiais para ferramentas de corte .....	58
Figura 12 – Corpo de prova cilíndrico de VAT32 <sup>®</sup> posicionado para os ensaios .....	72
Figura 13 – Centro de Torneamento de CNC Romi GL240M .....	72
Figura 14 – Sistema de aquisição de dados .....	73
Figura 15 – Tela do programa para captação de sinais durante os ensaios de torneamento ....	74
Figura 16 – Programa CNC utilizado durante o ensaio prático .....	75
Figura 17 – Ligação do sensor de potência acoplado na entrada do motor de rotação do centro de torneamento CNC.....	76
Figura 18 – (a)Sensor de emissão acústico R15 $\alpha$ e (b) pré-amplificador.....	76
Figura 19 – Sensor de vibração piezelétrico Vibro Control modelo TV-100.....	77
Figura20 – Fixação dos sensores de vibração e emissão acústica junto ao porta-ferramenta..	77
Figura21 – Exemplo de gráfico de potência de um ensaio de torneamento.....	79
Figura22 – Rugosímetro MAHR MarSurf M300+RD18 .....	80
Figura 23 – Medição de rugosidade da peça máquina após usinagem.....	81
Figura 24 – Estereoscópio e lupa .....	81
Figura 25 – Pastilhas testadas no processo de torneamento da superliga VAT32 <sup>®</sup> .....	82
Figura 26 – Pastilhas testadas montadas no suporte para torneamento externo .....	83
Figura 27 – Porta-ferramenta marca Seco Tools Capto modelo B01T9032445.....	83
Figura 28 – Pastilha experimental de cerâmica Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + MgO SNGN120408 .....	84
Figura 29 – Microestrutura da pastilha experimental Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + MgO .....	85
Figura 30 - Pastilha experimental de cerâmica Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> SNGN120408 .....	87
Figura 31 – Microestrutura da pastilha experimental Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .....	87

Figura 32 – Efeito da pastilha experimental cerâmica na potência(W).....	89
Figura 33 – Efeito da velocidade de corte ( $V_c$ ) na potência (W) .....	90
Figura 34 – Efeito do avanço (f) na potência (W) .....	91
Figura 35 – Efeito da profundidade ( $a_p$ ) na potência (W) .....	92
Figura 36 – Principais efeitos para potência (W) .....	93
Figura 37 – Efeito da pastilha experimental cerâmica no desgaste de flanco .....	94
Figura 38 – Efeito da velocidade de corte ( $V_c$ ) no desgaste de flanco .....	95
Figura39 – Efeito do avanço (f) no desgaste de flanco.....	96
Figura 40 – Efeito da profundidade ( $a_p$ ) no desgaste de flanco .....	97
Figura 41 – Principais efeitos para o desgaste de flanco.....	98
Figura 42 – Efeito da pastilha experimental cerâmica na rugosidade $R_a$ .....	99
Figura 43 – Efeito da velocidade de corte ( $V_c$ ) na rugosidade $R_a$ .....	100
Figura 44 – Efeito do avanço (f) na rugosidade $R_a$ .....	101
Figura 45 – Efeito da profundidade ( $a_p$ ) na rugosidade $R_a$ .....	102
Figura 46 – Principais efeitos para rugosidade $R_a$ .....	103
Figura 47 – Efeito da pastilha experimental cerâmica na rugosidade $R_t$ .....	104
Figura 48 – Efeito da velocidade de corte ( $V_c$ ) na rugosidade $R_t$ .....	105
Figura 49 – Efeito do avanço (f) na rugosidade $R_t$ .....	106
Figura 50 – Efeito da profundidade ( $a_p$ ) na rugosidade $R_t$ .....	107
Figura 51 – Principais efeitos para rugosidade $R_t$ .....	108
Figura 52 – Efeito da pastilha experimental cerâmica na Emissão acústica.....	109
Figura 53 – Efeito da velocidade de corte ( $V_c$ ) na Emissão acústica .....	110
Figura 54 – Efeito do avanço (f) na Emissão acústica .....	111
Figura 55 – Efeito da profundidade ( $a_p$ ) na Emissão acústica .....	112
Figura 56 – Principais efeitos para Emissão acústica.....	113
Figura 57 – Efeito da pastilha experimental cerâmica na Vibração (V) .....	114
Figura 58 – Efeito da velocidade de corte ( $V_c$ ) na Vibração (V).....	115
Figura 59 – Efeito do avanço (f) na Vibração (V) .....	116
Figura 60 – Efeito da profundidade ( $a_p$ ) na Vibração (V) .....	117
Figura 61 – Principais efeitos para Vibração (V).....	118
Figura 62 – Aresta de corte da pastilha cerâmica $Al_2O_3 + MgO$ SNGN120408.....	119
Figura 63 – Cavaco gerado durante o torneamento .....	119
Figura 64 - Aresta de corte da pastilha cerâmica $Al_2O_3 + Cr_2O_3$ SNGN120408.....	120
Figura 65 – Cavaco gerado durante o torneamento .....	121

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANOM	Análise de média
ANOVA	Análise de variância
APC	Aresta Postiça de corte
$A_p$	Profundidade de corte
<i>Cut off</i>	Comprimento de amostragem
DOE	Projeto do experimento
EA	Emissão Acústica
f	Avanço
$F_c$	Força de corte
$F_f$	Força de avanço
$F_p$	Força de profundidade
GRA	Grey relational analysis ou análise relational cinza
GRC	Grey relational coeficiente ou coeficiente relational cinza
GRG	Grey relational grade ou classificação relacional cinza
$L_c$	Comprimento de corte
$R_a$	Rugosidade média
$R_t$	Rugosidade total
RSm	Desvio padrão de perfil de rugosidade
$V_b$	Desgaste de flanco da pastilha
$V_c$	Velocidade de corte (m/min)
HRC	Dureza Rockwell C

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
1.1	OBJETIVO GERAL .....	15
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	16
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>17</b>
2.1	SUPERLIGAS .....	17
<b>2.1.1</b>	<b>Usinagem de superligas .....</b>	<b>19</b>
2.2	LIGA VAT 32 <sup>®</sup> .....	25
2.3	USINAGEM .....	28
<b>2.3.1</b>	<b>Processo de torneamento .....</b>	<b>28</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Rugosidade das superfícies.....</b>	<b>29</b>
<b>2.3.3</b>	<b>Mecanismos de formação de cavaco e respectiva classificação.....</b>	<b>35</b>
<b>2.3.4</b>	<b>Fluidos de corte .....</b>	<b>40</b>
<b>2.3.5</b>	<b>Usinabilidade .....</b>	<b>44</b>
<b>2.3.6</b>	<b>Monitoramento do processo de usinagem .....</b>	<b>48</b>
2.3.6.1	Potência .....	52
2.3.6.2	Emissão acústica .....	54
2.3.6.3	Vibração .....	55
2.4	FERRAMENTAS DE CORTE .....	56
<b>2.4.1</b>	<b>Materiais para ferramentas .....</b>	<b>56</b>
2.4.1.1	Cerâmicas .....	58
2.5	MÉTODO DE TAGUCHI .....	60
2.6	ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) E MÉTODO TUKEY.....	68
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>71</b>
3.1	CORPO DE PROVA .....	71
3.2	EQUIPAMENTOS PARA OS ENSAIOS E AQUISIÇÃO DE DADOS .....	72
3.3	TRATAMENTO DE DADOS .....	78
3.4	MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE .....	80
3.5	MEDIÇÃO DE DESGASTE E ANÁLISE DOS CAVACOS .....	81
3.6	MATERIAIS DAS FERRAMENTAS E PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL ..	82
<b>3.6.1</b>	<b>Pastilha cerâmica de <math>Al_2O_3 + MgO</math>.....</b>	<b>84</b>
<b>3.6.2</b>	<b>Pastilhas cerâmicas de <math>Al_2O_3 + Cr_2O_3</math>.....</b>	<b>86</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>89</b>

4.1	ENSAIOS COM A FERRAMENTA CERÂMICA DE $Al_2O_3 + MgO$ e $Al_2O_3 + Cr_2O_3$ .....	89
4.1.1	Potência de usinagem .....	89
4.1.2	Desgaste de flanco $V_b$ /comprimento de corte $L_c$ .....	94
4.1.3	Rugosidade $R_a$ .....	98
4.1.4	Rugosidade $R_t$ .....	103
4.1.5	Emissão Acústica .....	108
4.1.6	Vibração .....	113
4.1.7	Desgastes das ferramentas e geometria dos cavacos .....	118
4.1.7.1	Pastilha experimental cerâmica $Al_2O_3+MGO$ .....	118
4.1.7.2	Pastilha experimental cerâmica $Al_2O_3 + Cr_2O_3$ .....	120
5	CONCLUSÃO .....	122
	REFERÊNCIAS .....	124

## 1 INTRODUÇÃO

A utilização de superligas pelas indústrias aeronáutica, aeroespacial, automobilística e petroquímica, vem sendo limitada pelas dificuldades impostas pelos processos de fabricação. Atualmente o desenvolvimento de aeronaves, satélites, tubulações de petróleo, meios químicos passam pela necessidade de utilização de superligas para que essas indústrias alcancem êxito no mercado internacional. Essas ligas apresentam dificuldades na sua usinagem fazendo-se necessária uma seleção criteriosa dos processos, parâmetros e escolha de ferramentas de corte a serem utilizadas.

Os problemas relacionados às emissões de poluentes para a atmosfera vêm sendo reconhecidos e controlados por diversas legislações pelo mundo há alguns anos. As consequências em torno dos altos índices de poluição estão ligadas aos eventos de degradação do meio ambiente e de complicações na saúde da sociedade. Não diferente de qualquer emissor, a frota de veículos tem sido cada vez mais observada e regulada nas questões ambientais, devido sua alta disparidade em crescimento. O relatório da UNEA (Assembleia Ambiental das Nações Unidas) diz que, se fossem adotados padrões nos combustíveis e projetos automobilísticos, a frota de transporte seria capaz de reduzir cerca de 90% de sua contribuição na emissão de poluentes (UNEA, 2016). Os motores de combustão interna utilizados nos automóveis geram a energia mecânica através da combustão de combustíveis tais como etanol, gasolina, gás natural ou outros. O projeto de um motor *flex*, que ganhou grande número das preferências dos brasileiros, trouxe a comodidade de deixar opcional o uso da gasolina e/ou etanol. A Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente 418/2009 (CONAMA, 2009) estabelece limites da emissão de monóxido de carbono e hidrocarbonetos para grupos de veículos fabricados em diferentes anos, usando diferentes tipos de combustíveis. Esta também, apresenta padrões para serem seguidos em procedimentos de análises de gases poluentes para eventual aprovação ou não de um veículo. As normas ambientais estão cada vez mais exigentes quanto à produção de motores de combustão interna. A cada geração das normas, os materiais utilizados na confecção dos componentes dos motores têm sido cada vez mais exigidos em termos de temperaturas e cargas mecânicas crescentes. No decorrer dos anos, Ligas especiais com propriedades diferenciadas como resistentes ao calor e a corrosão foram testados. As Ligas especiais resistentes ao calor tem o ferro e o níquel como base, mas possuem cromo e outros elementos também, a fim de suportar solicitações mecânicas e térmicas extremas. São aplicadas nas indústrias alimentícia, química, petrolífera, de fundição de alumínio e de tratamento térmico. As Ligas especiais



resistentes à corrosão também tem ferro e níquel como base. Porém, para obter propriedades superiores às dos aços e, conseqüentemente, suportar solicitações mecânicas e corrosivas extremas, também utilizam cromo e outros elementos. Como resultado esses materiais são utilizados nas indústrias eletroeletrônica, petroquímica e química. A aplicação em válvulas automotivas para motores de combustão interna de alto desempenho compreende aplicações em temperaturas da ordem de 700-800°C com cargas de combustão da ordem de 220 Bar. Os assentos de válvula em geral apresentam elevada dureza a quente (~35HRC a 700°C) e são os principais responsáveis pelo desgaste da região do assento das válvulas. Atualmente para atender esta necessidade desenvolveu-se o VAT32<sup>®</sup>, uma superliga de alta resistência à corrosão, alta resistência à oxidação e ao desgaste que mantém a dureza no trabalho a altas temperaturas. (FARINA et al, 2013).

Com o estudo da usinabilidade desta nova liga, a VAT 32<sup>®</sup> foram desenvolvidas ferramentas cerâmicas experimentais (sendo Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+MgO e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), para serem testadas na operação de torneamento, que foram desenvolvidas pelo grupo de pesquisa em Usinagem do Departamento de Materiais e Tecnologia (DMT). As principais características das ferramentas cerâmicas são: alta dureza à quente (1600°C); não reação química com o aço; maior vida da ferramenta; uso com alta velocidade de corte; não formação de aresta postiça; baixa condutividade térmica. Com isso, podendo ser uma solução para otimizar o processo de usinagem das superligas, utilizando ferramentas cerâmicas, que apresentam um bom desempenho em altas velocidades e boa resistência a altas temperaturas.

O trabalho baseou-se em análise do desempenho destas novas ferramentas cerâmicas na usinagem da liga VAT 32<sup>®</sup>. Durante os testes práticos (torneamento cilíndrico externo) foi possível verificar a influência dos parâmetros de corte, velocidade de corte ( $v_c$ ), avanço ( $f$ ) e profundidade de corte ( $a_p$ ) sobre as variáveis potência de corte, emissão acústica, vibração e rugosidades  $R_a$  e  $R_t$ . A análise da otimização do processo de usinagem por torneamento da superliga VAT 32<sup>®</sup> quebrará o paradigma quanto a usinagem de superligas com ferramentas cerâmicas.

## 1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho foi a análise do desempenho de ferramentas de corte experimentais de cerâmica (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + MgO e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) no torneamento cilíndrico externo da superliga VAT 32<sup>®</sup>.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Análise da influência dos parâmetros de corte (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte) sobre as respostas potência de usinagem, desgaste da ferramenta, emissão acústica (EA), vibração e rugosidade  $R_a$  e  $R_t$ ;
- Análise do desempenho de ferramentas de corte experimentais de cerâmicas ( $Al_2O_3 + MgO$  e  $Al_2O_3 + Cr_2O_3$ ) no torneamento cilíndrico externo sem a utilização de fluido de corte;
- Avaliação dos mecanismos de desgaste para as ferramentas de corte experimentais de cerâmicas;
- Avaliar os tipos e formatos dos cavacos gerados pelo processo de usinagem da liga VAT 32<sup>®</sup> com os parâmetros de corte propostos;
- Avaliação do processo de torneamento utilizando-se as ferramentas de corte experimentais de cerâmica, utilizando o método de Taguchi.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica apresenta vários pontos relevantes para a conceituação dos fatores que influenciam na usinabilidade de superligas, tais como: o processo de usinagem por torneamento, parâmetros de corte, fluidos de corte e análise dos fatores que influenciam no monitoramento do processo de usinagem, ferramentas de corte de cerâmica ( $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$ ), o material usinado (superliga VAT 32<sup>®</sup>) e a análise do processo de usinagem por torneamento utilizando o método de Taguchi.

### 2.1 SUPERLIGAS

As superligas são ligas metálicas a base de níquel, ferro-níquel ou cobalto para uso em temperaturas superiores a 540°C. Elas podem ser divididas, de acordo com o elemento principal de composição, nos seguintes grupos (DONACHIE; DONACHIE, 2002):

- Superligas de Fe-Ni (densidade de 7,9 a 8,3 g/cm<sup>3</sup>);
- Superligas de Co (densidade de 8,3 a 9,4g/cm<sup>3</sup>);
- Superligas de Ni (densidade de 7,8 a 8,9 g/cm<sup>3</sup>);
- Superligas de Ni e Al contendo Ir e Rh (densidade de 8,5 a 12,4g/cm<sup>3</sup>).

Segundo a ASM International (2005) são diversos os usos de superligas, sendo elas aplicadas na fabricação de turbinas de aviões, turbinas para usinas geradoras de energia, no processamento de metais em ferramentas de trabalho a quente, aplicações médicas, em veículos espaciais, na indústria petroquímica e química ou em qualquer aplicação que exija resistência ao calor e/ou a corrosão. Ainda de acordo com ASM International (2005) classificam-se as superligas em três grupos, as superligas de Fe-Ni, as superligas de Ni e as superligas de Co, de acordo com a composição química, conforme o Quadro 1.

Quadro 1 – Principais elementos dos grupos de superligas.

Superligas de Fe-Ni										
Elemento	Ni	Fe	Ti	Al	Mo	Co	Cr	Nb	W	C
% mássica	9 - 44	29 - 67	0 - 3	0,3 - 1	0 - 3	0 - 20	0 - 25	0 - 5	0 - 2,5	< 0,35

Superligas de Co										
Elemento	Co	Ni	Ti	Al	Mo	Fe	Cr	Nb	W	C
% mássica	20 - 62	0 - 35	0 - 3	0 - 0,2	0 - 10	0 - 21	19 - 30	0 - 4	0 - 15	0 - 1

Superligas de Ni										
Elemento	Ni	Ti	Al	Mo	Co	Cr	Nb	W	C	
% mássica	37 - 79,5	0 - 5	0 - 6	0 - 28	0 - 20	5 - 22	0 - 5,1	0 - 15	< 0,30	

Fonte: Adaptado de ASM International (2005).

Dentro de classificação de superligas, Thellaputta, Chandra e Rao (2017) traz ainda uma quarta classificação, colocando a liga Ti-6Al-4V como uma superliga a base de titânio.

Ainda podem ser encontrados nas superligas elementos como Zr (Zircônio), La (Lantânio), Mn (Manganês), Si (Silício), Cu (Cobre), B (Boro), Ce (Cério), Mg (Magnésio), V (Vanádio), Ta (Tântalo) e Hf (Háfio).

De acordo com Silva e Mei (2006), as superligas estão entre os materiais de metalurgia mais complexas, mas que, de forma geral, são constituídas por uma matriz de estrutura CFC ( $\gamma$ ) e fases secundárias, entre elas carbonetos da fase  $\gamma'$ , que são estruturas com rede CFC do tipo  $A_3B$ , tipicamente  $Ni_3(Al,Ti)$ , e outras fases como  $\sigma$ ,  $\eta$ , etc.

As notáveis propriedades mecânicas, principalmente quando em condições de trabalho a altas temperaturas, surgem devido ao endurecimento por precipitação e o endurecimento por solução sólida, onde a principal função dos carbonetos é estabilizar os contornos de grão.

Superligas à base de Fe-Ni surgiram como desenvolvimento dos aços inoxidáveis austeníticos. Parte do Ni, responsável pela estabilização da austenita a elevadas temperaturas, é substituída por ferro, o que fazem destas ligas aptas a trabalharem em faixas inferiores de temperatura, entre 650-815 °C. Os teores de cromo são balanceados para que a liga apresente resistência à oxidação e/ou corrosão, enquanto que teores de nióbio e titânio são utilizados para evitar a formação de carbonetos de cromo nos contornos de grão. O endurecimento ocorre por precipitação de carbonetos e da fase  $\gamma'$  (DONACHIE e DONACHIE, 2002; SILVA e MEI, 2006).

As superligas à base de níquel têm como principais características a resistência a altas temperaturas, resistência à corrosão e oxidação, à fadiga e fase estável. O processo de endurecimento pode ser por solução sólida da fase  $\gamma$  (fase austenítica), por precipitação da

fase  $\gamma'$  (fase  $\text{Ni}_3(\text{Al,Ti})$ ) e por dispersão das partículas de carbonetos. A resistência à corrosão e oxidação é alcançada graças ao cromo e alumínio na liga, que formam uma película protetora de óxido de cromo ou óxido de alumínio imediatamente quando entram em contato com o oxigênio do ambiente (EZUGWU, WANG e MACHADO, 1998; DONACHIE; DONACHIE, 2002; SILVA e MEI, 2006).

As superligas de Co para aplicações a elevadas temperaturas foram desenvolvidas durante a Segunda Guerra Mundial, para a construção das primeiras turbinas. Porém, o uso da superliga de Co em turbinas foi interrompido com o advento da fusão à vácuo de superligas à base de níquel endurecidas por precipitação de elementos de liga altamente reativos, tais como alumínio e titânio, pois suas propriedades eram muito inferiores a essas novas ligas. Sua alta soldabilidade garante ainda o uso das ligas de Co em várias aplicações, também em função da sua alta resistência a corrosão em altas temperaturas graças aos altos teores de cromo, como em partes estacionárias de turbinas, fornos para tratamento térmico e em ligas com elevada resistência ao desgaste, como o Stellite® (DONACHIE; DONACHIE, 2002; SILVA e MEI, 2006).

### **2.1.1 Usinagem de superligas**

Na literatura existem poucas informações sobre usinagem da liga VAT 32®. Nos estudos foram apresentados os comportamentos de diferentes materiais para ferramentas de corte e/ou estudos para o entendimento da influência dos parâmetros de corte na usinagem das superligas.

De acordo com Donachie e Donachie (2002), a usinagem de superligas difere da usinagem de aços carbono tendo um custo maior devido, principalmente, à utilização de baixas velocidades de corte, de 5 a 10% das empregadas nos aços. Além do mais, não são só os custos e as dificuldades quanto à usinabilidade que importam quando se está trabalhando com superligas, pois as condições da superfície das peças depois da usinagem desempenham um importante papel em suas propriedades mecânicas, principalmente sob condições cíclicas.

As superligas possuem muitas propriedades que acabam dificultando e aumentando os custos de usinagem, entre eles (EZUGWU, WANG e MACHADO, 1998; DONACHIE; DONACHIE, 2002):

- Retenção de resistência a altas temperaturas, onde aços costumam ficar mais maleáveis;

- Possuem alta resistência dinâmica ao cisalhamento;
- Possuem carbonetos duros em sua microestrutura, o que tornam as superligas abrasivas causando alto desgaste das ferramentas por abrasão;
- Durante a usinagem, sofrem processo de endurecimento, fator que contribui para o aparecimento de desgaste de entalhe na ponta da ferramenta e/ou na linha da profundidade de corte;
- Baixa condutividade térmica que influencia na vida das ferramentas de corte empregadas, pois estas trabalham em temperaturas mais elevadas e não conduzem o calor gerado para a peça e cavacos;
- Durante a usinagem, formam cavacos longos prejudiciais ao processo e a ferramenta, que pode apresentar desgaste de cratera;
- Adesão da liga de níquel na ferramenta de corte causando graves entalhes e lascamentos na ferramenta;

Bushlya Zhou, e Ståhl(2012) e Thellaputta, Chandra e Rao (2017) complementam com outra propriedade como a afinidade química das superligas com os materiais das ferramentas de corte, o que causa desgaste por difusão, e a ocorrência de maiores esforços e temperaturas durante a usinagem, o que auxilia na degradação das ferramentas e dificulta ainda mais a usinagem das superligas.

De acordo com Ezugwu, Wang e Machado(1998), os fatores que governam a usinabilidade das ligas de níquel incluem a vida da ferramenta, taxa de remoção de material limitada, forças de corte e potência consumida, acabamento superficial e integridade dos componentes usinados, formato dos cavacos, alta relação resistência/dureza dos materiais trabalhados, sendo os mais importantes a vida da ferramenta e a qualidade superficial das peças usinadas. O entalhe, primariamente na região da profundidade de corte, é o modo de falha dominante devido a camada encruada de material, adesão entre cavaco e ferramenta e o desgaste de atrito. Desgaste de flanco e lascamento são outros fatores determinantes no tempo de vida das ferramentas causados por desgaste por difusão, desgaste por abrasão, desgaste por atrito e fadiga devido a carga térmica e mecânica nas ferramentas, podendo agir sozinhas ou em conjunto. Os autores afirmam que a aplicação de fluido à altas pressões causam uma redução no contato cavaco-ferramenta o que aumenta tensões na aresta das ferramentas,

levando a diminuição da vida. A usinabilidade é afetada pela geometria da ferramenta e ferramentas quadradas ou redondas terão um desempenho melhor que pastilhas com formato rômbo. Os autores identificam potencial para usinagem de superligas de níquel as ferramentas modernas de cerâmica, como as cerâmicas mistas, SiAlON e alumina reforçada com whiskers de SiC, as de metal duro revestido com múltiplas camadas e pastilhas de cBN.

De acordo com Sarikaya e Güllü (2015), a usinagem de superligas e materiais de engenharia avançados é mais difícil do que o processamento de aço convencional, definindo estes materiais como materiais de difícil corte ou de difícil usinagem. Elementos comuns em superligas, tais como Co, Ni, Cr e Ti provêm uma alta resistência mecânica e resistência à corrosão, propriedades estas que dificultam a usinagem do material. Um dos maiores problemas é a geração de calor na região de corte, onde demanda-se mais energia, então altas temperaturas ocorrem durante o processo de deformação nas interfaces ferramenta-cavaco e ferramenta-peça. A baixa condutividade térmica das superligas também contribui para o aparecimento deste fenômeno. Dois problemas na usinagem de superligas acontecem. Primeiro problema, o desgaste excessivo da ferramenta e conseqüentemente baixos tempos de vida. Segundo problema, a qualidade superficial baixa da superfície usinada devido à deformação plástica e geração de calor. A otimização destes dois critérios é de suma importância para a alta eficiência da usinagem de superligas. De acordo com Ezugwu (2007) o desgaste de entalhe é o modo de falha de ferramentas mais comum para materiais de difícil usinagem.

De acordo com Trent e Wright (2000), em termos de corte pode-se comparar a usinagem de superligas com o aço inoxidável austenítico, apesar da sua usinabilidade ser menor. As fases abrasivas que as superligas contêm e que diferem em quantidade de umas para as outras, leva a criação de desgaste abrasivo e de adesão nas ferramentas de corte e ao risco de deformação plástica. Os autores recomendam para a usinagem do Inconel 718 as ferramentas de cerâmica ou de metal duro, usando-se na cerâmica altas velocidades de corte (200 a 300 m/min) e baixos valores teóricos de espessura de cavaco ( $h_{ch} < 0,15\text{mm}$ ) e para o metal duro velocidade baixas (30 a 60 m/min) e espessuras relativas altas (entre 0,2 e 0,3 mm). Isto evitará a usinagem de material que foi deformado e encruado anteriormente. No Quadro 2 são demonstrados alguns dados de usinabilidade de algumas superligas.

O desafio das pesquisas em superligas é encontrar as condições de usinagem, explorando diferentes velocidades de corte, avanços e profundidades para garantir o dimensional e acabamento superficial. Encontrar materiais adequados para ferramentas de

corte é outro dos focos em pesquisas de usinagem envolvendo as superligas. A seguir serão apresentados estudos de usinagem de superligas encontrados na literatura.

Quadro 2 – Dados da usinabilidade de algumas superligas.

Liga	Usinabilidade	Liga	Usinabilidade
IN - 738	10	NIMONIC alloy 105	10
UDIMET 500	12	INCONEL alloy 751	14
IN - 939	12	INCONEL alloy C-276	18
WASPALOY	16	INCONEL alloy 625	24
INCONEL alloy X-750	14	INCONEL alloy 601	20
INCONEL alloy 718	16	HASTELLOY C	20

Fonte: Adaptado de Trent e Wright (2000).

Bushlya, Zhou, e Ståhl (2012) estudaram a usinagem do Inconel 718 durante torneamento de alta velocidade com ferramentas de PCBN recobertas e não recobertas, observando aspectos como forças de corte, vida da ferramenta, mecanismos de desgaste e integridade superficial das peças. As condições de usinagem testadas foram velocidades de corte de 250, 300 e 350 m/min, avanços de 0,1; 0,15 e 0,2 mm/rev e profundidade de corte de 0,3 mm, com utilização de fluido de corte semissintético em abundância. Apesar de se esperar menores forças de corte nas ferramentas revestidas devido à redução dos coeficientes de atrito entre peça e ferramenta, os autores encontraram esforços 10% maiores nas ferramentas revestidas do que nas de PCBN sem revestimento justificadas pelo aumento do raio de ponta causado pelo revestimento de TiN. Maiores rugosidades da peça também foram encontradas para a ferramenta revestida. Os autores concluíram que as vantagens do revestimento da ferramenta é a possibilidade de uma velocidade de corte máxima acima de 300 m/min, porém não há benefícios em termos de vida da ferramenta. O estudo mostrou que a vida da ferramenta foi muito sensível com relação à velocidade de corte utilizada tendo uma redução de vida de 250% quando se aumentou  $V_c$  de 250 m/min para 350 m/min.

Fan et al. (2013) investigaram a qualidade superficial do Inconel 718 no torneamento a seco com pastilha de metal duro revestida de TiAlN pelo processo PVD, no qual foram utilizadas as velocidades de corte de 25; 35 e 45 m/min, avanço de 0,12 mm/rev e profundidade de corte de 1mm. Na velocidade de corte de 25 m/min ocorreu a formação de aresta postiça de corte (APC) enquanto que usinando com 45 m/min resultou-se em altos desgastes da ferramenta causados por alta temperatura e mecanismo de desgaste por difusão.



No corte com 35 m/min a geração de uma camada mais macia de óxidos serviu como uma camada de lubrificação que fez com que o desgaste químico e abrasivo alcançasse um equilíbrio, inibindo a formação de APC e adesão a alta temperatura, reduzindo efeitos negativos na qualidade superficial.

De acordo com o levantamento feito por Bushlya et al. (2013b), a vida e desgaste das ferramentas são quesitos essenciais para análise de desempenho de diferentes materiais para as ferramentas de corte. No estudo mencionado analisaram o desempenho de ferramentas cerâmicas de alumina reforçadas com *whiskers* de SiC no torneamento a altas velocidades do Inconel 718 (dureza de 45 HRC), observando a vida da ferramenta e os mecanismos de desgastes envolvidos. De acordo com os autores, as ferramentas de alumina reforçadas por *whiskers* (SiC) possuem altas propriedades mecânicas devido ao reforço da matriz  $Al_2O_3$  pelos *whiskers* de carbonetos de silício. As ferramentas eram da geometria D com raio de ponta de 1,2mm e chanfro de  $0,1 \times 20^\circ$ . Os testes foram realizados utilizando-se velocidades de corte de 200; 250 e 300 m/min, avanços entre 0,11 e 0,22 mm/rev e profundidade de corte de 0,22; 0,31 e 0,53mm com uso de fluido de corte e usinado a seco. O desgaste mais comum encontrado foi o desgaste de entalhe, ocorrendo também a formação de aresta postiça, mesmo a altas velocidades de corte. Ocorreu difusão de elementos como Ni, Fe e Cr nos *whiskers* de SiC levando-os a degradação parcial e total. Outras avarias detectadas foram o aparecimento de trincas e a deformação plástica da ferramenta em condições de maiores cargas térmicas e mecânicas.

Na pesquisa de Bushlya et al. (2013a), o torneamento longitudinal e contínuo de Inconel 718 foi estudado, analisando-se força de corte, qualidade superficial, vida da ferramenta e mecanismos de desgaste da ferramenta. O material foi endurecido por processo de solubilização e envelhecimento, chegando a uma dureza de 45 HRC. As ferramentas testadas foram de PcBN revestida por TiN, espessura de  $2\mu m$ , PCBN sem revestimento, ambas com concentração de cBN de aproximadamente 50% no volume, e ferramentas cerâmicas de  $Al_2O_3$  reforçadas com *whiskers* de SiC. Utilizou-se as velocidades de corte de 250; 300 e 350 m/min, os avanços de 0,1; 0,15 e 0,2 mm/rev, profundidade de corte de 0,3 mm em torneamento com fluido de corte semissintético com concentração de 8%, a uma vazão de 40 L/min. A força de corte obtida pela ferramenta cerâmica foi 40% maior que as obtidas pelas ferramentas de PcBN, sendo que as ferramentas com revestimento apresentaram forças 10% maior que as sem revestimento. Esse comportamento foi atribuído a diferenças na microgeometria das ferramentas, onde raios de ponta menores tiveram menores forças de corte. Fenômeno semelhante ocorreu na qualidade superficial das peças onde a ferramenta de

PcBN sem revestimento e de menor raio teve menores valores de  $R_a$ . Com relação a vida das ferramentas, a pastilha de PcBN recoberta com TiN teve melhor desempenho que as outras na velocidade de corte de 250 m/min, porém nas velocidades superiores, seu desempenho cai devido à alta temperatura na região de corte devido a oxidação do titânio em  $TiO_2$ . A vida das ferramentas de PCBN reduziram-se muito quando houve aumento da velocidade de corte de 250 para 350 m/min devido ao desgaste por difusão, por mecanismo químico, devido a afinidade dos elementos da superliga como Cr, Fe, Ni, Nb e Mo.

Madariaga, Esnaola e Fernandez(2014) submeteram o Inconel 718 ao processo de faceamento com ferramenta de metal duro recoberta com TiC- $Al_2O_3$ -TiN com velocidade de corte de 30 e 70 m/min, avanço de 0,15 e 0,25 mm/rev e profundidade de corte de 0,15mm. A análise das forças passivas, de avanço e de corte mostraram que essas respostas foram mais sensíveis a fatores geométricos da ferramenta, ligados a carga mecânica, do que à velocidade de corte, ligada a condições térmicas.

No trabalho de Zhuang et al. (2014), um modelo de previsão de desgaste de entalhe para ferramenta de corte redonda de cerâmica à base de SiAlON foi proposto para torneamento de Inconel 718. A falha por entalhe é o mecanismo mais comum de falha em ferramentas cerâmicas redondas causadas principalmente pela formação de uma camada endurecida por encruamento no passe anterior ou em uma operação anterior. Essa camada encruada é a causa do aparecimento do entalhe. Os experimentos consistiram no torneamento com velocidade de corte de 200 m/min, avanço de 0,15 mm/rev e profundidade de corte de 0,15mm. Os autores concluíram que os principais desgastes de ferramenta que ocorrem na usinagem de Inconel 718 são o desgaste de flanco e de entalhe. Os autores comprovaram que a espessura da camada endurecida por encruamento tem relação com o aparecimento de entalhe nas ferramentas redondas de SiAlON.

O torneamento com fluido de corte a alta pressão foi pesquisado por Sørby e Vagnorius (2018). Os autores usinaram Inconel 625 com pastilhas cerâmicas de SiAlON com parâmetros de corte de 200 e 300 m/min de velocidade de corte, avanço de 0,1 mm/rev, profundidade de corte de 1mm, pressões de fluido de corte de 0,7; 5; 10 e 15 MPa. Apesar do uso de pressões altas auxiliar na quebra de cavaco, a mudança de pressões não alterou o tempo de vida das ferramentas. O desgaste de flanco foi o mais comum e o desgaste de entalhe, comum na usinagem de superligas, não foi significativo.

## 2.2 LIGA VAT 32®

O VAT 32® é uma liga classificada como superliga de Fe-Ni, devido aos seus teores de níquel e ferro. Foi desenvolvida pela empresa Villares Metals através de modelos termodinâmicos e vem para o mercado com o intuito de substituir a liga UNS N07751 (VAT 751®, INCONEL 751) na fabricação de válvulas de motores a diesel de alto desempenho (FARINA, LIBERTO e BARBOSA, 2013a).

Ainda de acordo com Farina,Liberto e Barbosa (2013b), a liga UNS N07751 apresenta um alto teor de níquel e cromo, aliada com altos teores de alumínio e titânio, o que após tratamentos térmicos de envelhecimento e recozimento de solubilização, proporciona uma dispersão fina de partículas de  $\gamma'$ , proporcionando excelente resistência mecânica a temperaturas mais altas associadas a altas resistências à corrosão, oxidação, fadiga e deformação por fluência. Porém, devido à matriz menos dura, a liga apresenta baixa resistência ao desgaste. No Quadro 3, encontram-se as composições da liga UNS N07751 e do VAT 32®.

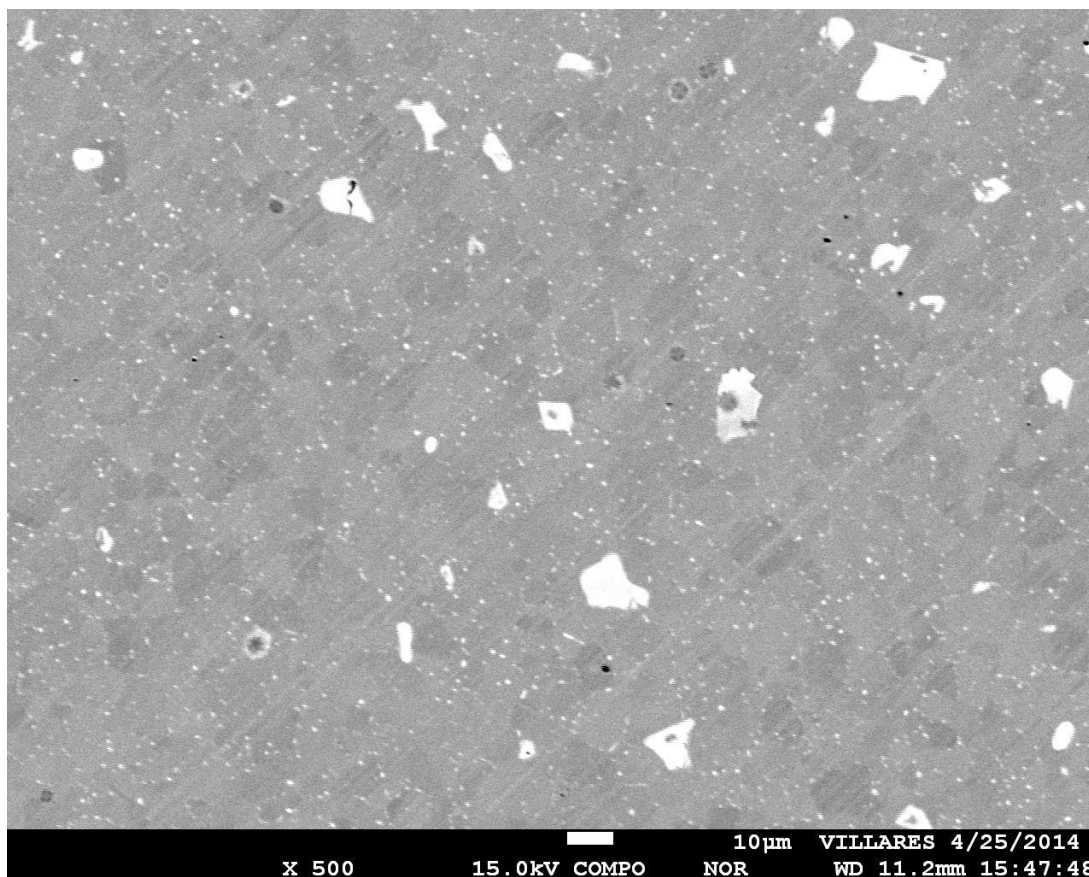
Quadro 3 – Composição química nominal das ligas UNS N07751 e do VAT 32®, em porcentagem mássica.

