

MARCEL YUZO KONDO

**Análise do processo de torneamento da superliga Vat 32[®] com
ferramentas de corte experimentais e comerciais**

Marcel Yuzo Kondo

**Análise do processo de torneamento da superliga Vat 32[®] com
ferramentas de corte experimentais e comerciais**

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Doutor em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves

K82a	<p>Kondo, Marcel Yuzo</p> <p>Análise do processo de torneamento da superliga Vat 32 com ferramentas de corte experimentais e comerciais / Marcel Yuzo Kondo – Guaratinguetá, 2019</p> <p>203 f. : il.</p> <p>Bibliografia: f. 184-194</p> <p>Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2019.</p> <p>Orientadora: Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves</p> <p>1. Ligas resistentes ao calor. 2. Ligas de níquel. 3. Ferramentas de corte. I. Título.</p> <p>CDU 621.9. 02(043)</p>
------	--

MARCEL YUZO KONDO

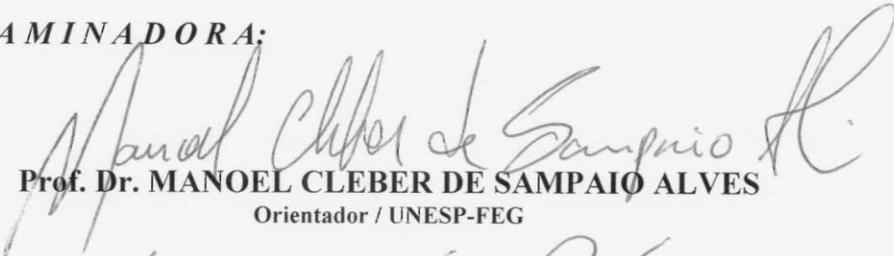
**ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

**PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO: DOUTORADO**

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Ivonete Ávila
Coordenadora

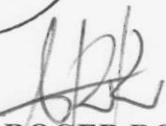
BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. MANOEL CLEBER DE SAMPAIO ALVES
Orientador / UNESP-FEG


Prof. Dr. MARCOS VALÉRIO RIBEIRO
UNESP/FEG


Prof. Dr. JOSÉ VITOR CANDIDO DE SOUZA
UNESP/FEG


Prof. Dr. NIVALDO LEMOS COPPINI
UNICAMP


Prof. Dr. ALESSANDRO ROGER RODRIGUES
USP/São Carlos

DADOS CURRICULARES

MARCEL YUZO KONDO

NASCIMENTO 23.12.1986 – Itapeva / SP

FILIAÇÃO Jorge Noboru Kondo
Marcia Massae Hirumitsu Kondo

2007/2011 Curso de Graduação em Engenharia Industrial Madeireira
Engenheiro Industrial Madeireiro
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
Campus de Itapeva

2012/2014 Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Mestre em Engenharia Mecânica
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
Campus de Guaratinguetá

2015/2019 Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Doutor em Engenharia Mecânica
Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
Campus de Guaratinguetá

dedico este trabalho à minha família, meu falecido pai Jorge, minha mãe guerreira Marcia, meus irmãos Kenzo e Litsue, e à minha esposa Karla, companheira, amiga e grande incentivadora para a conclusão desta etapa da minha vida.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, Aquele que em momentos difíceis encontrei forças para superar os obstáculos, que me deu a capacidade para concluir este trabalho e que sempre ilumina meu caminho, apontando-me um norte,

ao meu orientador, *Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves*, mais que um orientador, um amigo que sempre me aconselhou não só no aspecto acadêmico, mas também no aspecto da vida, obrigado por toda a paciência, dedicação, orientação e auxílio,

a todos os docentes da FEG, pelo apoio e aprendizado que tive,

aos professores *Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro* FEG/UNESP, *Prof. Dr. José Vitor Candido de Souza* FEG/UNESP e *Prof. Dr. Sérgio Francisco dos Santos* por toda ajuda, discussões, auxílio e apoio recebido, sem os quais este trabalho não seria possível,

a *Vilares Metals*, em especial ao *Eng. Dr. Alexandre Farina*, pela doação dos materiais desta pesquisa,

a *SECO Tools*, pela doação das ferramentas de corte e suportes e, em especial ao *Eng. MSc. Fábio Ricardo da Silva* por todo auxílio e informações prestadas,

a todos os servidores técnicos por toda a solicitude e auxílio, em especial aos técnicos que tive maior convivência, *Manoel, Seu Odir, Seu Wilson e Célio*,

a todos os técnicos administrativos, funcionários da biblioteca, financeiro, de apoio acadêmico e em especial aos técnicos administrativos da secretaria de pós graduação, *Renata, Maria Cristina, Rodrigo e Sidney*, que tive o prazer de conhecer melhor durante minha experiência no conselho,

aos meus colegas da pós-graduação por todo apoio e auxílio,

aos meus amigos que me ajudaram muito no desenvolvimento deste trabalho com discussões, auxílio e sugestões, *Marcelo Antunes de Paula, Taise Azevedo de Sousa, Cleverson Pinheiro, Rennan Pereira Gama, Maurício de Oliveira Filho, Reginaldo Toshihiro Konatu e Anderson Zenken Nakazato*, sem os quais este trabalho também não se concluiria.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- Brasil (CAPES) - código de financiamento 001.

O mestre disse a um dos seus alunos: “Yu, queres saber em que consiste o conhecimento? Consiste em ter consciência tanto de conhecer uma coisa quanto de não a conhecer. Este é o conhecimento”

Confúcio

RESUMO

A superliga de níquel VAT 32[®] foi desenvolvida como um substituto da liga UNS N07751 (Inconel 151) 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[®] com quatro tipos de ferramentas de corte. São elas insertos de metal duro com diferentes revestimentos, Ti(C,N) + Al₂O₃ pelo processo de deposição química de vapor (*chemical vapor deposition* – CVD), e revestimento de Ti-Al-Si-N pelo processo de deposição física de vapor (*physical vapor deposition* – PVD), pastilhas de nitreto cúbico de boro (cBN) e pastilhas experimentais de Al₂O₃ + MgO. Através do método de Taguchi de planejamento experimental, foram obtidas as combinações e os efeitos principais dos parâmetros velocidade de corte, avanço da ferramenta, profundidade de usinagem e tipo de lubrificação (seco ou em abundância) para otimizar 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. Foram obtidos 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. Com a utilização da análise relacional cinza (GRA), método de otimização multiobjetivo, selecionou-se uma condição para os ensaios de vida das diferentes ferramentas estudadas. Os tipos de desgaste e tipos de cavaco também foram observados. Nos ensaios de vida, onde cada um dos tipos de ferramenta trabalhou na sua condição otimizada, o melhor desempenho em relação ao comprimento usinado total até o fim de vida foi da ferramenta de metal duro CVD. Porém, quando analisada a rugosidade das peças usinadas, o destaque é dado a ferramenta de PVD, pois seu comprimento total de usinagem é pouco inferior aos obtidos pela ferramenta CVD mas os valores de rugosidade obtidos são muito inferiores, cerca de pelo menos 3 vezes menor.

PALAVRAS-CHAVE: Metal duro PVD. Metal duro CVD. cBN. Potência de usinagem. Ferramenta cerâmica. Método de Grey-Taguchi. Superligas.

ABSTRACT

VAT 32[®] is a nickel based super alloy developed to substitute UNS N07751 alloy in production of automotive valves for high performance internal combustion engines. The formation of niobium carbides gives to this alloy a high resistance to wear, desired in the application in automotive valves, creating however, a greater difficulty in the machining of this material. This thesis aimed the study of VAT 32[®] turning with four different cutting tools. The tested tools were Ti(C,N)+Al₂O₃ coated by chemical vapor deposition (CVD) carbide inserts, Ti-Al-Si-N coated by physical vapor deposition (PVD) carbide inserts, cubic boron nitride (cBN) inserts and experimental Al₂O₃+MgO ceramic inserts. Optimal combination of the cutting parameters and main effects of the factors speed of cutting, tool feed, depth of cutting and lubrication condition (dry and abundant) in turning of VAT 32[®] were found using Taguchi's method as a design of experiment (DOE). The analyzed response variables were machining power, tool wear, surface quality of the machined pieces, chips format and acoustic emission and vibration signals of the process. It was also obtained in this work the robust process with the analysis of signal to noise ratio (S/N) where cutting parameters for smaller process variability were found. Finally, the multi-objective optimization method called Grey Relational Analysis (GRA) was used to find optimal cutting conditions for each tested tools. These optimal conditions were used in a tool life test. In the life tests, where each type of tool worked in its optimized condition, the best performance in relation to the total machined length till the end of life was of obtained by the CVD carbide tool. However, when the roughness of the machined part was analyzed, the highlight is the PVD tool, because its total machining length is slightly lower than those obtained by the CVD tool, but the obtained roughness values are much lower, at least 3 times lower.

KEYWORDS: PVD carbide tool. CVD carbide tool. cBN. Cutting power. Ceramic tool. Grey-Taguchi method. Superalloy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Forças que agem na ferramenta.	32
Figura 2- Comparação dos diferentes tipos de materiais para ferramentas de corte de acordo com os parâmetros de usinagem, resistência mecânica e ductilidade.	38
Figura 3 - Estrutura do hBN, do cBN e diagrama do equilíbrio hBN/cBN.....	46
Figura 4 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV) do VAT 32 [®] atacado quimicamente.	62
Figura 5 - Fluxograma das etapas de trabalho.	74
Figura 6 - Tela do programa supervisor para captação de sinais durante os ensaios de torneamento.	76
Figura 7 - Ligação do sensor de potência acoplado na entrada do motor de rotação do centro de torneamento CNC.	77
Figura 8 - Afixação dos sensores de vibração e emissão acústica juntamente ao porta-ferramenta.	77
Figura 9 - Exemplo de gráfico de potência de um ensaio de torneamento para identificação da potência em vazio e do momento de efetiva remoção de material.	79
Figura 10 - Exemplo dos gráficos gerados pelo programa de tratamento de dados feito com o software MATLAB [®]	80
Figura 11 - Pastilhas testadas na usinagem da superliga VAT 32 [®] , respectivamente Metal Duro CVD, Metal Duro PVD, cBN e pastilha cerâmica.	82
Figura 12 - Porta-ferramenta SECO TOOLS Capto B01T9032445.....	82
Figura 13 - Porta-Ferramentas C4-DCLNL-27050-12M da fabricante Seco Tools.....	83
Figura 14 - a) Pastilha CNMG120412-MF5 TH1000 (PVD) e b) Pastilha CNMG120412-MF5 TH1500 (CVD), ambas da SECO Tools.	86
Figura 15 - Pastilha CBN170 da Seco Tools.....	88
Figura 16- Pastilha experimental de Al ₂ O ₃ +MgO SNGN120408.	89
Figura 17 - Efeitos principais dos fatores na média das médias de potência de corte (ANOM).	93
Figura 18 - ANOM para a razão sinal-ruído para potência de usinagem.....	95
Figura 19-ANOM para análise dos efeitos principais dos fatores sobre a variável V _b /L _c	97
Figura 20 - ANOM para análise dos efeitos principais dos fatores sobre a variável V _b /L _c	99
Figura 21 - ANOM para os valores de R _a no torneamento com pastilha de metal duro PVD.	101
Figura 22 - ANOM para os valores de S/N para rugosidade R _a	102

Figura 23 - ANOM para os valores de R_t	104
Figura 24 - ANOM para os valores de S/N para R_t	105
Figura 25 - Efeitos principais dos fatores na média das médias de emissão acústica (ANOM).	107
Figura 26 - Análise de médias (ANOM) para η do sinal de emissão acústica.	108
Figura 27 - Análise de média (ANOM) para vibração.	110
Figura 28 - ANOM para a razão sinal-ruído de vibração.	111
Figura 29 – (a) e (c) Arestas de corte das ferramentas de metal duro PVD; (b) e (d) Cavacos gerados na usinagem do VAT 32 [®]	113
Figura 30 – (a) e (c) Arestas de corte das ferramentas de metal duro PVD; (b) e (d) Cavacos gerados na usinagem do VAT 32 [®]	114
Figura 31 – ANOM para os valores de potência de usinagem no torneamento do VAT 32 [®] com pastilha de metal duro CVD.	120
Figura 32 - ANOM para os valores de η da variável resposta potência de usinagem.	122
Figura 33 - ANOM para os valores médios da relação $V_b.1000/L_c$ para a ferramenta de metal duro CVD.	123
Figura 34 - Efeitos principais para os valores de S/N de $V_b.1000/L_c$	125
Figura 35 - Efeitos Principais dos valores médios de rugosidade R_a para a ferramenta de metal duro CVD.	126
Figura 36 – ANOM dos efeitos principais para os valores η de R_a	128
Figura 37 - Efeitos principais para os valores médios de R_t	130
Figura 38 - Efeitos principais para a razão sinal-ruído de R_t	132
Figura 39 - ANOM com os efeitos principais na média dos valores de emissão acústica para a ferramenta de metal duro CVD.	133
Figura 40 - Efeitos principais para os valores da razão sinal-ruído de emissão acústica.	135
Figura 41 - Efeitos principais para a média do sinal de vibração.....	137
Figura 42 - Efeitos principais para os valores de η referentes a vibração do processo.	138
Figura 43 - Desgastes das arestas de corte e os cavacos gerados no torneamento do VAT 32 [®]	139
Figura 44 - Desgastes das ferramentas de corte CVD e formato dos cavacos gerados.	140
Figura 45 - Efeitos principais dos fatores sobre a média dos valores de potência de usinagem para a ferramenta de cBN.	146
Figura 46 - Efeitos principais para os valores de η relacionados a potência de usinagem.	147

Figura 47 - Análise de médias para os valores de desgaste de flanco por comprimento usinado.....	149
Figura 48 - Efeitos principais para os valores de η de $V_b.1000/L_c$	150
Figura 49 - Efeitos principais para as médias de rugosidade R_a	151
Figura 50 - Efeitos principais para os valores de η de R_a	152
Figura 51 - ANOM dos valores médios de R_t	153
Figura 52 - ANOM e efeitos principais dos valores da razão sinal-ruído (S/N) de R_t	155
Figura 53 - Efeitos principais dos fatores sobre a variável resposta emissão acústica.....	156
Figura 54 - Efeitos principais para os valores da razão sinal-ruído de emissão acústica.....	157
Figura 55 - Efeitos principais para os valores médios de vibração no uso da ferramenta de cBN.....	159
Figura 56 - Efeitos principais dos fatores de corte sobre S/N de vibração.....	160
Figura 57 - Desgastes das ferramentas de cBN 170 e cavacos gerados durante a usinagem com $v_c=170$ m/min.....	161
Figura 58 - Desgastes das ferramentas de corte de cBN 170 e cavacos gerados na usinagem com $v_c=350$ m/min.....	162
Figura 59- Efeitos principais para a média de potência de usinagem no torneamento com pastilha cerâmica.....	167
Figura 60 - Efeitos principais para os valores de η de potência de usinagem.....	168
Figura 61 - Análise de médias para os valores de $V_b.1000/L_c$	170
Figura 62 - Efeitos principais para S/N de $V_b.1000/L_c$ no tornemanto com ferramenta cerâmica.....	171
Figura 63 - Análise de médias para rugosidade R_a no torneamento com pastilha de cerâmica.....	173
Figura 64 - Efeitos principais para os valores de S/N de R_a para ensaios com pastilha cerâmica.....	175
Figura 65 - Efeitos principais para as médias de R_t obtidas na usinagem com pastilha cerâmica.....	176
Figura 66 - Efeitos principais para S/N de R_t no processo de usinagem com ferramenta cerâmica.....	177
Figura 67 - Efeitos principais para os sinais de emissão acústica no tornemanto com ferramenta de cerâmica.....	179
Figura 68 – Efeitos principais da razão sinal-ruído para os valores de emissão acústica.....	180

Figura 69 - Análise de médias para os valores médios de vibração no torneamento com a pastilha cerâmica.	182
Figura 70 – Efeitos principais para a razão sinal-ruído de vibração.	183
Figura 71 - Aresta de corte da pastilha de $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{MgO}$	184
Figura 72 - Desgastes das arestas de corte para a ferramenta cerâmica de $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{MgO}$ e cavacos gerados durante o torneamento do VAT 32 [®] com $v_c = 350$ e 400 m/min.	185
Figura 73 - Desgastes das arestas de corte para a ferramenta cerâmica de $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{MgO}$ e cavacos gerados durante o torneamento VAT 32 [®] com $v_c = 450$ e 500 m/min.	186
Figura 74 - Ensaio de vida das ferramentas de corte	192
Figura 75- Desgastes de flanco das ferramentas em função do tempo efetivo de usinagem.	193
Figura 76 - Evolução da potência de usinagem pelo comprimento de usinagem.	193
Figura 77 - Progressão da rugosidade R_a com relação ao aumento do desgaste da ferramenta nos ensaios de vida.	194
Figura 78 - Progressão da rugosidade R_t com relação ao aumento do desgaste da ferramenta nos ensaios de vida.	196