Liga	C	Si	Mn	Ni	Nb	Al	Ti	Cr	Fe
UNS N07751	0,02	0,20	0,30	Balanço	1,00	1,20	2,30	15,50	7,00
VAT 32®	0,30	0,20	0,30	32,00	3,90	1,80	2,00	15,50	Balanço

Fonte: Farina, Liberto e Barbosa, (2013a).

Pode-se observar que, diferentemente da liga UNS N07751, a VAT 32® apresenta maiores teores de nióbio e menores teores de níquel. A adição de nióbio e carbono teve por objetivo a formação de precipitados eutéticos de NbC, que aumentam a resistência mecânica e a resistência ao desgaste. A adição de nióbio também favorece o aumento da resistência mecânica da matriz pela precipitação de uma fina dispersão de fases  $\gamma'$  ( $\text{Ni}_3(\text{Al,Ti})$ ) e  $\gamma''$  ( $\text{Ni}_3\text{Nb}$ ) durante o tratamento térmico de envelhecimento. A formação dessas estruturas traz uma dificuldade maior na usinagem desta liga, pois são elementos tão duros que poderiam ser utilizados como ferramentas de corte, como mostrado por Uhlmann, Hinzmann e Kropidlowksi (2018). Na Figura 1 encontra-se a microestrutura do VAT 32® revelada por ataque químico Glyceregia e microscopia Eletrônica de varredura (MEV).

Figura 1 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV) do VAT 32<sup>®</sup>, ampliação de 500X.



Fonte: Cedido por Villares Metals (2014).

Os pontos em branco são os precipitados de NbC, no qual, através de uma análise da imagem pelo *software* Image J, apresenta proporção volumétrica de 2,5% no VAT 32<sup>®</sup>, enquanto, de acordo com Farina, Liberto e Barbosa (2013a), a proporção do carboneto de nióbio na liga UNS N07751 é de aproximadamente 0,25%.

Conforme Farina (2013), foi realizado uma comparação de desempenho entre o VAT 32<sup>®</sup> e a liga UNS N07751 nos ensaios de fluência e ruptura, ensaio de tração a quente, ensaio de fadiga mecânica por flexão rotativa a quente, ensaio Charpy de entalhe “V”, ensaio de desgaste abrasivo, ensaio de dureza a quente, testes de oxidação e de trabalhabilidade a quente. As propriedades obtidas podem ser vistas no Quadro 4.

Quadro 4 – Propriedades da liga VAT 32® e UNS N07751.

TESTE	Liga	
	VAT 32®	UNS N07751
Ruptura sob tensão [800°C e carga de 100Mpa]	1235h	1240h
Limite de escoamento [800°C]	473 MPa	372 MPa
Resistência à fadiga [750°C e 10 <sup>8</sup> ciclos]	325 MPa	306 MPa
Impacto Charpy "V"	52 J	-
Taxa de desgaste abrasivo <sup>-1</sup>	12,46 x 10 <sup>-6</sup>	9,21 x 10 <sup>-6</sup>
Dureza a quente [760°C]	396 HV	270 HV
Teste de oxidação [ganho mássico 400 h a 800°C]	0,250 mg/cm <sup>2</sup>	0,542 mg/cm <sup>2</sup>
Trabalhabilidade a quente [redução em área]	85,70%	85,30%

Fonte: Adaptado de Farina, Liberto e Barbosa (2013b).

Esta liga foi projetada como o objetivo de ser equivalente ou superior a Inconel 751<sup>®</sup> nas propriedades de resistência a altas temperatura e abrasão. Devido a essa elevada resistência a abrasão é possível eliminar algumas etapas do processamento das válvulas, como a etapa de *hard facing*, ou seja, não é necessário a deposição de *Stellite* nas válvulas, e se torna uma vantagem econômica VILLARES METAL, 2007 apud PASPARDELLI, 2011).

A superliga VAT 32<sup>®</sup> possui, nas propriedades mecânicas ensaiadas, um desempenho equivalente ou superior em relação à liga UNS N07751, sendo que, comparando-se a resistência à abrasão, o desempenho do VAT 32<sup>®</sup> é superior e associado com uma alta dureza a quente entre 700°C e 800°C.

A VAT 32<sup>®</sup> pode ser aplicada em substituição a UNS N07751 apresentando vantagens econômicas devido à redução da quantidade de níquel e redução também de quatro etapas de processo produtivo quando comparada à liga UNS N07751.

Segundo Farina; Liberto e Barbosa (2013) a liga VAT 32<sup>®</sup> foi desenvolvida com o objetivo de evitar, em algumas aplicações, a deposição de *Stellite* para aumentar a resistência ao desgaste, apresentando dureza entre 350 HV10 e 375 HV10 para temperaturas entre 700°C e 800°C, associada com uma elevada fração volumétrica de carbonetos do tipo NbC. Ao se evitar a deposição de *Stellite*, ao menos quatro etapas de processamento da válvula são eliminadas: a abertura do canal de deposição, a deposição do cordão de *Stellite*, a usinagem do cordão de *Stellite* e a inspeção do cordão de *Stellite*.

## 2.3 USINAGEM

Segundo Ferraresi (1982), podem-se separar as operações com metais em duas classes: as operações de usinagem e as operações de conformação. Ambas as operações têm como objetivo conferir a peça forma, dimensões ou acabamento, porém enquanto nos processos de conformação os objetivos são alcançados pela deformação plástica, os processos de usinagem dão as características através da produção de cavaco. O autor define cavaco como porção do material da peça, retirada pela ferramenta, com forma geométrica irregular.

A usinagem é definida por Machado et al. (2011) como operação que ao conferir à peça forma, dimensões e acabamento, produza cavaco. O cavaco é definido como porção do material da peça retirada pela ferramenta e caracterizada por apresentar forma geométrica irregular.

Dentre os processos de usinagem podem-se citar os seguintes processos de:

- Afição;
- Aplainamento;
- Brochamento;
- Fresamento;
- Furação;
- Brunimento;
- Retificação;
- Torneamento;
- Mandrilamento, etc.

### 2.3.1 Processo de torneamento

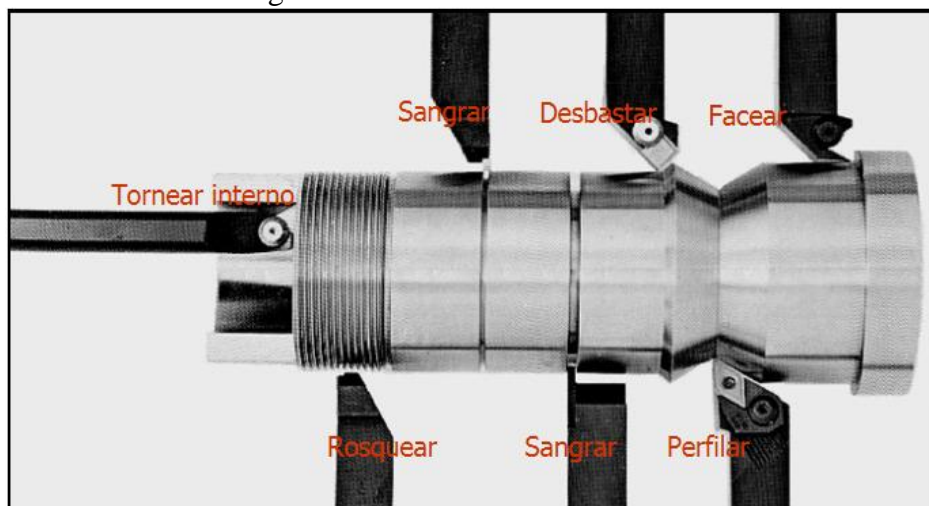
O torneamento gera perfis arredondados e cilíndricos com uma ferramenta de aresta única (monocortante) e geometria definida. A definição de torneamento é aquela que diz que a ferramenta é estacionária e a peça gira. A operação de torneamento é o processo mais comum para usinagem. O torneamento pode ser dividido em diversas aplicações básicas (torneamento longitudinal, faceamento ou perfilamento), entre outras operações, exigindo tipos específicos de ferramentas, dados de corte e programação para a operação ser realizada da maneira mais eficiente possível em máquina com controle numérico.

De acordo com Trent e Wright (2011), a peça é presa na placa torno que rotaciona, enquanto uma ferramenta de corte, rigidamente presa a um suporte, é movida com taxa constante na direção do eixo axial da barra, cortando-se uma camada de metal (cavaco) para formar um cilindro ou uma superfície com perfil mais complexo. Os autores definem ainda como velocidade de corte ( $V_c$ ) a taxa na qual a superfície não cortada da peça passa a aresta de corte da ferramenta, expressa em m/min. O avanço ( $f$ ) é a distância movida pela ferramenta na direção axial a cada rotação da peça, expressa geralmente em mm/revolução. A profundidade de usinagem ( $a_p$ ) é a espessura de material removida da barra, medida na direção radial.

Segundo a ABNT NBR 6175(2015) Usinagem – Processos mecânicos, torneamento é o processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes. Para isso, a peça rotaciona em torno do eixo principal de rotação da máquina e a ferramenta se desloca simultaneamente segundo uma trajetória coplanar com o referido eixo.

De acordo com Machado et al. (2011), a operação de torneamento é uma operação com ferramenta de geometria definida que pode ser dividida em torneamento cilíndrico externo, torneamento cilíndrico interno, torneamento cônico externo e interno. Na Figura 2 são apresentadas algumas operações de torneamento.

Figura 2- Processos de torneamento.



Fonte: Adaptado do Catálogo JS Ferramentas (2009).

### 2.3.2 Rugosidade

As superfícies dos componentes mecânicos devem ser adequadas ao tipo de função que exercem. Por esse motivo, a importância do estudo do acabamento superficial aumenta à medida que crescem as exigências do projeto.

As superfícies dos componentes deslizantes, como o eixo de um mancal, devem ser lisas para que o atrito seja o menor possível. Já as exigências de acabamento das superfícies externas da tampa e da base do mancal são menores. A produção das superfícies lisas exige, em geral, custo de fabricação mais elevado.

Para Machado *et al.* (2011), os diferentes processos de fabricação de componentes mecânicos determinam acabamentos diversos nas suas superfícies. As superfícies, por mais perfeitas que sejam, apresentam irregularidades. E essas irregularidades compreendem dois grupos de erros: erros macrogeométricos e erros microgeométricos.

Erros macrogeométricos são os erros de forma, verificáveis por meio de instrumentos convencionais de medição, como micrômetros, relógios comparadores, projetores de perfil, etc. Entre esses erros, incluem-se divergências de ondulações, ovalização, retineidade, planicidade, circularidade etc.

Durante a usinagem, as principais causas dos erros macrogeométricos são:

- defeitos em guias de máquinas-ferramenta;
- desvios da máquina ou da peça;
- fixação errada da peça;
- distorção devida ao tratamento térmico.

Os erros microgeométricos são os erros conhecidos como rugosidade.

### Rugosidade

É o conjunto de irregularidades, isto é, pequenas saliências e reentrâncias que caracterizam uma superfície. Essas irregularidades podem ser avaliadas com aparelhos eletrônicos, a exemplo do rugosímetro. A rugosidade desempenha um papel importante no comportamento dos componentes mecânicos. Ela influi na:

- qualidade de deslizamento;
- resistência ao desgaste;



- possibilidade de ajuste do acoplamento forçado;
- resistência oferecida pela superfície ao escoamento de fluidos e lubrificantes;
- qualidade de aderência que a estrutura oferece às camadas protetoras;
- resistência à corrosão e à fadiga;
- vedação;
- aparência.

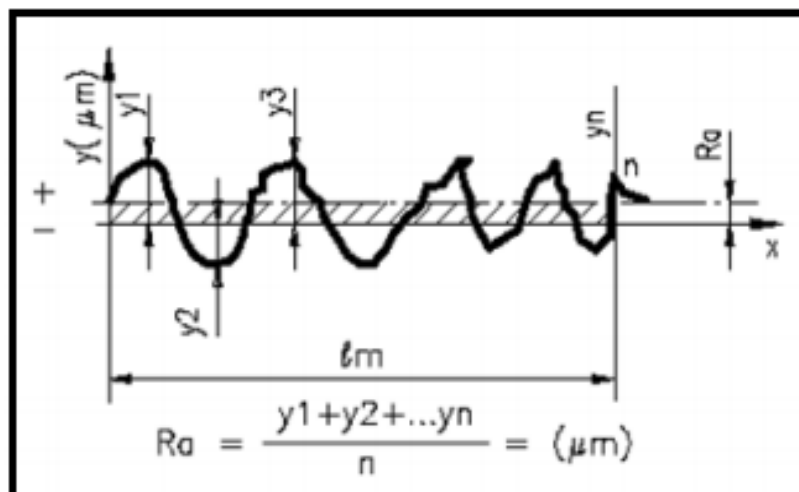
A grandeza, a orientação e o grau de irregularidade da rugosidade podem indicar as suas causas que, entre outras, são:

- imperfeições nos mecanismos das máquinas-ferramenta;
- vibrações no sistema peça-ferramenta;
- desgaste das ferramentas;
- o próprio método de conformação da peça.

Dois parâmetros muito utilizados para avaliação da rugosidade são os parâmetros  $R_a$  e  $R_t$ , definidos como: (ABNT NBR ISO 4287, 2002)

- $R_a$ : Conhecido como desvio aritmético médio, consiste na média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem, conforme mostrado na Figura 3;

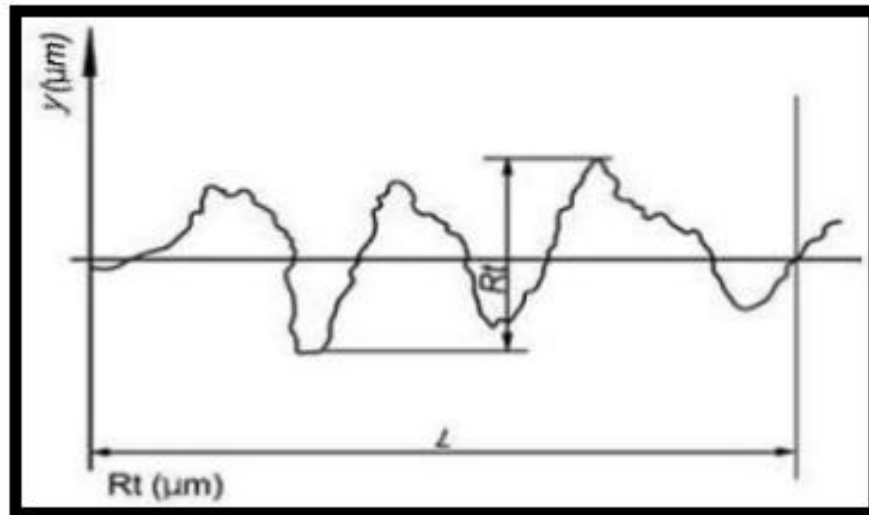
Figura 3 – Desvio médio aritmético ( $R_a$ )



Fonte: Adaptado da NBR8404(1984).

- $R_t$ : É a altura total do perfil, calculado pela soma da maior altura de pico do perfil e da maior profundidade de vales do perfil no comprimento de amostragem, conforme mostrado na Figura 4. (NBR8404,1984).

Figura 4 – Altura máxima das irregularidades ( $R_t$ ).



Fonte: Adaptado da NBR8404 (1984).

O parâmetro  $R_a$ , por ser uma média aritmética, pode levar a decisões equivocadas uma vez que é pouco sensível com relação à presença de defeitos. Para solucionar este problema pode-se utilizar a maior distância pico-vale, o  $R_t$ , que é diretamente influenciado por defeitos ou irregularidades na superfície das peças. Outro fator que influencia nos valores de rugosidade é o comprimento de amostragem ( $l_t$ ), ou em inglês *cut-off*. Esses valores de comprimentos de amostragem dependem da faixa de  $R_a$  avaliada e são dadas pela norma ISO 4288:2008 *Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Rules and procedures for the assessment of surface texture*. A norma brasileira ABNT NBR NBR ISO 4288:2008 - Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil – Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade. As rugosidades teóricas  $R_a$  e  $R_t$  de um processo de torneamento são obtidas da análise geométrica do processo de corte, e são dadas, de acordo com Machado *et al.* (2011), pelas Equações 1 e 2, respectivamente.

$$R_a = \frac{f^2}{18\sqrt{3}r_\epsilon} \text{ (\mu m)} \quad (1)$$

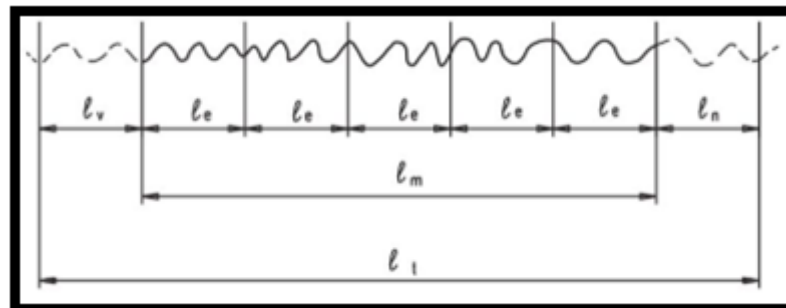
$$R_t = \frac{f^2}{8.r_\epsilon} \text{ (\mu m)} \quad (2)$$

Onde  $f$  é o avanço em mm/rev e  $r_\epsilon$  é o raio de ponta da ferramenta de corte, em mm.

Para uma melhor análise da rugosidade alguns parâmetros devem ser considerados, entre eles o comprimento de amostragem (*Cut off*). Para defini-lo toma-se o perfil efetivo de uma superfície num comprimento  $l_m$ , comprimento total de avaliação. Chama-se o comprimento  $l_e$  de comprimento de amostragem (NBR ISO 4288/2008).

O comprimento de amostragem nos aparelhos eletrônicos, chamado de *cut-off* ( $l_e$ ), não deve ser confundido com a distância total ( $l_t$ ) percorrida pelo apalpador sobre a superfície. É recomendado pela norma ISO que o rugosímetro meça 5 comprimentos de amostragem e indiquem o valor médio, conforme indicado na Figura 5.

Figura 5–Comprimentos de amostragem.



Fonte: Adaptado da Norma NBR ISO 4288 (2008).

Legenda:  $l_e$  – é o comprimento de amostragem (*cut off*);

$l_m$  – é o comprimento de medição;

$l_t$  – é o comprimento total;

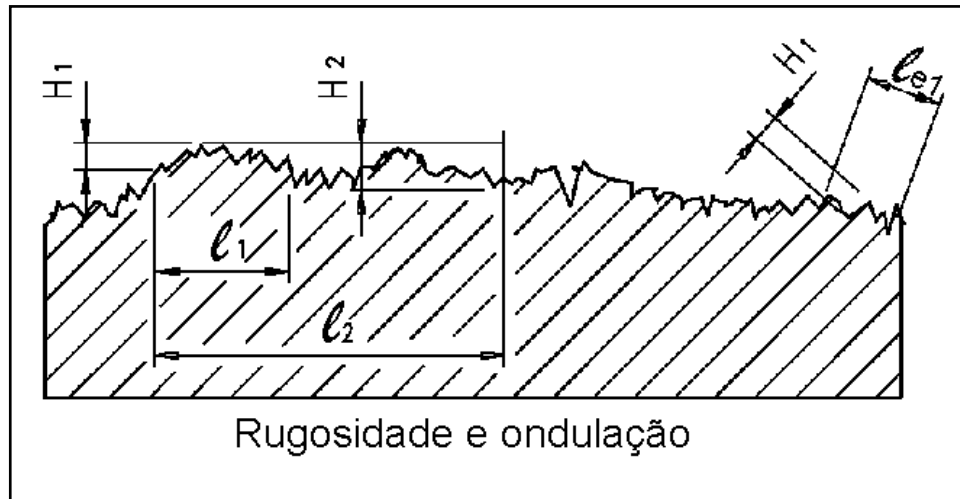
$l_v$  – é o comprimento inicial (transiente);

$l_n$  – é o comprimento final (transiente).

A distância percorrida pelo apalpador deverá ser igual a  $5 \times l_e$  mais a distância para atingir a velocidade de medição  $l_t$  e para a parada do apalpador  $l_m$ .

É indicado na Figura 6, como o perfil demonstrado apresenta a rugosidade e ondulação, o comprimento de amostragem filtra a ondulação.

Figura 6 – Rugosidade e ondulação.



Fonte: Adaptado da Norma NBR ISO 4288 (2008).

A rugosidade  $H_2$  é maior, pois  $l_2$  incorpora ondulação.

A rugosidade  $H_1$  é menor, pois, como o comprimento  $l_1$  é menor, ele filtra a ondulação.

Os valores do comprimento de amostragem podem ser encontrados no Quadro 5, para perfil aperiódico, e no Quadro 6, para perfil periódico. No Quadro 2 o valor de  $R_{Sm}$  representa a distância entre as marcações deixadas nos perfis periódicos, e que geralmente são equivalentes ao avanço  $f$  ou  $f_n$  da ferramenta.

Quadro 5 - Comprimentos de amostragem e de avaliação para medição de rugosidade.

Faixa de $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	Comprimento de amostragem	Comprimento de avaliação
	$L_t$ [cut-off] (mm)	$l_n$ (mm)
$(0,006) < R_a \leq 0,02$	0,08	0,4
$0,02 < R_a \leq 0,1$	0,25	1,25
$0,1 < R_a \leq 2$	0,8	4
$2 < R_a \leq 10$	2,5	12,5
$10 < R_a \leq 80$	8	40

Fonte: Adaptado da Norma NBR ISO 4288 (2008).

Quadro 6 – Comprimento de amostragem de rugosidade para medições de parâmetros RSm de perfis periódicos e não-periódicos.

RSm (mm)	Comprimento de amostragem de rugosidade $l_r$ (mm)	Comprimento de avaliação de rugosidade $l_n$ (mm)
$0,013 < RSm \leq 0,04$	0,08	0,4
$0,04 < RSm \leq 0,13$	0,25	1,25
$0,13 < RSm \leq 0,4$	0,8	4
$0,4 < RSm \leq 1,3$	2,5	12,5
$1,3 < RSm \leq 4$	8	40

Fonte: Adaptado da Norma NBR ISO 4288 (2008).

### 2.3.3 Mecanismo de formação de cavaco e respectiva classificação

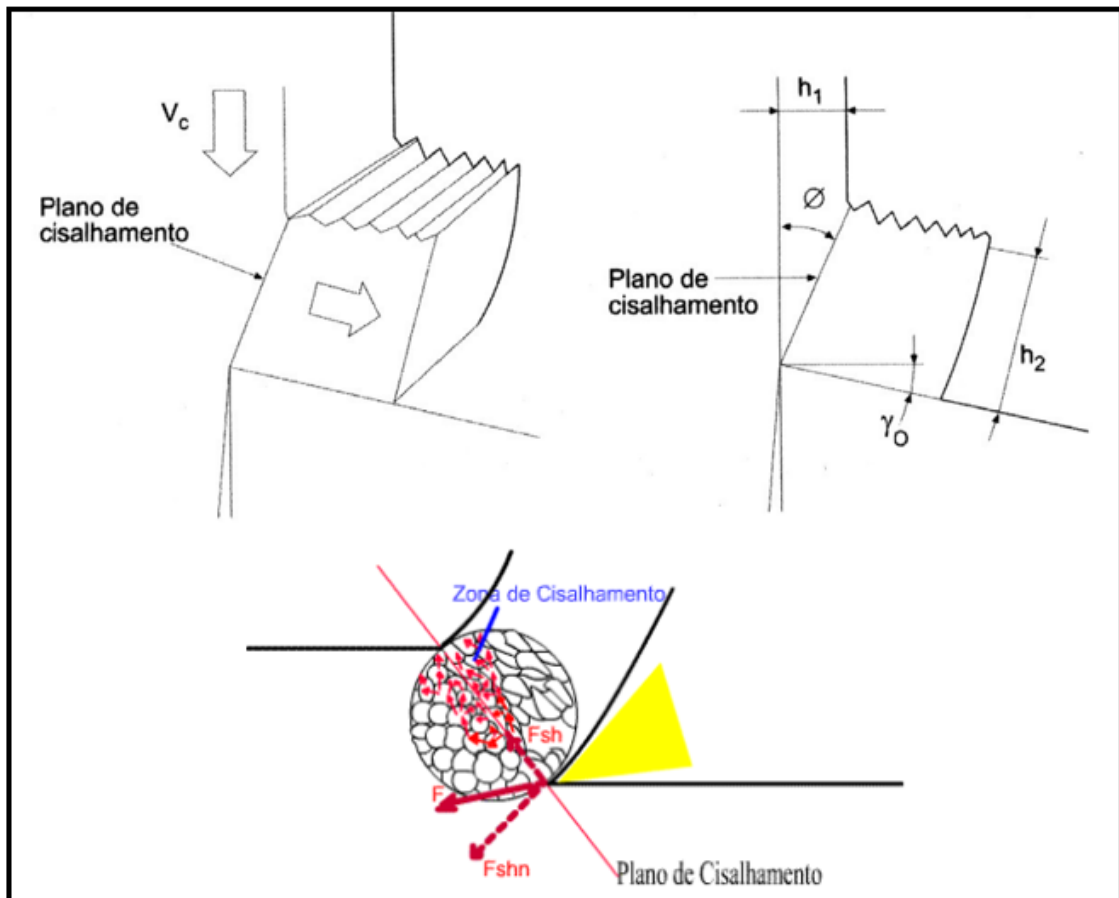
Segundo Diniz, Coppini e Marcondes (2014), o cavaco é o material removido durante o processo de usinagem. A formação do cavaco influencia diretamente diversos aspectos relacionados às operações de usinagem, podendo-se destacar os seguintes:

- Econômico: velocidade de corte, fluido de corte utilizado, vida da ferramenta, etc.
- Qualidade: final da peça acabamento superficial, esforços de corte, etc.
- Segurança: proteção do operador.

O corte dos metais acontece através de um processo contínuo de deformação e cisalhamento do material que, em função dos parâmetros de corte e propriedades físicas do material da peça pode resultar em cavacos de diferentes configurações geométricas.

O plano ao longo do qual acontece o cisalhamento do material é denominado plano de cisalhamento. O ângulo formado entre o plano de cisalhamento (conforme Figura 7) e a direção de corte é chamado ângulo de cisalhamento ( $\varphi$ ). Quanto maior a deformação do cavaco sendo formado, menor o ângulo de cisalhamento e maiores os esforços de corte.(Diniz, Coppini e Marcondes (2014)).

Figura 7 – Planos de cisalhamento.



Fonte: Diniz, Coppini e Marcondes (2014).

#### Etapas do processo de formação do cavaco

Ainda conforme Diniz, Coppini e Marcondes (2014), em condições normais de usinagem com ferramentas de aço rápido ou metal duro, a formação do cavaco segue as seguintes etapas:

1. Uma pequena porção de material é recalcada (sofre deformações elástica e plástica) contra a superfície de saída da ferramenta.
2. A deformação plástica aumenta até que as tensões internas de cisalhamento sejam suficientemente grandes, causando deslizamento entre a porção recalcada e a peça (sem ruptura do material).
3. Continuando a penetração da ferramenta, ocorre ruptura total ou parcial do cavaco, no plano de cisalhamento.

4. A porção de material rompida escorrega sobre a superfície de saída da ferramenta. O ciclo se repete para as próximas porções de material a serem usinadas. A periodicidade e tempo de duração de cada etapa depende do material sendo usinado.

#### Controle da forma do cavaco

Segundo Diniz, Coppini e Marcondes (2014), em relação a materiais dúcteis - todas as fases são bem pronunciadas (há muita deformação antes da ruptura). Já quanto aos materiais frágeis - as duas primeiras fases descritas anteriormente são curtas, na terceira ocorre ruptura total do cavaco e a quarta praticamente não existe. A forma do cavaco pode influenciar os seguintes fatores:

- segurança do operador;
- possível dano à ferramenta ou à peça;
- manuseio e armazenagem;
- forças de corte;
- temperatura e vida da ferramenta.

Assim sendo, materiais dúcteis tendem a produzir cavacos longos e contínuos que são os mais prejudiciais, porém os materiais frágeis tendem a produzir cavacos em forma de pequenas partículas.

#### Classificação dos cavacos

Os cavacos são usualmente classificados em tipos e formas. Segundo Diniz, Coppini e Marcondes (2014), quanto aos tipos temos:

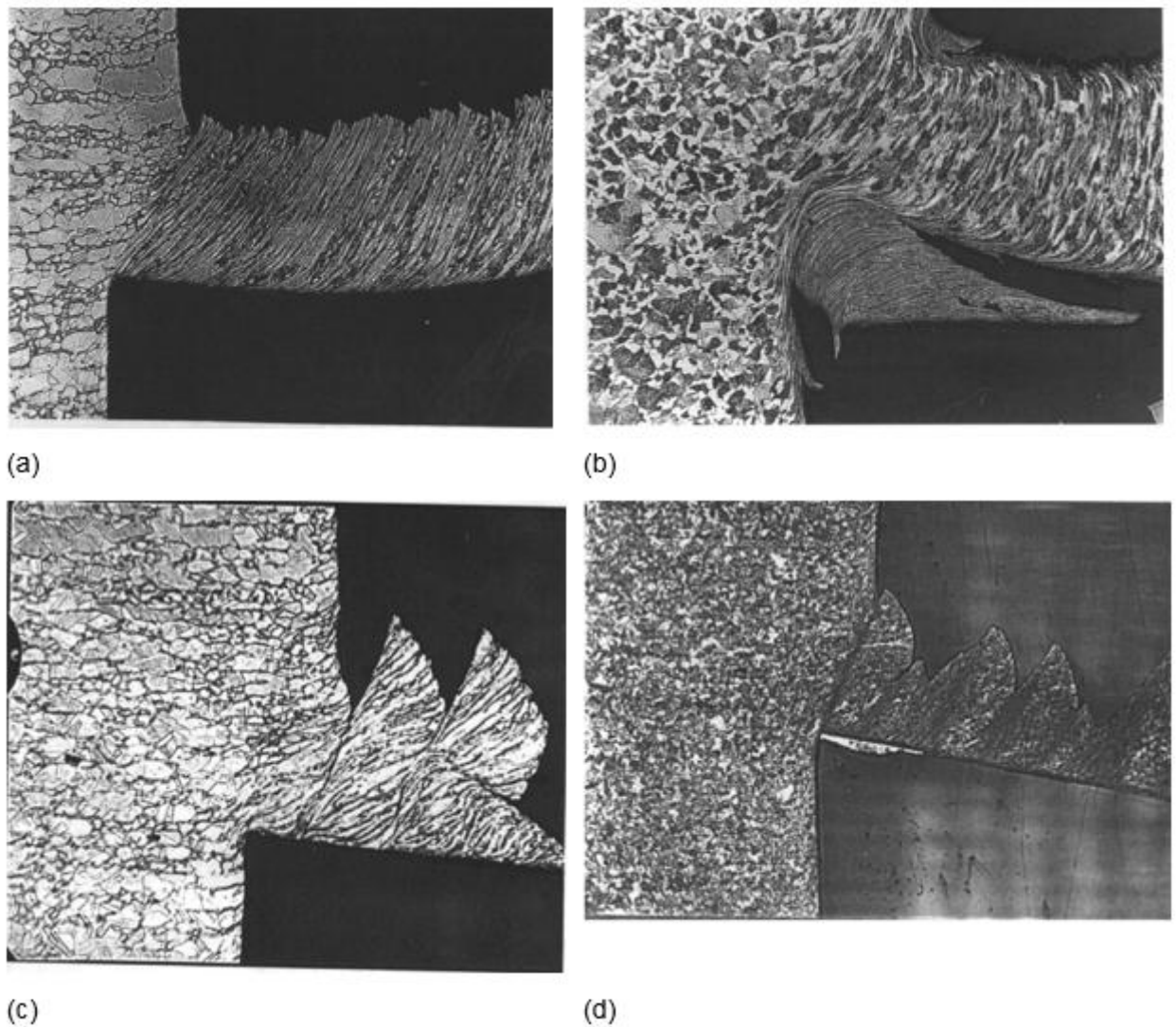
- Cavaco contínuo: apresenta lamelas justapostas em disposição contínua. A distinção das lamelas não é nítida. Forma-se na usinagem de materiais dúcteis (ex. aço). O ângulo de saída assume valores altos;
- Cavaco de cisalhamento: apresenta lamelas justapostas bem distintas;
- Cavaco de ruptura: constituído de fragmentos arrancados da peça usinada. A superfície de contato entre cavaco e superfície de saída da ferramenta é reduzida,

assim como a ação do atrito; o ângulo de saída deve assumir valores baixos, nulos ou negativos.

### Formas

Os cavacos também são classificados de acordo com a forma. Na Figura 8 podemos observar as principais formas de cavacos: cavaco contínuo, cavaco contínuo com formação de aresta, cavaco descontínuo (ruptura) e cavaco segmentado, segundo Trent (1985).

Figura 8 – Formas de cavaco conforme o mecanismo de formação de cavaco.



Fonte: Trent (1985).

Cavaco Contínuo (a)



Ocorre na usinagem de materiais com estrutura mais homogênea, tais como os aços de baixo e médio carbono; as ligas de alumínio (alto Al); ligas de magnésio (alto Mg). A velocidade de corte deve ser alta o suficiente para evitar a formação da aresta postiça.

#### Cavaco contínuo com formação de aresta (b)

É um cavaco contínuo, mas obtido pela aresta postiça (material da peça soldado na superfície de saída). Ocorre, principalmente, em baixas velocidades de corte.

#### Cavaco descontínuo (ruptura) (c)

Ocorre na usinagem de materiais com estrutura heterogênea, tais como os ferros fundidos e algumas ligas de cobre (latão e bronze) e em todos os materiais compósitos.

#### Cavaco segmentado (d)

Ocorre na usinagem de aços endurecidos, aços inoxidáveis; ligas de titânio e ligas de níquel.

O controle de forma pode ser feito através do parâmetro avanço de corte, onde quanto maior o avanço, maior é a tendência da formação de cavacos fragmentados, ou pelo uso de ferramentas com ângulos de saída mais positivos ou com quebra cavacos. Na Figura 9 observa-se a classificação detalhada da forma dos cavacos segundo a Norma ISO 3685(1993).

Figura 9– Classificação detalhada da forma dos cavacos segundo a norma ISO 3685(8).

1 - Cavaco em fita	2 - Cavaco tubular	3 - Cavaco espiral	4 - Cavaco hel. tipo arruela	5 - Cavaco hel. cônico	6 - Cavaco em arco	7 - Cavaco fragmentado	8 - Cavaco tipo agulha
1-1- Longo	2-1- Longo	3-1- Plano	4-1- Longo	5-1- Longo	6-1- Conect.		
1-2- Curto	2-2- Curto	3-2- Cônico	4-2- Curto	5-2- Curto	6-2- Solto		
1-3 - Emaranhado	2-3 - Emaranhado		4-3 - Emaranhado	5-3 - Emaranhado			

Fonte: Adaptado de ISO 3695 (1993).

### 2.3.4 Fluido de corte

Nesse tópico foi abordado a usinagem com e sem fluido de corte. Com o surgimento de novos materiais para ferramentas, aliado ao fato da crescente severidade da legislação ambiental quanto ao descarte industrial e os custos referentes aos fluidos de corte, a indústria tem buscado novas soluções produtivas, sendo uma delas a usinagem sem fluido de corte, onde os fluidos de corte são eliminados do processo, mas com a não utilização de fluidos de corte, retira-se da usinagem os seus benefícios, que é a lubrificação, a refrigeração e a remoção de cavacos gerados no processo de torneamento.

As indústrias de manufatura enfrentam constantemente pressões para redução de custos enquanto precisam atender elevados padrões de qualidade. Para manterem-se competitivas, as empresas precisam continuamente identificar oportunidades de mercado e de redução de custos, através da promoção de melhorias em seus processos produtivos.

Uma importante oportunidade de redução de custos é encontrada na redução da utilização dos fluidos de corte nos processos de usinagem. Os fluidos de corte representam parcela significativa dos custos totais de usinagem, chegando a atingir 20% desse total, pois além da aquisição dos produtos, incorrem custos relativos ao manuseio dos mesmos e à destinação dos resíduos resultantes do processo, de forma a atender as legislações ambientais mais exigentes (KLOCKE e EISENBLÄTTER, 1997; SREEJITH e NGOI, 2000; TASDELEN, WIKBLOM e EKERED, 2008). Além disso, esses fluidos representam sérios

riscos ao meio ambiente e à saúde dos trabalhadores. A destinação inadequada dos fluidos pode causar poluição do ar, da água e do solo. E o contato prolongado dos operadores de máquinas com fluidos de corte pode causar doenças respiratórias, da pele e do sistema digestivo (SOKOVIC e MIJANOVIC, 2001; SU et al., 2006; THOMÉ *et al.*, 2007).

O consumo anual mundial de fluidos de corte para usinagem é estimado em 1,25 bilhões de litros (MARKSBERRY e JAWAHIR, 2008). Esse dado dimensiona o grande potencial de redução de custos e de problemas ambientais e de saúde que pode ser alcançado através de estratégias de redução da utilização de fluidos de corte. No Brasil, não há uma legislação específica em relação aos fluidos de corte, mas duas leis referem-se aos lubrificantes em geral, a resolução CONAMA 362/05 e o Decreto 50.877/61, as quais classificam os lubrificantes como resíduos perigosos e dispõem instruções de destinação e reciclagem (ALVES e OLIVEIRA, 2006).

Confirmando a tendência para as preocupações ambientais provocadas pela utilização de fluidos de corte nos processos de usinagem, forte ênfase hoje é dada a tecnologias ambientalmente corretas que visem à preservação do meio ambiente e em conformidade com a norma ISO 14000. Por outro lado, apesar de persistentes tentativas para eliminar completamente a utilização de fluidos de corte, em muitos casos ainda é indispensável o arrefecimento para atingir vidas de ferramentas economicamente viáveis e qualidades superficiais requeridas como, por exemplo, na usinagem de materiais de difícil usinabilidade e na fabricação de componentes que exigem elevada precisão dimensional. Nestas condições, a técnica de mínimas quantidades de lubrificante (MQL) é uma alternativa interessante, pois combina as funcionalidades de refrigeração com um consumo extremamente baixo de lubrificante (SILVA *et al.*, 2007). A técnica de mínima quantidade de lubrificante consiste na atomização de uma quantidade mínima de fluido, inferior a 100 ml/h, na região de corte, geralmente através de um jato de ar comprimido (TEIXEIRA FILHO, 2006). Essa vazão de fluido é muito inferior à utilizada em processos com emulsão, nos quais é comum a utilização de vazões superiores a 1000 l/h.