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comprimentos de amostragem e de avaliação para medição de rugosidade de acordo com a norma ISO 4288:2008.....	27
Tabela 2 – Comprimento de amostragem de rugosidade para medições de parâmetros R de perfis periódicos e RSm de perfis periódicos e não-periódicos.....	28
Tabela 3 - Dados de usabilidade de algumas superligas.	53
Tabela 4 - Composição química nominal das ligas VAT 32 [®] e UNS N007751, em porcentagem mássica.....	61
Tabela 5 - Propriedades da liga VAT 32 e UNS N07751.	62
Tabela 6 - Composição química nominal da peça de VAT 32 [®]	75
Tabela 7 - Combinação experimental dos fatores de acordo com arranjo ortogonal L ₈ de Taguchi para a ferramenta de metal duro revestido por PVD.....	83
Tabela 8 - Planejamento experimental para os testes com ferramenta de metal duro revestido por CVD.	87
Tabela 9 - Combinação experimental a ser aplicada nos testes com pastilha de cBN.	88
Tabela 10 - Combinação experimental para os testes com a ferramenta de cerâmica de Al ₂ O ₃ +MgO.....	90
Tabela 11 - Valores obtidos nos ensaios de dureza Vickers do VAT 32 [®]	92
Tabela 12 - Análise de variância para os valores médios de potência de corte.....	94
Tabela 13 - ANOVA para a razão sinal-ruído de potência de usinagem.	96
Tabela 14 - ANOVA dos efeitos principais dos fatores na média da razão V _b /L _c	98
Tabela 15 - ANOVA para os valores de sinal-ruído de V _b /L _c	100
Tabela 16 - ANOVA para os valores de R _a na usinagem com ferramenta de metal duro PVD.	101
Tabela 17 – Análise de variância para os valores da razão sinal-ruído η para R _a	103
Tabela 18 - Comparação dos valores teóricos e experimentais de rugosidade R _t	104
Tabela 19 - ANOVA para os valores de média R _t	105
Tabela 20 - ANOVA para os valores de S/N para R _t	106
Tabela 21 - Análise de variância para as médias do sinal de emissão acústica.....	107
Tabela 22 - Análise de variância dos valores de S/N para emissão acústica.....	109
Tabela 23 - ANOVA para os valores médios de vibração.	110
Tabela 24 - Análise de variância dos dados normalizados de η para vibração.	112

Tabela 25 - Valores ótimos dos parâmetros de corte para o torneamento do VAT 32 [®] com ferramenta de metal duro revestida por Ti-Al-Si-N pelo processo PVD para os valores médios das respostas.	115
Tabela 26 - Valores otimizados dos parâmetros de corte para o torneamento do VAT 32 [®] com ferramenta de metal duro revestida por Ti-Al-Si-N pelo processo PVD com relação aos valores de η	115
Tabela 27 – Geração relacional cinza, normalização das variáveis respostas para a ferramenta de metal duro PVD.	116
Tabela 28 - Obtenção da sequência de desvio $\Delta 0ik$ para os fatores de qualidade analisados.	117
Tabela 29 - Obtenção dos coeficientes relacionais cinzas (GRC) γ dos fatores de qualidade.	117
Tabela 30 - Valores da classificação relacional cinza (GRG) e classificação dos experimentos realizados.	118
Tabela 31 - Análise de variância para as médias de potência de usinagem com pastilha de metal duro CVD.	121
Tabela 32 - ANOVA para os valores da razão sinal-ruído para potência de usinagem.	122
Tabela 33 - Análise de variância para as médias de $V_b.1000/L_c$	124
Tabela 34 - ANOVA para os valores de η relacionados a $V_b.1000/L_c$	126
Tabela 35 - ANOVA para os valores normalizados de R_a	127
Tabela 36 - ANOVA dos dados normalizados da razão sinal-ruído para a variável resposta R_a	129
Tabela 37 - Teste de Tukey para os fatores com relação a variável resposta R_t	131
Tabela 38 - Comparação entre as rugosidades teóricas e as obtidas experimentalmente no torneamento com a pastilha de metal duro CVD.	131
Tabela 39 - ANOVA para os dados normalizados da razão sinal-ruído para R_t	133
Tabela 40 - ANOVA para os dados normalizados de Emissão Acústica.	134
Tabela 41 – Análise de variância dos dados η de emissão acústica normalizados.	136
Tabela 42 - ANOVA dos dados normalizados das médias de vibração.	137
Tabela 43 - Análise de variância dos valores de razão sinal-ruído de vibração.	139
Tabela 44 - Valores otimizados dos parâmetros de corte para as médias no torneamento do VAT 32 [®] com ferramenta de metal duro revestida por Ti(C,N)+Al ₂ O ₃ pelo processo CVD.	141

Tabela 45 - Valores otimizados dos parâmetros de corte para a razão sinal-ruído das respostas no torneamento do VAT 32 [®] com ferramenta de metal duro revestida por Ti(C,N)+Al ₂ O ₃ pelo processo CVD.....	142
Tabela 46 - Geração relacional cinza ou normalização dos dados de qualidade para o torneamento com pastilha de metal duro CVD.	142
Tabela 47 - Obtenção das sequências de desvio.....	143
Tabela 48 - Cálculo do coeficiente relacional cinza (GRC) γ para o torneamento com pastilha de metal duro CVD.....	144
Tabela 49 - Valores da classificação relacional cinza (GRC) dos dados de qualidade do processo de torneamento com pastilha de metal duro CVD.....	144
Tabela 50 - ANOVA para a média de potência de usinagem.....	147
Tabela 51 - ANOVA para S/N de potência de usinagem.	148
Tabela 52 - ANOVA para os valores médios de $V_b \cdot 1000/L_c$	149
Tabela 53 - ANOVA dos valores de S/N para $V_b \cdot 1000/L_c$	150
Tabela 54 - ANOVA para os valores médios de R_a	152
Tabela 55 - ANOVA para os valores da razão sinal-ruído de R_a	153
Tabela 56 - Análise de variância para os valores médios de R_t	154
Tabela 57 - Comparativo entre os valores teóricos e experimentais de R_a e R_t	154
Tabela 58 - ANOVA dos valores da razão sinal-ruído para R_t	155
Tabela 59 - ANOVA para os valores médios do sinal de missão acústica.....	157
Tabela 60 - ANOVA da razão sinal-ruído para os valores de emissão acústica.	158
Tabela 61 - Análise de variância dos valores médios de vibração.	159
Tabela 62 - ANOVA dos valores de S/N para a variável vibração.	160
Tabela 63 - Valores otimizados dos parâmetros de corte para o torneamento do VAT 32 [®] com ferramenta de cBN170, relacionados as médias dos parâmetros de qualidade.	163
Tabela 64 - Valores otimizados dos parâmetros de corte para a menor variabilidade do processo de torneamento do VAT 32 [®] com ferramenta cBN170.....	164
Tabela 65 - Etapa de geração relacional cinza para normalização dos dados de qualidade do processo de torneamento com pastilha de cBN.	164
Tabela 66 - Obtenção das sequências de desvio $\Delta 0i(k)$ dos parâmetros de qualidade do torneamento com pastilha de cBN.....	165
Tabela 67 - Coeficiente relacional cinza γ dos fatores de qualidade analisados no torneamento do VAT 32 [®] com pastilha de cBN.	165

Tabela 68 - Obtenção da classificação relacional cinza (GRC) e classificação geral dos experimentos com pastilha de cBN.	166
Tabela 69 - ANOVA para os valores médios de potência de usinagem para ferramenta cerâmica.....	168
Tabela 70 - ANOVA para os valores de η para potência de usinagem da ferramenta cerâmica.	169
Tabela 71 - Análise de variância para a média de $V_b.1000/L_c$	170
Tabela 72 - ANOVA de S/N para a resposta $V_b.1000/L_c$ na usinagem com pastilha de cerâmica.....	172
Tabela 73 - ANOVA dos dados normalizados de R_a para a usinagem com ferramenta de cerâmica.....	174
Tabela 74 - ANOVA dos valores de S/N para R_a no torneamento com ferramenta cerâmica.	175
Tabela 75 - ANOVA para os valores médios de R_t	176
Tabela 76 - ANOVA dos valores médios de η para R_t	178
Tabela 77 - Comparação da rugosidade teóricas e as obtidas experimentalmente no torneamento do VAT 32 com ferramenta de cerâmica.....	178
Tabela 78 - ANOVA dos dados normalizados de emissão acústica para usinagem com ferramenta de cerâmica.....	180
Tabela 79 - ANOVA de S/N para o sinal de emissão acústica no torneamento com ferramenta de cerâmica.	181
Tabela 80 - ANOVA dos valores médios de vibração para o torneamento com ferramenta cerâmica.....	182
Tabela 81 - ANOVA de S/N para vibração na usinagem com ferramenta cerâmica.	183
Tabela 82 - Valores otimizados dos fatores para as médias das variáveis resposta no torneamento do VAT 32 [®] com ferramenta cerâmica de Al_2O_3+MgO	187
Tabela 83 - Valores otimizados dos fatores para a minimização da variabilidade das variáveis resposta no torneamento do VAT 32 [®] com ferramenta cerâmica de Al_2O_3+MgO	187
Tabela 84 - Geração relacional cinza dos dados de qualidade obtidos nos ensaios de torneamento com ferramenta cerâmica.....	188
Tabela 85 - Obtenção das sequências de desvio $\Delta 0i(k)$ para os dados de qualidade na usinagem com a ferramenta de cerâmica.....	188
Tabela 86 - Cálculo do coeficiente relacional cinza γ (GRC) da usinagem com ferramenta cerâmica.....	189

Tabela 87 - Classificação relacional cinza dos dados de qualidade do torneamento com ferramenta cerâmica.	190
Tabela 88 - Parâmetros de corte para os ensaios de vida das ferramentas.	191

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação brasileira de normas técnicas
ANOM	Análise de média
ANOVA	Análise de variância
APC	Aresta postiça de corte
cBN	Nitreto de boro cúbico
CVD	Deposição química de vapor
DOE	<i>Design of experiment</i> ou projeto de experimento
GRA	<i>Grey relational analysis</i> ou análise relacional cinza
GRC	<i>Grey relational coefficient</i> ou coeficiente relacional cinza
GRG	<i>Grey relational grade</i> ou classificação relacional cinza
hBN	Nitreto de boro hexagonal
HRC	Dureza Rockwell C
HV	Dureza Vickers
NBR	Norma brasileira registrada
PCBN	Nitreto de boro cúbico policristalino
PCD	Diamante policristalino
PVD	Deposição física de vapor ou <i>Physical vapor deposition</i>
S/N	Razão sinal-ruído

LISTA DE SÍMBOLOS

$\Delta_{0i}(k)$	Sequência de desvio
Δ_{max}	Maior valor da sequência $\Delta_{0i}(k)$
Δ_{min}	Menor valor da sequência $\Delta_{0i}(k)$
\hat{X}	Valor alvo desejável
$X_0(k)$	Sequência de referência
$X_i^*(k)$	Série dos valores referentes aos fatores de qualidade
w_i	Peso de cada variável resposta
\emptyset	Ângulo de cisalhamento
a_p	profundidade de usinagem (mm)
D	Diâmetro da peça (mm)
EA_{RMS}	Média quadrática de emissão acústica
f	Avanço (mm/rev)
F_c	Força de corte (N)
F_f	Força de avanço (N)
F_p	Força passiva (N)
h_{ch}	Espessura do cavaco (mm)
L_c	Comprimento de usinagem (m)
L_f	Comprimento de avanço (mm)
m	Número de fatores de qualidade analisados
n	Número de medições
P_c	Potência de corte (W)
P_U	Potência de usinagem (W)
R_a	Rugosidade aritmética média (μm)
R_t	Rugosidade total do perfil (μm)
r_ϵ	Raio de ponta da ferramenta (mm)
U_{cc}	Sinal de tensão do sensor (V)
V_b	Desgaste de flanco (mm)
v_c	Velocidade de corte (mm/min)
Vib	Sinal de vibração
y_i	Valor da característica na i -ésima medição
Δt	Variação de tempo (s)

η	Razão sinal-ruído
ξ	Coeficiente de distinção
$GRG (X_0, X_i)$	Classificação relacional cinza
$\gamma(X_0(k), X_i(k))$	Coeficiente relacional cinza (GRC)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	24
1.1	OBJETIVO GERAL.....	24
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	25
2	REVISÃO DA LITERATURA	26
2.1	QUALIDADE SUPERFICIAL - RUGOSIDADE.....	26
2.2	FLUIDOS DE CORTE.....	28
2.3	MONITORAMENTO DO PROCESSO DE USINAGEM.....	30
2.3.1	Potência	31
2.3.2	Emissão acústica	34
2.3.3	Vibração	35
2.4	FERRAMENTAS DE CORTE	36
2.4.1	Materiais para ferramentas	36
2.4.1.1	Metal duro	38
2.4.1.2	Cerâmicas	43
2.4.1.3	Nitreto de boro cúbico (cBN).....	45
2.5	AS SUPERLIGAS.....	48
2.5.1	Usinagem de superligas.....	51
2.6	A LIGA VAT 32®	60
2.7	MÉTODO DE TAGUCHI	63
2.8	ANÁLISE RELACIONAL CINZA (GRA)	68
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	74
3.1	CORPO DE PROVA.....	74
3.2	ENSAIO DE DUREZA VICKERS.....	75
3.3	EQUIPAMENTOS PARA OS ENSAIOS DE TORNEAMENTO E O SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	75
3.4	TRATAMENTO DE DADOS	78
3.5	MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE	81
3.6	MEDIÇÃO DE DESGASTE DAS FERRAMENTAS E ANÁLISE DOS CAVACOS.....	81
3.7	MATERIAIS DAS FERRAMENTAS E PLANEJAMENTO experimental	81
3.7.1	Insertos de Metal Duro	82
3.7.2	Insertos de cBN.....	87
3.7.3	Insertos cerâmicas de Al₂O₃ + MgO	89

3.8	ENSAIOS DE VIDA DAS FERRAMENTAS	91
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	92
4.1	VALORES DA MEDIÇÃO DE DUREZA.....	92
4.2	USINAGEM COM A FERRAMENTA DE METAL DURO REVESTIDO PELO MÉTODO PVD	93
4.2.1	Potência de Usinagem	93
4.2.2	Desgaste de flanco/percurso de corte L_c.....	97
4.2.3	Rugosidades R_a e R_t.....	100
4.2.4	Emissão acústica (EA).....	106
4.2.5	Vibração	109
4.2.6	Desgastes das ferramentas e cavacos	112
4.2.7	Análise relacional cinza e obtenção para as condições do teste de vida	112
4.3	USINAGEM COM A FERRAMENTA DE METAL DURO REVESTIDA PELO PROCESSO CVD	119
4.3.1	Potência de usinagem	120
4.3.2	Desgaste de flanco/comprimento de corte L_c.....	123
4.3.3	Rugosidade R_a e R_t.....	125
4.3.4	Emissão Acústica	132
4.3.5	Vibração	136
4.3.6	Desgastes das ferramentas e geometria dos cavacos	138
4.3.7	Análise relacional cinza e obtenção para as condições do teste de vida da pastilha de metal duro CVD	140
4.4	USINAGEM COM A FERRAMENTA DE CBN	145
4.4.1	Potência de usinagem	146
4.4.2	Desgaste de flanco V_b/comprimento usinado L_c.....	148
4.4.3	Rugosidades R_a e R_t.....	151
4.4.4	Emissão acústica	156
4.4.5	Vibração	158
4.4.6	Análise dos desgastes das ferramentas e dos cavacos gerados	161
4.4.7	Análise relacional cinza e seleção das condições para o ensaio de vida.....	163
4.5	ENSAIOS COM AS FERRAMENTAS CERÂMICAS DE AL_2O_3+MgO	166
4.5.1	Potência de usinagem	166
4.5.2	Desgaste de flanco V_B/comprimento de corte L_c	169
4.5.3	Rugosidades R_a e R_t.....	172

4.5.4	Emissão acústica	178
4.5.5	Vibração	181
4.5.6	Desgastes das ferramentas de cerâmica e cavacos gerados	184
4.5.7	Análise relacional cinza e seleção dos parâmetros de corte para os ensaios de vida da ferramenta experimental de cerâmica	186
4.6	ENSAIOS DE VIDA DAS FERRAMENTAS DE CORTE.....	191
5	CONCLUSÕES	197
	REFERÊNCIAS	199

1 INTRODUÇÃO

As normas ambientais exigem dos materiais características e propriedades cada vez melhores para a manufatura de produtos, como as normas EURO V e EURO VI, relacionadas à produção de motores de combustão interna. Segundo Farina et al. (2013a), a cada geração das normas, os materiais utilizados na confecção dos componentes dos motores tem sido cada vez mais exigidos em termos de temperaturas e cargas mecânicas. Para atender esta demanda desenvolveu-se o VAT 32[®], uma superliga de alta resistência à corrosão, alta resistência à oxidação e ao desgaste que mantém a dureza no trabalho a altas temperaturas.

Diante dos desafios de se trabalhar com a novo liga, realizou-se uma parceria entre a empresa Villares Metals e os professores responsáveis pelo estudo de usinagem do Departamento de Materiais e Tecnologia da FEG/UNESP, onde foi elaborada uma nova proposta de estudo de usinagem da superliga VAT 32[®]. O objetivo era gerar conhecimento acerca dos processos de dar forma e dimensões, pela remoção de material na forma de cavaco, desta liga recém desenvolvida. Na literatura, as superligas são classificadas como materiais de difícil usinagem, nos quais a formação de aresta postiça, os desgastes intensos das ferramentas e a formação de cavacos longos são características que dificultam a usinagem destes materiais. Outros pontos como baixa condutividade térmica, manutenção de resistência a altas temperaturas e encruamento durante a usinagem são outros pontos que dificultam o corte dessas ligas.

Juntamente com a proposta de estudo da usinagem desta nova liga, ferramentas de cerâmicas são desenvolvidas pelo grupo de pesquisa desta instituição para serem testadas nas operações de usinagem de diversos tipos de materiais, tais como ferro fundido, aços inoxidáveis, aços endurecidos e superligas. Acabou-se então com uma proposta muito interessante de trabalho, o teste das ferramentas de corte cerâmicas recém desenvolvidas em um estudo de usinagem de uma liga nova, sem informações na literatura.