Apesar das grandes mudanças necessárias para se trabalhar sem fluido de corte, a usinagem a seco é a tendência real na manufatura global (OLIVEIRA, 2003; DEVILLEZ *et al.*, 2007). Uma análise criteriosa dos mecanismos dos processos de corte é um elemento chave no desenvolvimento de um processo de usinagem sem fluido de corte, econômico e seguro. Além da adoção dessa tecnologia de usinagem, a construção de máquinas-ferramenta e seus equipamentos periféricos deve considerar os aspectos inerentes à nova tecnologia, pois a implantação da usinagem sem fluido de corte não consiste em simplesmente interromper a

alimentação de fluido. De fato, os fluidos exercem importantes funções no processo, e sua ausência deve ser compensada pela adequação dos demais elementos do processo.

A grande quantidade de calor gerado nas operações de corte, devido à energia necessária para se retirar o cavaco e à energia derivada do atrito entre o cavaco-ferramenta e entre a ferramenta-peça, provoca resultados indesejáveis na superfície de trabalho, na ferramenta, influenciando na qualidade e no custo do produto final. Assim, surgem os fluidos de corte, que “são aqueles líquidos e gases aplicados na ferramenta e no material que está sendo usinado, a fim de facilitar a operação de corte” (AVALLONE *et al.*, 1978 APUD CIMM, 2014), tendo como principais funções:

- Refrigerar a região de corte;
- Lubrificar as áreas em atrito;
- Retirar o cavaco da zona de corte;
- Proteger a ferramenta, a peça e a máquina da corrosão e oxidação. (CIMM - CENTRO DE INFORMAÇÃO METAL MECÂNICA, ano 2014).

Para desempenhar as suas funções, entretanto, os fluidos de corte precisam apresentar algumas propriedades. Um fluido de corte deve ter como um bom refrigerante:

- Baixa viscosidade a fim de que flua facilmente;
- Capacidade de envolver “molhar” para estabelecer um bom contato térmico;
- Alto calor específico e alta condutividade térmica. (Diniz, Coppini e Marcondes (2014)).

Estas características facilitarão a dissipação rápida do calor, mesmo quando o material da ferramenta é resistente ao desgaste, o refrigerante é utilizado para garantir as “qualidades dimensionais, geométricas e de superfície” da peça. (Diniz, Coppini e Marcondes (2014)).

E deve ter como um bom lubrificante:

- Resistir a pressões e temperaturas elevadas sem vaporizar;
- Boas propriedades antifricção e antissoldantes;
- Viscosidade adequada – a viscosidade deve ser suficientemente baixa para permitir uma fácil circulação do fluido e suficientemente alta de modo a permitir uma boa

aderência do fluido às superfícies da ferramenta. (Diniz, Coppini e Marcondes (2014)).

Não há uma classificação padrão dos fluidos de corte. Ferraresi (1982) classifica os fluidos em três grupos: sólidos, líquidos e gasosos. (Diniz, Coppini e Marcondes (2014)), por sua vez, classifica-os em: ar, tipos aquosos e óleos.

Para escolher o tipo correto de fluido deve-se considerar a condição de corte (severa ou leve), material da ferramenta (metal duro, diamante e outros), material da peça (aço, ferro fundido e outros) e operação a ser realizada (torneamento, fresamento e outros). Atualmente temos outros fatores a serem considerado, como: meio ambiente, análise econômica, entre outros fatores.

Vale ressaltar no trabalho proposto não foi utilizado nenhum fluido de corte, o processo de torneamento foi realizado sem fluido de corte.

Segundo Dhar, Kamruzzaman e Ahmed (2006), os processos de usinagem de alta produção geram altas temperaturas na zona de corte, os quais na maioria das vezes fazem o uso de fluidos de corte com o objetivo de refrigerar e remover o calor causado. A alta temperatura atingida durante a usinagem pode provocar a falha prematura da ferramenta de corte, bem como prejudicar a integridade do produto, induzindo tensões residuais de tração através da dilatação térmica do material e microfissuras na superfície, além da rápida oxidação e corrosão superficial.

Entretanto, de acordo com Dhar, Kamruzzaman e Ahmed (2006) os fluidos de corte utilizados em altas velocidades de corte perdem sua eficiência de remoção de calor, devido não conseguirem penetrar na interface ferramenta-cavaco. Outro problema enfrentado pelas indústrias é a manipulação inadequada dos fluidos de corte, danificando o solo e os recursos hídricos, causando sérios danos ao meio ambiente. Deste modo, o manuseio destes agentes químicos deve obedecer às regras rígidas de proteção ambiental. Outra desvantagem está relacionada aos operadores das máquinas, que podem ser afetados pelos maus efeitos dos fluidos de corte à saúde, tais como problemas de pele e respiratórios. Em relação ao custo, os fluidos de corte representam uma grande quantidade dos custos totais de usinagem. Visando o meio ambiente e a redução de custos, a eliminação dos fluidos de corte na área de produção tem sido uma decisão bastante utilizada pelas empresas. Uma alternativa é a utilização de materiais de ferramentas com potenciais que dispensam o uso de fluidos de corte durante a usinagem, como por exemplo, as cerâmicas. Com os avanços recentes no desenvolvimento de materiais cerâmicos para ferramentas de corte, as mesmas podem ser utilizadas em processos

de usinagem a seco sem prejudicar o acabamento superficial do material usinado (INÁCIO,2010).

### **2.3.5 Usinabilidade**

A usinabilidade pode ser definida como a facilidade com que um metal pode ser submetido a diferentes operações ou técnicas de usinagem. Entretanto, não existe uma definição única e não ambígua a este termo. Uma vez que devido às complexas relações existente nestes processos, não é possível avaliar as operações em termos de um único critério padronizado (BOOTHROYD, apud Silva, 2015).

De acordo com Diniz, Coppini e Marcondes (2014), a usinabilidade pode ser definida como o grau de dificuldade em se usinar um determinado material, sendo esta relativa quando se fala de uma ou de outra característica tomada como parâmetro para o material a ser trabalhado. Sendo assim um material pode ter um valor de usinabilidade baixo em certas condições de usinagem e um valor maior em outras condições de usinagem. Segue a usinabilidade de alguns materiais:

- **Usinabilidade dos aços**

A usinabilidade dos aços é um assunto difícil de ser tratado de forma generalizada, devido à grande variedade desse grupo de materiais, que contem desde os aços de livre corte, de fácil usinabilidade, até os aços ferramenta, de difícil usinagem.

As características de usinabilidade estão muito relacionadas ao processo de fabricação dos aços, o que implica na possibilidade de ocorrer variações de desempenho na usinagem de lotes diferentes de um mesmo material (SANTOS; S. C. e SALES, 2007).

Toda a complexidade relacionada à usinabilidade dos aços não impede que sejam feitas considerações sobre os principais fatores que influenciam a sua usinabilidade. As principais propriedades que afetam a usinabilidade dos aços são:

- Dureza;
- Limite de resistência;
- Ductilidade.
- Essas propriedades são controladas pela:

- Composição química;
- Microestrutura.

Via de regra, segundo SANTOS; S. C. e SALES (2007), a vida das ferramentas de corte na usinagem dos aços liga são inferiores quando comparadas à usinagem de aços-carbono com porcentagem de carbono equivalentes. O aumento da porcentagem dos elementos de liga promove o aumento da diferença de usinabilidade em relação aos aços carbono com o mesmo teor de carbono.

Essa influência pode ser explicada pelo fato de a maioria dos elementos de liga formar carbonetos e promover o aumento da dureza e da resistência mecânica. Mesmo os elementos que permanecem dissolvidos na ferrita, promovem o aumento da temperabilidade dos aços.

- **Usinabilidade do alumínio**

Segundo Diniz, Coppini e Marcondes (2014), as ligas de alumínio, de forma geral, apresentam boa usinabilidade.

Entretanto, de acordo com DIOGENES (2011), com relação aos critérios de usinabilidade baseados na rugosidade da peça e na característica do cavaco, não se pode dizer que o alumínio tenha usinabilidade alta. Pois em condições normais de usinagem o acabamento superficial não é satisfatório e o cavaco possui formato alongado. Para se obter bom acabamento superficial, deve-se atentar tanto à velocidade de corte, que deve ser suficientemente alta, bem como à geometria da ferramenta.

De acordo com DIOGENES (2011), outros fatores podem influenciar positiva ou negativamente na usinabilidade das ligas de alumínio. Como por exemplo: variação de impurezas, processos de fundição e tratamentos aplicados ao metal.

- **Usinabilidade do ferro fundido**

De acordo com SANTOS; S. C. e SALES (2007) a usinabilidade dos ferros fundidos é relacionada à sua microestrutura e aos elementos de liga. Assim a dureza somente é um indicador de usinabilidade quando se trata de materiais com a mesma estrutura. A presença de carbonetos duros na matriz prejudica a usinabilidade devido à sua ação abrasiva sobre a ferramenta de corte.

Os ferros fundidos podem apresentar inclusões de óxidos de elevada dureza como o MgO e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, que além de acelerar o desgaste das ferramentas, causam ainda o aumento das forças de usinagem de acordo com (SANTOS; S. C. e SALES, 2007).

- **Ligas de cobre**

As ligas de cobre de alta condutividade térmica e elétrica (acima de 99% de cobre) são consideradas como uma das famílias de ligas mais difíceis de usar. Em operações de furação, por exemplo, as forças são suficientemente altas para ocorrer quebra da broca, principalmente em baixas velocidades. É possível melhorar este desempenho utilizando maiores velocidades de corte, mas os cavacos gerados são contínuos e se emaranham facilmente (SILVA, 2015).

- **Usinabilidade das Ligas à base de Níquel**

Durante os processos de usinagem das ligas de níquel ocorrem altas tensões nas interfaces peça-ferramenta e ferramenta-cavaco que geram um efeito de encruamento no material que dificulta a usinagem e pode causar distorções em componentes de menor espessura. Para se obter um melhor resultado quanto a estabilidade dimensional da peça o melhor processo seria desbastar o material até próximo a sua dimensão final e depois proceder com um alívio de tensões e com a operação de acabamento até a dimensão final da peça. O processo de alívio de tensões não gera grandes efeitos no material quando se diz respeito às suas dimensões, porém quando se trata das suas propriedades mecânicas tal processo pode afetá-las significativamente, por exemplo, eliminando tensões de tração na superfície da peça que, além de poderem causar distorções ainda são responsáveis pela redução do limite de fadiga do material. O tamanho do grão tem pequeno efeito direto na usinagem das ligas à base de níquel. Em geral, a microestrutura afeta a usinagem de duas maneiras:

- A presença de grafita ou fases de sulfetos favorece consideravelmente a usinagem;
- Fases duras, como carbonetos, nitretos, carbonitretos, óxidos, silicatos e a possibilidade de se encontrar fase gama linha ( $\gamma'$ ) de Ni<sub>3</sub>(Al, Ti), são abrasivos e causam rápido desgaste da ferramenta.



Como apresentado por alguns autores (Ezugwu, Bonney e Yamane (2003)), as principais dificuldades encontradas na usinagem de superligas podem ser resumidamente destacadas como:

- Alta resistência e dureza a quente, causando deformação da ferramenta de corte durante a usinagem;
- A matriz austenítica das ligas de níquel ocasiona um rápido endurecimento durante a usinagem, sendo considerada uma das maiores causas de desgaste severo sofrido pelas ferramentas no processo;
- A presença de carbonetos duros e abrasivos na microestrutura destas ligas levando a excessivos desgastes por abrasão e podendo levar a ferramenta a uma falha prematura;
- A baixa condutividade térmica destas ligas leva à concentração de temperaturas de corte superiores a 1000°C na ferramenta, gerando altos gradientes térmicos;
- Esses materiais têm a tendência de reagirem com as ferramentas, em determinadas condições atmosféricas, conduzindo a altas taxas de desgaste por difusão;
- A soldabilidade do material da peça na aresta de corte da ferramenta, formando uma aresta postiça de corte (APC) que deteriora as superfícies usinadas comprometendo a integridade superficial da peça, bem como da ferramenta de corte.

Todos estes fatores operando juntos ou em combinação causam altas temperaturas de corte, podendo alcançar 1000°C, além de altas tensões de compressão na superfície de saída (aproximadamente 3450 MPa) o que leva ao desenvolvimento rápido do desgaste de flanco, cratera ou desgaste de entalhe, dependendo do material da ferramenta e das condições de corte. Devido a estas condições desfavoráveis, as velocidades convencionais de corte, com ferramentas de metal duro, são bem inferiores que as de aços comuns. No geral, as taxas de remoção de material são baixas, independente do processo de corte. A definição de altas velocidades de corte é baseada no tipo de material que está sendo usinado. Deste modo, para as ligas à base de níquel, o conceito de alta velocidade de corte refere-se a velocidades de aproximadamente 40 m/min. Portanto, para se obter as melhores condições de usinagem, é fundamental que se tenha um bom conhecimento da microestrutura, das propriedades dos materiais envolvidos, dos efeitos sobre o comportamento das ferramentas de corte e sobre a eficiência dos processos de usinagem empregados. A baixa usinabilidade das ligas à base de níquel sujeitam as ferramentas a extremas tensões térmicas e mecânicas na aresta de corte,

frequentemente levando a deformações plásticas e a acelerado desgaste da ferramenta. Os modos de falha normalmente observados na usinagem por torneamento das ligas à base de níquel são o aparecimento de entalhes na ponta da ferramenta e/ou na profundidade de corte, desgaste de cratera, lascamento e falha catastrófica da ferramenta. As ferramentas de corte utilizadas na usinagem destas ligas devem possuir adequada dureza a quente para resistir às elevadas temperaturas geradas em condições de elevadas velocidades de corte. Sob estas condições a maioria dos materiais das ferramentas perdem sua dureza resultando na diminuição da resistência nas junções interpartículas e consequente aceleração do desgaste da ferramenta. Para usinagem a altas velocidades das ligas de níquel utilizam-se geralmente ferramentas de metal duro revestido, cerâmicas e CBN/PCBN, e normalmente não são utilizadas ferramentas de metal duro sem revestimento para esta situação. Assim a eficiência do processo de usinagem dependerá da escolha correta dos parâmetros de corte utilizados, da ferramenta e da flexibilidade do equipamento de modo que se tenha uma produção economicamente viável. Em sua maioria as falhas catastróficas das ferramentas, quando da usinagem de superligas, são devido à formação de entalhe na profundidade de corte da ferramenta, sendo considerado o modo de falha mais comumente encontrado. Este modo de falha ocorre devido a ações mecânicas e químicas entre a ferramenta de corte e o material trabalhado durante a usinagem. O desgaste por entalhe cresce de forma aleatória e imprevisível, portanto todos os esforços são realizados para prevenir seu aparecimento. Os entalhes podem aumentar a concentração de tensão na aresta de corte, prejudicar a qualidade da superfície gerada e ainda enfraquecer a aresta, tornando-a propensa a uma falha catastrófica durante a usinagem.

### **2.3.6 Monitoramento do processo de usinagem**

Conforme Zonta (2019), a área de monitoramento de processo de usinagem tem sido motivo de estudo desde o final dos anos 70, em que dispositivos instalados na máquina-ferramenta de maneira *stand-alone*, ou seja, que não necessitam de nenhum outro recurso auxiliar integrado, ou conectado, tomavam medidas de segurança, como a detecção de colisão para evitar danos em tempo real, tanto na máquina-ferramenta, quanto no componente em fabricação.

Esses sistemas de monitoramento de processo de usinagem tradicionais permitem a coleta de sinais ou dados, tanto diretamente do controle numérico da máquina, quanto com o auxílio de sensores externos de diversas maneiras. Os sinais são interpretados por meio de

algoritmos específicos e imediatamente tomam ações em tempo real que interferem no processo de usinagem, com foco em eficiência, segurança e previsibilidade.

Tais sistemas, porém, têm a desvantagem de serem inflexíveis frente à variedade de processos e também complexos de serem configurados e mantidos de maneira adequada em diferentes máquinas e componentes. Isso os torna inacessíveis para empresas de diferentes segmentos e portes na indústria.

A boa notícia é que com o advento da Internet das coisas veio a conectividade e a chance de agregar esses dados em um serviço de nuvem, em que é possível obter ajustes no processo de maneira mais confiável que o método tradicional. Outro ponto positivo é a facilidade, por parte dos usuários, em configurar e manter o monitoramento operacional. Dessa forma, essa nova tecnologia pode ser acessível não somente para grandes empresas, mas também para as de pequeno e médio porte, como nosso estudo.

## VANTAGEM COMPETITIVA

Segundo Zonta (2019), quem nunca em nossa indústria passou pela experiência de ter seu processo de usinagem instável em função da variação da dureza da matéria-prima e, conseqüentemente, eventuais quebras de ferramentas? Ou também uma quebra inesperada do fuso da máquina acarretando em perda de faturamento pelo fato de a máquina estar parada? Essas situações típicas, existentes em nossa indústria, podem ser solucionadas por um sistema de monitoramento mais eficiente.

Um exemplo muito comum de perda de tempo produtivo, que vale detalhar, é quando se define a vida da ferramenta com base em quantas peças a ferramenta deve produzir e também levando em conta as características físicas do material, como a dureza variada de uma mesma matéria-prima. Melhor explicando, o pior caso possível de variação da dureza do material é usado como referência pelo operador para essa definição e isso é configurado na máquina e dificilmente será mudado até que alguém o faça manualmente. O resultado disso é a subutilização dessa ferramenta, com o encurtamento da vida da mesma ou até mesmo a redução de peças produzidas por ferramenta, ou seja, justamente o contrário do desejado.

Com a possibilidade de um monitoramento adequado do processo é possível fazer com que o valor de referência estabelecido para a vida da ferramenta, antes fixo e com base no pior cenário, se torne flexível e se adeque de acordo com as condições atuais da matéria-prima em uso, evitando desperdícios e, por conseguinte, conferindo maior estabilidade ao processo,

redução de custos relativos à manutenção corretiva e melhor uso dos recursos da máquina e da ferramenta.

Uma das principais finalidades é gerar um processo de produção completamente livre de erros e, portanto, mais eficiente, eliminando as necessidades dos usuários definirem os limites, seja das ferramentas de corte, seja dos ciclos de usinagem. Isso agrega mais valor ao processo de monitoramento de usinagem, tornando-o mais competitivo.

## MONITORAMENTO E SUSTENTABILIDADE

Ainda conforme Zonta, a população global está em rápido crescimento. Estima-se que no ano de 2040 terá um acréscimo de 2 bilhões aos atuais 7,2 bilhões de habitantes, e haverá, portanto, uma grande pressão para melhor utilização dos recursos de nosso planeta, incluindo a maneira que nossa indústria utiliza esses recursos. Por outro lado, incidentes comuns como colisões, seleção incorreta de programas, ajustes incorretos, entre outros, afetam diretamente o nível de desperdício em nossa indústria.

Ambos os fatores tornam as soluções para o monitoramento da usinagem em tempo real e em nuvem, de grande auxílio em prol de uma usinagem sustentável, capaz de gerar por tabela, um menor consumo de energia, maior qualidade das peças produzidas, maior controle de manutenção, prazos de fabricação menores, melhor previsão de custo por peça, estoque otimizado de ferramentas, enfim um maior nível de controle operacional.

Em outras palavras, trata-se de uma tecnologia sustentável e não apenas do ponto de vista ambiental, mas também sob a óptica das pessoas e da excelência operacional. Aplica-se o monitoramento:

- Nas máquinas, fornecendo diagnósticos e monitoramento de desempenho;
- Nas ferramentas, fornecendo o posicionamento, estado de afiação, alinhamento e lubrificação;
- Nas peças, tem-se o monitoramento da geometria e dimensão, rugosidade e danos térmicos;
- E no processo, para melhor compreensão do mecanismo de formação de cavacos, monitoramento das temperaturas e consumo de energia.

De acordo com Schühli (2007), os diferentes elementos do monitoramento do processo de usinagem são:

- Sensor: A conversão de uma forma de energia a outra é uma característica essencial do processo de leitura, sendo o sensor o dispositivo que detecta as mudanças em um estímulo físico convertendo em um sinal mensurável. Alguns importantes tipos de sinais são radiação, mecânico, térmico, elétrico, magnético e químico;
- Processamento do sinal: é o processamento do sinal analógico por amplificação, filtragem, transformação matemática, a conversão de analógico para digital e processamento do sinal digital;
- Interpretação: Modelos às vezes são necessários para relacionar os valores medidos aos objetos que são monitorados. Os valores são comparados com limites pré-definidos ou analisados a medições anteriores. A saída do processo de monitoramento pode indicar ocorrência de problemas durante o processo, causa esta que pode não ser clara até este ponto;
- Saída: É caracterizada pela sua exatidão, confiabilidade, relação de entrada e saída, assim como frequência de resposta.

No mundo metalmeccânico, os dias de baixa segurança do processo, qualidade ruim da peça e ferramentas subutilizadas estão a caminho de serem eliminados. O controle contínuo do processo por meio do monitoramento de usinagem em tempo real traz maior eficiência, sustentabilidade e, portanto, reduz custos.

Os níveis de utilização da máquina podem chegar a 85% devido à eliminação de paradas de máquinas não planejadas. Ao mesmo tempo, a eficiência da remoção de metal pode chegar a 95% em comparação com os 80% normalmente alcançados com a fabricação convencional, sem uso do monitoramento em nuvem que pode “ouvir” o que está acontecendo no ambiente, verificar se tudo está indo como deveria e corrigir quaisquer desvios, com maior flexibilidade. (Schühli (2007)).

Ao levar a instabilidade a um mínimo absoluto, o monitoramento do processo de usinagem em tempo real e em nuvem pode ser o catalisador para mudanças significativas na indústria da manufatura.

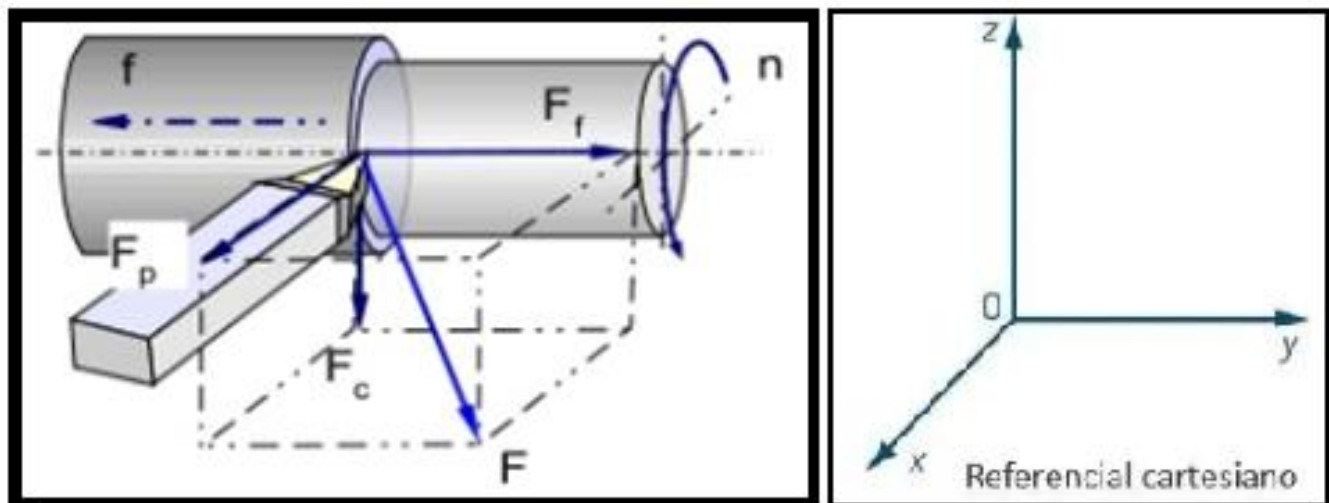
Alguns dos sinais observados no trabalho foram: os de potência, emissão acústica e vibração.

### 2.3.6.1 Potência

De acordo com Trent e Wright (2000), para planejar a potência necessária para os elementos da máquina ferramenta, das fixações e porta ferramentas adequadamente rígidas e livres de vibração, o conhecimento das forças na usinagem é imprescindível. Elas variam de acordo com os ângulos das ferramentas e sua mensuração precisa auxilia na otimização e planejamento das geometrias de ferramenta. Conforme demonstrado na Figura 10, temos as componentes de força:

- Força de corte ( $F_c$ ): componente da força que age sobre a superfície de saída da ferramenta, normal a aresta de corte na direção YO (Eixo Y e origem). É a maior entre as componentes e age na direção da velocidade de corte ( $V_c$ );
- Força de avanço ( $F_f$ ): componente da força que age na ferramenta, na direção OX (origem e eixo X), paralela com a direção de avanço;
- Força passiva ou força de profundidade ( $F_p$ ): age na direção OZ (origem e eixo Z), perpendicular ao plano de trabalho, tendendo a empurrar a ferramenta para fora do trabalho na direção radial. Como é a menor entre as três componentes, para o processo de torneamento é geralmente ignorada.

Figura 10 – Componentes de força.



Fonte: Machado et al. (2011).

Tem-se ainda que para o cálculo de potência, multiplica-se a força pela velocidade. Tem-se então, de acordo com Machado et al. (2011), a potência de corte é dada pela Equação 3.

$$P_c = F_c \cdot V_c \quad (3)$$

Segundo Hassui (2002) os esforços de corte ocorrem devido à deformação plástica nas zonas primárias e secundárias de cisalhamento e atritos entre a ferramenta e a peça e entre o cavaco e a peça, podendo ser medidos direta ou indiretamente. Para a medição direta das componentes de força pode-se utilizar dinamômetros piezelétricos, equipamentos estes de custo de aquisição mais caro. Indiretamente pode-se utilizar, para a medição de força, o deslocamento e extensão de partes da máquina, o consumo de corrente do motor principal ou de acionamento do eixo de avanço e o consumo de potência do eixo principal ou do acionamento do eixo de avanço. As medições indiretas possuem a desvantagem de poderem ser contaminados por ruídos presentes no caminho entre o fenômeno em si e aquele que está sendo medido, e para medições mais exatas há a necessidade de calibração com dinamômetro. A vantagem é que o sensor é posicionado num ambiente menos agressivo que a região de corte, o que favorece seu funcionamento, além é claro de terem um custo bem menor (HASSUI, 2002).

Usualmente, a fim de medir-se a potência consumida durante o processo de usinagem, um sensor de efeito Hall pode ser utilizado. Seu princípio de funcionamento é baseado no efeito Hall, descoberto pelo Dr. Edwin Hall, em 1879. A corrente fluindo através de um cabo pelo motor da máquina-ferramenta produz um campo magnético. Se o cabo passa em um sensor de efeito Hall, uma tensão induzida no sensor é desenvolvida devido à força de Lorentz. Esta tensão é conhecida como tensão Hall, e é proporcional à corrente original que flui pelo cabo. Então, medindo as mudanças da tensão Hall, a potência consumida pelo motor pode ser facilmente obtida durante a usinagem (NAKAI, 2012; EUZEBIO, 2012).

Lançoni (2008) comparou o uso de dinamômetros piezelétricos para a obtenção das forças de corte com as medições por meio da potência e corrente elétrica do motor do rebolo no processo de retificação plana tangencial. Para a medição de corrente o autor utilizou um sensor de efeito Hall. Medindo-se a corrente do motor podem-se obter os valores de potência multiplicando a corrente pela tensão de alimentação do motor. Ele conclui que é perfeitamente possível substituir o dinamômetro por um sistema de medição da potência elétrica do motor, embora a relação entre as medidas não seja linear, a correspondência pode

ser realizada com equações de 4ª ordem. A substituição apenas pela medida da corrente elétrica do motor é aceitável, embora de menor precisão que a potência elétrica.

A força de corte foi uma das variáveis estudadas no torneamento de superligas nos trabalhos de Bushlya, Zhou e Ståhl (2012), Thakur e Gangopadhyay (2016) e Angappan, Thangiah e Subbarayan (2017), que se utilizaram de dinamômetros para a realização dos experimentos.

### 2.3.6.2 Emissão acústica

Hara (1999) traz as seguintes definições para emissão acústica:

- Energia elástica transiente espontaneamente gerada em materiais em estado de deformação ou fratura;
- É referida à geração de uma onda vibracional na grade de materiais cristalinos devido ao rearranjo da estrutura do material;
- São ondas transientes de tensão geradas na distribuição de tensão em redor da aspereza do contato na superfície de tensão.

É atribuída a muitas fontes como deformações plásticas e elásticas, tanto da peça quanto da ferramenta de corte, atrito, fratura da peça, desgaste e quebra da ferramenta (HARA; 1999).

De acordo com Hassui (2002), o que torna a emissão acústica interessante no monitoramento da usinagem são os limites de frequência que determinam o fenômeno, que apesar de não haver um consenso da faixa trabalhada na literatura, podendo-se encontrar uma variação de 15 kHz a 1200 kHz, as frequências altas tornam o sinal insensível aos ruídos presentes nas máquinas ferramentas, tais como rolamentos, vibrações e tensão de rede. Uma possibilidade dentro de retificação é usar a emissão acústica para identificar o tempo que o rebolo não tem contato com a peça e está em avanço de trabalho.

Euzébio (2012) expõe a definição de emissão acústica como ondas de tensão elástica devido à rápida liberação de energia na deformação de um material sujeito a um esforço externo. Esses sinais podem ser detectados por um sensor piezelétrico, que transforma deslocamento em sinais elétricos. Os sinais podem ser contínuos ou de pico, onde as de pico ocorrem devido a quebras, trincas, impactos e são identificadas pela elevação repentina na intensidade do sinal.



Um parâmetro predominante estudado em pesquisas usando emissão acústica é o valor quadrático médio RMS (*root mean square*). Também conhecido como valor eficaz, é uma medida estatística da magnitude de uma quantidade variável de sinal de emissão acústica calculada pela média aritmética do quadrado dos valores puros de emissão acústica, conforme a Equação 4 (EUZEBIO, 2012).

$$EA_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{\Delta t} \int_0^{\Delta t} EA^2(t) dt} \quad (4)$$

Onde  $EA_{RMS}$  é o valor médio quadrático de emissão acústica,  $\Delta t$  é o tempo de integração e  $EA$  é o sinal puro de emissão acústica.

### 2.3.6.3 Vibração

De acordo com Ståhl (2012) vibração em usinagem ocorre devido à dinâmica do processo de corte estar em ressonância à estrutura ao seu redor, tais como da peça, do porta ferramentas e da própria máquina. Se o amortecimento é insuficiente, pode levar a efeitos indesejados, como aberrações na superfície da peça usinada e aumento do desgaste da ferramenta. Ao contrário das condições estáveis de usinagem, um sistema dinâmico deste tipo produz movimentos que excedem aqueles esperados baseados nos valores nominais de forças de corte.

A ferramenta de corte e a peça que está sendo usinada podem sofrer vibrações causadas pela variação das forças de contato entre esses dois componentes do sistema de usinagem, justificada pela variação da resistência ao corte ou devido aos parâmetros de corte. Pode ocorrer também a chamada vibração crítica, ocasionada pelo fenômeno de ressonância de frequências vibratórias da interface peça-ferramenta com a frequência natural de oscilação da estrutura da máquina. Podem ser solucionados alterando-se os parâmetros de corte (STÅHL, 2012; MUNOA, BEUDAERT e DOMBOVARI, 2016).

De acordo com Quintana e Ciurana (2011), Siddhpura e Paurobally (2012), Munoa Beudaert, Dombovari (2016) e Stepan et al. (2017) existem nos processos de usinagem uma vibração auto excitada, em inglês diferenciada pela palavra *chatter*, que limita os processos de remoção de material. É um fenômeno muito complexo que envolve diversos elementos que compõem o sistema dinâmico e seu comportamento, tais como a ferramenta de corte, o porta-

ferramentas, o material da peça, a estrutura da máquina e os parâmetros de corte. Os efeitos negativos dessa vibração autoexcitada são baixa qualidade superficial, imprecisão inaceitável, excesso de ruído, desgaste de ferramenta desproporcional, danos a máquina CNC, redução das taxas de remoção de material, aumentos de custos relacionados ao tempo produtivo, desperdício de materiais, desperdício de energia juntamente com os impactos ambientais gerados por esses desperdícios e custo de retrabalho e reprocesso.

De acordo com Siddhpura e Paurobally (2012) os sistemas mais comumente utilizados para pesquisa da presença e detecção de vibrações é a utilização de sensores que medem as forças envolvidas nos processos ou a própria vibração utilizando-se sensores piezelétricos.

## 2.4 FERRAMENTAS DE CORTE

### 2.4.1 Materiais para ferramentas

A escolha do material adequado para a ferramenta passa pelo princípio de que o material da ferramenta deve ser mais duro e mecanicamente mais resistente que a peça. A ferramenta perfeita seria aquela que alia tenacidade e dureza, porém, ao aumentarmos uma das propriedades temos a redução da outra, ou seja, ferramentas de elevada dureza possuem baixa tenacidade e ferramentas capazes de absorver impactos possuem, geralmente, menores durezas.

Diniz, Coppini e Marcondes (2014) pontuam alguns aspectos que devem ser levados em conta para a seleção do material das ferramentas. São eles:

- Material a ser usinado: de acordo com o material tem-se diferentes durezas e diferentes tipos de cavacos;
- Processo de usinagem: Em algumas peças de pequena dimensão necessita-se de altas rotações para atingir a velocidade de corte adequada para alguns materiais mais nobres, como metal duro, cBN ou ferramentas de diamante, o que em alguns casos é de difícil alcance. Utiliza-se então materiais que trabalham com velocidades de corte menores, como ferramentas de aço rápido;
- Condição da máquina-ferramenta: Características como potência, a gama de velocidades e o estado de conservação da máquina também influenciam na escolha da ferramenta. Máquinas com folgas, baixa potência e rotação exigem ferramentas mais tenazes;

- Forma e dimensões da ferramenta: Formas não padronizada causam dificuldades de produção em escala;
- Custo do material da ferramenta: Apesar de alguns tipos de materiais terem um desempenho melhor com relação à vida da ferramenta, é necessário se atentar para a relação custo/benefício;
- Condições de usinagem: Ferramentas mais tenazes são necessárias em operações de desbaste, onde geralmente se usa baixa velocidade de corte, altos avanços e altas profundidades, às vezes com camadas endurecidas, excentricidades etc. Para operações de acabamento onde se tem altas velocidades de corte, baixos avanços e baixas profundidades se exige ferramentas mais duras do que tenazes;
- Condições da operação: Ferramentas tenazes são necessárias em operações com corte interrompido e/ou sistemas pouco rígidos.

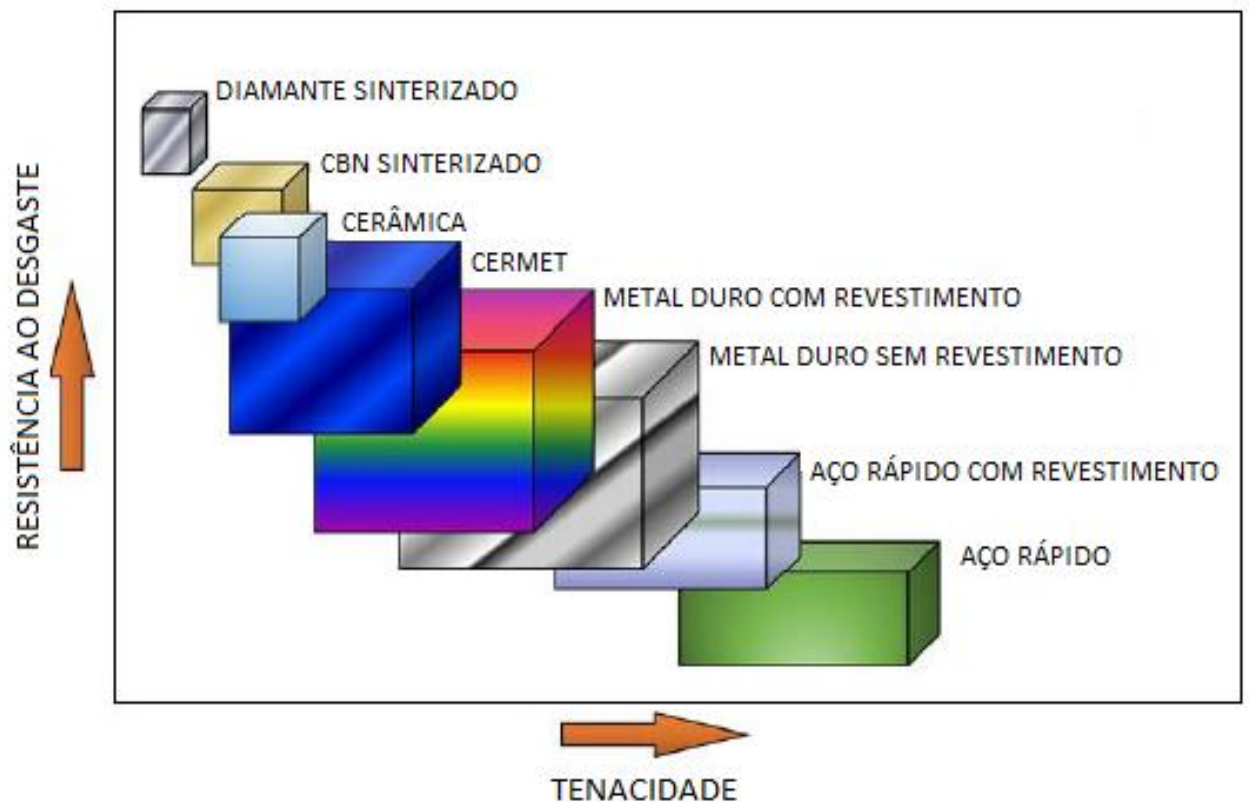
As características importantes para o material de uma ferramenta de corte para processos de usinagem, segundo Diniz, Coppini e Marcondes (2014), são:

- Dureza à quente: a temperatura de operação em alguns tipos processo pode ultrapassar os 1000°C, o que demanda materiais que possam manter a dureza e capazes de suportar as tensões do corte sob elevadas temperaturas;
- Resistência ao desgaste: Resistência à abrasão é necessária, isto é, resistência ao atrito;
- Tenacidade: quantidade de energia necessária para romper o material. Ferramentas tenazes são mais resistentes a choques mecânicos inerentes aos processos de corte;
- Estabilidade química: Importante para evitar desgastes por difusão, principalmente com altas velocidades de corte.