O estudo e otimização do processo de usinagem da superliga VAT 32[®] proporcionará informações importantes para que esta se consolide no mercado, além de que os testes realizados com as ferramentas desenvolvidas nesta universidade podem viabilizar o uso comercial das ferramentas experimentais de cerâmica.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é o estudo do torneamento cilíndrico externo e usinabilidade da nova superliga VAT 32[®] com diferentes ferramentas de corte, comerciais e experimental.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

1. Análise da influência dos parâmetros de corte (velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem) sobre as respostas potência de usinagem (P_U), desgaste da ferramenta, emissão acústica (EA), vibração e rugosidade R_a e R_t ;
2. Análise do torneamento com diferentes ferramentas de corte comercial, metal duro revestido pelo método PVD, metal duro revestido pelo método CVD e pastilha de CBN, analisando vida das ferramentas e análise de desempenho da ferramenta cerâmica experimental, produzida pelo grupo, composta por $Al_2O_3 + MgO$;
3. Influência da utilização de fluido de corte abundante nas operações envolvendo os insertos de metal duro revestido;
4. Investigação dos mecanismos de desgaste para os diferentes materiais de ferramenta de corte;
5. Otimização do processo de torneamento utilizando-se diferentes ferramentas de corte, através do método de Taguchi e análise relacional cinza (GRA);
6. Ensaio de vida e comparação de desempenho das ferramentas.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura está estruturada abordando-se, como primeiro tópico, a qualidade superficial. No segundo tópico são apresentados os fluidos de corte, vantagens e desvantagens do uso. Após, serão expostos aspectos relacionados ao processo de monitoramento de usinagem. Em seguida, abordar-se-á ferramentas de corte, apresentando os materiais utilizados na confecção de insertos.

Seguindo será apresentada a revisão sobre superligas explorando-se classificação, propriedades e mostrando o estado da arte envolvendo as pesquisas em usinagem destes materiais. Em seguida, encontra-se a revisão sobre o desenvolvimento e as propriedades da liga VAT 32[®]. Por último são abordados os tópicos de planejamento de experimentos de Taguchi e o método de otimização multiobjetivo de análise relacional cinza.

2.1 QUALIDADE SUPERFICIAL - RUGOSIDADE

Um importante aspecto de qualidade de um processo de usinagem é o acabamento superficial das peças. Tem-se como características de qualidade superficial, de acordo com Machado et al. (2011), ondulações, falhas e rugosidade. Durante o projeto de um componente, as exigências de acabamento devem ser especificadas, pois elas influenciam em características como:

- Resistência à fadiga e à corrosão;
- Custos;
- Aparência;
- Processamentos posteriores, como revestimentos e pinturas;
- Coeficiente de atrito;
- Acoplamento de componentes, como selos de mancais, moldes de injeção e componentes com função de vedação;
- Resistividade elétrica e térmica de contato.

A rugosidade é uma característica das irregularidades ou de erros micro geométricos devido ao processo de remoção de material, como marcas de avanço, arestas postigas de corte (APC) e desgastes da ferramenta (MACHADO et al., 2011).

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;
- 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.

Apesar de ser o mais utilizado dos parâmetros de rugosidade para averiguação e controle dos processos de usinagem, o parâmetro R_a isoladamente, 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_r), ou em inglês *cut-off*. Esses valores de comprimentos de amostragem dependem da faixa de R_a avaliada e são dadas pela norma ISO 4288:1996 *Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Rules and procedures for the assessment of surface texture*. A norma brasileira equivalente a esta é a ABNT NBR ISO 4288:2008 - Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil – Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade. Os valores do comprimento de amostragem podem ser encontrados na

Tabela 1, para perfil aperiódico, e na Tabela 2, para perfil periódico. Na Tabela 2 o valor de R_{Sm} representa a distância entre as marcações deixadas nos perfis periódicos, e que geralmente são equivalente ao avanço f da ferramenta.

Tabela 1 - Comprimentos de amostragem e de avaliação para medição de rugosidade de acordo com a norma ISO 4288:2008.

Faixa de R_a (μm)	Comprimento de amostragem l_r [<i>cut-off</i>] (mm)	Comprimento de avaliação 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: ISO NBR 4288 (2008).

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.

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

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

Onde f é o avanço em mm/rev e r_ϵ é o raio de ponta da ferramenta de corte, em mm.

Tabela 2 – Comprimento de amostragem de rugosidade para medições de parâmetros R de perfis periódicos e 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: ISO NBR 4288 (2008).

A influência do avanço é clara ao se observar as fórmulas, bem como a importância e influência da geometria da ferramenta, onde o raio de ponta entra como um dos fatores da Equação 1 e Equação 2.

Para baixas velocidades de corte tem-se a maior possibilidade de formação de aresta postiça de corte, o que prejudica muito a qualidade superficial das peças trabalhadas. Um aumento da velocidade v_c é acompanhado de maiores rotações da peça, o que pode aumentar a vibração da peça e, conseqüentemente, causar prejuízos à qualidade da superfície usinada. Com relação à profundidade de usinagem a_p adotada, quanto maior for o a_p maior serão as forças, possibilitando a ocorrência de flexões da peça, o que também prejudica o acabamento.

2.2 FLUIDOS DE CORTE

A utilização de fluidos de corte na usinagem de materiais começou a ser feita em 1890, por F. W. Taylor. Inicialmente o fluido utilizado foi a água, depois se utilizou água e soda ou água e sabão, com o intuito de evitar a oxidação da peça/ferramenta (DINIZ et al., 2006).

De acordo com Machado et al. (2011) o uso de fluídos de corte pode trazer benefícios quando bem escolhidos e aplicados apropriadamente, tais como aumento de produtividade e redução de custos. Há casos em que a aplicação de fluído, responsável por 16% do custo de operação, causa aumento dos custos sem melhoras significativas do processo tornando a opção de usinagem a seco a mais viável. Entre os possíveis benefícios do uso de lubrificantes estão:

- Aumento da vida da ferramenta;
- Redução das forças de usinagem e, portanto, da potência de usinagem, diminuindo-se assim o calor gerado pelo atrito ferramenta/peça;
- Melhoria do acabamento da peça;
- Facilidade de remoção dos cavacos da região de corte;
- Redução do risco de distorção da peça.

Segundo Alves (2005) os fluídos de corte exercem a função de lubrificação e refrigeração do corte, tais como as funções de:

- Prevenção de formação de aresta postiça, que consiste na soldagem cavaco-ferramenta;
- Proteção contra corrosão;
- Redução da dilatação térmica da peça;
- Evitar dano à estrutura superficial e o crescimento exagerado de tensões residuais na superfície da peça usinada;
- Redução no custo de ferramental na operação.

Machado et al. (2011) classifica os fluidos de corte em fluidos de corte gasosos, líquidos e sólidos. Entre os fluidos de corte gasosos tem-se aqueles utilizados em temperatura negativa e sob pressão como ar, CO₂ e N₂, que são pouco utilizados devido à inviabilidade econômica. A grafita e o bissulfeto de molibdênio são usados para a redução do atrito ferramenta/cavaco, sendo exemplo de fluídos sólidos e que possuem uso restrito devido à necessidade de interrupção do processo para reaplicação do produto. Os fluídos líquidos são os mais utilizados e podem ser divididos em:

- Óleos: os primeiros óleos integrais utilizados na usinagem eram de origem vegetal e animal e devido a seu alto custo e rápida deterioração se tornaram economicamente inviáveis sua utilização, porém são usados como aditivos nos fluidos minerais devido a suas

boas propriedades de lubrificação. Devido ao seu baixo coeficiente de condução térmica e baixo peso específico são ineficazes na condução de calor para fora da zona de corte. Podem também ser citados nesta categoria os óleos minerais, utilizados puros ou com aditivos, porém seu emprego tem sido substituído pelos óleos emulsionáveis devido ao alto custo, possibilidade de formação de fumos prejudiciais a saúde dos operadores, ineficiência a altas velocidades de corte e baixa capacidade de refrigeração.

- Emulsões: Compostos bifásicos de óleos minerais e água, com proporção variando entre 1:10 a 1:100, são misturados a agentes emulsificantes ou surfactantes que garantem a uniformidade da mistura. Devido à formação de uma película monomolecular, resultante do emulsificante, formam-se glóbulos de óleo menores tornando a emulsão translúcida. Empregam-se ainda aditivos anticorrosivos, como nitrito de sódio, e agentes biocidas inibidores de bactérias e fungos. A capacidade de refrigeração das emulsões é maior que dos óleos devido a presença de água. Como emulsão também é utilizada o fluido semissintético, que se caracteriza pela concentração de 5% a 50% de óleo mineral na sua composição além de aditivos e compostos químicos que se dissolvem na água formando uma emulsão menos leitosa e mais transparente.

- Soluções: Compostos monofásicos de óleos que se dissolvem completamente na água. São os chamados fluidos sintéticos que possuem sais orgânicos e inorgânicos, aditivos de lubricidade, biocidas, inibidores de corrosão. Quando misturados a água, por não possuírem óleos minerais na sua composição, formam uma fase única resultando numa solução transparente que facilita a visibilidade das operações de corte.

De acordo com Diniz et al. (2006), questões ambientais e de saúde dos operadores devem ser levados em conta na seleção dos fluidos, uma vez que o contato do fluido de corte com o ser humano pode gerar doenças como dermatites, alergias, perda da capacidade pulmonar, câncer gastrointestinal e outros tipos de câncer. Já o descarte inadequado destes fluidos no meio ambiente ocasiona impactos ecológicos ao solo, a água, e ao ar.

2.3 MONITORAMENTO DO PROCESSO DE USINAGEM

Segundo Hassui (1997), um fenômeno de interesse da indústria, e também da academia, é a otimização dos processos de usinagem, utilizando, para tanto, como ferramenta, os sistemas de monitoramento. Aplica-se o monitoramento:

- Nas máquinas, dando diagnósticos e monitoramento de desempenho;

- Nas ferramentas, dando 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.

Hassui (1997) ainda diz que o monitoramento possibilita indicar o nível crítico que em que degradações dos subsistemas ou falhas catastróficas onde há a necessidade de paralisação da operação, aumentando assim a confiabilidade das máquinas ferramenta.

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.

Serão discutidos nos seguintes os sinais de potência, emissão acústica e vibração.

2.3.1 Potência

De acordo com Trent; 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

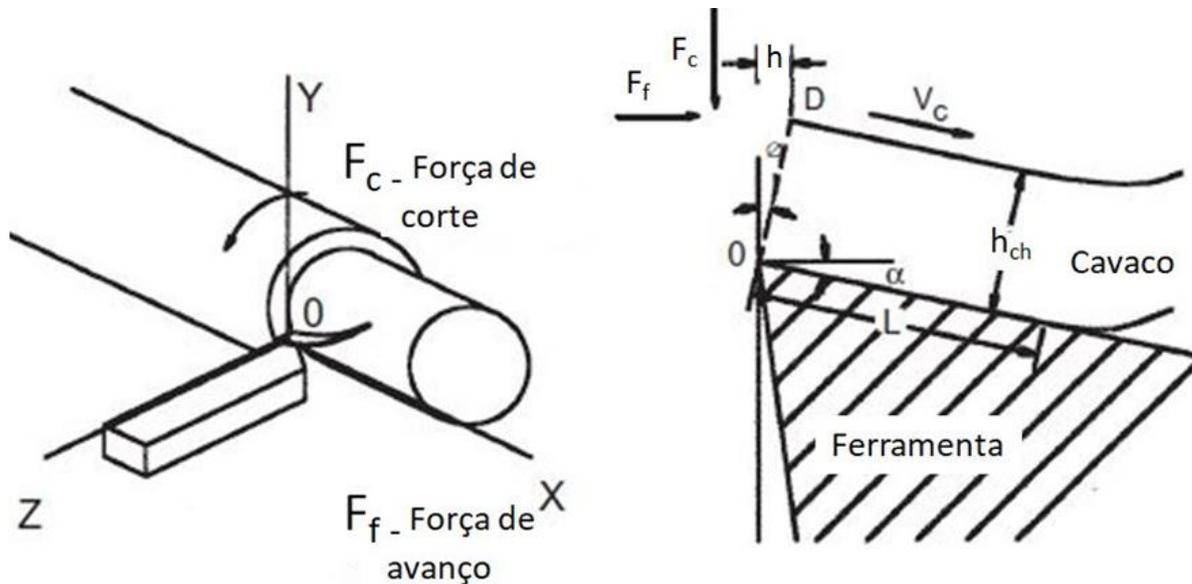
acordo com os ângulos das ferramentas e sua mensuração precisa auxilia na otimização e planejamento das geometrias de ferramenta.

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, presente na Figura 4. 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, paralela com a direção de avanço;
- Força passiva ou força de profundidade (F_p): age na direção OZ, 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.

Na Figura 1 encontra-se a direção de cada força definida, \overrightarrow{OY} para força de corte (F_c), \overrightarrow{OX} para a força de avanço (F_f) e \overrightarrow{OZ} para força passiva ou de profundidade (F_p).

Figura 1 - Forças que agem na ferramenta.



Fonte: Adaptado de Trent; Wright (2000).

Tem-se ainda que para o cálculo de potência, multiplica-se a força pela velocidade. Tem-se então a definição de Newton para potência de uma força, definida como o produto entre força e velocidade e que, de acordo com Machado et al. (2011), define a potência de corte como dado 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 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 retificadora 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 et al. (2012), Thakur et al. (2016) e Angappan et al. (2017), que se utilizaram de dinamômetros para a realização dos experimentos.

2.3.2 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 como 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.

Euzebio (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 piezolétrico, 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 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, Δt é o tempo de integração e EA é o sinal puro de emissão acústica.

2.3.3 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. (STAHL, 2012; MUNOA et al., 2016).

De acordo com Quintana; Ciurana (2011), Siddhpura; Paurobally (2012), Munoa et al. (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 auto excitante 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; 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 os processos de usinagem passam 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 et al. (2006) pontua 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 caso é de difícil alcance. Utiliza-se então materiais que trabalham com velocidades de corte menores, como ferramentas de aço rápido;
- Condição da máquina operatriz: 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. O aço rápido pode ser a opção nestes casos;
- 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 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 temos altas velocidades de corte, baixos avanços e baixas profundidades exigem 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 et al. (2006), 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 de se encontrar temos os aços rápidos, aços rápidos com cobertura, metais duro (carbonetos) com e sem revestimento, materiais cerâmicos, cermets, nitreto de boro cúbico (cBN) e diamante (PCD). Na Figura 2 podem-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 dos mesmos.

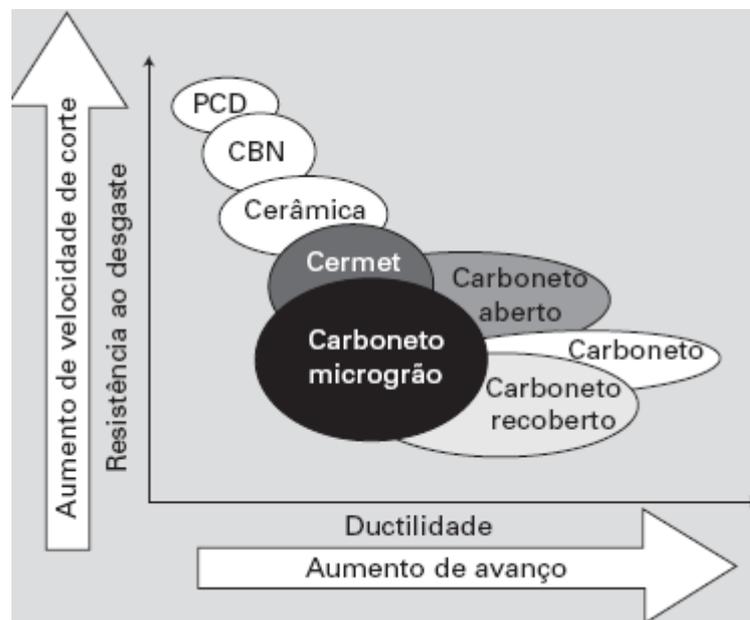
O Quadro 1 apresenta um comparativo entre as propriedades de diversos materiais utilizados como ferramentas de corte.

Serão descritos nos itens seguintes os materiais utilizados neste trabalho, o metal duro, o material cerâmico e o cBN.

2.4.1.1 Metal duro

De acordo com Diniz et al. (2006), o metal duro é um produto da metalurgia do pó feito de partículas duras finamente divididas de carbonetos de metais refratários, sinterizados com um ou mais metais do grupo do ferro (ferro, níquel e cobalto) que formam um corpo de alta resistência à compressão e alta dureza.

Figura 2- Comparação dos diferentes tipos de materiais para ferramentas de corte de acordo com os parâmetros de usinagem, resistência mecânica e ductilidade.



Fonte: Machado et al. (2011).

Originalmente desenvolvido na Alemanha, conhecido como *widea* (em alemão duro como diamante), é uma liga composta de carboneto de tungstênio em matriz de cobalto (WC + Co), que se mostrou muito eficiente na usinagem de ferros fundidos, mas na usinagem de aços apresentou o desgaste na superfície de saída, conhecido como craterização. A fim de aumentar a resistência adicionou-se outros carbonetos aos WC + Co, como o carboneto de titânio (TiC), o carboneto de tântalo (TaC) e/ou o carboneto de nióbio (NbC). Como são mais duros que o WC, apresentam maiores resistências ao desgaste abrasivo, apresentam menor chance de difusão, pois a estabilidade química dos carbonetos adicionados é maior (MACHADO et al., 2011). O tamanho destas partículas adicionadas pode variar entre 1 e 10 μm e ocupar de 60 a 95% do volume do material.

Quadro 1 - Dados quantitativos das principais propriedades das ferramentas de corte.