De acordo com Machado *et al.* (2011), as características desejáveis para o material da ferramenta de corte são a alta dureza, tenacidade suficiente para evitar falha por fratura, alta resistência ao desgaste abrasivo, alta resistência à compressão, alta resistência ao cisalhamento, boas propriedades mecânicas e térmicas em temperaturas elevadas, alta resistência ao choque térmico, alta resistência ao impacto e ser inerte quimicamente. Não se encontram essas propriedades reunidas em um só material, sendo necessário priorizar algumas delas dependendo da aplicação.

Entre os materiais de corte mais comuns temos os aços rápidos, aços rápidos com cobertura, metal duro (carbonetos) com e sem revestimento, materiais cerâmicos, cermets, nitreto de boro cúbico (cBN) e diamante (Diamante Policristalino, PCD). Na Figura 11 pode-se verificar a aplicação dos diferentes materiais de acordo com a velocidade de corte e o avanço e a diferença entre resistência ao desgaste e ductilidade destes.

Figura 11- Comparação dos diferentes tipos de materiais para ferramentas de corte.



Fonte: Analista de ferramentas (2015).

O material da ferramenta utilizada nesse trabalho foi a cerâmica, sendo de 2 tipos diferentes. Sendo uma de  $Al_2O_3+MgO$  e a outra  $Al_2O_3+Cr_2O_3$ .

#### 2.4.1.1 Cerâmicas

De acordo com Trent; Wright (2000) os materiais cerâmicos estão entre os materiais testados para ferramentas de maior dureza e maiores temperaturas de fusão e tem sido utilizada com sucesso em vários países na usinagem de aços e ferros fundidos. As ferramentas cerâmicas de sucesso consistem em alumina ( $Al_2O_3$ ) finamente granulada (menor que  $5\mu m$ ), com densidade relativa alta, ou seja, porosidade menor que 2%. Muitas adições podem ser

feitas a alumina, por exemplo, óxido de magnésio (MgO) e óxido de titânio (TiO<sub>2</sub>), para a promoção de maiores densificações e manter o tamanho de grão fino. Apesar do minério de origem (Bauxita) ser relativamente barato e abundante, o processamento para transformação para alumina é caro, comparadas as ferramentas de metal duro, tem um custo mais elevado. A dureza a temperatura ambiente de ferramentas de alumina é comparável as do metal duro, entre 1550 HV e 1700 HV. Outras vantagens com relação às ferramentas de metal duro são que as ferramentas de alumina, retém a dureza e resistência a compressão a temperaturas superiores e que elas são inertes quimicamente com relação ao aço em temperaturas superiores a temperaturas de fusão.

De acordo com Machado *et al.* (2011), as cerâmicas são compostas de elementos metálicos e não metálicos, geralmente, na forma de óxidos, carbonetos e nitretos. Esses elementos são então submetidos a um processo de sinterização para a confecção dos insertos. Tem estrutura cristalina com ligação, entre os elementos, iônica ou covalente. É um grupo bastante competitivo utilizado no mercado na usinagem de materiais endurecidos, principalmente aços com durezas acima de 45 HRc, e superligas. Seu desempenho em operações com corte interrompido ou em aços-carbono ou de baixas ligas é ruim, pois sua tenacidade é baixa e não apresentam quebra-cavacos. Seu principal limitante era exatamente esta fragilidade, o que foi solucionado com o desenvolvimento de cerâmicas mistas, das cerâmicas reforçadas com SiC na forma de *whiskers* e das cerâmicas à base de nitreto de silício. No Quadro 7 encontra-se as propriedades de alguns tipos de ferramentas cerâmicas.

Quadro 7 - Propriedades das principais ferramentas cerâmicas.

MATERIAL	MÓDULO DE ELASTICIDADE (GPa)	DUREZA (GPa)	TENACIDADE K <sub>1c</sub> (MPa M <sup>1/2</sup> )	COEFICIENTE DE DILATAÇÃO TÉRMICA (10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup> )	CONDUTIVIDADE TÉRMICA (Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	400	17,2	4,3	8,0	10,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + TiC	420	20,6	4,5	8,5	13,0
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> + ZrO <sub>2</sub>	390	16,5	6,5	8,5	8,0
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> + SIALON	300	15,6	6,5	3,1	9,7
SiC / WHISKER	390	18,5	8,0	6,4	32,0

Fonte: Machado *et al.* (2011)

De acordo com Diniz, Coppini e Marcondes (2014), algumas propriedades dos materiais cerâmicos prejudicam seu desempenho com ferramentas de usinagem, tais como baixa condutividade térmica, o que dificulta a transferência de calor e faz com que a interface e região próxima do contato cavaco-ferramenta e peça-ferramenta atinja temperaturas muito

elevadas, e baixa tenacidade, que facilita o aparecimento de trincas e a quebra da ferramenta. Outro fator importante é a fragilidade quando submetida a um gradiente elevado de temperatura, o que facilita também o aparecimento de trincas e que tornam a utilização de fluidos de corte em processo com ferramenta cerâmica inviável. Sua classificação é dividida em:

- À base de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ): Divididas em cerâmicas puras, cerâmicas mistas e alumina reforçada com *whiskers*. As cerâmicas puras são compostas unicamente de finos grãos de alumina sinterizados, podendo conter algum teor de óxido de magnésio, para inibir o crescimento de grãos, óxido de cromo, titânio e níquel, para aumento da resistência mecânica, ou alumina com baixos percentuais de óxido de zircônio ( $\text{ZrO}_2$ ), que aumentam a tenacidade do material. As cerâmicas mistas contém, além de alumina, 20 a 30% em volume de carboneto de titânio (TiC) e pequenas quantidades de nitreto de titânio (TiN). A alumina reforçada com *whiskers* é constituída de alumina com inclusões de monocristais de SiC;
- À base de nitreto de silício ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ): São cristais de  $\text{Si}_3\text{N}_4$  com uma fase intergranular de  $\text{SiO}_2$  que são sinterizados na presença da alumina (SiAlON) e/ou óxido de ítrio ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) e magnésio (MgO).

De acordo com Machado et al. (2011), alguns cuidados devem ser adotados para utilização de ferramentas cerâmicas: uso de chanfros e evitar corte interrompido antes de iniciar a operação (*dimensões do chanfro de 0,05 a 0,3mm com ângulos entre 20° e 30°*); o uso de fluidos de corte deve ser evitado e, no caso de haver necessidade de uso, deve-se usar fluido em abundância na aresta de corte (evitando gradientes de temperatura); não usar aresta cortante afiada sem chanfro ou arredondamento (*honing*); usar arestas com raio de ponta; preferir valores maiores de velocidade de corte e de avanço possíveis; usar um rígido sistema de fixação do inserto e um bom assentamento da pastilha no suporte; usar em máquinas-ferramentas rígidas, livres de vibração.

## 2.5 MÉTODO DE TAGUCHI

O Método de Taguchi trata da qualidade de projeto e engenharia (*off-line*) assim como da qualidade de manufatura (*on-line*). A definição de qualidade dada pelo Dr. Genichi Taguchi, visa fundamentalmente o cliente final. A qualidade é definida de uma maneira

negativa: "Qualidade é a perda imposta a atividade a partir do momento em que o produto é expedido". Esta perda inclui os custos da insatisfação dos clientes, que por sua vez conduzem a custos de reputação da empresa. Esta definição é bastante diferente da definição tradicional orientada para o produto, que inclui os custos de trabalho, sucata, garantia e custos de serviços para medir a qualidade. O cliente é a parte mais importante do fluxo deste processo, uma vez que produtos e serviços com qualidade irão garantir o retorno dos clientes, melhorando a reputação e aumentando a cota de mercado. Os Japoneses foram os primeiros a perceber o potencial de outro método o DOE (*Design of experiments*). Contrariamente ao método tradicional, este executa a mudança sistemática de vários fatores simultaneamente, garantido o estado independente de todos os fatores do produto. (SILVA,2013)

Os 4 pontos principais da filosofia da qualidade de Taguchi são:

1. Num mercado competitivo, a melhoria contínua da qualidade e a redução de custos são necessárias para que as empresas sobrevivam;
2. Uma medida importante da qualidade de um determinado artigo produzido é o custo total que esse artigo infringe à sociedade;
3. A perda de um consumidor devido à má qualidade é aproximadamente igual ao quadrado do desvio da sua característica de performance em relação ao seu objetivo ou valor nominal;
4. A variação da performance de um produto onde um serviço pode ser reduzido, se observados os efeitos não lineares que os fatores (parâmetros) têm nas características de performance. Qualquer pequeno desvio do valor objetivo, conduz a uma qualidade.

Taguchi dá uma grande ênfase na aproximação entre a engenharia e a qualidade. Afirma que, produzindo com determinados objetivos ou requisitos de maneira a minimizar a variação da performance de um determinado produto, vai-se aumentar a qualidade e a satisfação dos clientes. A essa variação ele chama ruído. Taguchi identifica 3 tipos distintos de ruído:

1. Ruído externo: Variáveis ambientais ou condições de uso que, perturbam as funções do produto (temperatura, umidade, poeira, etc.);
2. Ruído interno: mudanças que sucedem como resultado de um desgaste;
3. Ruído peça – a – peça: Diferenças entre produtos que, são fabricados de acordo com as mesmas especificações.

O Projeto de qualidade de Taguchi, incide fundamentalmente em 3 áreas distintas:

1. Projeto do sistema. É o processo de aplicação de conhecimentos de engenharia e científicos de maneira a produzir um projeto básico de um protótipo funcional. O projeto inicial pode ser funcional mas poderá estar muito longe dos termos ótimos de qualidade e de custo.

2. Projeto de parâmetros. Meios de reduzir custos e melhorar as performances sem remover as causas da variação. O projeto de parâmetros requer sempre uma experiência para a avaliação dos efeitos dos fatores de ruído nas características da performance de um determinado produto. O objetivo desta experiência é o de selecionar os níveis ótimos dos parâmetros do projeto, de maneira que o sistema seja funcional, que tenha um alto nível de performance independentemente das condições de uso, e que seja robusto aos fatores de ruído. Tradicionalmente, fazer experiências com as variáveis de projeto, mudando uma de cada vez ou por tentativa erro, torna-se um processo muito demorado e muito caro, até encontrar a combinação ótima de parâmetros do projeto. Em muitos casos, devido as pressões existentes do mercado, o resultado (devido à falta de tempo), é um produto que está longe de ser considerado ótimo. Como exemplo, se um projetista estiver a estudar 13 parâmetros de controle, e cada um tiver 3 níveis, variando 1 fator de cada vez, significaria estudar 1.594.323 configurações experimentais ( $3^{13}$ ). Em contraste, o projeto robusto de Taguchi dá-nos um sistema eficiente na condução de experiências com o intuito de determinar o conjunto ótimo de parâmetros de projeto tanto a nível de performance como de custos. Este método usa matrizes ortogonais, baseado na teoria do projeto de experiências. Usando estas matrizes ortogonais, vamos reduzir significativamente o número de experiências, em que a quantidade de colunas nessas matrizes, representa o número máximo de fatores que podem ser estudados.

3. Projeto de tolerâncias. Meios de reduzir a variação controlando as causas, mas com aumento de custo. É o processo de determinação de tolerâncias à volta dos valores nominais selecionados na fase do projeto de parâmetros. O projeto de tolerâncias é necessário se o projeto robusto não conseguir produzir a performance desejada sem o uso de componentes especiais muito dispendiosos ou processos de grande precisão. O projeto de parâmetros e o projeto de tolerâncias, têm como base a otimização da razão Custo/Performance, utilizando a tecnologia do projeto/planejamento de experiências.

Os tipos de Função Qualidade – Custo são:



## 1. Nominal – é – melhor

$$L(y) = \frac{A_0}{\Delta^2_0} X (\bar{y} - m)^2$$

O custo de qualidade é sempre indesejável em qualquer dos lados do valor objetivo. Exemplos de tipos de problemas Nominal-é-melhor:

- Controle do fluxo de aerossol de uma lata de spray;
- Tornear o cilindro de um motor para atingir um determinado diâmetro;
- Controlar o diâmetro de um filamento de uma lâmpada;
- Controlar a viscosidade de um óleo para automóvel;
- Controlar o diâmetro de um pneu.

A função-custo Nominal-é-melhor, pode ser somente aplicada a uma peça ou produto, como também ao custo médio associado a mais do que uma unidade. O conceito de custo médio é essencial para a interpretação do conceito da razão sinal ruído (*signal-to-noise ratio* - S/N). Conseqüentemente, vale a pena verificar como este custo vai se decompor em duas partes distintas: A contribuição devida ao valor médio estar fora do objetivo e a contribuição devida à variância.

Sendo  $K = \frac{A_0}{\Delta^2_0}$ , a minha função custo final para n unidades produzidas vai ser:

$$L(y) = K [S^2 + (\bar{y} - m)^2]$$

Para reduzir custos, deve-se minimizar a expressão  $[S^2 + (\bar{y} - m)^2]$  e pode ser feito de duas maneiras:

- Reduzir a variação que está a causar a dispersão em volta do valor  $\bar{y}$ , ou seja, minimizar  $S^2$ .
- Ajustar a resposta média  $\bar{y}$ , aproximado do valor objetivo,  $(\bar{y} - m)^2 = 0$ .

## 2. Menor – é – melhor

$$L(y) = K(y)^2$$

Algumas respostas nunca têm valores negativos, a sua resposta ideal é 0. A medida que  $y$  se afasta de 0, a performance piora e o custo começa a aumentar. Exemplos de tipos de problemas Menor-é-melhor:

- Fuga de radiações no micro-ondas;
- Quantidade de papel atolado na copiadora;
- Defeitos em uma imagem;
- Poluição do sistema de exaustão de um automóvel;
- Vibração na coluna de direção;
- Corrosão nos materiais.

A função Menor-é-melhor pode ser somente aplicada a uma peça ou produto, como também ao custo médio associado a mais do que uma unidade. Sendo  $K = \frac{A_0}{\Delta^2}$ , a minha função custo final para  $n$  unidades produzidas vai ser:

$$L(y) = K [S^2 + (\bar{y})^2]$$

Uma vez que o valor ideal é 0,  $\bar{y}$  é o desvio da média em relação a 0. A função ideal está focada no mínimo valor possível da resposta.

### 3. Maior-é-melhor

$$L(y) = A_0 \Delta_0^2 (1/(y)^2)$$

Conceitualmente, nestes casos, à medida que o valor da performance se aproxima de infinito, o custo da qualidade aproximasse de 0. Esta função é simplesmente o inverso da Menor-é-melhor. Exemplos de tipos de problemas Maior-é-melhor:

- Força de aderência;
- Força de uma junta soldada;
- A capacidade de tração de um pneu;
- Número de quilômetros feitos com 1L de gasolina;
- Resistência à corrosão de uma carroceria.

A função Maior-é-melhor pode ser somente aplicada a uma peça ou produto, como também ao custo médio associado a mais do que uma unidade. Sendo  $K = A_0 \Delta_0^2$ , a minha função custo final para n unidades produzidas vai ser:

$$L(y) = K \left(1 + \frac{3s^2}{y^2}\right)$$

#### 4. Nominal – é – melhor – assimétrico

Há certas situações, em que a performance de uma determinada característica causa mais danos, se for desviada para direções opostas do seu valor objetivo.

A função de custo assimétrica de custo toma então a seguinte forma:

$$L^+(y) = K^+ (y - m)^2, y > m$$

$$L^-(y) = K^- (y - m)^2, y \leq m$$

Exemplos de tipos de problemas Nominal-é-melhor-assimétrico: - A quantidade de toner que uma copiadora usa para reproduzir uma imagem. Muito toner vai aumentar o custo destes, que vai ser mais dispendioso, pouco toner, vai produzir imagens deficientes, que vai dar origem a uma rejeição imediata; - Variação da temperatura de um frigorífico. Estraga-se mais comida se a temperatura subir acima do seu valor nominal, do que se ela baixar. (RODRIGUES, M. V. (2013))

### SINAL DE RUÍDO

A função de perda de Taguchi (perda para a sociedade), e a razão de sinal de ruído (S/N) são elementos críticos deste procedimento de otimização. A razão S/N é uma medida de performance, que serve para escolher os níveis dos fatores que melhor se comportam com o ruído. Esta razão depende da média e da variabilidade. São definidas essencialmente 3 formas de funções de perda:

1. Quanto – menor – melhor: (níveis de impurezas, defeitos encontrados, etc.)
2. Quanto – nominal – melhor: (Diâmetro interior/exterior, nível de umidade, etc.)
3. Quanto – maior – melhor: (eficiência de combustíveis, resistência à corrosão, etc.)

Para cada uma destas 3 categorias de Sinal – de – ruído, cada transformação  $\eta$  é expressa em decibéis (dB), em vez de unidades observadas.

### 1. Menor é a melhor característica

A característica de qualidade é contínua e não negativa, estando no intervalo  $[0, \infty[$ , onde o valor mais desejado é zero. Pode-se colocar como exemplos de características menor é melhor a poluição de uma planta de energia, a emissão de radiação eletromagnética em equipamentos de telecomunicação e corrosão em metais e outros materiais. Pode ser calculado pela Equação 5.

$$\eta = -10 \log[1/n \sum_{i=1}^n y_i^2] \quad (5)$$

Onde  $\eta$  é a razão sinal ruído e  $y_i$  é o valor da característica na  $i$ -ésima medição e  $n$  é o número de medições.

### 2. Nominal é a melhor característica

Também a característica de qualidade é contínua e não negativa  $[0, \infty[$ , onde tem-se um valor alvo não zero e finito como valor ideal para a característica de qualidade. Como exemplo tem-se a deposição de um filme em que a espessura desejada é um valor específico. Este tipo de característica tem sua razão sinal ruído calculada pela Equação 6.

$$\eta = 10 \log \mu^2 / \sigma^2 \quad (6)$$

Onde  $\mu$  e  $\sigma$  são dados pelas Equações 7 e 8.

$$\mu = 1/n \sum_{i=1}^n y_i \quad (7)$$

$$\sigma^2 = 1/n - 1 \sum_{i=1}^n (y_i - \mu)^2 \quad (8)$$

A otimização de problemas do tipo nominal é melhor são realizadas em duas etapas. Primeiro, maximiza-se a razão sinal ruído  $\eta$ , selecionando-se os níveis dos fatores de controle

para maximizar  $\eta$  enquanto ignora-se a média. Segundo, ajusta-se a média no alvo, onde usa-se o fator de ajuste para trazer a média para o alvo sem mudar  $\eta$ .

### 3. Maior é a melhor característica

A característica de qualidade é contínua e não negativa sendo desejável que a característica tenha o maior valor. Tem-se como exemplos a resistência mecânica de um fio por unidade de área de secção e a distância percorrida por litro de combustível em um automóvel. Calcula-se a taxa de sinal ruído pela Equação 9.

$$\eta = -10 \log(1/n \sum_{i=1}^n y_i^2) \quad (9)$$

A estratégia de otimização do método de Taguchi pode ser resumido em (PHADKE, 1989):

- a) Medição dos efeitos dos fatores de controle considerando os valores de  $\eta$  e das médias;
- b) Para os fatores com efeitos significativos nos valores de  $\eta$ , selecionar os níveis que maximizam  $\eta$ ;
- c) Selecionar qualquer fator que não tenha efeitos sobre  $\eta$ , mas mostrem efeitos significativos na média como fatores de ajuste. Na prática, é necessário selecionar como fatores de ajuste aqueles fatores com pequeno efeito em  $\eta$  e efeito significativo na média. Usar o fator de ajuste para trazer o valor da média para os valores alvo. O ajuste da média para o valor alvo é a principal atividade de controle de qualidade em processos de manufatura e é necessária pela mudança de matéria prima, variação das condições de processo, etc.;
- d) Para os fatores que não possuem efeitos em  $\eta$  e na média, pode-se selecionar o nível mais conveniente do ponto de vista de outras considerações como outras características de qualidade ou custos.

Apesar das vantagens de utilizar menos experimentos quando comparados ao planejamento experimental de fatorial completo, de utilizar a razão sinal ruído e função de qualidade para otimização e minimização de variação do processo e do uso de arranjos ortogonais, o método de Taguchi possui algumas desvantagens. A primeira delas é que nem todos os arranjos ortogonais possuem espaço na sua matriz experimental para investigação de efeitos de segunda ordem, ocorrendo o efeito de “*confounding*”. Se a análise de efeitos de

segunda ordem for importante, o pesquisador deve selecionar o arranjo ortogonal adequado, atentando-se aos gráficos lineares para posicionar corretamente os fatores de interesse nas colunas adequadas e assim obter esses efeitos. Outro ponto é que o método de Taguchi analisa cada um dos fatores de qualidade, as variáveis de saída, uma de cada vez, encontrando uma solução ótima para aquela variável específica. Em processos industriais, diversos parâmetros de qualidade estão presentes e casos de uma única resposta, variável de saída, são raros. De acordo com Shi, Zhang e Ren (2015), a principal limitação do método de Taguchi está no fato dele resolver problemas como se possuíssem um único objetivo, analisando-se apenas uma resposta por vez, onde para problemas com múltiplas respostas, a otimização é feita para cada uma das variáveis de saída.

## 2.6 ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) E TESTE TUKEY

De acordo com Montgomery e Runger (2008), a análise de variância, também conhecida como ANOVA é uma abordagem utilizada para se comparar vários grupos de interesse. Busca avaliar se há diferenças consideráveis entre os grupos investigados. Walpole, Myers e Myers (2009) salientam que a ANOVA é um procedimento muito comum usado para lidar com testes de médias populacionais. Paese, Caten e Ribeiro (2001) apresentaram uma aplicação da ANOVA para levantamento de possíveis fontes de variação relativos aos valores de bitola nominal em um processo de laminação de barras de aço. Neste estudo, os autores identificaram, através da ANOVA, que o tipo de aço foi considerado a principal fonte de variabilidade para este processo.

### Comparações Múltiplas

Segundo Sousa, Lira Junior e Ferreira (2012) diversas áreas do conhecimento utilizam ferramentas de análise estatística para investigar hipóteses propostas. Uma das maneiras de se realizar esta análise se dá através de técnicas de comparação múltipla entre as médias de tratamentos experimentais. Esta técnica é realizada posteriormente à ANOVA. De acordo com Walpole, Myers e Myers (2009), a ANOVA é um procedimento poderoso para testar a homogeneidade de um conjunto de médias. Entretanto, ao rejeitar a hipótese nula e aceitar a hipótese alternativa – de que as médias são iguais – ainda não é possível saber quais dentre as médias populacionais são iguais e quais são diferentes. Em geral, é de interesse realizar diversas (talvez, todas as possíveis) comparações correlacionadas entre os tratamentos. Desta

forma, uma comparação correlacionada pode ser vista como um contraste simples, ou um teste do tipo, para todos os  $i \neq j$ :

$$H_0: \mu_i - \mu_j = 0$$

$$H_1: \mu_i - \mu_j \neq 0$$

Todas as comparações correlacionadas possíveis entre as médias podem ser bastante benéficas quando certos contrastes complexos não são conhecidos a priori. Ainda segunda Sousa, Lira Junior e Ferreira (2012) verificaram a eficiência das respostas de diferentes métodos de comparações múltiplas entre médias. Analisaram quatro diferentes procedimentos de testes de comparações múltiplas entre médias aplicadas a 200 experimentos e a 10 variáveis, criadas a partir de valores aleatórios. De acordo com os resultados obtidos, o maior nível de concordância obtido, considerando o nível adotado, ocorreu a partir das análises através do Teste de Tukey. Conagin, Barbin e Demétrio (2008) propuseram duas modificações do teste de Tukey. Através de simulação pelo método de Monte Carlo, compararam o poder de vários (16) testes estatísticos, considerando dados para 600 experimentos em um planejamento em blocos com oito tratamentos, sendo 400 com repetições e 200 sem repetições. Os autores adotaram coeficiente de variação de 10% e erro tipo I com probabilidade  $\alpha=0,05$ . Adotou-se também diferenças entre as médias dos tratamentos de 30%, 20%, 15%, 10%, 5%, incluídos dois tratamentos que, parametricamente, não diferiram da média do controle. Em todos os ensaios o poder diminuiu à medida que as diferenças das médias, comparadas à média do controle, decresceram. Além disso, os autores concluíram que os testes modificados apresentaram uma maior eficiência se comparados aos testes originais propostos. Ainda de acordo com Sousa, Lira Junior e Ferreira (2012), é importante os testes apresentarem bom controle do valor de erro tipo I, ou seja, apresentarem boa taxa de exatidão ao afirmarem que as diferenças significativas relacionadas aos níveis de cada fator de um experimento, quando na verdade não há, pois as mesmas são aleatórias. Dentre as comparações múltiplas, tem-se os Testes de Tukey, Dunnet, LSD, Duncan, dentre outros. Optou-se por utilizar o teste de Tukey para condução das comparações múltiplas porque permite testar qualquer contraste, sempre, entre duas médias de tratamentos, e, principalmente devido ao fato dos experimentos não serem emparelhados, ou seja, os pares (teste principal e réplica) para cada arranjo (avanço, profundidade de corte e ambiente) não foram realizados em seguida, devido à dificuldade de realizar todos os layouts necessários em

um único dia. Logo, optou-se por realizar todos os testes principais em um único dia e suas respectivas réplicas no dia seguinte.

### Teste de Tukey

Segundo Walpole, Myers e Myers (2009) o procedimento de Tukey permite a formação de intervalos de confiança  $100(1-\alpha)\%$  simultâneos para todas as comparações em pares. O método é baseado em uma distribuição de amplitude “estudada”. O percentual apropriado é uma função de  $\alpha$ ,  $k$  e  $v =$  graus de liberdade para  $S^2$ . Ainda de acordo com os referidos autores, o método de comparações em pares de Tukey envolve a descoberta de uma diferença de significância entre as médias  $i$  e  $j$ , se  $|\bar{y}_i - \bar{y}_j|$  exceder  $q[\alpha, k, v]$ .



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta parte do trabalho foi subdividida em tópicos abordando: o corpo de prova submetido ao estudo de usinagem, o maquinário para a usinagem e os equipamentos para a obtenção dos sinais durante o processo de corte, a obtenção da rugosidade, a análise dos desgastes das ferramentas e análise dos cavacos, o tratamento dos dados de potência, emissão acústica e vibração, e a apresentação das ferramentas de corte juntamente com o planejamento experimental a ser aplicado para cada uma.

#### 3.1 CORPO DE PROVA

Para os ensaios de torneamento cilíndrico externo, foi utilizado um corpo de prova de formato cilíndrico do material VAT 32<sup>®</sup>. Suas dimensões iniciais eram de 250 mm de comprimento e diâmetro de 56,6 mm, material doado pela Villares Metals. A composição química nominal da peça pode ser vista no Quadro 8.

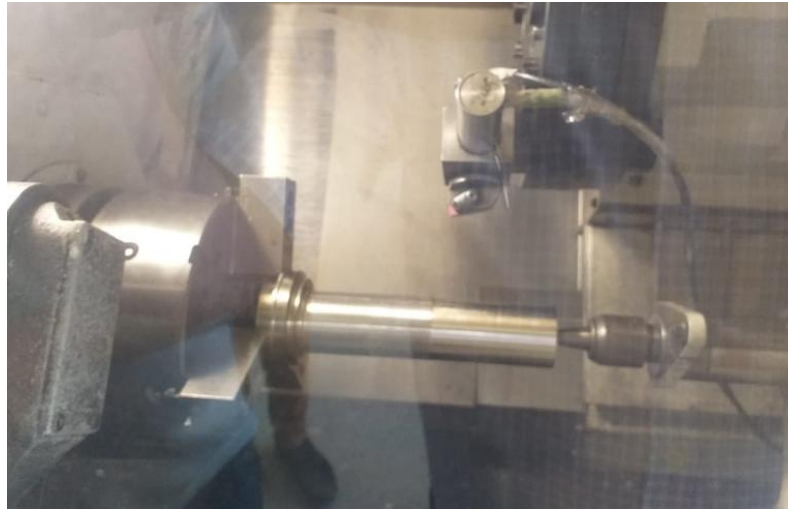
Quadro 8 – Composição química nominal da peça de VAT 32<sup>®</sup>.

Liga	C	Si	Mn	Ni	Nb	Al	Ti	Cr	Fe
VAT 32 <sup>®</sup>	0,3	0,2	0,3	32,0	3,9	1,8	2,0	15,5	Balanço

Fonte: Adaptado de Farina, Liberto e Barbosa (2013b)

O corpo de prova foi usinado pelo processo de torneamento cilíndrico externo, sem tratamentos térmicos. Na Figura 12, é mostrada a peça de VAT 32<sup>®</sup> montada na máquina para a realização dos ensaios, presa entre a castanha e a contraponta, dentro do centro de torneamento.

Figura 12 - Corpo de prova cilíndrico de VAT 32<sup>®</sup> posicionado para os ensaios.



Fonte: Próprio autor.

### 3.2 EQUIPAMENTOS PARA OS ENSAIOS DE TORNEAMENTO E O SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Os ensaios de torneamento ocorreram no centro de torneamento CNC da marca ROMI modelo GL240M, com potência de 15 kW, do Laboratório de Estudos da Usinagem da FEG-UNESP. Na Figura 13 pode ser visto o centro de torneamento que foi utilizado neste trabalho.

Figura 13- Centro de torneamento de CNC Romi GL240M.



Fonte: Próprio autor.

Juntamente ao centro de torneamento foi instalado um sistema de aquisição para captação em tempo real dos sinais de potência de corte, emissão acústica e vibração durante

os processos de usinagem. O sistema é composto de um módulo de canais da marca National Instruments modelo BNC-2120, acoplado a uma placa de aquisição de dados também da mesma marca ligada a um computador. Na Figura 14 pode ser encontrado o sistema de captação de dados utilizado.

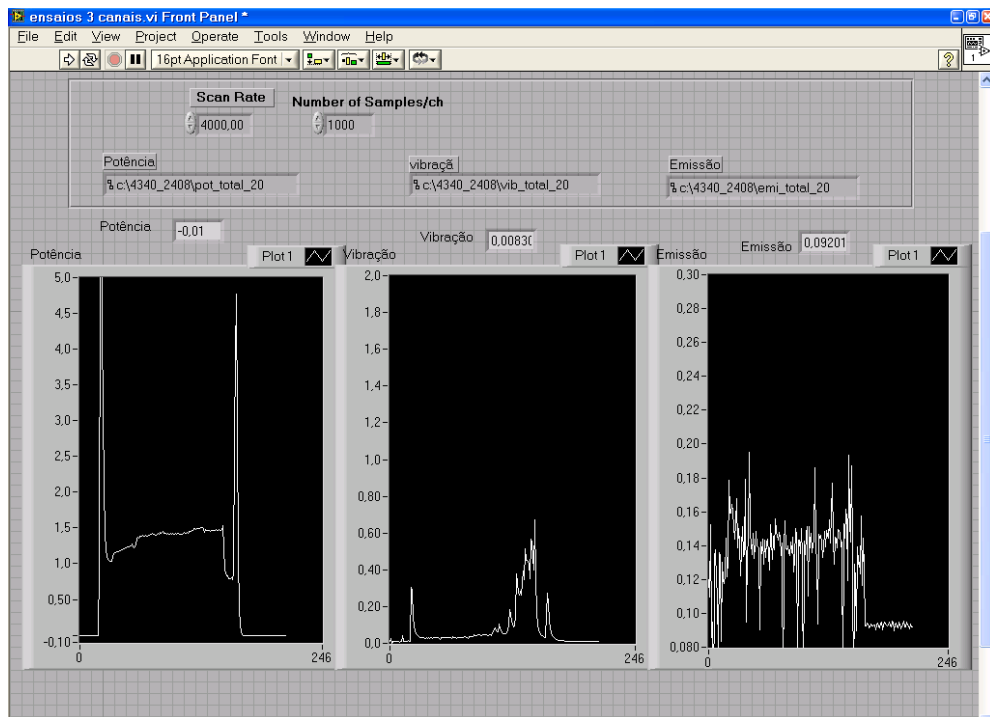
Figura 14- Sistema de aquisição de dados.



Fonte: Próprio autor.

Com o auxílio do *software* LABVIEW<sup>®</sup> da National Instruments montou-se um programa de supervisão, no qual podem ser verificados os dados que estão sendo captados e também gravá-los no formato de arquivo de extensão “txt”. A entrada de dados dos sensores foi feita em termos de unidades de tensão. Na Figura 16, tem-se a tela do programa de supervisão utilizado. Todos os sinais foram captados com uma taxa de 4000 Hz, ou seja, 4000 pontos por segundo de ensaio. Na Figura 15 pode-se observar os gráficos referentes à potência, vibração e emissão acústica.

Figura 15 - Tela do programa supervisor utilizado para captação de sinais durante os ensaios de torneamento.

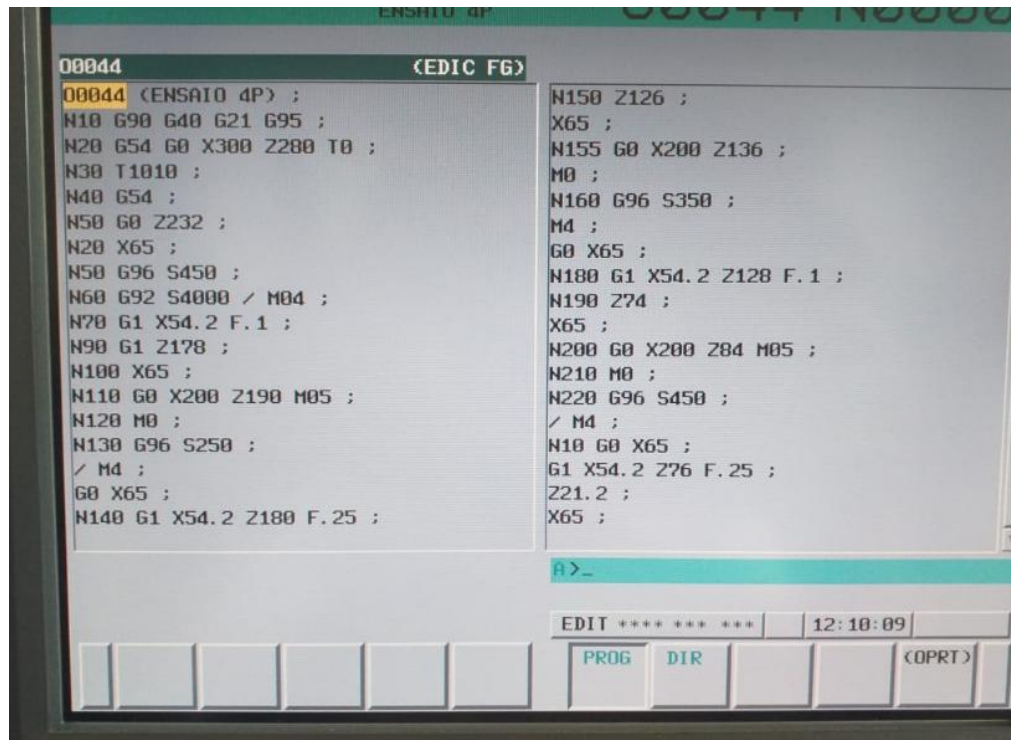


Fonte: Próprio autor.

O comando utilizado para a programação do deslocamento da ferramenta e os parâmetros de corte utilizados foi o FANUC (desenvolvido por uma empresa de engenharia mecânica e eletrônica do Japão, especializada em construção de robôs). A empresa foi a desenvolvedora do controle numérico (CN) em 1956, em 1976 desenvolveram o primeiro comando numérico informatizado (CNC) com o equipamento chamado Robodrill (site Fanuc – Robodrill (1973)).

Na Figura 16, pode ser observada na tela do centro de torneamento o programa CNC utilizado durante o ensaio de usinagem, juntamente com os parâmetros de corte utilizados e coordenadas dos movimentos realizados pela ferramenta, tanto dos movimentos ativos (onde há a remoção de cavaco), quanto dos movimentos passivos (deslocamento da ferramenta).

Figura 16 – Programa CNC utilizado durante o ensaio de usinagem.



Fonte: Próprio autor.

O sensor utilizado para a captação dos dados de potência consumida é um transformador de potência da marca LEM modelo AT 100 B10, ligado em uma das fases de entrada do motor do centro de torneamento responsável pelo movimento de rotação da placa e da peça, como mostrado na Figura 17. Este sensor envia um sinal de tensão proporcional à corrente elétrica da entrada do motor para o módulo de canais, sendo esta uma medida indireta da potência consumida para usinagem.

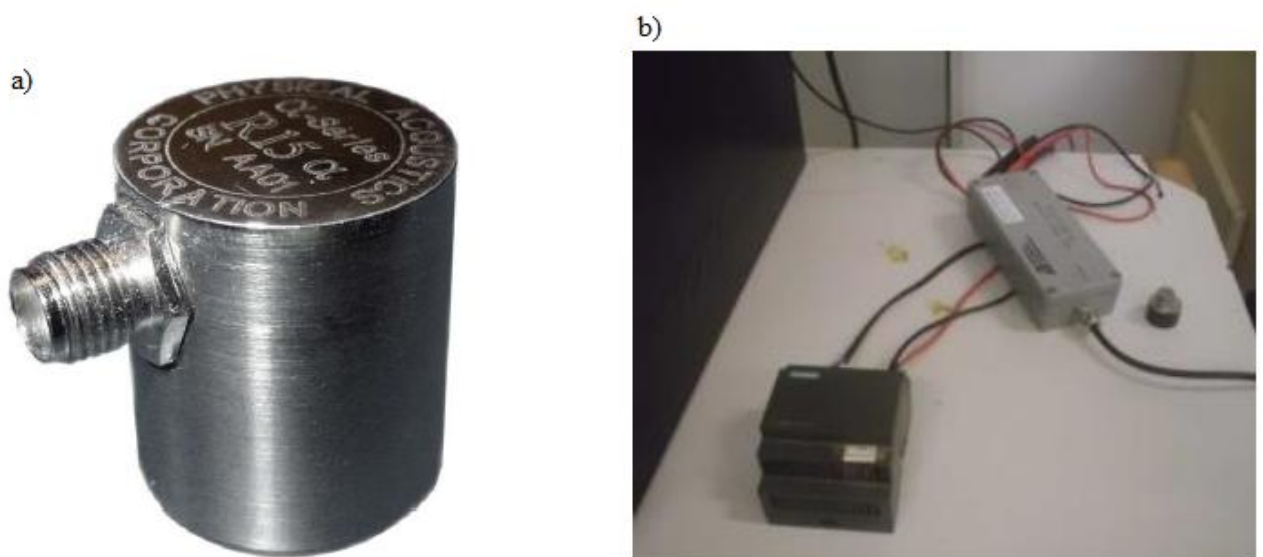
Figura 17 - Montagem do sensor de potência acoplado à entrada do motor principal do centro de torneamento CNC.