Propriedades do material da ferramenta	Aço rápido (M2)	Carboneto de tungstênio (M20)	Alumina branca	Alumina mista	Alumina reforçada com whisker	Cerâmica à base de nitrato de silício	PcBN	Diamante natural	PCD
Composição básica*	0,85% pC 4% pCr 5% pMo 6,5% pW 2% pV	80,5% pWC 10% pCo 9,5% pOutros	90-95% Al ₂ O ₃ 5-10% ZrO ₂	Al ₂ O ₃ 30% TiC 5-10% ZrO ₂	75% Al ₂ O ₃ 25% SiC	77% Si ₃ N ₄ 13% Al ₂ O ₃ 10% Y ₂ O ₃	98% CBN 2% AlB ₂ -AlN		PCD 2-8% Co
Densidade (g/cm ₃)	7,85	14,5	3,8-4,0	4,3	3,7	3,2	3,1	3,5	3,4
Dureza à TA (HV)	850	1.600	1.700	1.900	2.000	1.600	4.000	1.0000	8.000-10.000
Dureza à 1.000 °C (HV)	n.a.	~400	650	800	900	900	~1.800	n.a.	n.a.
Resistência à fratura (MPa m ^{1/2})	17	13	1,9	2	8	6	10	3,4	7,9
Condutividade térmica (W/m °C)	37	85	8-10	12-18	32	23	100	900	560
Módulo de Young (kN/mm ₂)	250	580	380	420	390	300	680	964	841
Coefficiente de expansão térmica (x10 ⁶ /K)	12	5,5	8,5	8	6,4	3,2	4,9	1,5-4,8	3,8
Custo aproximado por barra** (US\$)	72,54 (barra 25 x 25 x 200 mm)	0,61	0,83	1,08	4,5	2,25	72-108	225-252	54-90

*por volume a menos que indicado.

**custo referente à ISO SNGN 120416

Fonte: Machado et al. (2011).

Dois fatores são muito importantes para a definição das propriedades dos metais duros, as porcentagens de cobalto e carbeto e o tamanho de grão dos carbeto. Machado et al. (2011) nota que um aumento dos teores de Co implicam em maior tenacidade (maior resistência a impactos), menor dureza, maior resistência à ruptura transversal (THR) e menor módulo de elasticidade (menor rigidez). O efeito no tamanho de grãos dos carbonetos é notado quando ocorre o refino de grãos, o que melhora a tenacidade em, aproximadamente, 50%, aumentando a dureza média mas com prejuízo as propriedades térmicas. O Quadro 2 traz um comparativo quanto a diferença no tamanho de grãos nos metais duros.

O tamanho de grãos é classificado, de acordo com Diniz et al. (2006), em fino (0,8 a 1,3 µm), submicrométrico (0,5 a 0,8 µm), ultra-fino (0,2 a 0,5 µm) e manométrico (menor que 0,2 µm). Os autores afirmam que ferramentas de metal duro são usadas com sucesso em operações de torneamento, fresamento, mandrilamento, e em alguns casos de furação, aplainamento e serramento. Tem bom desempenho na usinagem de metais com dureza inferior a 45 HRC. Alguns fatores adicionais e importantes para a seleção de metais duros são:

- Severidade da operação de usinagem: operação de desbaste (grandes avanços f e altos valores de a_p) ou corte interrompido pode ocasionar tensões elevadas na ferramenta, exigindo o emprego de classes mais tenazes (maior teor de Co);

Quadro 2 - Comparação das propriedades de metal duro com tamanho de grão convencional (THM e THR) e com grãos ultrafinos (THM-F e THR-F).

	THM	THM-F	THR	THR-F
Densidade (g/cm ³)	14,9	14,8	14,6	14,4
Dureza (HV30)	1.600	1.800	1.450	1.500
Resistência à ruptura transversal (N/mm ²)	2.000	3.000	2.350	3.200
Resistência à compressão (N/mm ²)	5.400	6.000	5.000	5.300
Tenacidade à fratura K _{IC} (Mpa K ^{-1/2})	9,6	10,8	12,0	13,8
Condutividade térmica (W m ⁻¹ K ⁻¹)	80	46	70	42
Coefficiente de expansão térmica (K ⁻¹)	5,5 10 ⁻⁶	6,2 10 ⁻⁶	5,6 10 ⁻⁶	6,7 10 ⁻⁶

Fonte: Machado et al. (2011).

- Velocidade de corte: Classes de maiores resistências ao calor e à abrasão (menos Co e mais carbonetos) são necessários nas operações de acabamento (velocidade de corte mais elevadas);
- Tendência à vibração: Quanto maior a possibilidade de haver vibração, como em sistemas pouco rígidos ou com grandes folgas, é recomendado o uso de classe mais tenaz.

Atualmente o metal duro recoberto ocupa grande parte do mercado do metal duro sem cobertura, o qual tem sido utilizado somente para a usinagem do alumínio e para operações especiais.

Os metais duros revestidos são as ferramentas de metal duro que recebem camadas de revestimento, o que garante um desempenho superior à ferramenta sem revestimento na usinagem de materiais ferrosos. Ocupam cerca de 95% do mercado e, com a melhora das técnicas de revestimento, tem-se aumentado ainda mais essa participação. A finalidade da aplicação desta camada é a de aumentar a resistência ao desgaste da camada superior que entra em contato com o cavaco e a peça, diminuindo os esforços de corte e aumentando a vida da ferramenta.

Dois métodos de revestimento de metal duro são comuns, os métodos CVD e o PVD. No processo de revestimento CVD (*Chemical Vapor Deposition* – Deposição Química de Vapor) ocorre a formação de um revestimento através de uma reação química do elemento a ser depositado com o substrato, reações essas que podem incluir decomposição térmica, redução, hidrólise, oxidação, carbonização e nitretação. Possibilita a aplicação de

multicamadas de revestimento, que tem entre 2 e 12 μm de espessura total. Quanto maior a espessura da cobertura, maiores resistências ao desgaste ocorrem, porém menores tenacidades também são consequência, o que pode aumentar a tendência a lascamentos. Dentre os revestimento aplicados por este método podem-se citar o carboneto de titânio (TiC), o óxido de alumínio (Al_2O_3), nitreto de titânio (TiN) e o carbonitreto de titânio (TiCN).

O revestimento de TiC (3200 HV) é o de maior dureza entre os revestimentos de CVD, propriedade esta que aumenta a resistência ao desgaste de flanco da ferramenta, porém, devido a formação de uma camada “eta” ($\text{Co}_3\text{W}_3\text{C}$), pode ocorrer a formação de micro lascas levando ao desgaste por quebra da ferramenta. Este tipo de problema pode ser resolvido utilizando-se carbonitreto de titânio (TiCN) que também possui alta dureza (3000 HV), onde parte dos átomos de C é substituído por N durante a deposição (COSTA, 2016). De acordo com Diniz et al. (2006), Tanto a camada de TiC como a camada de TiCN, por conterem carbono, necessitam de uma barreira térmica para evitar o desgaste difusivo durante o processo de usinagem. Por isso geralmente se tem uma camada de óxido de alumínio sobre a camada de TiC e TiCN.

O revestimento de Al_2O_3 é outro usado nas ferramentas de metal duro revestidos pela técnica de CVD, pois são inertes quimicamente e possuem alta dureza e, portanto, maiores resistências ao desgaste. Reduzem a condutividade térmica servindo como uma barreira para a chegada do calor até a superfície da ferramenta (MACHADO et al, 2011).

O nitreto de titânio reduz o coeficiente de atrito entre a pastilha e o cavaco, sendo utilizado como a camada mais externa da ferramenta. É mais estável quimicamente que o TiC, ou seja, tem menor tendência à difusão com aços e sua espessura varia entre 5 e 7 μm (DINIZ, et al, 2006).

No processo PVD (*Physical Vapor Deposition* – Deposição Física de Vapor) forma-se uma camada no substrato por deposição física de átomos, íon ou moléculas do elemento a ser depositado. Evaporação, *Sputtering* e Íons são técnicas de PVD. Trabalha-se com temperaturas mais baixas (500°C), o que previne a formação de camada “eta”, há a possibilidade de revestir aços-rápidos, obtém-se revestimentos com granulometrias mais finas e possibilita o revestimento de cantos vivos. Não há a possibilidade de aplicação de multicamadas nem a possibilidade de aplicação de camada de Al_2O_3 por PVD. As camadas mais comuns aplicada por PVD são as camadas de nitreto de titânio-alumínio (TiAlN) ou nitreto de alumínio-titânio (AlTiN), as camadas de TiC e TiN.

As principais características da camada de TiAlN são maiores resistências a oxidação, o que permite o uso de temperaturas mais altas, quando oxidam formam Al_2O_3 , que é inerte

quimicamente e muito resistente à difusão, baixa condutividade térmica, o que protege a aresta de corte e aumenta a remoção de calor através do cavaco, alta dureza a frio e a quente (próxima a 3300HV) maior que as das camadas de TiC e TiCN (próximas a 3000HV) e maiores que das camadas de TiN. São também mais estáveis quimicamente, o que reduz desgaste de cratera e seu coeficiente de atrito é ainda mais baixo que nas obtidas pelas camadas de TiN ou de TiCN.