Fonte: Adaptado de Kondo (2019).

Para a obtenção do sinal de emissão acústica, foi utilizado um sensor R15 $\alpha$  da marca Physical Acoustic Corporation, juntamente com o pré-amplificador modelo 1272, com saída RMS para o módulo de canais, que podem ser visualizados na Figura 18, onde também é apresentada a fonte de alimentação.

Figura 18 – (a) Sensor de emissão acústica R15 $\alpha$  e (b) pré-amplificador modelo 1272 da Physical Acoustic Corporation.



Fonte: (a) Physical acoustic Corporation; (b) Adaptado de Kondo (2019).

Os sinais de vibração foram obtidos com a utilização do sensor de vibração piezelétrico da marca Vibro Control modelo TV-100, com alcance de 25 mm/s em sinal RMS, ligado ao módulo de canais conforme a Figura 19.

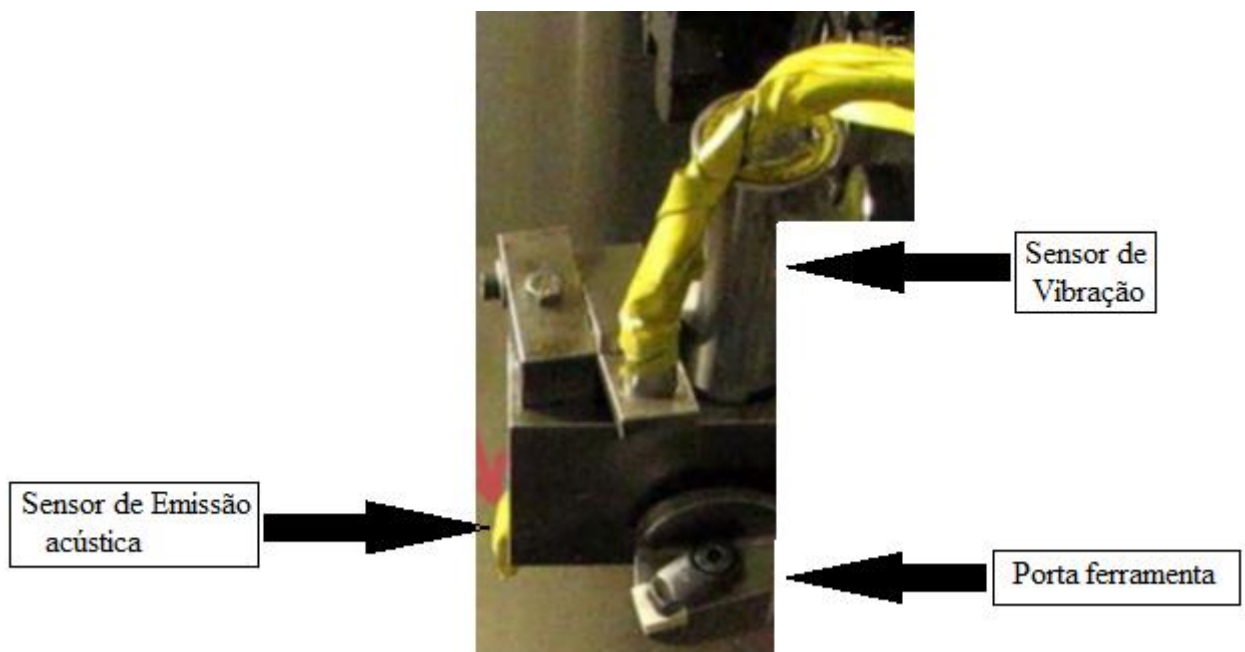
Figura 19- Sensor de vibração piezelétrico Vibro Control modelo TV-100.



Fonte: Adaptado de Kondo (2019).

Na Figura 20 podem ser vistos o posicionamento dos sensores de vibração e emissão acústica que ficam em um aparato fixado juntamente com o porta-ferramenta do torno. Este aparato foi fixado de maneira que garantisse a máxima rigidez com relação ao porta-ferramentas.

Figura 20 - Fixação dos sensores de vibração e emissão acústica juntamente ao porta-ferramenta.



Fonte: Próprio autor.

### 3.3 TRATAMENTO DE DADOS

Os dados obtidos e armazenados durante os ensaios, com o auxílio do *software* LABVIEW®, foram então tratados através de programas desenvolvidos pelo autor no *software* MATLAB® R2015b *student*. As etapas de tratamento consistem em:

- Conversão do separador de números decimais: o primeiro programa elaborado realizou a substituição das vírgulas, que separam as casas decimais dos sinais nos programas textos gerados pelo *software* LABVIEW, para ponto, que é o padrão usado pelo programa de tratamento dos dados MATLAB®;

- Conversão da matriz de dados em uma coluna de dados: para facilitar a programação e operações com os números contendo as informações dos sinais, converteu-se a matriz de dados proveniente do LABVIEW®, onde cada linha é a captação durante um segundo, com 4000 colunas, pois a taxa de aquisição era de 4000 pontos por segundo, para uma única coluna;

- Transformação dos sinais nas grandezas requeridas: os sinais de tensão  $U_{cc}$  (Tensão estipulada de curto circuito) correspondentes à potência, à emissão acústica e à vibração foram convertidos através das Equações 10, 11 e 12, respectivamente, para as unidades Watts (potência), RMS (emissão acústica) e mm/s (vibração).

$$PU = U_{cc} \cdot 10.220.0,79 \cdot \sqrt{3} \quad (10)$$

$$EA_{RMS} = U_{cc} \quad (11)$$

$$Vib = U_{cc} \cdot 25 / 8 \quad (12)$$

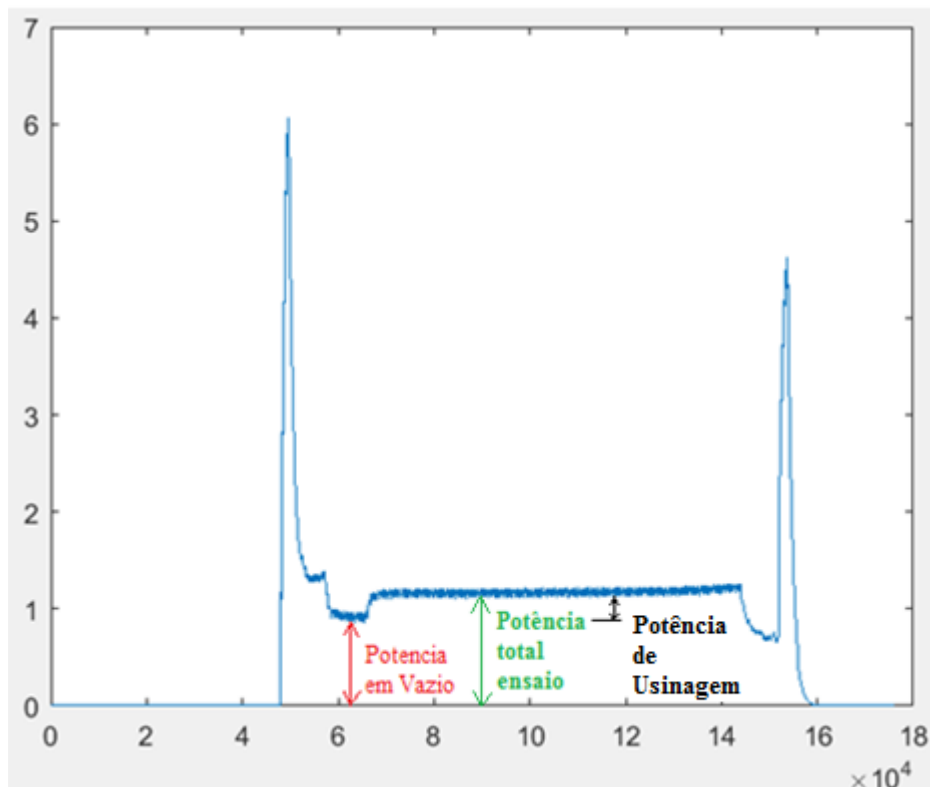
Onde, PU (Potência por unidade consumida) e  $EA_{RMS}$  (Valor médio quadrático de emissão acústica).

- Obtenção da potência em vazio e dos valores correspondentes do ensaio: montagem dos gráficos com os valores de potência de cada ensaio realizado identificando-se o valor em vazio da potência, correspondente a potência consumida para a movimentação dos mecanismos do CNC, atritos e outras perdas, identificação e separação da potência onde efetivamente havia o contato ferramenta de corte-peça. O valor em vazio foi descontado dos



valores médios de potência para que tenhamos a potência efetivamente utilizada na remoção de material, a potência consumida de usinagem. Aproveita-se a separação dos momentos de efetiva remoção de material para a separação dos valores de emissão acústica e vibração. Na Figura 21 encontra-se um exemplo de obtenção dos valores de potência em vazio e dos momentos de toque efetivo entre a ferramenta de corte e a peça;

Figura 21- Exemplo de gráfico de potência de um ensaio de torneamento para identificação da potência em vazio e do momento de efetiva remoção de material.



Fonte: Próprio autor.

- Obtenção dos valores médios: com a separação dos momentos de efetiva remoção de material, montou-se os gráficos de potência, emissão acústica e vibração, como mostrado na Figura 21. O programa então realizou a obtenção dos valores médios e máximos da potência de corte, da emissão acústica e da vibração nos momentos onde há efetivo contato ferramenta-peça para cada ensaio que foi realizado. Esses valores foram então utilizados na análise da influência dos parâmetros de corte nas respectivas respostas.

A opção de utilizar a média dos máximos de emissão acústica e vibração ocorreu por elas serem mais representativas do processo do que a simples média dos sinais durante o torneamento.

Os dados obtidos foram submetidos a análises estatísticas, através do *software* estatístico MINITAB 17. Para tanto foi utilizada a análise de variância (ANOVA), de acordo com o planejamento experimental adotado para cada ferramenta testada. Foi utilizado também o Teste de Tukey.

### 3.4 MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE

As rugosidades  $R_a$  e  $R_t$  foram obtidos nas peças depois de cada ensaio, efetuando 3 medições no meio da região usinada, com o auxílio do aparelho rugosímetro portátil da MAHR modelo MarSurf M300 + RD18 com *cut-off* de 0,8mm e comprimento de amostragem de 4 mm de acordo com a norma DIN EN ISO 4288:1996, com equivalência a norma ABNT NBR ISO 4288:2008 – Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do Perfil – Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade, sendo as medições realizadas na direção perpendicular ao avanço da ferramenta e realizadas três repetições. Encontra-se na Figura 22 o referido equipamento de mensuração de rugosidade. Em casos onde os valores de rugosidade ficaram fora da faixa especificada para o *cut-off* de 0,8 mm.

Figura 22 - Rugosímetro MAHR MarSurf M300+RD18.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 23, observa-se a medição da rugosidade com o rugosímetro portátil após a realização do processo de torneamento, com a peça ainda na máquina.

Figura 23 – Medição da rugosidade da peça na máquina após usinagem.

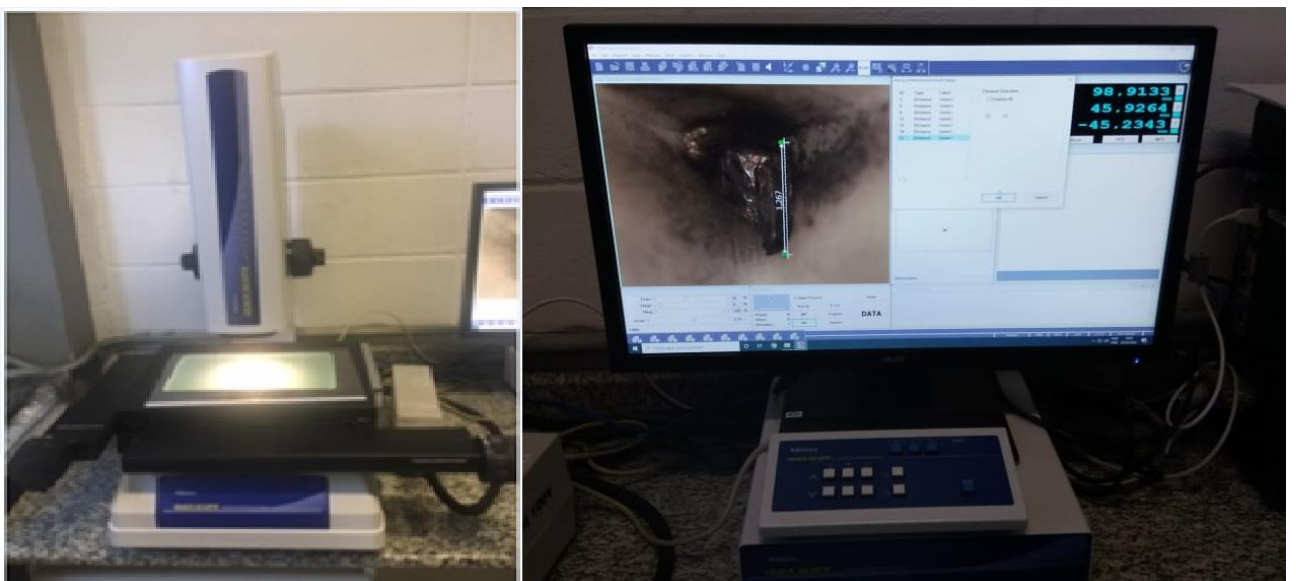


Fonte: Próprio autor.

### 3.5 MEDIÇÃO DE DESGASTE DAS FERRAMENTAS E ANÁLISE DOS CAVACOS

Os desgastes de flanco (análise quantitativa) foram obtidos depois da realização dos ensaios com auxílio do microscópio da Mitutoyo modelo Quick Scope QS-L2010Z, com mesa de movimento micrométrico. (Figura 25). Este equipamento se encontra no Laboratório de Estudos de Usinagem do Departamento de Materiais e Tecnologia da FEG-UNESP.

Figura 25 – Microscópio.

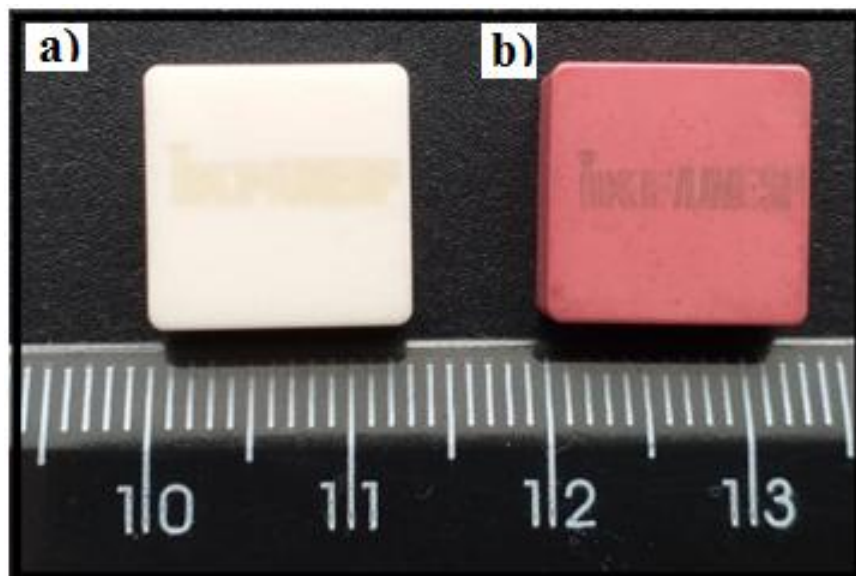


Fonte: Próprio autor.

### 3.6 MATERIAIS DAS FERRAMENTAS E PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

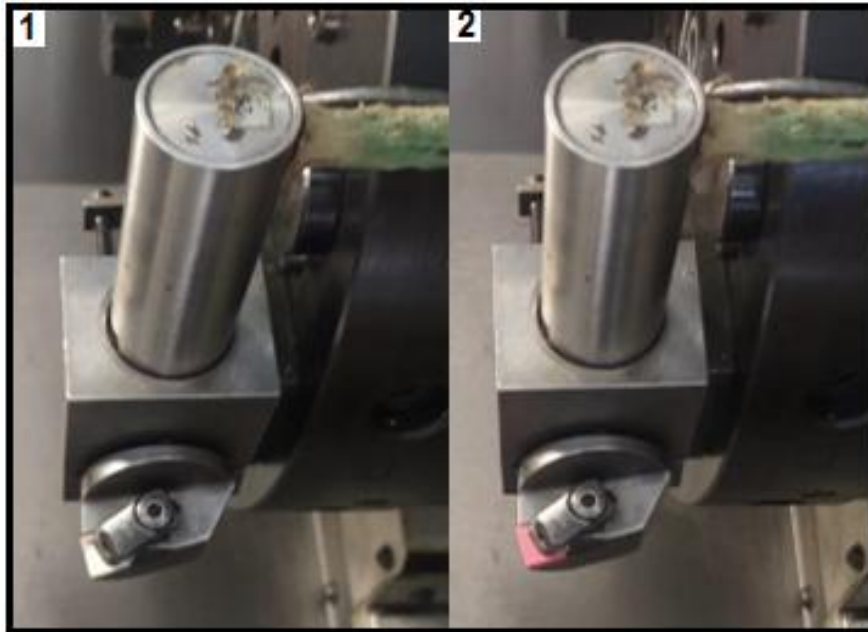
Foram testados os comportamentos de dois tipos diferentes de pastilhas experimentais de cerâmica, sendo uma com a composição de  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{MgO}$  e a outra,  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Ferramentas estas, ainda não comercializadas, produzidas pelo próprio grupo de pesquisa em usinagem do Departamento de Materiais e Tecnologia. Na Figura 25 são mostradas as pastilhas testadas na usinagem do VAT 32<sup>®</sup>. Na Figura 26 podem ser visualizadas as respectivas pastilhas montadas no suporte.

Figura 25 - Pastilhas cerâmicas utilizadas no processo de torneamento da superliga VAT 32<sup>®</sup>: de  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{MgO}$  (a) e de  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Cr}_2\text{O}_3$ (b).



Fonte: Próprio autor.

Figura 26 – Pastilhas testadas montadas no suporte para torneamento externo.



Fonte: Próprio autor.

As pastilhas cerâmicas foram testadas utilizando-se o suporte da fabricante Seco Tools modelo Capto B01T9032445 (Figura 27), suporte de cunha-grampo que pode trabalhar com pastilha tipo S. O ângulo de posição ( $K_r$ ) das pastilhas no suporte é de  $75^\circ$ , ângulo de inclinação ( $\lambda_s$ ) de  $-6^\circ$  e o ângulo de saída ( $\gamma_o$ ), para as ferramentas sem quebra-cavacos, de  $-6^\circ$ .

Figura 27 - Porta-ferramenta marca Seco Tools modelo Capto B01T9032445.



Fonte: Próprio autor.

Foram analisadas as influências dos fatores sobre as respostas potência de usinagem média, emissão acústica, vibração, rugosidade  $R_a$  e  $R_t$  e desgaste de flanco  $V_b$  da ferramenta. Na análise do desgaste de flanco  $V_b$ , optou-se por dividir esse valor pelo comprimento de corte, ou percurso de corte ( $L_c$ ), na determinada condição experimental. Esse fato é

importante, pois com a realização dos ensaios o diâmetro do corpo de prova diminuía, afetando diretamente o comprimento de corte de cada ensaio. Para que essa diferença fosse contabilizada nas análises de desgaste, optou-se por dividir o valor de  $V_b$  pelo comprimento de corte ( $L_c$ ). O valor de  $L_c$  foi calculado por meio da Equação (13).

$$L_c = \pi \cdot D \cdot L_f / 1000 \cdot f \quad (13)$$

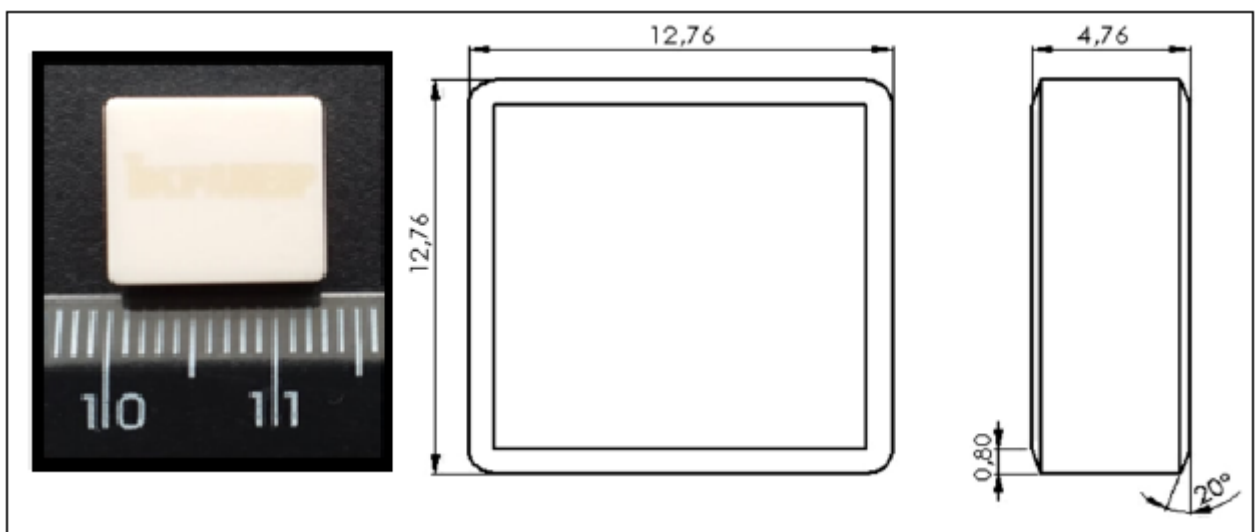
Onde  $D$  é o diâmetro da peça em mm,  $L_f$  é o percurso de avanço em mm,  $f$  é o avanço em mm/rev e  $L_c$  é o percurso de corte dado em m.

### 3.6.1 Pastilhas cerâmicas de $Al_2O_3 + MgO$

A pastilha cerâmica experimental criada pelo grupo de pesquisa é composta de 99,75% em peso de  $Al_2O_3$ , a partir de um pó de alumina  $\alpha$ , e 0,25% em peso de MgO com partículas entre 0,40-0,60  $\mu m$  de tamanho. A densidade relativa destas pastilhas é de 98,50 +/- 0,11%, retração linear de 20,41 +/- 0,16%, Tenacidade à fratura de  $K_{Ic} = 3,646 +/- 0,14\%$  MPa.m<sup>1/2</sup> e dureza Vickers de HV=1928,36 +/- 0,12%. O MgO age como dopante, com o objetivo de controlar o tamanho do grão e promover aumento da dureza.

Sua geometria tem codificação SNGN120408, com 12,76 mm de largura, espessura de 4,76 mm e raio de ponta de 0,8 mm. Há ainda um chanfro nas arestas de corte de 20°, como visto na Figura 28.

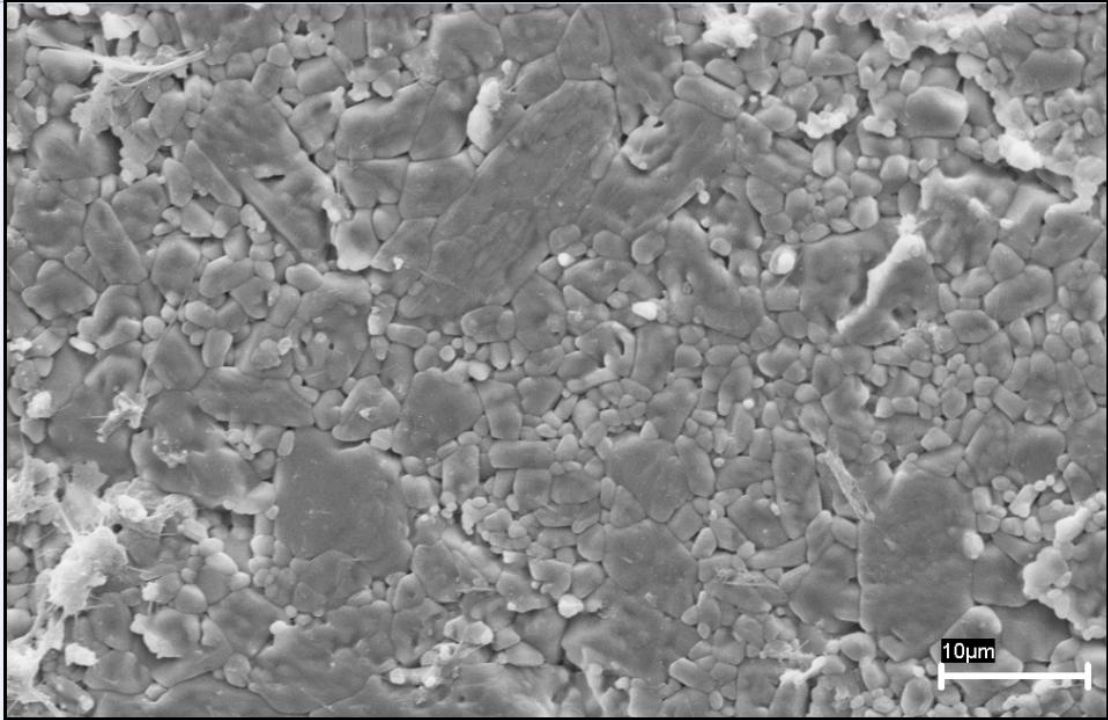
Figura 28- Pastilha experimental de  $Al_2O_3 + MgO$  SNGN120408.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 29 observa-se a micrografia da pastilha experimental de  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$  obtida por meio de um microscópio eletrônico de varredura (MEV).

Figura 29 – Microestrutura da pastilha cerâmica experimental de composição  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ .



Fonte: Cortesia do grupo de pesquisa em usinagem do Departamento de Materiais e Tecnologia – Unesp (2019).

Como planejamento experimental, os ensaios de torneamento externo foram utilizados as pastilhas cerâmicas, optou-se por um arranjo ortogonal de Taguchi L8. As análises feitas investigaram três fatores, velocidade de corte (250, 350 e 450 m/min), avanço (0,1; 0,15 e 0,25 mm/rev) e profundidade de corte (0,15; 0,25 e 0,35 mm). Para cada combinação desses fatores, conforme o Quadro 9, foram realizadas duas repetições.

Quadro 9 – Combinação para os testes práticos com a ferramenta de cerâmica  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ .

Experimento	Velocidade de corte (m/min)	de Avanço (mm/rev)	de Profundidade de corte (mm)
1 e 7	250	0,1	0,15
13 e 19	250	0,15	0,25
25 e 31	250	0,25	0,35
2 e 8	350	0,1	0,15
14 e 20	350	0,15	0,25
26 e 32	350	0,25	0,35
15 e 21	450	0,1	0,25
27 e 33	450	0,15	0,35
3 e 9	450	0,25	0,15

Fonte: Próprio autor.

Cada combinação foi realizada com uma aresta de corte nova da ferramenta e o percurso de avanço adotado de  $L_f = 52\text{mm}$ . As respostas analisadas foram potência de usinagem, emissão acústica, vibração, rugosidade  $R_a$  e  $R_t$  e desgaste de flanco da ferramenta pelo comprimento usinado. Essas respostas foram então analisadas, encontrando-se a influência de cada fator sobre as variáveis respostas.

Com base na metodologia de aplicação de Taguchi, foi encontrada a condição de corte do processo onde obteve-se as melhores respostas.

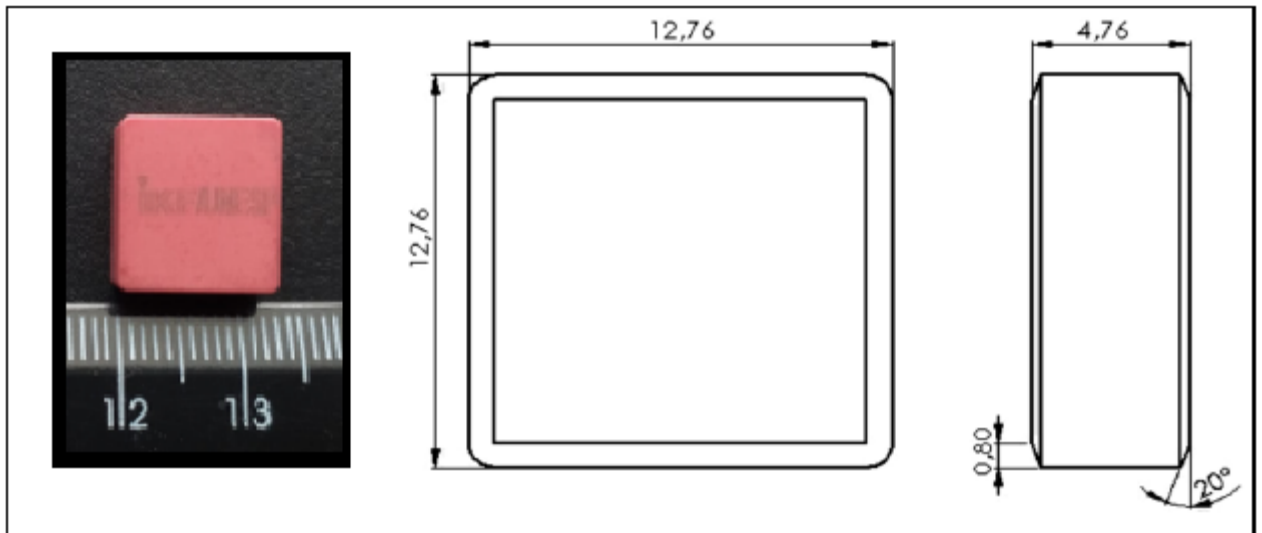
### 3.6.2 Pastilhas cerâmicas de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$

A pastilha cerâmica experimental de  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$  desenvolvida pelo grupo de pesquisa em usinagem e é composta de 99% em peso de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , a partir de um pó de alumina  $\alpha$ , e 1,0% em peso de  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . A densidade relativa destas pastilhas é de 98,14 +/- 0,10%. Apresenta a dureza Vickers (Hv) de 2094 +/- 0,08% Vickers. Propriedade mecânica de tenacidade à fratura de  $K_{Ic} = 3,25 +/- 0,22\% \text{MPa.m}^{1/2}$  e Retração linear de 19,80 +/- 0,15%. O  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  tem o objetivo de aumento da dureza, controle do grão e controle da densificação.

Sua geometria tem codificação SNGN120408, com 12,76 mm de largura, espessura de 4,76 mm e raio de ponta de 0,8 mm. Há ainda um chanfro nas arestas de corte de 20°, como visto na Figura 30.



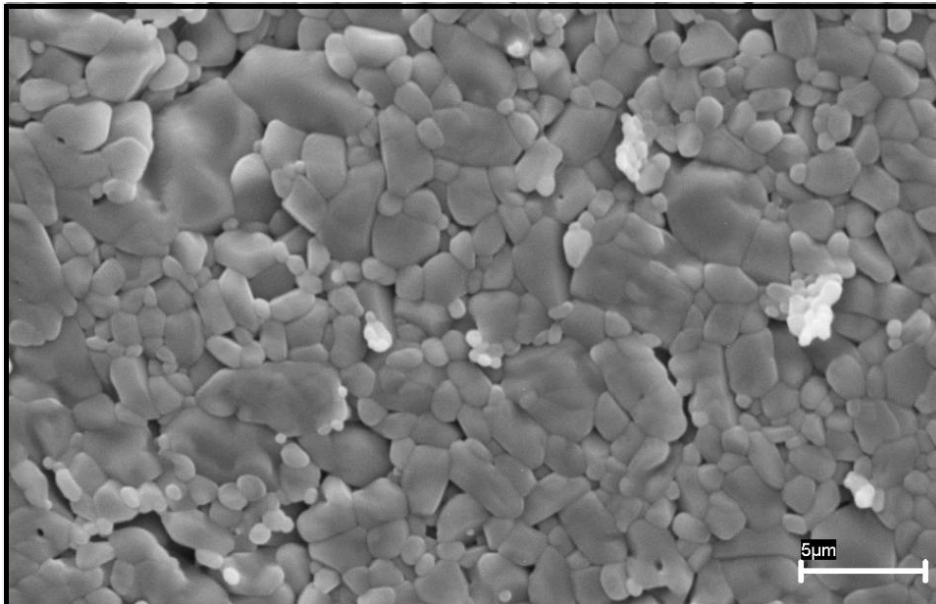
Figura 30- Pastilha experimental de  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$  SNGN120408.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 31 observa-se a microestrutura da pastilha experimental de  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$  obtida por meio de um microscópio eletrônico de varredura.

Figura 31 - Pastilha experimental de  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$ .



Fonte: Cortesia do grupo de pesquisa em usinagem do Departamento de Materiais e Tecnologia – Unesp (2019).

Como planejamento experimental, os ensaios de torneamento externo foram utilizados as pastilhas cerâmicas, optou-se por um arranjo ortogonal de Taguchi L8. As análises feitas investigaram três fatores, velocidade de corte (250, 350 e 450 m/min), avanço (0,1; 0,15 e

0,25 mm/rev) e profundidade de corte (0,15; 0,25 e 0,35 mm). Para cada combinação desses fatores, conforme o Quadro 10, foram realizadas duas repetições.

Quadro 10 – Combinação para os testes práticos com a ferramenta cerâmica  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$ .

Experimento	Velocidade de corte (m/min)	Avanço (mm/rev)	Profundidade de corte (mm)
28 e 34	250	0,1	0,15
4 e 10	250	0,15	0,25
16 e 22	250	0,25	0,35
17 e 23	350	0,1	0,15
29 e 35	350	0,15	0,25
5 e 11	350	0,25	0,35
30 e 36	450	0,1	0,15
6 e 12	450	0,15	0,25
18 e 24	450	0,25	0,35

Fonte: Próprio autor.

Cada combinação foi realizada com uma aresta de corte nova da ferramenta e o percurso de avanço adotado de  $L_f = 52\text{mm}$ .

As respostas analisadas foram potência de usinagem, emissão acústica, vibração, rugosidade  $R_a$  e  $R_t$  e desgaste de flanco da ferramenta pelo comprimento usinado. Essas respostas foram então analisadas, encontrando-se a influência de cada fator sobre as variáveis respostas.

Com base na metodologia de aplicação de Taguchi, foi encontrada a condição de corte do processo onde obteve-se as melhores respostas.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram organizados mostrando, primeiramente, os valores obtidos para cada ferramenta testada:  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{MgO}$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$  no torneamento externo do VAT 32<sup>®</sup>. Para facilitar a interpretação os resultados são separados em análise de potência de usinagem, análise do sinal de emissão acústica, análise do sinal de vibração, análise das rugosidades e a análise dos desgastes da ferramenta.

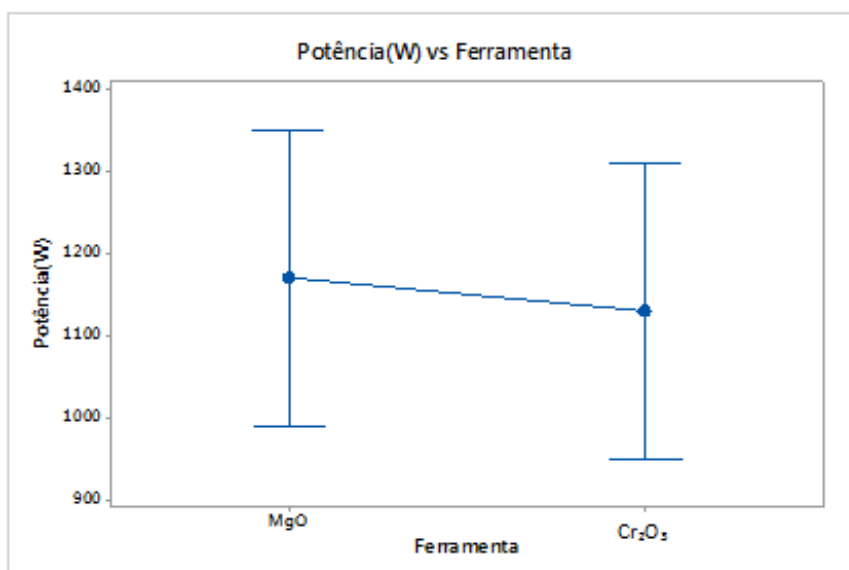
### 4.1 ENSAIOS COM AS FERRAMENTAS CERÂMICAS DE $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{MgO}$ e $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos para o torneamento da superliga VAT 32<sup>®</sup> utilizando as ferramentas experimentais cerâmica de  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{MgO}$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$  e sua comparação com relação aos fatores de qualidade. Também serão apresentados os desgastes encontrados e os cavacos. Na última parte dessa seção será apresentado resumo do desempenho da ferramenta com relação às respostas.

#### 4.1.1 Potência de usinagem

Após análise de variância observar-se os valores dos efeitos principais para potência de usinagem no torneamento da superliga VAT 32<sup>®</sup> utilizando as ferramentas experimentais cerâmicas de  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{MgO}$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$  e podem ser vistos na Figura 32.

Figura 32 – Efeito da ferramenta experimental cerâmica na Potência Total (W).



Fonte: Próprio autor.

Análise de Variância:

Fonte	DF	Adj SS	Adj MS	Valor - F	Valor - P
Ferramenta	1	14509	14509	<b>0,1</b>	<b>0,75</b>
Erro residual	34	4764137	140122		
Total	35	4778646			

Legenda:

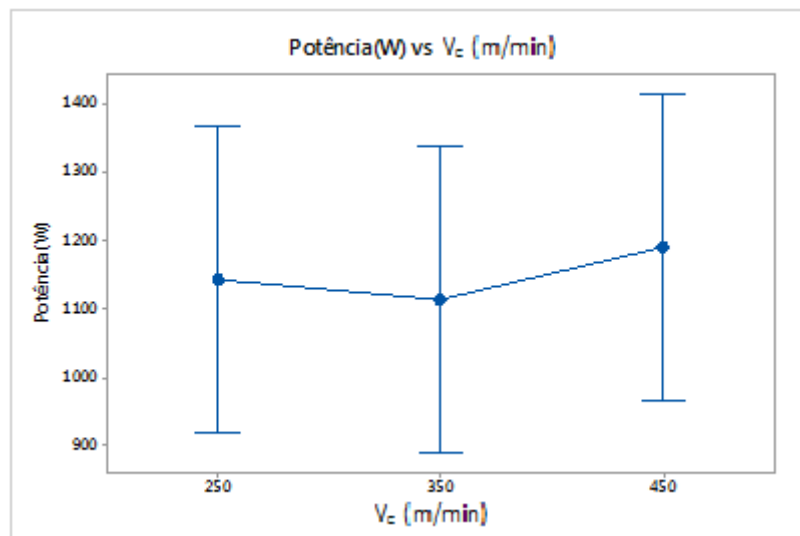
Valor-F: é a variação entre as médias das amostras ou a variação dentro das amostras, para ser significativo estatisticamente esse valor deve ser maior que 2,0.

Valor-P: é a hipótese de igualdade das medias, para ser significativo esse valor deve ser menor que 0,05.

Com esses valores é possível afirmar que o efeito das pastilhas experimentais cerâmicas na potência não foi significativo, pois apesar da diferença na composição das pastilhas era previsto essa resposta. As geometrias das pastilhas experimentais são idênticas.

Comparando a potência com a velocidade de corte ( $V_c$ ) utilizada por cada pastilha experimental cerâmica, pode-se verificar o efeito na Figura 33.

Figura 33 – Efeito da velocidade de corte ( $V_c$ ) na Potência Total (W).



Fonte: Próprio autor.

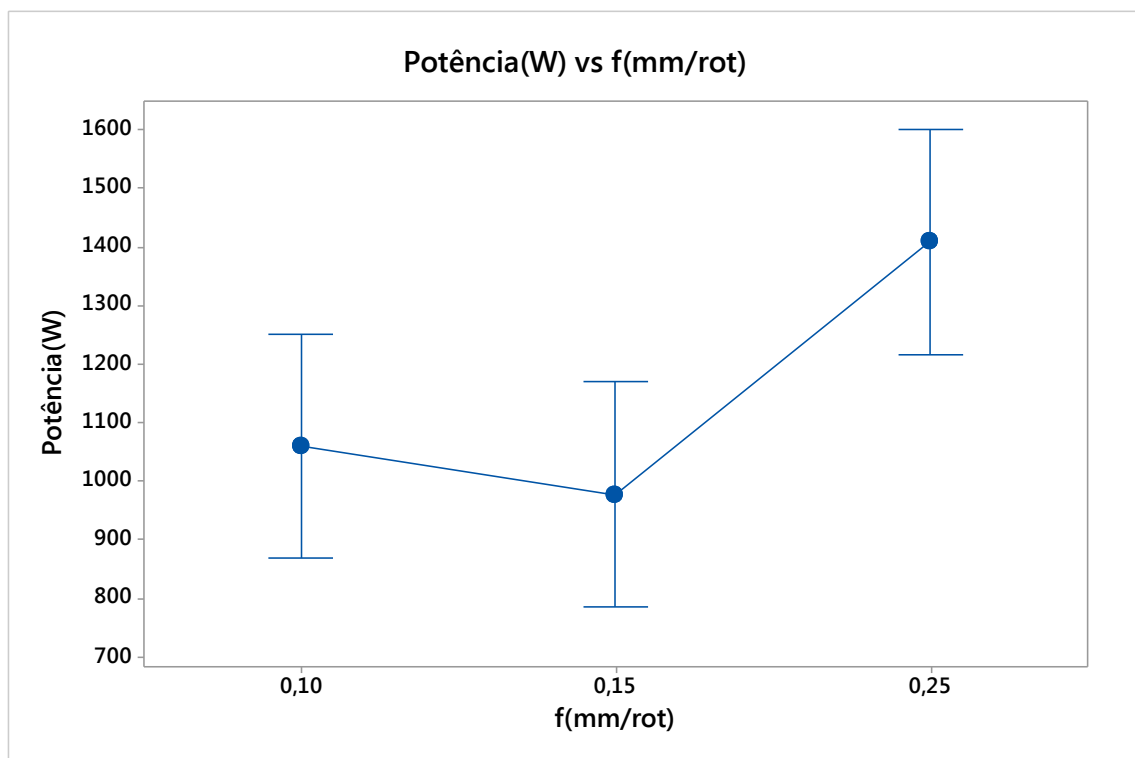
## Análise de Variância

Fonte	DF	Adj SS	Adj MS	Valor - F	Valor - P
Vc (m/min)	2	35133	17567	<b>0,12</b>	<b>0,885</b>
Erro residual	33	4743513	143743		
Total	35	4778646			

Com esses valores é possível afirmar que o efeito das velocidades de corte utilizadas nas pastilhas experimentais cerâmicas na Potência Total (W) não foi significativo, pois com o aumento da Velocidade de corte ( $V_c$ ) o valor da força de corte ( $F_c$ ) diminuiu e ficou próximo ao valor da potência de usinagem consumida.

Comparando a Potência Total com o avanço (f) utilizado por cada pastilha experimental cerâmica, pode-se verificar o efeito na Figura 34.

Figura 34 – Efeito do avanço (f) na Potência Total (W).



Fonte: Próprio autor.

## Análise de Variância

Fonte	DF	Adj SS	Adj MS	Valor - F	Valor - P
f (mm/rot)	2	1257388	628694	<b>5,89</b>	<b>0,006</b>
Erro residual	33	3521258	106705		
Total	35	4778646			

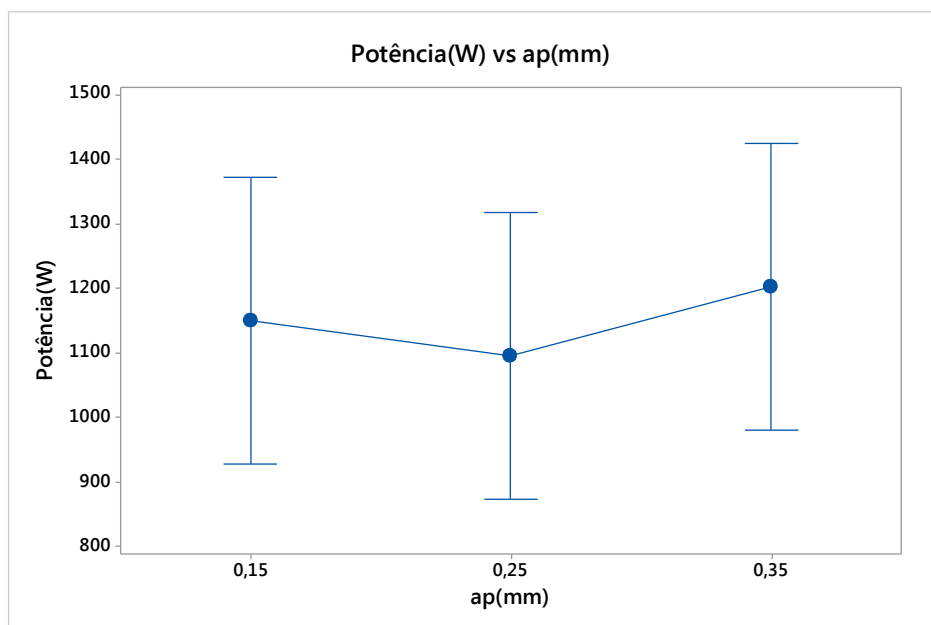
Com esses valores é possível afirmar que o efeito do avanço (f) utilizado nas pastilhas experimentais cerâmicas na potência foi significativo, sendo iguais estatisticamente nos avanços de 0,10 e 0,15mm/rev, porém diferente para 0,25mm/rev, pois apresentou um efeito maior na potência Total e na força de corte. A utilização do Método Tukey é devido aos valores apresentados em: Valor – F foi maior que 2,0 e Valor – P foi menor que 0,05.

Análise confirmada quando utilizando o Método Tukey, conforme demonstrado abaixo:

Agrupamento de Informações usando o Método Tukey e confiabilidade de 95%				
f (mm/rot)	N	Média	Agrupamento	
<b>0,25</b>	<b>12</b>	<b>1409</b>	<b>A</b>	
0,1	12	1060,4	B	
0,15	12	978,4	B	

Comparando a potência com a profundidade de corte ( $a_p$ ) utilizado por cada pastilha experimental cerâmica, pode-se verificar o efeito na Figura 35.

Figura 35 – Efeito da profundidade de corte ( $a_p$ ) na potência.



Fonte: Próprio autor.

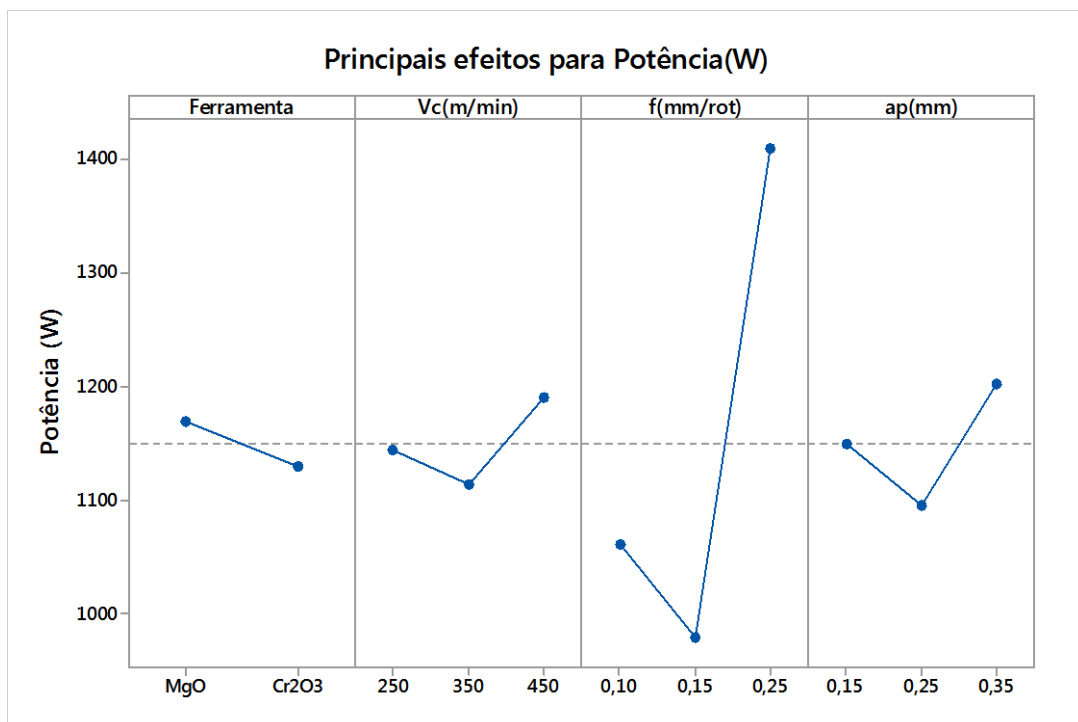
## Análise de Variância

Fonte	DF	Adj SS	Adj MS	Valor - F	Valor - P
ap (mm)	2	69337	34669	<b>0,24</b>	<b>0,786</b>
Erro residual	33	4709309	142706		
Total	35	4778646			

Com esses valores é possível afirmar que o efeito da profundidade de corte ( $a_p$ ) utilizadas nas pastilhas experimentais cerâmicas na Potência não foi significativo, pois os valores de avanço utilizados são típicos da operação de acabamento.

Levando em consideração cada item avaliado, na Figura 36 pode-se observar os principais efeitos na potência de usinagem no decorrer dos testes realizados.

Figura 36 – Principais efeitos para Potência (W).



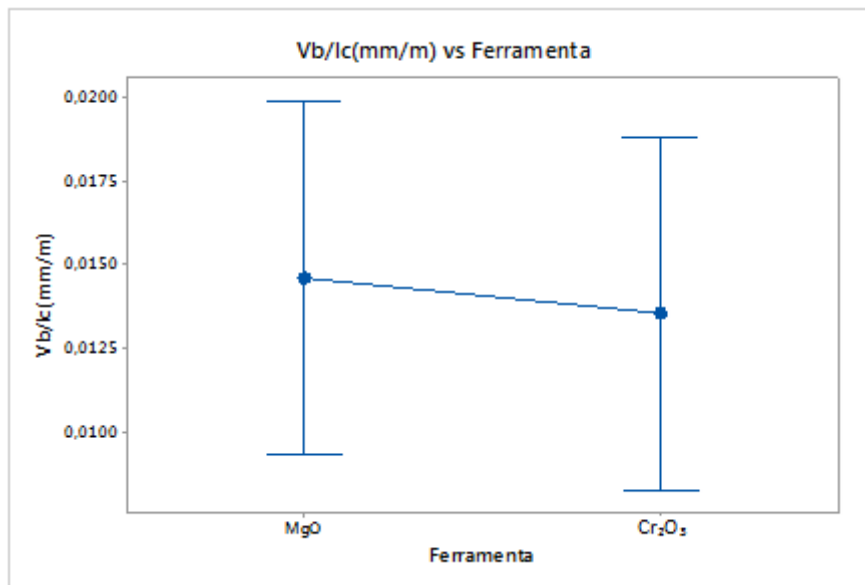
Fonte: Próprio autor.

Avaliando os resultados demonstrados na Figura 36, é possível afirmar que o efeito do avanço foi maior na Potência de Usinagem, se comparado com outros parâmetros de corte, pois com o avanço de 0,25 mm/rev resultou no aumento da temperatura de usinagem e o desgaste frontal.

#### 4.1.2 Desgaste de flanco $V_b$ /comprimento de corte $L_c$

Os valores de desgaste de flanco das pastilhas ( $V_b$ ) em relação ao comprimento de corte ( $L_c$ ) foram medidos e após análise de variância é possível observar os valores dos efeitos principais para  $V_b$  no torneamento da superliga VAT 32<sup>®</sup> utilizando as ferramentas experimentais cerâmicas de  $Al_2O_3+MgO$  e  $Al_2O_3 + Cr_2O_3$  e podem ser vistos na Figura 37.

Figura 37 – Efeito de cada pastilha experimental cerâmica no desgaste de flanco ( $V_b$ )/ $L_c$ .



Fonte: Próprio autor.

#### Análise de Variância

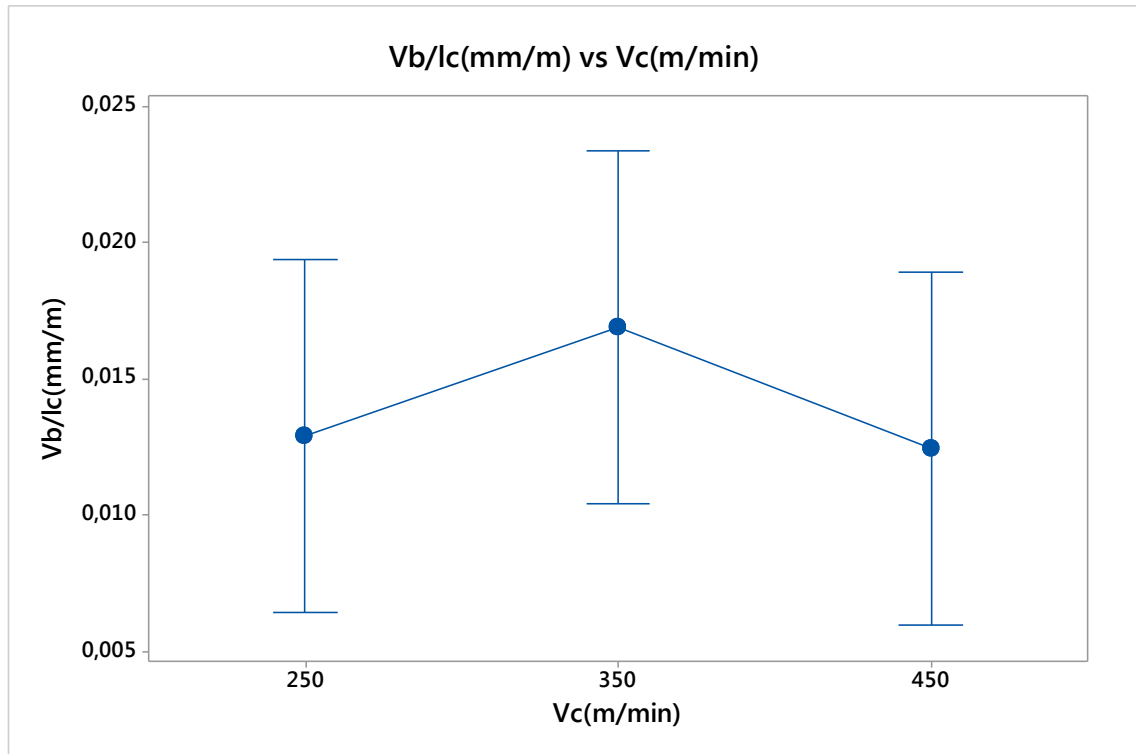
Fonte	DF	Adj SS	Adj MS	Valor - F	Valor - P
Ferramenta	1	0,00001	0,00001	<b>0,08</b>	<b>0,773</b>
Erro residual	34	0,004128	0,000121		
Total	35	0,004138			

Com esses valores é possível afirmar que o efeito das pastilhas experimentais cerâmicas no  $V_b/L_c$  não foi significativo.

Comparando o desgaste de flanco pelo comprimento de corte ( $V_b/L_c$ ) com a velocidade de corte ( $V_c$ ) utilizada por cada pastilha experimental cerâmica ( $MgO$  e  $Cr_2O_3$ ), pode-se verificar o efeito na Figura 38.



Figura 38 – Efeito da velocidade de corte ( $V_c$ ) no desgaste de flanco ( $V_b/L_c$ ).



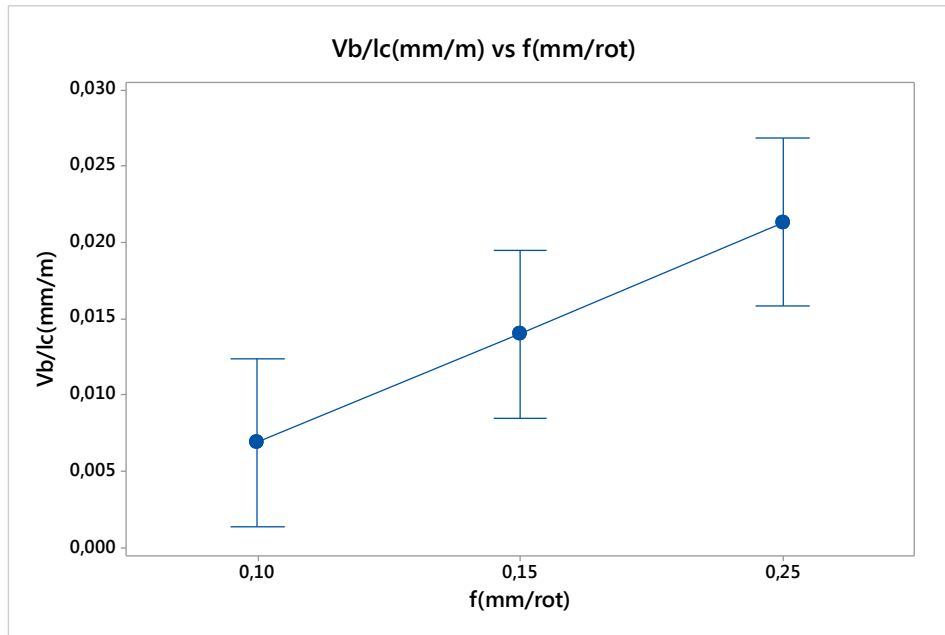
Fonte: Próprio autor.

#### Análise de Variância

Fonte	DF	Adj SS	Adj MS	Valor - F	Valor - P
$V_c$ (m/min)	2	0,000144	0,000072	<b>0,6</b>	<b>0,557</b>
Erro residual	33	0,003994	0,000121		
Total	35	0,004138			

Com esses valores é possível afirmar que o efeito das velocidades de corte utilizadas não foi significativo no  $V_b/L_c$ .

Comparando o desgaste de flanco pelo comprimento de corte ( $V_b/L_c$ ) com o avanço ( $f$ ) utilizada por cada pastilha experimental cerâmica ( $MgO$  e  $Cr_2O_3$ ), pode-se verificar o efeito na Figura 39.

Figura 39 – Efeito do avanço (f) no desgaste de flanco ( $V_b/L_c$ ).

Fonte: Próprio autor.

## Análise de Variância

Fonte	DF	Adj SS	Adj MS	Valor - F	Valor - P
f (mm/rot)	2	0,001256	0,000628	<b>7,19</b>	<b>0,003</b>
Erro residual	33	0,002882	0,000087		
Total	35	0,004138			

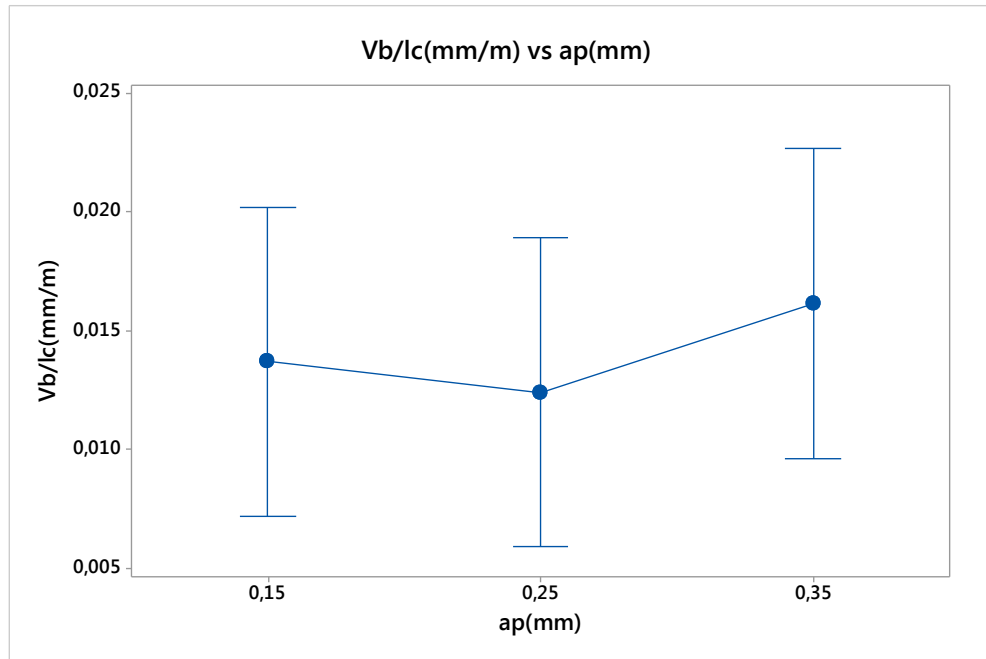
Com esses valores é possível afirmar que o efeito do avanço (f) utilizado nas pastilhas experimentais cerâmicas no desgaste de flanco ( $V_b/L_c$ ) foi significativo, sendo iguais estatisticamente nos avanços de 0,10 e 0,15mm/rev, porém diferente para 0,25mm/rev. O Método Tukey foi utilizado pois os valores apresentados em: Valor – F foi maior que 2,0 e Valor – P foi menor que 0,05.

Análise confirmada quando utilizando o Método Tukey, conforme demonstrado abaixo:

Agrupamento de Informações usando o Método Tukey e confiabilidade de 95%				
f (mm/rot)	N	Média	Agrupamento	
0,25	12	0,02137	A	
0,15	12	0,01402	AB	
0,1	12	0,0069	B	

Comparando o desgaste de flanco pelo comprimento de corte ( $V_b/L_c$ ) com a profundidade de corte ( $a_p$ ) utilizado por cada pastilha experimental cerâmica ( $MgO$  e  $Cr_2O_3$ ), pode-se verificar o efeito na Figura 40.

Figura 40 – Efeito da profundidade de corte ( $a_p$ ) no desgaste de flanco ( $V_b/L_c$ ).



Fonte: Próprio autor.

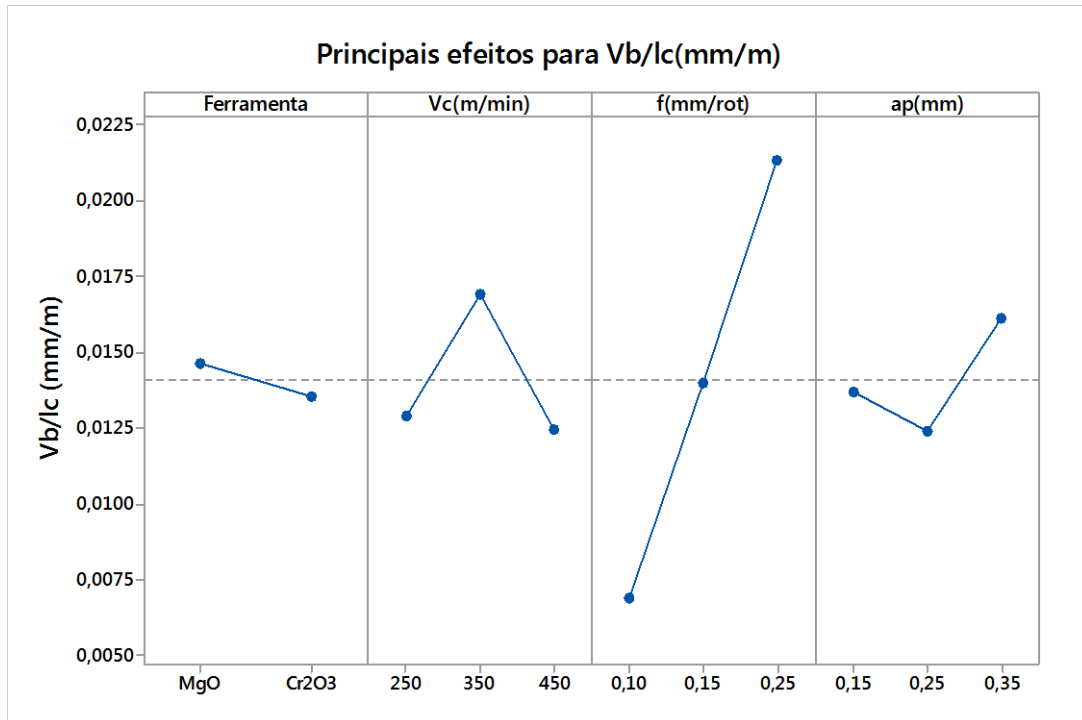
#### Análise de Variância

Fonte	DF	Adj SS	Adj MS	Valor - F	Valor - P
ap (mm)	2	0,000086	0,000043	<b>0,35</b>	<b>0,706</b>
Erro residual	33	0,004051	0,000123		
Total	35	0,004138			

Com esses valores é possível afirmar que o efeito de cada profundidade de corte ( $a_p$ ) utilizadas nas pastilhas experimentais cerâmicas não foi significativo no desgaste de flanco pelo comprimento de corte ( $V_b/L_c$ ).

Levando em consideração cada item avaliado, na Figura 41 pode-se observar os principais efeitos desgaste de flanco pelo comprimento de corte ( $V_b/L_c$ ) no decorrer dos testes realizados.

Figura 41 – Principais efeitos para desgaste de flanco pelo comprimento de corte ( $V_b/L_c$ ).



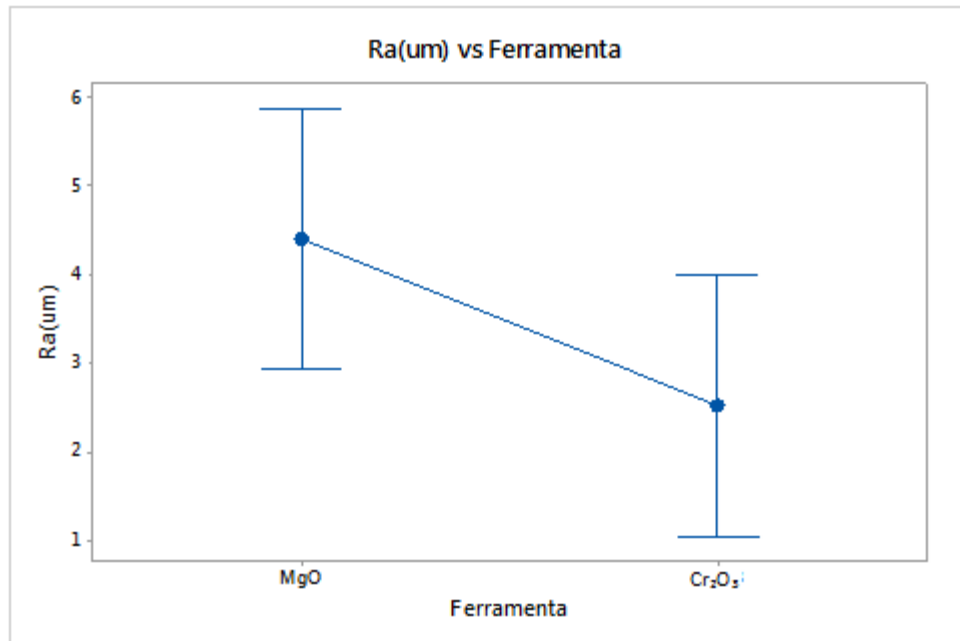
Fonte: Próprio autor.

Avaliando os resultados demonstrados na Figura 41, é possível afirmar que o efeito do avanço foi maior no  $V_b/L_c$  (mm/m), se comparado com outros parâmetros de corte, pois com o avanço de 0,25 mm/rev resultou no aumento da temperatura de usinagem e o desgaste frontal.

#### 4.1.3 Rugosidades $R_a$

Os dados de rugosidades da peça usinada nos ensaios foram submetidos às análises de médias e de variância com o objetivo de levantar os fatores com efeitos significativos nos valores de  $R_a$ .

Os valores de  $R_a$  foram medidos e após análise de variância é possível observar os valores dos efeitos principais no torneamento da superliga VAT 32<sup>®</sup> utilizando as ferramentas experimentais cerâmicas de  $Al_2O_3+MgO$  e  $Al_2O_3 + Cr_2O_3$  e podem ser vistos na Figura 42.

Figura 42 – Efeito de cada pastilha experimental cerâmica no  $R_a$ .

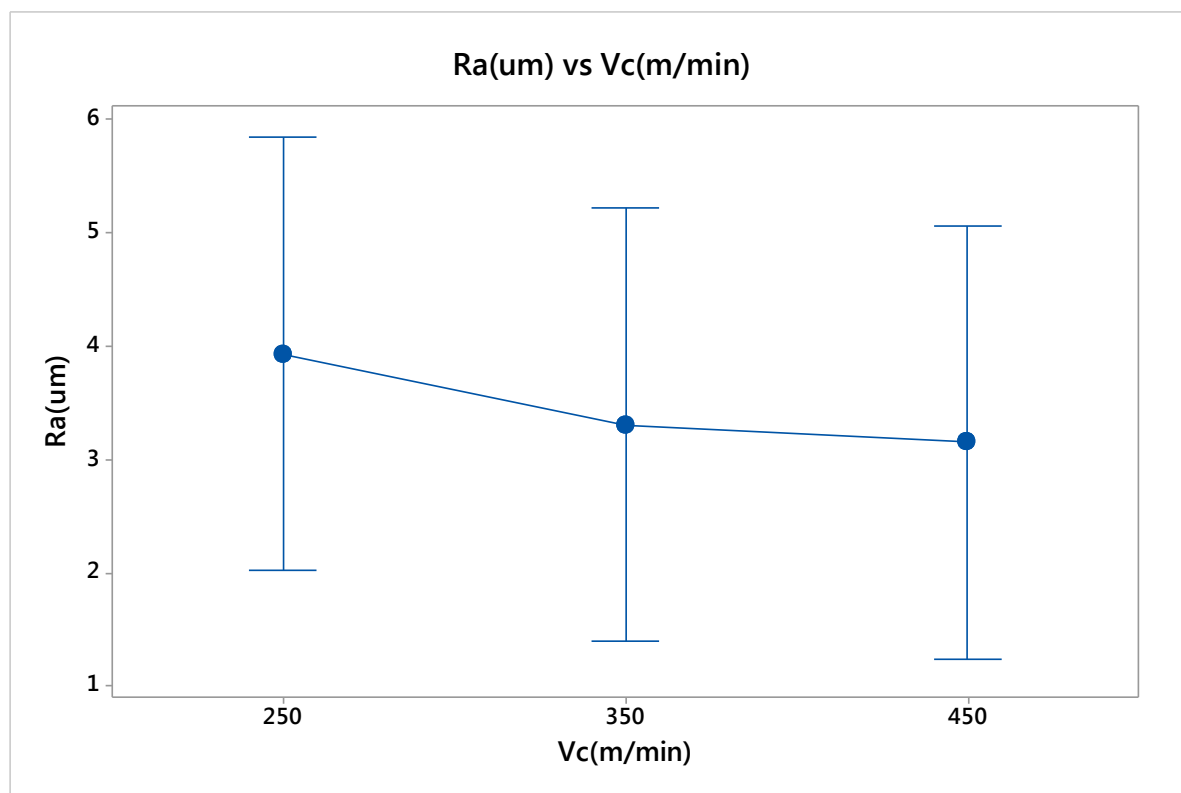
Fonte: Próprio autor.

#### Análise de Variância

Fonte	DF	Adj SS	Adj MS	Valor - F	Valor - P
Ferramenta	1	31,81	31,811	<b>3,35</b>	<b>0,076</b>
Erro residual	34	323,02	9,501		
Total	35	354,83			

Com esses valores é possível afirmar que o efeito de cada pastilha experimental cerâmica na rugosidade  $R_a$  foi significativo, pois o valor apresentado em Valor-F é maior que 2,0. A diferença provavelmente ocorreu devido ao desgaste das pastilhas ensaiadas. Os parâmetros de corte utilizados: velocidade de corte e profundidade foram iguais entre as pastilhas ensaiadas, variando o avanço (0,1; 0,15 e 0,25 mm/rev).

Comparando a rugosidade  $R_a$  com a velocidade de corte ( $V_c$ ) utilizada em cada pastilha experimental cerâmica, pode-se verificar o efeito na Figura 43.

Figura 43 – Efeito da velocidade de corte ( $V_c$ ) na rugosidade  $R_a$ .

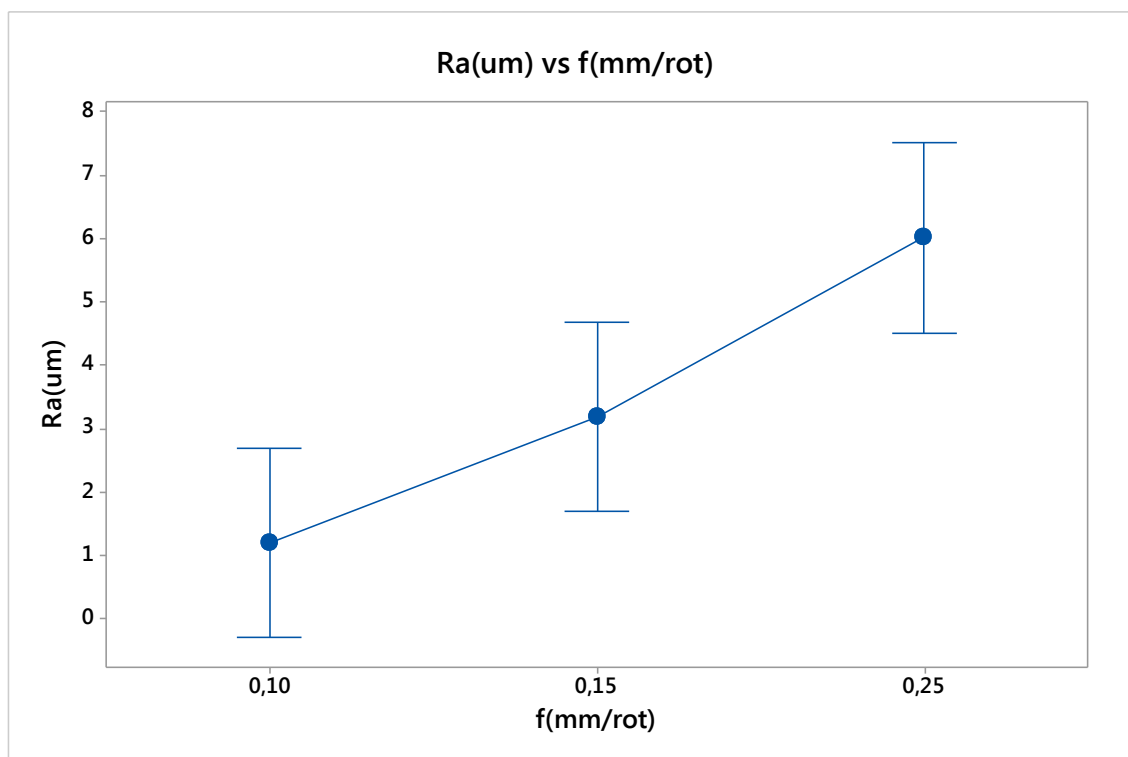
Fonte: Próprio autor.

#### Análise de Variância

Fonte	DF	Adj SS	Adj MS	Valor - F	Valor - P
$V_c$ (m/min)	2	4,11	2,055	<b>0,19</b>	<b>0,825</b>
Erro residual	33	350,721	10,628		
Total	35	354,831			

Com esses valores é possível afirmar que o efeito das velocidades de corte utilizadas não foi significativo na rugosidade  $R_a$ .

Comparando a rugosidade  $R_a$  com o avanço ( $f$ ) utilizada por cada pastilha experimental cerâmica, pode-se verificar o efeito na Figura 44.

Figura 44 – Efeito do avanço (f) na rugosidade  $R_a$ .

Fonte: Próprio autor.

#### Análise de Variância

Fonte	DF	Adj SS	Adj MS	Valor - F	Valor - P
f (mm/rot)	2	140,1	70,051	<b>10,77</b>	<b>0</b>
Erro residual	33	214,7	6,507		
Total	35	354,8			

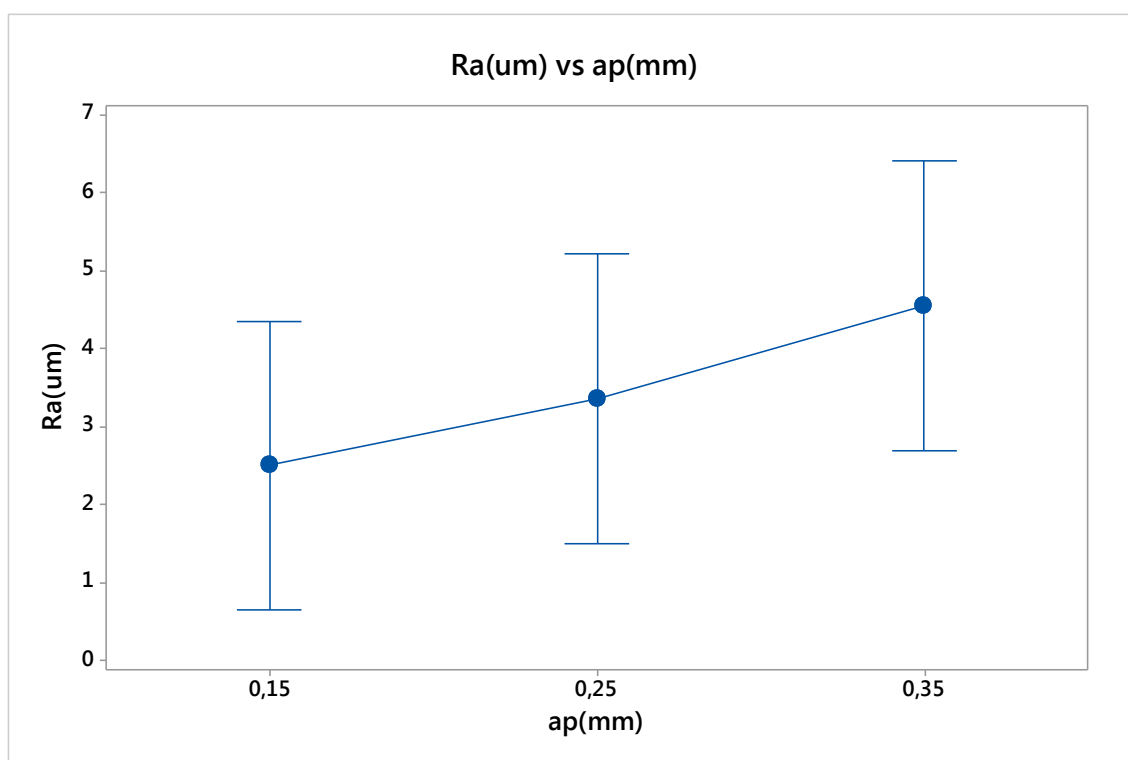
Com esses valores é possível afirmar que o efeito do avanço (f) utilizado nas pastilhas experimentais cerâmicas foi significativo na rugosidade ( $R_a$ ), sendo iguais estatisticamente nos avanços de 0,10 e 0,15mm/rev, porém diferente para 0,25mm/rev. O Método Tukey foi utilizado pois os valores apresentados em: Valor – F foi maior que 2,0 e Valor – P foi menor que 0,05.

Análise confirmada quando utilizando o Método Tukey, conforme demonstrado abaixo:

Agrupamento de Informações usando o Método Tukey e confiabilidade de 95%				
f (mm/rot)	N	Média	Agrupamento	
<b>0,25</b>	<b>12</b>	<b>6,01</b>	<b>A</b>	
0,15	12	3,184	B	
0,1	12	1,205	B	

Comparando a rugosidade ( $R_a$ ) com a profundidade de corte ( $a_p$ ) utilizado por cada pastilha experimental cerâmica, pode-se verificar o efeito na Figura 45.

Figura 45 – Efeito da profundidade de corte ( $a_p$ ) na rugosidade ( $R_a$ ).



Fonte: Próprio autor.

#### Análise de Variância

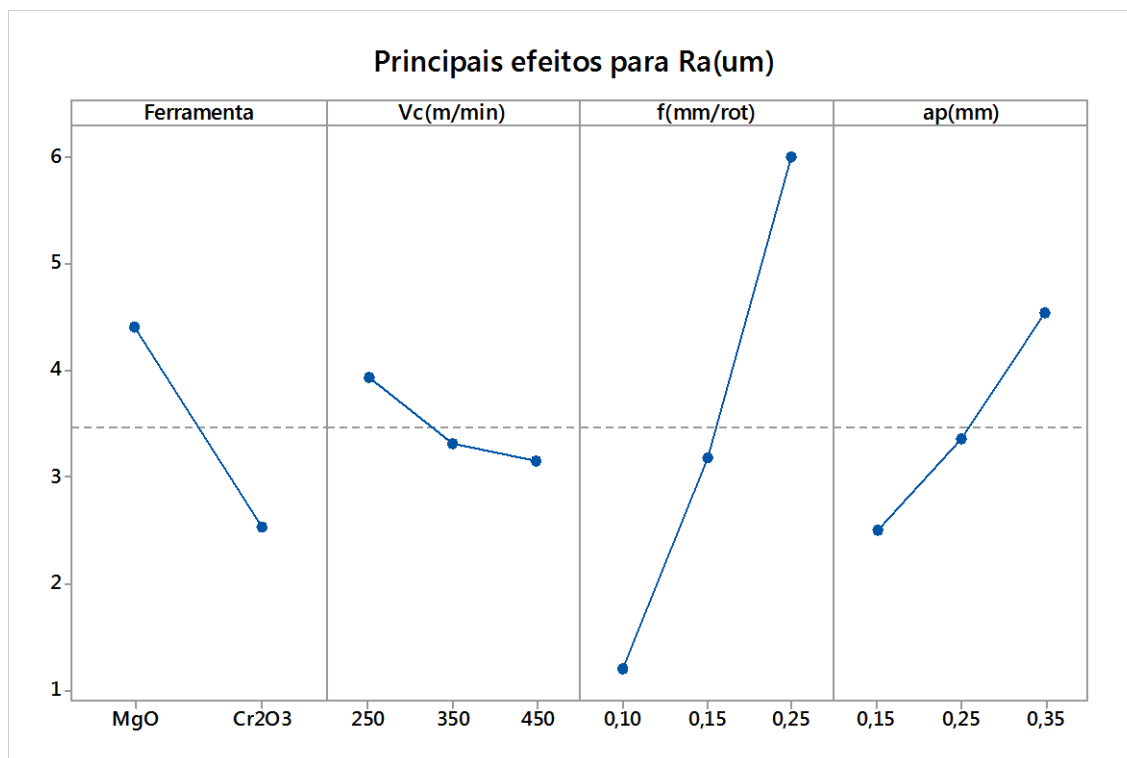
Fonte	DF	Adj SS	Adj MS	Valor - F	Valor - P
ap(mm)	2	25,23	12,616	<b>1,26</b>	<b>0,296</b>
Erro residual	33	329,6	9,988		
Total	35	354,83			

Com esses valores é possível afirmar que o efeito de cada profundidade de corte ( $a_p$ ) utilizadas nas pastilhas experimentais cerâmicas não foi significativo na rugosidade ( $R_a$ ).



Levando em consideração cada item avaliado, na Figura 46 pode-se observar os principais efeitos na rugosidade ( $R_a$ ) no decorrer dos testes realizados.

Figura 46 – Principais efeitos para rugosidade ( $R_a$ ).



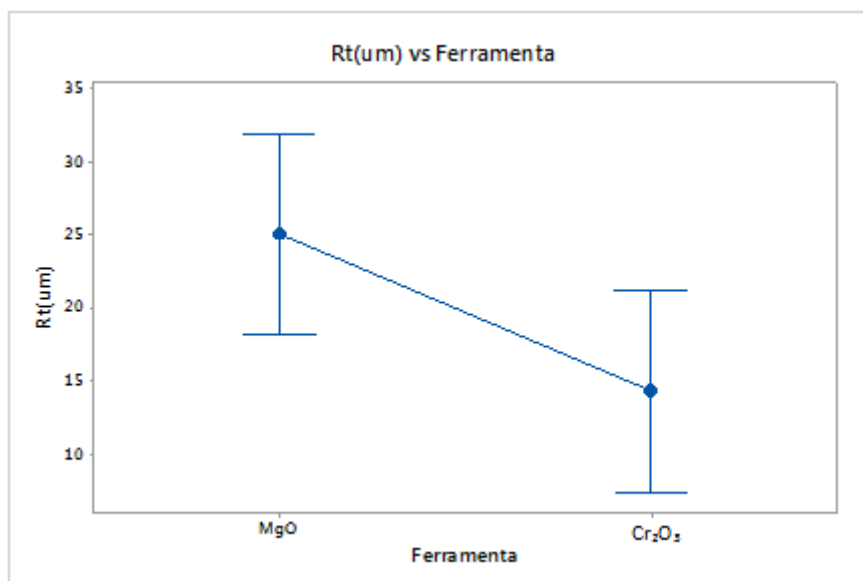
Fonte: Próprio autor.

Avaliando os resultados demonstrados na Figura 46, é possível afirmar que o efeito do avanço foi maior na Rugosidade média ( $R_a$ ), se comparado com outros parâmetros de corte, pois com o avanço de 0,25 mm/rev resultou no aumento da temperatura de usinagem e o desgaste frontal. A geometria das ferramentas experimentais (MgO e Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) juntamente com os parâmetros de corte, avanço e raio de ferramenta influenciam na rugosidade.

#### 4.1.4 Rugosidade $R_t$

Os dados de rugosidades da peça usinada nos ensaios foram submetidos às análises de médias e de variância com o objetivo de levantar os fatores com efeitos significativos nos valores de  $R_t$ .

Os valores de  $R_t$  foram medidos e após análise de variância é possível observar os valores dos efeitos principais no torneamento da superliga VAT 32<sup>®</sup> utilizando as ferramentas experimentais cerâmicas de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+MgO e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e podem ser vistos na Figura 47.

Figura 47 – Efeito da pastilha experimental cerâmica no  $R_t$ .

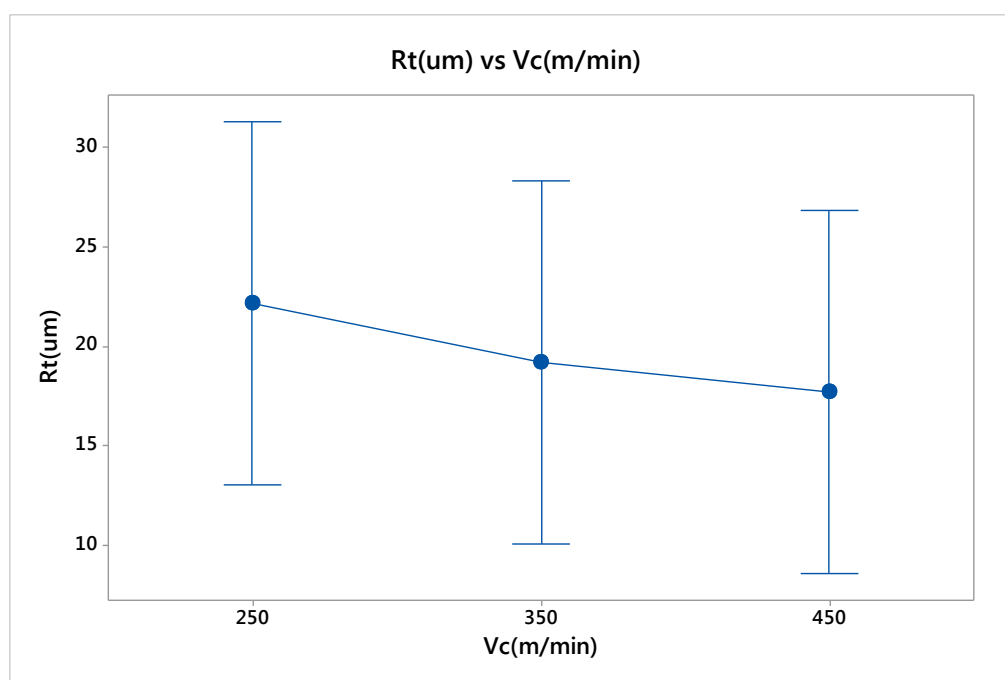
Fonte: Próprio autor.

#### Análise de Variância

Fonte	DF	Adj SS	Adj MS	Valor - F	Valor - P
Ferramenta	1	1038	1037,6	<b>5,01</b>	<b>0,032</b>
Erro residual	34	7049	207,3		
Total	35	8087			

Com esses valores é possível afirmar que o efeito de cada pastilha experimental cerâmica foi significativo na rugosidade  $R_t$ . O Método Tukey foi utilizado pois os valores apresentados em: Valor – F foi maior que 2,0 e Valor – P foi menor que 0,05.

Comparando a rugosidade  $R_t$  com a velocidade de corte ( $V_c$ ) utilizada por cada pastilha experimental cerâmica, pode-se verificar o efeito na Figura 48.

Figura 48 – Efeito da rugosidade  $R_t$  em cada velocidade de corte ( $V_c$ ).

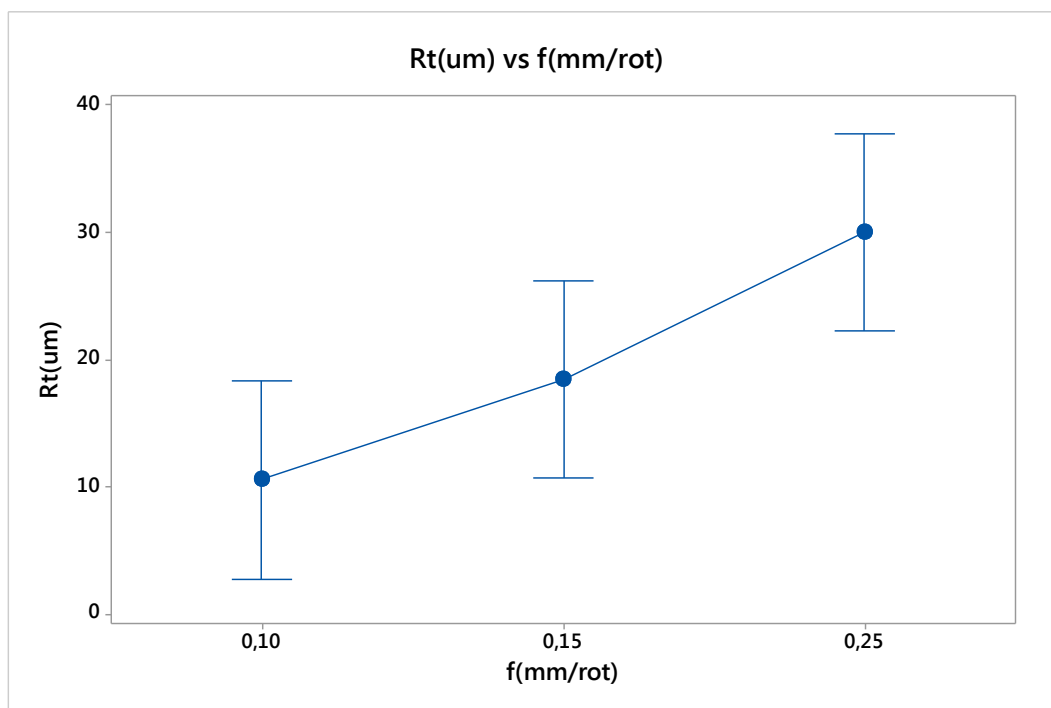
Fonte: Próprio autor.

#### Análise de Variância

Fonte	DF	Adj SS	Adj MS	Valor - F	Valor - P
Vc(m/min)	2	121,8	60,89	<b>0,25</b>	<b>0,779</b>
Erro residual	33	7964,8	241,36		
Total	35	8086,5			

Com esses valores é possível afirmar que o efeito das velocidades de corte utilizadas não foi significativo na rugosidade  $R_t$ .

Comparando a rugosidade  $R_t$  com o avanço ( $f$ ) utilizada por cada pastilha experimental cerâmica, pode-se verificar o efeito na Figura 49.

Figura 49 – Efeito do avanço (f) na rugosidade  $R_t$ .

Fonte: Próprio autor.

#### Análise de Variância

Fonte	DF	Adj SS	Adj MS	Valor - F	Valor - P
f (mm/rot)	2	2305	1152,6	<b>6,58</b>	<b>0,004</b>
Erro residual	33	5781	175,2		
Total	35	8087			

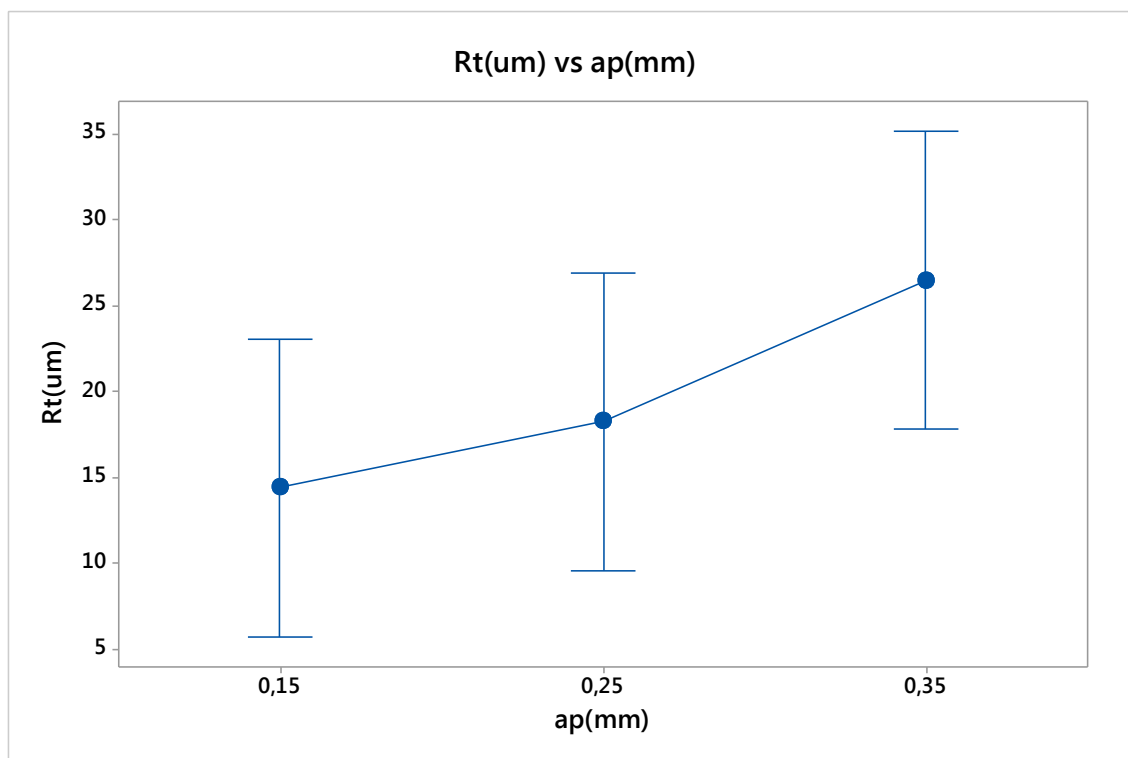
Com esses valores é possível afirmar que o efeito do avanço (f) utilizado nas pastilhas experimentais cerâmicas foi significativo na rugosidade ( $R_t$ ), sendo iguais estatisticamente nos avanços de 0,10 e 0,15mm/rev, porém diferente para 0,25mm/rev. O Método Tukey foi utilizado pois os valores apresentados em: Valor – F foi maior que 2,0 e Valor – P foi menor que 0,05.

Análise confirmada quando utilizando o Método Tukey, conforme demonstrado abaixo:

Agrupamento de Informações usando o Método Tukey e confiabilidade de 95%				
f (mm/rot)	N	Média	Agrupamento	
<b>0,25</b>	<b>12</b>	<b>30,08</b>	<b>A</b>	
0,15	12	18,49	AB	
0,1	12	10,59	B	

Comparando a rugosidade ( $R_t$ ) com a profundidade de corte ( $a_p$ ) utilizado por cada pastilha experimental cerâmica, pode-se verificar o efeito na Figura 50.

Figura 50 – Efeito da profundidade de corte ( $a_p$ ) na rugosidade ( $R_t$ ).



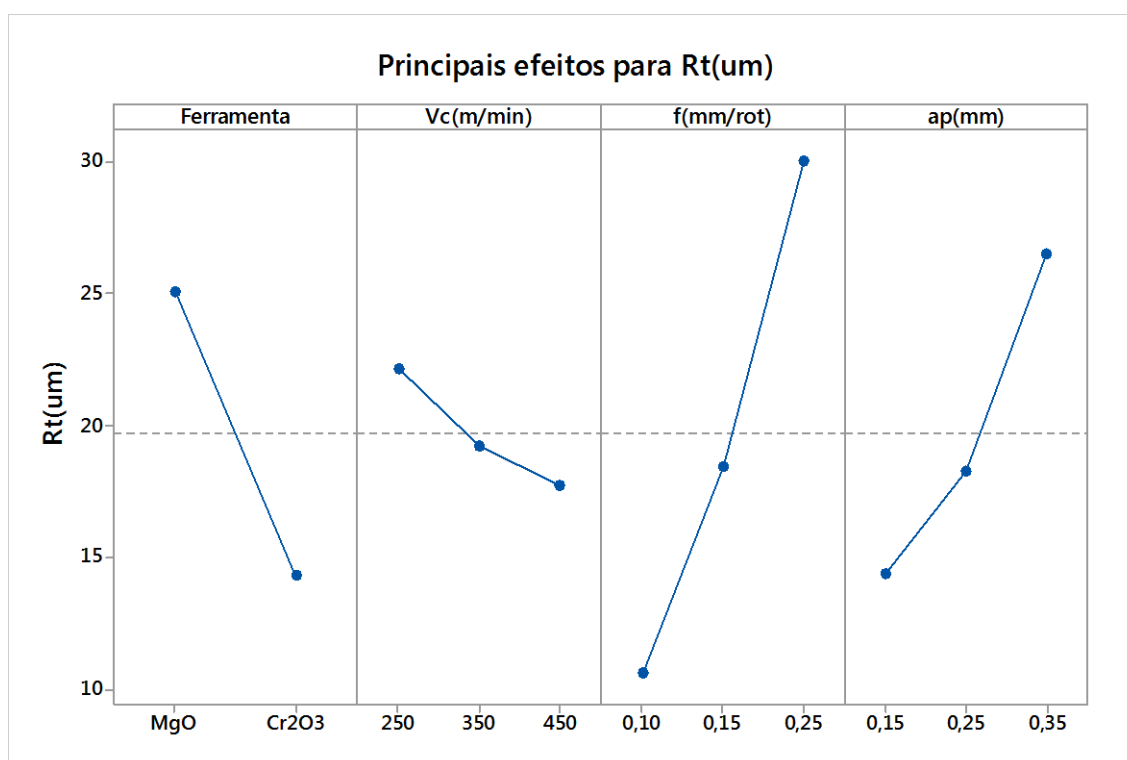
Fonte: Próprio autor.

#### Análise de Variância

Fonte	DF	Adj SS	Adj MS	Valor - F	Valor - P
ap (mm)	2	919,5	459,7	<b>2,12</b>	<b>0,136</b>
Erro residual	33	7167,1	217,2		
Total	35	8086,5			

Com esses valores é possível afirmar que o efeito de cada profundidade de corte ( $a_p$ ) utilizadas nas pastilhas experimentais cerâmicas foi significativo na rugosidade ( $R_t$ ). O valor apresentado em Valor – F foi maior que 2,0.

Levando em consideração cada item avaliado, na Figura 51 pode-se observar os principais efeitos da rugosidade ( $R_t$ ) no decorrer dos testes realizados.

Figura 51 – Principais efeitos para rugosidade ( $R_t$ ).

Fonte: Próprio autor.

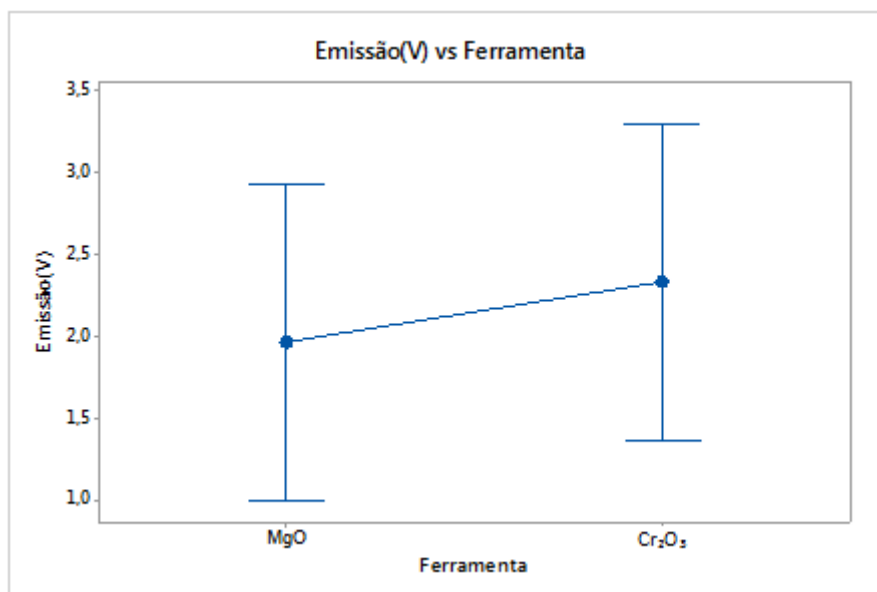
Avaliando os resultados demonstrados na Figura 46, é possível afirmar que o efeito do avanço foi maior na Rugosidade média ( $R_a$ ), se comparado com outros parâmetros de corte, pois com o avanço de 0,25 mm/rev resultou no aumento da temperatura de usinagem e o desgaste frontal. A geometria das ferramentas experimentais (MgO e Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) juntamente com os parâmetros de corte, avanço e raio de ferramenta influenciam na rugosidade. A profundidade de corte maior ( $ap = 0,35$  mm) afeta a Força de corte, pois quanto maior a Força de corte maior a rugosidade.

#### 4.1.5 Emissão acústica (V)

Com os sinais adquiridos de emissão acústica, foi realizada a análise de médias para averiguação dos efeitos dos fatores sobre a resposta.

Os valores de emissão acústica foram medidos e após análise de variância é possível observar os valores dos efeitos principais no torneamento da superliga VAT 32<sup>®</sup> utilizando as ferramentas experimentais cerâmicas de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+MgO e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e podem ser vistos na Figura 52.

Figura 52 – Efeito da pastilha experimental cerâmica na Emissão acústica.



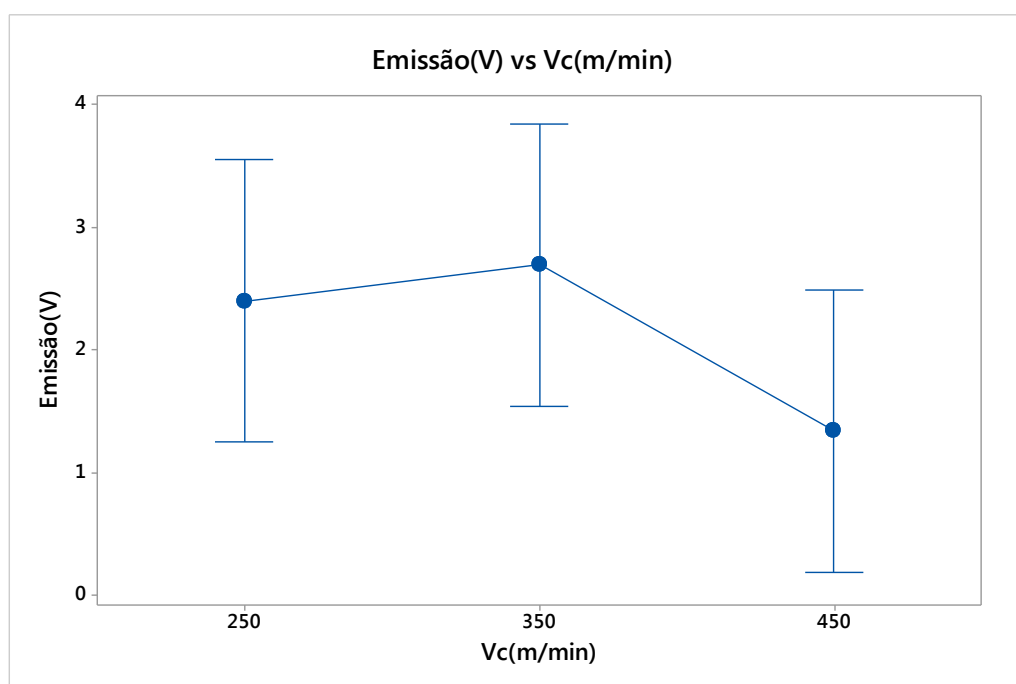
Fonte : Próprio autor.

#### Análise de Variância

Fonte	DF	Adj SS	Adj MS	Valor - F	Valor - P
Ferramenta	1	1,192	1,192	<b>0,3</b>	<b>0,591</b>
Erro residual	34	137,305	4,038		
Total	35	138,497			

Com esses valores é possível afirmar que o efeito de cada pastilha experimental cerâmica não foi significativo na emissão acústica.

Comparando a emissão acústica com a velocidade de corte ( $V_c$ ) utilizada por cada pastilha experimental cerâmica, pode-se verificar o efeito na Figura 53.

Figura 53 – Efeito da velocidade de corte ( $V_c$ ) na Emissão acústica.

Fonte: Próprio autor.

## Análise de Variância

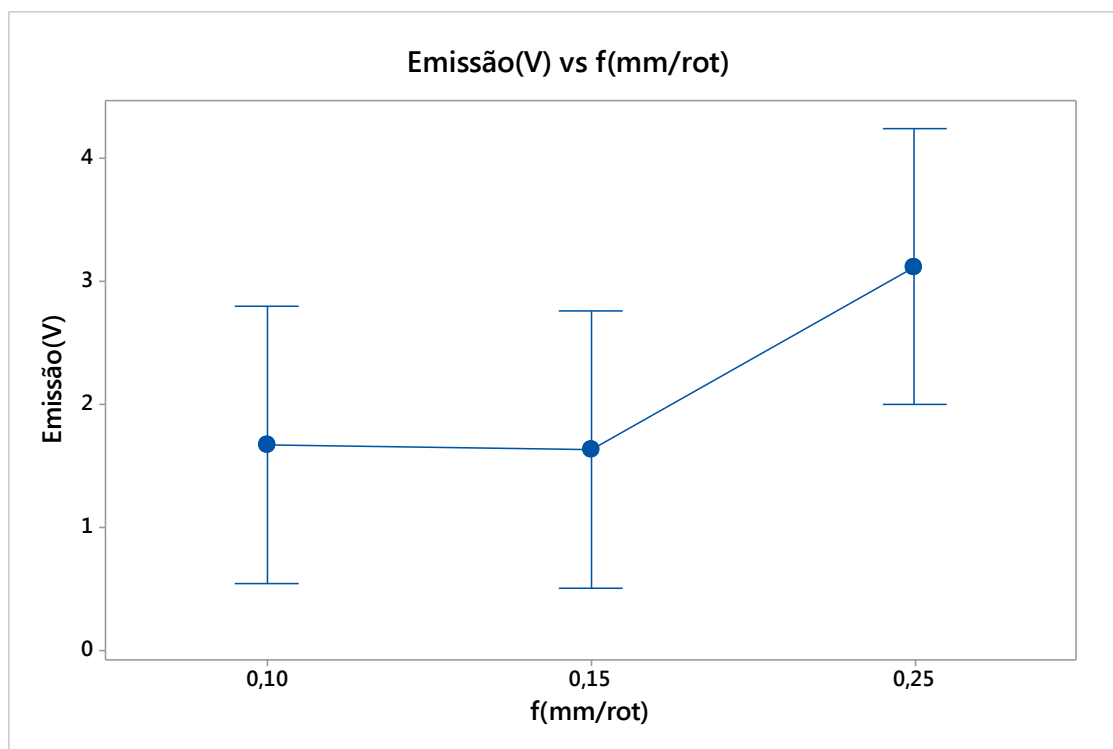
Fonte	DF	Adj SS	Adj MS	Valor - F	Valor - P
Vc (m/min)	2	12,13	6,066	<b>1,58</b>	<b>0,22</b>
Erro residual	33	126,36	3,829		
Total	35	138,5			

Com esses valores é possível afirmar que o efeito das velocidades de corte utilizadas não foi significativo na Emissão acústica.

Comparando a Emissão acústica com o avanço (f) utilizada por cada pastilha experimental cerâmica, pode-se verificar o efeito na Figura 54.



Figura 54 – Efeito do avanço (f) na Emissão acústica.



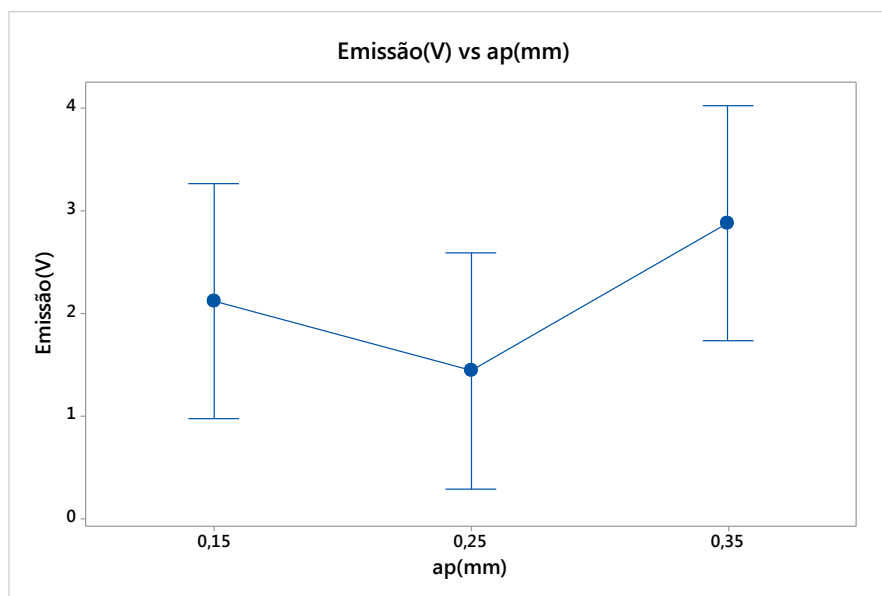
Fonte: Próprio autor.

#### Análise de Variância

Fonte	DF	Adj SS	Adj MS	Valor - F	Valor - P
f (mm/rot)	2	17,16	8,581	<b>2,33</b>	<b>0,113</b>
Erro residual	33	121,33	3,677		
Total	35	138,5			

Com esses valores é possível afirmar que o efeito do avanço (f) utilizado nas pastilhas experimentais cerâmicas foi significativo na Emissão acústica (V) no por causa do F-Value ser maior que 2. Sendo iguais estatisticamente nos avanços de 0,10 e 0,15mm/rev, porém diferente para 0,25mm/rev.

Comparando a Emissão acústica (V) com a profundidade de corte ( $a_p$ ) utilizado por cada pastilha experimental cerâmica, pode-se verificar o efeito na Figura 55.

Figura 55 – Efeito da profundidade de corte ( $a_p$ ) na Emissão acústica (V).

Fonte: Próprio autor.

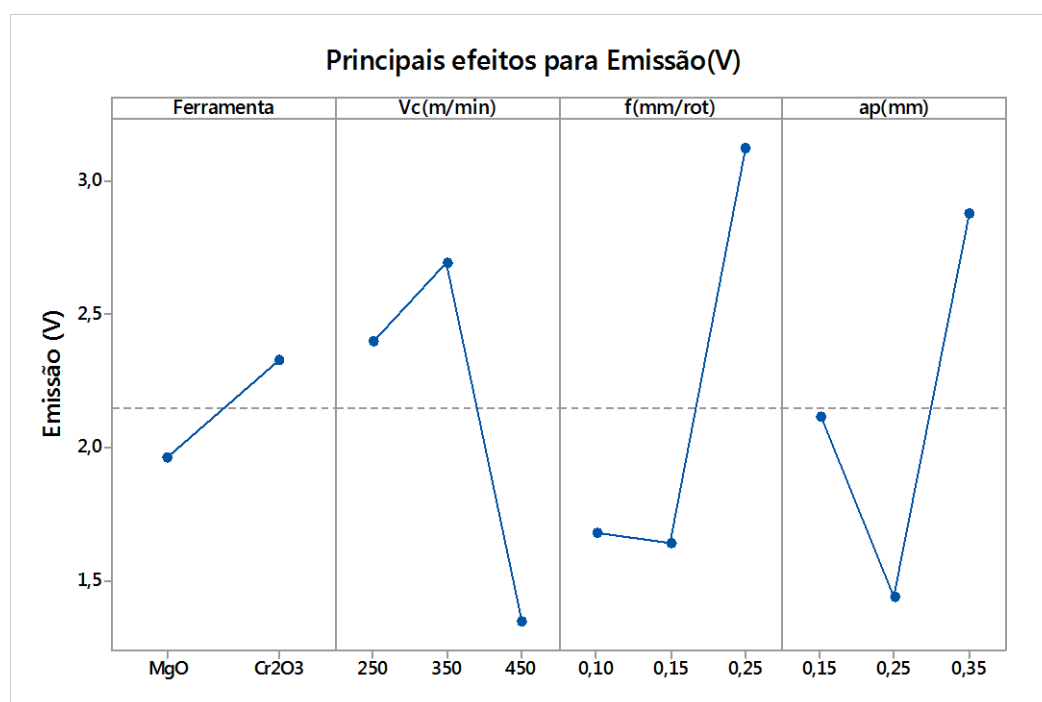
## Análise de Variância

Fonte	DF	Adj SS	Adj MS	Valor - F	Valor - P
ap (mm)	2	12,51	6,254	<b>1,64</b>	<b>0,21</b>
Erro residual	33	125,99	3,818		
Total	35	138,5			

Com esses valores é possível afirmar que o efeito da profundidade de corte ( $a_p$ ) utilizada nas pastilhas experimentais cerâmicas não foi significativo da Emissão acústica (V).

Levando em consideração cada item avaliado, na Figura 56 pode-se observar os principais efeitos da Emissão acústica (V) no decorrer dos testes realizados.

Figura 56 – Principais efeitos para Emissão acústica (V).



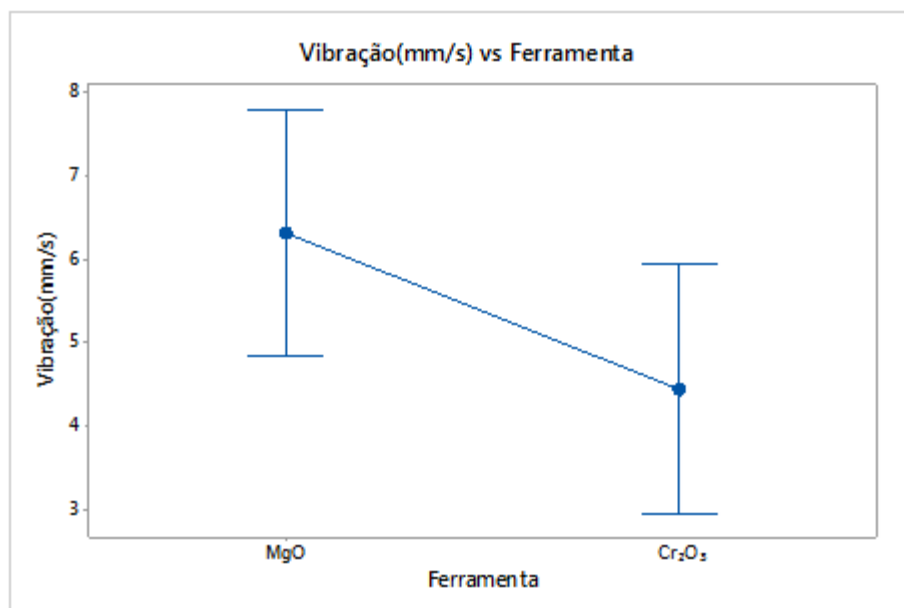
Fonte: Próprio autor.

Avaliando os resultados demonstrados na Figura 56, é possível afirmar que o efeito do avanço foi maior na Emissão Acústica (V), se comparado com outros parâmetros de corte, pois com o avanço de 0,25 mm/rev resultou no aumento da temperatura de usinagem e o desgaste frontal.

#### 4.1.6 Vibração

Os valores de vibração (mm/s) foram medidos e após análise de variância é possível observar os valores dos efeitos principais no torneamento da superliga VAT 32<sup>®</sup> utilizando as ferramentas experimentais cerâmicas de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+MgO e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e podem ser vistos na Figura 57.

Figura 57 – Efeito de cada pastilha experimental cerâmica na Vibração.



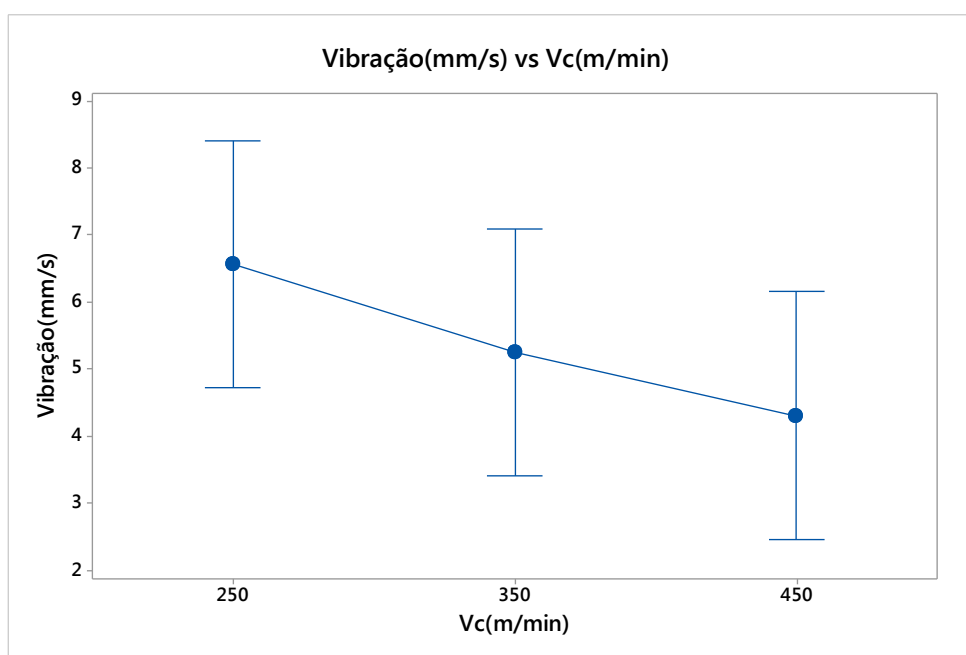
Fonte: Próprio autor.

#### Análise de Variância

Fonte	DF	Adj SS	Adj MS	Valor - F	Valor - P
Ferramenta	1	31,19	31,191	<b>3,26</b>	<b>0,08</b>
Erro residual	34	324,81	9,553		
Total	35	356,01			

Com esses valores é possível afirmar que o efeito da Vibração (mm/s) nas pastilhas experimentais cerâmicas foi significativo, por causa do F-Value ser maior que 2. Sendo maior na pastilha cerâmica de  $Al_2O_3+MgO$ .

Comparando a Vibração com a velocidade de corte ( $V_c$ ) utilizada por cada pastilha experimental cerâmica, pode-se verificar o efeito na Figura 58.

Figura 58– Efeito de cada velocidade de corte ( $V_c$ ) na Vibração.

Fonte: Próprio autor.

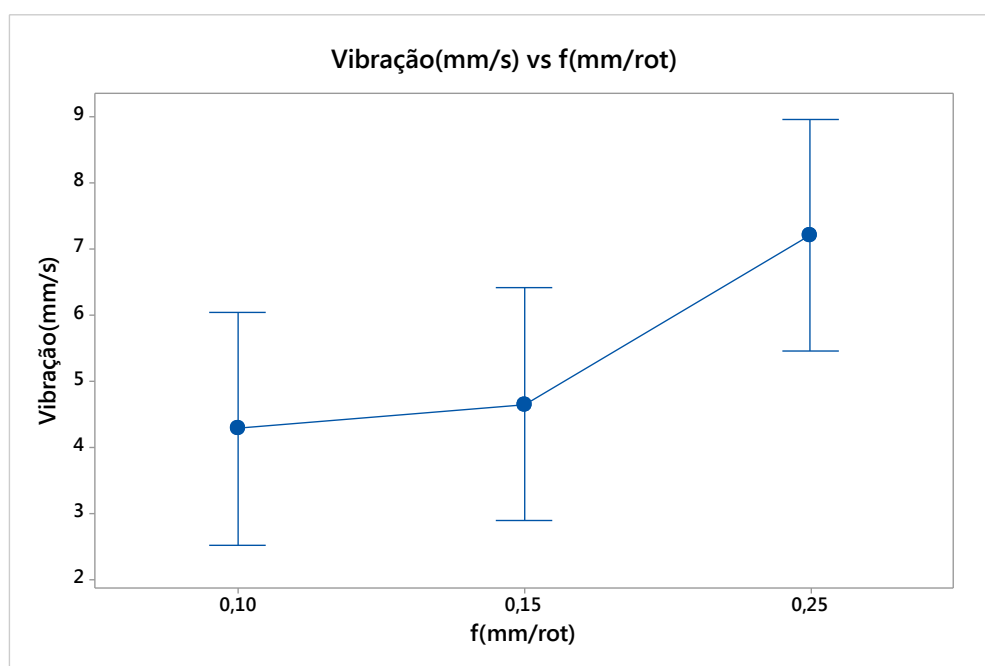
#### Análise de Variância

Fonte	DF	Adj SS	Adj MS	Valor - F	Valor - P
$V_c$ (m/min)	2	31,01	15,503	<b>1,57</b>	<b>0,222</b>
Erro residual	33	325	9,848		
Total	35	356,01			

Com esses valores é possível afirmar que o efeito das velocidades de corte utilizadas não foi significativo na Vibração.

Comparando a Vibração com o avanço ( $f$ ) utilizada por cada pastilha experimental cerâmica, pode-se verificar o efeito na Figura 59.

Figura 59 – Efeito do avanço (f) na Vibração.



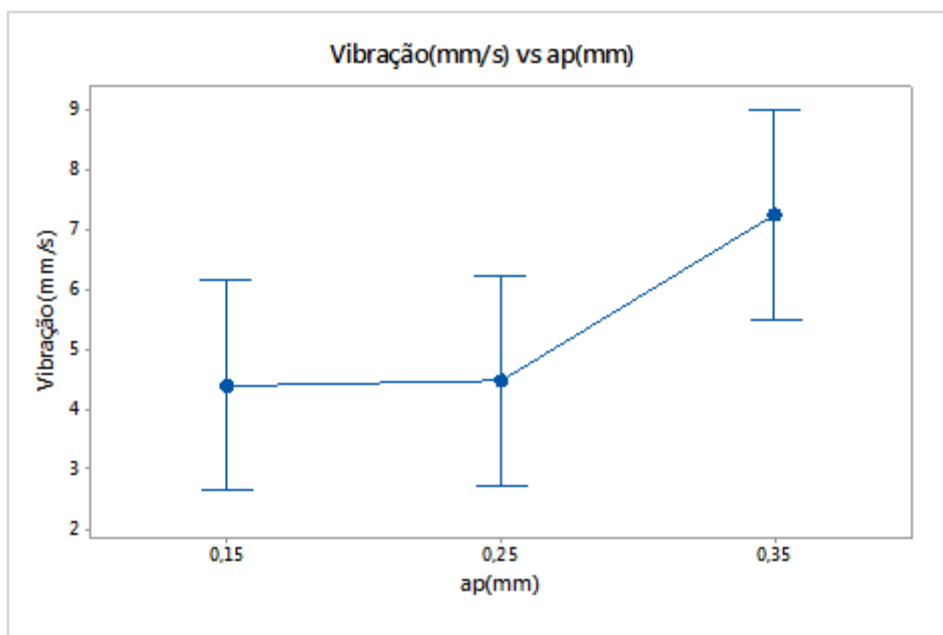
Fonte: Próprio autor.

#### Análise de Variância

Fonte	DF	Adj SS	Adj MS	Valor - F	Valor - P
f (mm/rot)	2	61,19	30,597	<b>3,42</b>	<b>0,045</b>
Erro residual	33	294,81	8,934		
Total	35	356,01			

Com esses valores é possível afirmar que o efeito da Vibração no avanço (f) utilizado nas pastilhas experimentais cerâmicas foi significativo, por causa do Valor -P ser menor que 0,05. Sendo iguais estatisticamente nos avanços de 0,10 e 0,15mm/rev, porém diferente para 0,25mm/rev.

Comparando a Vibração com a profundidade de corte ( $a_p$ ) utilizado por cada pastilha experimental cerâmica, pode-se verificar o efeito na Figura 60.

Figura 60 – Efeito da profundidade de corte ( $a_p$ ) na Vibração.

Fonte: Próprio autor.

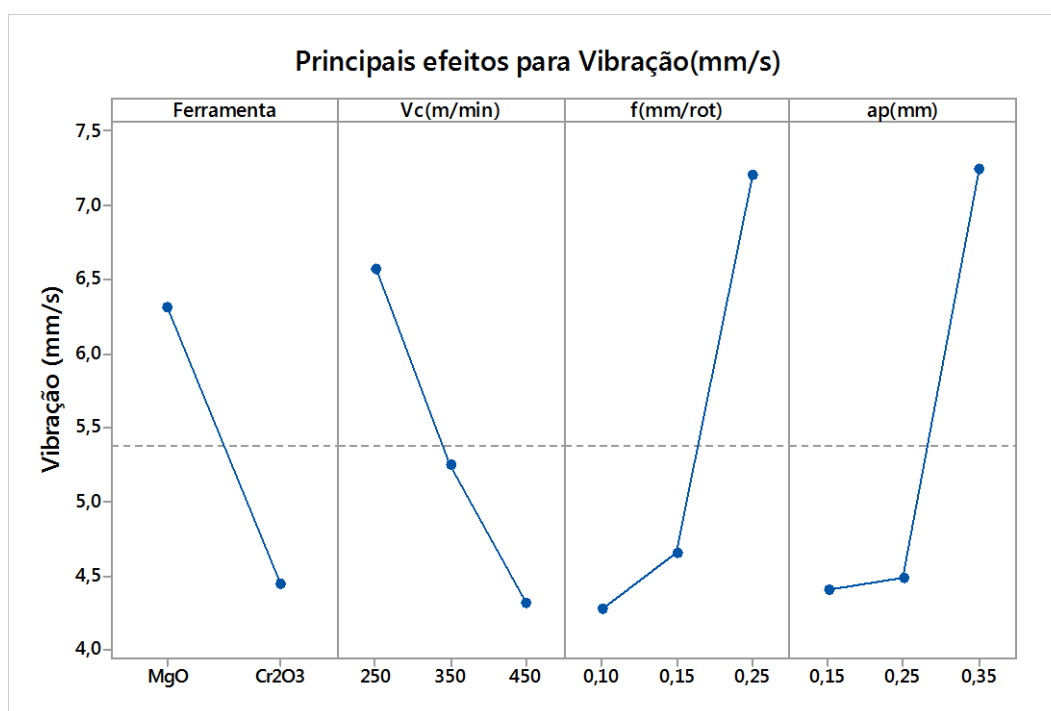
#### Análise de Variância

Fonte	DF	Adj SS	Adj MS	Valor - F	Valor - P
$a_p$ (mm)	2	63,11	31,557	<b>3,56</b>	<b>0,04</b>
Erro residual	33	292,89	8,876		
Total	35	356,01			

Com esses valores é possível afirmar que o efeito da profundidade de corte utilizado nas pastilhas experimentais cerâmicas foi significativo na Vibração (mm/s), por causa do Valor-P ser menor que 0,05.

Levando em consideração cada item avaliado, na Figura 61 pode-se observar os principais efeitos da Vibração (mm/s) no decorrer dos testes realizados.

Figura 61 – Principais efeitos para Vibração (mm/s).



Fonte: Próprio autor.

Avaliando os resultados demonstrados na Figura 61, é possível afirmar que o efeito do avanço foi maior na Rugosidade média ( $R_a$ ), se comparado com outros parâmetros de corte, pois com o avanço de 0,25 mm/rev resultou no aumento da temperatura de usinagem e o desgaste frontal. A geometria das ferramentas experimentais (MgO e Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) juntamente com os parâmetros de corte, avanço e profundidade de corte influenciam na vibração.

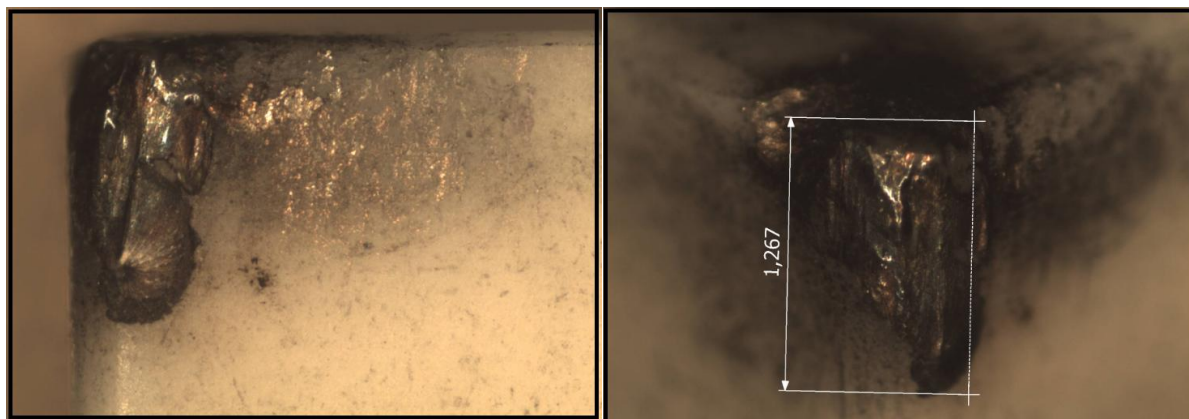
#### 4.1.7 Desgastes das ferramentas de cerâmica e cavacos gerados

##### 4.1.7.1 Pastilha experimental cerâmica Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+MgO

Nessa seção são mostrados primeiramente a análise dos desgastes da pastilha experimental cerâmica Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+MgO e posteriormente a Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+ Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Na Figura 62 encontram-se as imagens de uma aresta de corte da ferramenta experimental de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+MgO. Os parâmetros de corte utilizados foram:  $V_c = 450$  m/min;  $f_n = 0,15$  mm/rev e  $a_p = 0,35$  mm.



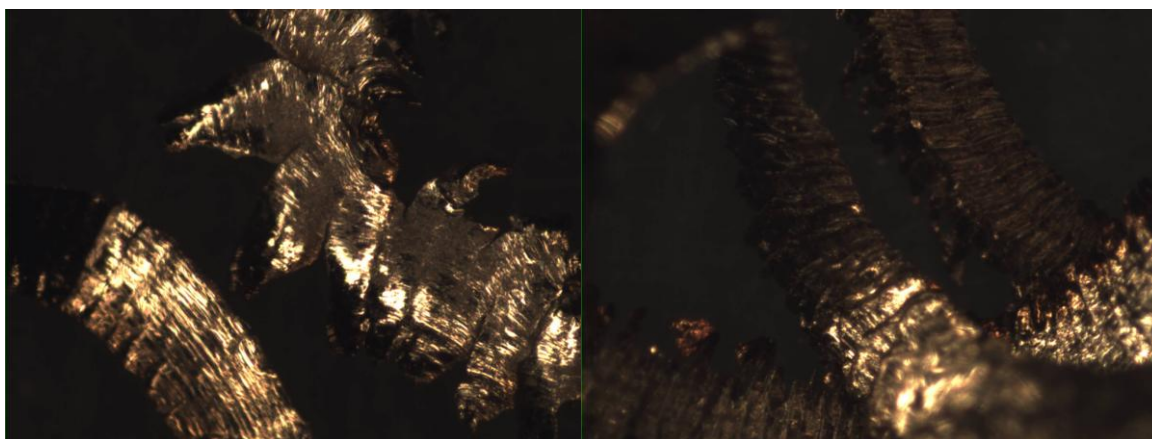
Figura 62 - Aresta de corte da pastilha de  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{MgO}$ .

Fonte: Próprio autor.

Ao observar os detalhes das arestas de corte, foram identificados como principal mecanismo de desgaste, o mecanismo abrasivo, que ocasiona o desgaste de flanco da ferramenta. Muitas ferramentas também apresentaram lascamento que fragilizam a aresta de corte, devido as altas temperaturas e baixa tenacidade da ferramenta.

Na Figura 63 abaixo encontram-se as imagens dos cavacos gerados durante o torneamento externo com a pastilha de  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{MgO}$ .

Figura 63 – Cavaco gerado durante o torneamento cilíndrico externo.



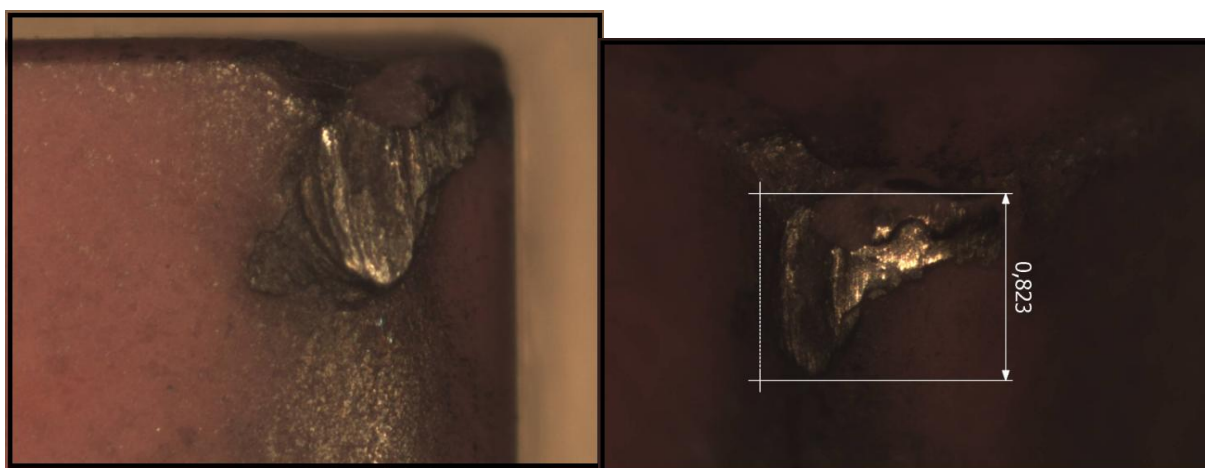
Fonte: Próprio autor.

Os tipos de cavacos gerados são de arcos soltos e fragmentados. Os cavacos apesar de ter formato fragmentado, a característica dos cavacos é de cisalhamento, devido o material apresentar pouca deformação plástica e elevada resistência mecânica.

#### 4.1.7.2 Pastilha experimental cerâmica $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$ .

Na Figura 64 abaixo encontram-se as imagens de uma aresta de corte da ferramenta experimental de  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$ . Os parâmetros de corte utilizados foram:  $V_c = 450$  m/min;  $f_n = 0,15$  mm/rev e  $a_p = 0,15$  mm.

Figura 64 - Aresta de corte da pastilha de  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$ .

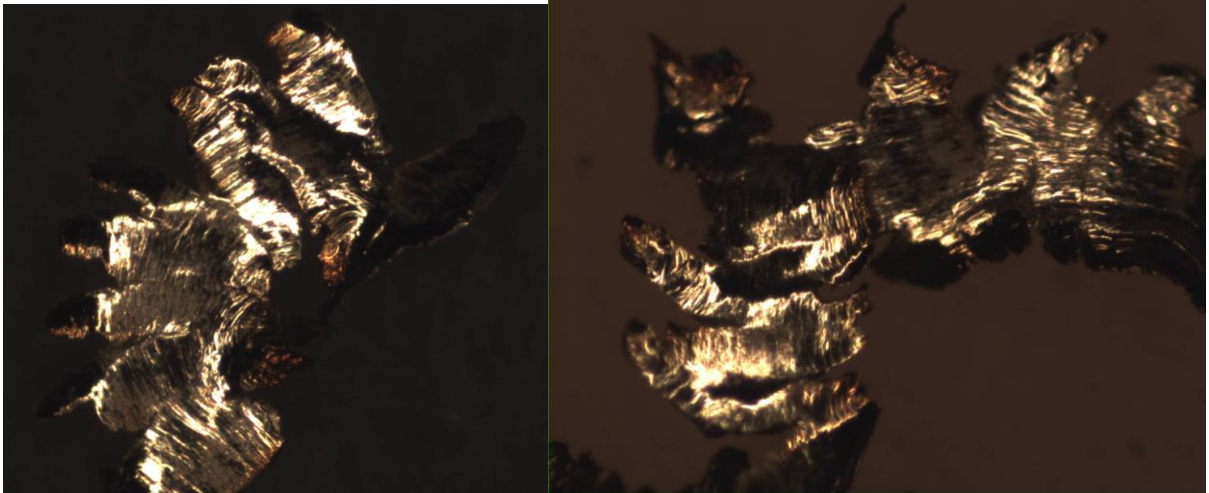


Fonte: Próprio autor.

Ao observar os detalhes das arestas de corte, foram identificados como principal mecanismo de desgaste, o mecanismo abrasivo, que ocasiona o desgaste de flanco da ferramenta. Muitas ferramentas também apresentaram lascamento que fragilizam a aresta de corte.

Na Figura 65 abaixo encontram-se as imagens dos cavacos gerados durante o torneamento externo com a pastilha de  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$ .

Figura 65 – Cavaco gerado durante o torneamento.



Fonte : Próprio autor.

Os tipos de cavacos gerados são de arcos soltos e fragmentados. Os cavacos apesar de ter formato fragmentado, a característica dos cavacos é de cisalhamento, pois o material usinado apresenta pouca deformação plástica e elevada resistência mecânica.

## 5 CONCLUSÃO

Foram realizados neste trabalho o estudo do torneamento cilíndrico externo da nova superliga VAT 32<sup>®</sup>, com 2 ferramentas de corte de cerâmica, sendo a primeira pastilha com composição de  $Al_2O_3+MgO$  e a segunda,  $Al_2O_3 + Cr_2O_3$ . Os melhores acabamentos resultaram dos parâmetros de corte testados: velocidades de corte ( $V_c$ ) 450 m/min, com velocidade de avanço ( $f$ ) 0,15mm/volta e profundidade ( $a_p$ ) entre 0,15 e 0,35 mm. Para esses parâmetros a rugosidade  $R_a$  variou entre 1,045 e 1,537  $\mu m$ . As ferramentas experimentais testadas apresentaram um desgaste de flanco ( $V_b$ ) entre 0,30 e 0,40. A aplicação do método de Taguchi, como planejamento experimental, auxiliou na busca dos efeitos principais dos fatores sobre as respostas de potência de usinagem, rugosidades, desgastes da ferramenta, emissão acústica e vibração do processo. A influência dos parâmetros de corte nas variáveis para cada ferramenta utilizada foram encontradas, bem como os parâmetros para se obter um processo robusto, ou seja, de menor variabilidade e garantia de qualidade dimensional e superficial.

O avanço da ferramenta ( $f$ ) se mostrou influente na maioria das características de qualidade analisadas, com a tendência de aumento dos valores das características com o aumento do valor de  $f$ .

Observou-se que o cavaco formado é do tipo de cisalhamento, portanto o material usinado apresenta pouca deformação plástica e uma elevada resistência mecânica.

A análise dos desgastes mostrou que a aresta de corte da ferramenta de formato quadrado sofreu uma degradação muito intensa, o que pode indicar que a geometria desta ferramenta para a usinagem de superligas pode não ser a mais adequada. Apesar do método Taguchi encontrar a solução otimizada dos parâmetros de corte para o processo, os parâmetros testados podem não ser os adequados para o material e geometria da ferramenta proposta. Apesar da geometria das pastilhas experimentais ser a quadrada, a profundidade utilizada nos testes foi muito menor ao raio de aresta que é de 0,8mm. Nessa condição o resultado foi equivalente a um teste utilizando pastilhas tendendo à geometria redonda, onde se tem uma resistência maior por causa do arco de contato, onde os esforços são mais distribuídos. A partir dos resultados do desgaste conclui-se que a usinagem desse material com ferramenta cerâmica, mesmo que gere bons acabamentos, é complexa e causa um grande desgaste. Sendo necessário uso de grande quantidade de ferramentas para processos longos. Não foi possível realizar uma análise mais detalhada (EDS) para identificar a presença de elementos distintos a composição das ferramentas, confirmando assim a adesão o material da

peça na ferramenta. Vale ressaltar que a dureza do VAT32<sup>®</sup> não é um problema, mas sim os carbonetos de sua composição.

Recomenda-se para trabalhos futuros, novas aplicações com o uso desta ferramenta experimental com a composição  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Cr}_2\text{O}_3$  que apresentou um acabamento superficial melhor e desgaste inferior em relação a outra ferramenta cerâmica de  $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ , principalmente para avaliar os parâmetros de corte testados quanto a vida da ferramenta e também a realização de análises por EDS.

## REFERÊNCIAS

- ALVES, M.S.; OLIVEIRA, J.F.G. Development of new cutting fluid for grinding process adjusting mechanical performance and environmental impact. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, n. 179, p.185-189, 2006.
- ANALISTA DE FERRAMENTA. **Treinamento básico 1**. 2015. Disponível em: <http://www.analistadeferramentas.com.br/o-quefazemos/treinamentos/basico-a1>. Acesso em: 02 abr. 2017.
- ANGAPPAN, P.; THANGIAH, S.; SUBBARAYAN, S. Taguchi-based grey relational analysis for modeling and optimizing machining parameters through dry turning of Incoloy 800H. **Journal of Mechanical Science and Technology**, Korea, v. 31, n. 9, p. 4159–4165, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ISO 4288**: especificações geométricas de produto (GPS): rugosidade: método do perfil: regras e procedimentos para avaliação de rugosidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.
- BUSHLYA, V.; ZHOU, J.; STÅHL, J. E. Effect of cutting conditions on machinability of superalloy inconel 718 during high speed turning with coated and uncoated PCBN tools. **Procedia CIRP**, Sweden, v. 3, n. 1, p. 370–375, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2010.03.093>. Acesso em: 02 mar. 2017.
- BUSHLYA, V. *et al.* Effects of cutting when turning age hardened Inconel 718 with PCBN Tools of binderless and low-CBN grades. **Machining Science and Technology**, Oxfordshire United Kingdom, v. 17, n. 4, p. 497–523, 2013a. Disponível em: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10910344.2013.806105>. Acesso em: 10 jun.2018.
- BUSHLYA, V. *et al.* Performance and wear mechanisms of whisker-reinforced alumina, coated and uncoated PCBN tools when high-speed turning aged Inconel 718. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Berlin, v. 66, n. 9–12, p. 2013–2021, 2013.b.
- CIMM - CENTRO DE INFORMAÇÃO METAL MECÂNICA. **Os fluidos de corte**. Disponível em: [http://www.cimm.com.br/portal/noticia/material\\_didatico/4757#.UT9KexzqmSo](http://www.cimm.com.br/portal/noticia/material_didatico/4757#.UT9KexzqmSo). Acesso em: 24 fev. 2013.
- CONAGIN, A.; BARBIN, D.; DEMÉTRIO, C.G.B. Modifications for the Tukey test procedure and evaluation of the power and efficiency of multiple comparison procedures. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 65, p. 428-432, 2008.
- DEVILLEZ, A. *et al.* Cutting forces and wear in dry machining of Inconel 718 with coated carbide tools. **16th International Conference on Wear of Materials**, Montreal, Canada, n. 262, 2007, p. 931-942.
- DHAR, N. R.; KAMRUZZAMAN, M.; AHMED, Mahiuddin. Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in turning AISI-4340 steel. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 172, n. 2, p. 299-304, 2006.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos metais**. 9. ed. São Paulo: Artliber, 2014.

DIOGENES, A. C. **Estudo da usinagem por torneamento de ligas de alumínio**. Orientador: Dr. Marcos Valério Ribeiro. 2011. 69 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2011.

DONACHIE, M. J.; DONACHIE, S. J. **Superalloy: a technical guide**. 2nd ed. United States: ASM International, 2002.

EUZEBIO, C. D. G. **Uma contribuição da aplicação de modelos Fuzzy empregados na detecção da queima de peças na retificação plana**, 2012. Orientador: Dr. Paulo Roberto Aguiar. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2012.

EZUGWU, E. O.; BONNEY, J.; YAMANE, Y. An overview of the machinability of aeroengine alloys. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v.134, n.2, p. 233-253, 2003.

EZUGWU, E.O; WANG, Z.M.; MACHADO, A.R. The machinability of nickel-based alloys: a review. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 86, n. 1–3, p. 1–16, 1998. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013698003148>. Acesso em: 18 abr.2018.

EZUGWU, E. O. Improvements in the machining of aero-engine alloys using self-propelled rotary tooling technique. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, v. 185, n. 1–3, p. 60–71, 2007.

FAN, Y. H.*et al.* Study of surface quality in machining nickel-based alloy Inconel 718. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Berlin, v. 69, n. 9–12, p. 2659–2667, 2013.

FARINA, A. B.; LIBERTO, R. C. N.; BARBOSA, C. A. Desenvolvimento de novos aços válvula para aplicação em motores de alto desempenho. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, v. 10, n. 4, p. 329–335, 2013a. Disponível em: <http://tecnologiammm.com.br/doi/10.4322/tmm.2013.043>. Acesso em: 15 abr.2018.

FARINA, A. B.; LIBERTO, R. C. N.; BARBOSA, C. A. Development of new intermediate nickel alloys for application in automotive valves of high performance engines. **SAE Technical Paper**, 2013b. Disponível em: <http://papers.sae.org/2013-01-1153/>. Acesso em: 15 abr.2018.

FARINA, A.B.*et al.* Modelagem termodinâmica aplicada a otimização de processos e desenvolvimento de novas ligas. **ABM**, São Paulo, 2013.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. São Paulo: Edgard Blucher, 1970.

HARA, C. M. **Uma contribuição para o monitoramento de retificação cilíndrica de mergulho**. Orientador: Dr. Anselmo Eduardo Diniz. 1999. 178 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

HASSUI, A. **Comparação sobre a utilização de diferentes sensores no monitoramento do processo de retificação.** Orientador: Dr. Anselmo Eduardo Diniz. 1997. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

HASSUI, A. **Estudo da vibração durante o corte e centelhamento na retificação cilíndrica de mergulho.** Orientador: Dr. Anselmo Eduardo Diniz. 2002. 179 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

INÁCIO, M.A. **Desenvolvimento de compósitos cerâmicos de  $Al_2O_3$  e  $ZrO_2$ .** Orientadores: Dr. Daniel Alessandro Nono *et al.* 2010. 97f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010.

JS FERRAMENTAS. **Catálogo.** 2009. Disponível em: <http://www.jsferramentas.com.br/catalogo2009>. Acesso em: 20 out. 2017.

KLOCKE, F.; EISENBLÄTTER, G. Dry cutting. **CIRP Annals: manufacturing Technology**, Sweden, v. 2, 1997, p. 519-526. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60877-4](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60877-4). Acesso em: 15 out. 2018.

KONDO, M.Y. **Análise e otimização do processo de torneamento da superliga Vat 32® com ferramentas de corte experimentais e comerciais.** Orientador: Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves. 2019. 213 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2019.

LANÇONI, P. N. **Estudo comparativo de medição de força de corte no processo de retificação.** Orientador: Dr. Paulo Roberto de Aguiar. 2008. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2008.

MACHADO, Á. R. *et al.* **Teoria da usinagem dos materiais.** São Paulo: Edgard Blucher, 2011.

MADARIAGA, A.; ESNAOLA, J. A.; FERNANDEZ, E.; *et al.* Analysis of residual stress and work-hardened profiles on Inconel 718 when face turning with large-nose radius tools. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Berlin, v. 71, n. 9–12, p. 1587–1598, 2014.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros.** 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

MUNOA, J.; BEUDAERT, X.; DOMBOVARI, Z. Chatter suppression techniques in metal cutting. **CIRP Annals: Manufacturing Technology**, Sweden, v. 65, n. 2, p. 785–808, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.004>. Acesso: 15 out. 2018.

OLIVEIRA, A.J. **Otimização das condições de usinagem visando o torneamento a seco do aço ABNT 1045 em operação de desbaste.** Orientador: Dr. Anselmo Eduardo Diniz. 2003.



115f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, 2003.

PAESE, C.; CATEN, C.; RIBEIRO, J. L. D. Aplicação da análise de variância na implantação do CEP. **Revista Produção**, São Paulo, v. 11 n.1, 2001.

PASPARDELLI, C. **Remoção de Pb e Bi em ligas de níquel por refino a vácuo**. 136f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) - Universidade de São Paulo, São Paulo 2011.

PHADKE, M. S. **Quality engineering using robust design**. United States: P T R Prentice-Hall, 1989.

PRASAD, C.L.V.R.S.V. *et al.* experimental investigations for the prediction of wear zones on the rake face of tungsten carbide inserts under dry machining conditions. **Procedia CIRP**, Sweden, v.8, p. 528-533, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2013.06.145>. Acesso em: 20 out.2018.

QUINTANA, G.; CIURANA, J. Chatter in machining processes: a review. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Spain, v. 51, n. 5, p. 363–376, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmactools.2011.01.001>. Acesso em: 15 de abr. 2018.

SANTOS, S. C.; SALES, W. F. **Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais**. São Paulo: Editora Artliber, 2007.

SARIKAYA, M.; GÜLLÜ, A. Multi-response optimization of minimum quantity lubrication parameters using Taguchi-based grey relational analysis in turning of difficult-to-cut alloy Haynes 25. **Journal of Cleaner Production**, Turkey, v. 91, p. 347–357, 2015.

SCHÜHLI, L. A. **Monitoramento de operações de retificação usando fusão de sensores**, 2007. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção Mecânica) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

SHI, K.; ZHANG, D.; REN, J. Optimization of process parameters for surface roughness and microhardness in dry milling of magnesium alloy using Taguchi with grey relational analysis. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Berlin, v. 81, n. 1–4, p. 645–651, 2015.

SIDDHPURA, M.; PAUROBALLY, R. A review of chatter vibration research in turning. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Australia, v. 61, p. 27–47, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmactools.2012.05.007>. Acesso em: 18 abr.2018.

SILVA, A. L. V. C. E; MEI, P. R. **Aços e ligas especiais**. São Paulo: Edgard Blucher, 2006.

SILVA, M. B. **Design of experiments: applications**. Rijeka, Croatia: InTech, 2013.

SILVA, L.R. *et al.* Analysis of surface integrity for minimum quantity lubricant: MQL in grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, n. 47, p. 412-418, 2007.

SILVA, M. R. **Estudo do efeito da fase beta na usinabilidade de ligas de latão livres de chumbo**. Orientadora: Izabel Fernanda Machado, 2015. 132f. Dissertação ( Mestrado em Engenharia Mecânica) –Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

SØRBY, K.; VAGNORIUS, Z. High-pressure cooling in turning of inconel 625 with ceramic cutting tools. **Procedia CIRP**, Sweden, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.221>. Acesso em: 15 fev.2019.

SOKOVIC, M.; MIJANOVIC, K. Ecological aspects of the cutting fluids and its influence on quantifiable parameters of the cutting processes. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, n. 109, p. 181-189, 2001.

SOUSA, C. A.; LIRA JUNIOR, M. A.; FERREIRA, R. L. C. Avaliação de testes estatísticos de comparações múltiplas de médias. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 59, n. 3, maio/jun. 2012.

SREEJITH, P.S.; NGOI, B.K.A. Dry machining: machining of the future. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, n. 101, p. 287-291, 2000.

STÅHL, J.-E. **Metal cutting: theories and models**. Lund, Sweden: Division of Production and Materials Engineering, Lund University, 2012.

STEPAN, G. *et al.* Chatter avoidance in cutting highly flexible workpieces. **CIRP Annals: manufacturing technology**, Sweden, v. 66, n. 1, p. 377–380, 2017. CIRP. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.054>. Acesso em: 12 jun.2018.

TASDELEN, B.; WIKBLOM, T.; EKERED, S. Studies on minimum quantity lubrication (MQL) and air cooling at drilling. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, n. 200, p. 339-346, 2008.

TEIXEIRA FILHO, F. **A utilização de fluido de corte no fresamento do aço inoxidável 15-5PH**. Orientador: Dr. Anselmo Eduardo Diniz. 2006. 230f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2006.

THAKUR, A.; GANGOPADHYAY, S. Dry machining of nickel-based super alloy as a sustainable alternative using TiN/TiAlN coated tool. **Journal of Cleaner Production**, India, v.129, p. 256 – 268, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.074>. Acesso em: 15 abr.2018.

THELLAPUTTA, G. R.; CHANDRA, P. S.; RAO, C. S. P. Machinability of nickel based superalloys: a review. **Materials today: proceedings**, United Kingdom, v. 4, n. 2, p. 3712–3721, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.266>. Acesso em: 15 abr.2018.

THOMÉ, R. *et al.* Doenças causadas por microbactérias: uma revisão de trabalhos. **Revista Máquinas e Metais**, n. 492, p. 96-109, 2007.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal cutting**. 4th ed. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2000.

UHLMANN, E.; HINZMANN, D.; KROPIDLOWKSI, K. Increased tool performance with niobium carbide based cutting materials in dry cylindrical turning. **Procedia CIRP**, Sweden, v. 0, n. Hpc, p. 541–544, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.238>. Acesso em: 23 fev.2018.

ZHUANG, K. *et al.* Notch wear prediction model in turning of Inconel 718 with ceramic tools considering the influence of work hardened layer. **Wear**, Montreal, Canada, v. 313, n. 1–2, p. 63–74, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2014.02.007>. Acesso em: 23 fev.2018.

ZONTA, A. Porque monitorar a usinagem? **Revista Mundo da Usinagem**, 2019. Disponível em: <http://omundodausinagem.com.br/Soluçõesdeusinagem/> Acesso: 25 abr.2019.

WALPOLE, R. E. *et al.* **Probabilidade e estatística para engenharia e ciências**. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.