Entre as vantagens e desvantagens dos processos de CVD e PVD podem ser citados, de acordo com Costa (2016), que:

- No processo CVD, a adesão do revestimento ao substrato é maior que na PVD, o que permite também camadas mais espessas de cobertura;
- Revestimentos CVD oferecem resistências mais elevadas de calor quando comparado com revestimentos PVD. Óxidos são difíceis de serem obtidos através do processo de revestimento PVD;
- Maiores substratos podem ser revestidos no PVD do que CVD devido às temperaturas dos processos que no CVD são em torno de 1000 °C e PVD em torno de 700 °C.

No Quadro 3, tem-se um comparativos de ferramentas recobertas pelo método CVD e PVD.

Quadro 3 - Comparação de ferramentas revestidas pelos processos CVD e PVD.

	CVD – Deposição química de vapor	PVD – Deposição física de vapor
Temperatura de revestimento	Aproximadamente 1.000 °C	Aproximadamente 500 °C
Tenacidade	Reduzida	Não é afetada
Aresta de corte	Arredondamento requerido	Pode ser quina viva
Espessura do revestimento	Até 12 µm	Até 4 µm
Camadas	Multicamadas TiC - TiN, TiN - TiCN - TiN, TiC - Al ₂ C ₃	TiN, TiCN, TiAl
Principais aplicações	Torneamento e mandrilamento	Fresamento, roscamento e furação
Vantagens	<p>Maior resistência ao desgaste</p> <p>Maior resistência à craterização</p> <p>Grande vida da ferramenta</p>	<p>Substitui ferramentas sem revestimento: com mesma tenacidade, mesma configuração de aresta e mesma precisão</p> <p>Reduz APC</p> <p>Maior vida na ferramenta</p>

Fonte: Machado et al. (2011).

Bhatt et al. (2010) estudaram o torneamento do Inconel[®] 718 (32 HR_C) com ferramentas de metal duro sem revestimento, revestido com TiAlN por PVD e revestido com TiCN/Al₂O₃/TiN por CVD. Foram variados nos experimentos as velocidades de corte v_c (50, 75 e 100 m/min) e avanço f (0,075, 0,1 e 0,125 mm/rev), e como critério de vida das ferramentas, foi adotado comprimento de desgaste de flanco V_b médio de 300 μ m. Na velocidade de corte 50 m/min a ferramenta de metal duro sem revestimento obteve maiores tempos de vida, enquanto que nas velocidades de 75 e 100 m/min os melhores desempenhos foram obtidos, respectivamente, pela ferramenta revestida por PVD e pela ferramenta revestida por CVD. Na maior v_c a ferramenta de PVD sofreu lascamento, atribuído a vibrações, o que prejudicou o desempenho da ferramenta. Na maioria dos casos os desgastes abrasivos e de adesão foram os mecanismos de desgastes das ferramentas.

2.4.1.2 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 (Al₂O₃) finamente granulada (menor que 5 μ 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), para a promoção de maiores densificações e manter o tamanho de grão fino. A alumina é um material barato e abundante, porém seu processamento é caro e, 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. Correspondem ao terceiro grande impulso nas ferramentas de corte, após os aços rápidos como primeiro e os metais duros como segundo. É um grupo bastante competitivo utilizado no mercado na usinagem de materiais endurecidos, principalmente aços com durezas acima de 45 HR_C, 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 4 encontra-se as propriedades de alguns tipos de ferramentas cerâmicas.

Quadro 4 - Propriedades das principais ferramentas cerâmicas.

Material	Módulo de elasticidade (GPa)	Dureza (GPa)	Tenacidade K_{Ic} ($MPa \cdot m^{1/2}$)	Coefficiente de dilatação térmica ($10^{-6} K^{-1}$)	Condutividade térmica ($Wm^{-1} K^{-1}$)
Al_2O_3	400	17,2	4,3	8,0	10,5
$Al_2O_3 + TiC$	420	20,6	4,5	8,5	13,0
$Al_2O_3 + ZrO_2$	390	16,5	6,5	8,5	8,0
Si_3N_4 / 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 et al. (2006), 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 fluídos de corte em processo com ferramentas cerâmicas inviável. Sua classificação é dividida em:

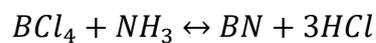
- À base de óxido de alumínio (Al_2O_3): Divididas em cerâmicas puras, cerâmicas mistas e alumina reforçada com *whiskers*. As cerâmicas puras são compostas unicamente de finos grãos de alumina sinterizados, podendo conter algum teor de óxido de magnésio, para inibir o crescimento de grãos, óxido de cromo, titânio e níquel, para aumento da resistência mecânica, ou alumina com baixos percentuais de óxido de zircônio (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 (Si_3N_4): São cristais de Si_3N_4 com uma fase intergranular de SiO_2 que são sinterizados na presença da alumina (SiAlON) e/ou óxido de ítrio (Y_2O_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.

2.4.1.3 Nitreto de boro cúbico (cBN)

De acordo com Diniz et al. (2006), o nitreto de boro cúbico é um material sintético obtido pela reação química:



Nesta reação o composto BN tem uma estrutura hexagonal com aproximadamente um número igual de átomos de boro e nitrogênio arranjados alternadamente. Tendo o lítio como catalizador, submete-se o nitreto de boro com estrutura hexagonal, o hBN ou nitreto de boro hexagonal, a altas pressões, 5000 a 9000 MPa, e temperaturas, de 1500°C a 1900°C , que modifica sua estrutura para cúbica (nitreto cúbico de boro cBN), similar ao que acontece na transformação do carbono (grafite) para carbono (diamante). O cBN é quimicamente mais estável que o diamante, podendo usinar ligas ferrosas sem problemas com difusão, tem tenacidade similar ao material cerâmico baseado em nitretos e duas vezes maior que os de alumina. Com relação à dureza só perdem para o diamante, sendo duas vezes mais duros que a alumina. Na Figura 4 apresenta-se a estrutura do hBN e do cBN, bem como o diagrama de equilíbrio entre elas.

Dependendo do tipo de operação, desbaste ou acabamento, as pastilhas de cBN, que compõem somente uma ponta soldada a um inserto de metal duro, possuem volumes diferentes de composição. Ferramentas para operações de desbaste tem maiores concentrações

de nitreto de boro cúbico, entre 85 e 100% em volume, o que aumenta a ligação entre cristais e a tenacidade, conferindo ainda um aumento de dureza. São muito eficientes em processos de usinagem onde o mecanismo de desgaste predominante é a abrasão e/ou onde ocorrem forças de corte muito altas ou corte interrompido e fresamento de aços endurecidos.

Figura 3 - Estrutura do hBN, do cBN e diagrama do equilíbrio hBN/cBN.



Estrutura do (a) hBN e (b) cBN

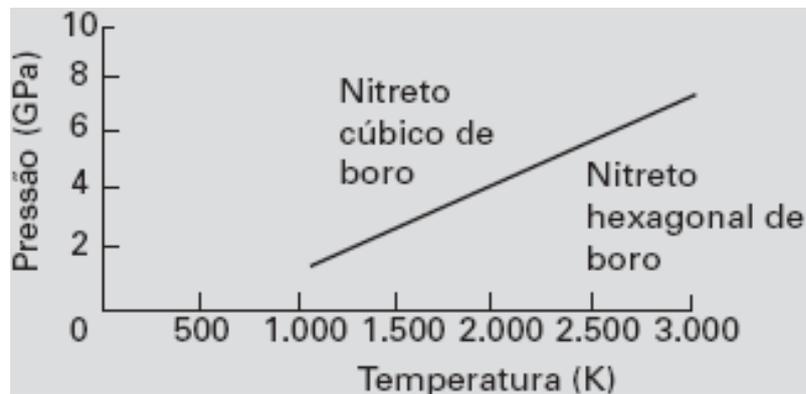


Diagrama de equilíbrio hBN/cBN

Fonte: Machado et al. (2011).

Para operações de acabamento tem-se pastilhas de cBN adicionadas a uma fase cerâmica, concentração volumétrica de cBN entre 40 e 65%, o que resulta em menores tenacidades e durezas, mas estabilidade química e térmica.

As ferramentas de cBN são empregadas na usinagem de aços duros (dureza maior que 45 HRc), e mesmo em condições de corte interrompido, tem bom desempenho. Outros materiais onde o emprego de cBN ocorre são os aços-ferramenta, aços rápidos, ligas ferrosas resistentes a altas temperaturas (superligas) a base de níquel e cobalto, metais duros e revestimentos duros com altas porcentagens de carbonetos de tungstênio ou Cr-Ni. É mais caro que as ferramentas cerâmicas, mas devido a sua maior vida, o custo ferramental é compensado através da produtividade por aresta e menores tempos de paradas para trocas de ferramentas. No Quadro 5 podem-se verificar as propriedades de diferentes materiais considerados ultraduros.

Diniz et al. (2006) complementam alguns cuidados com o uso de insertos de cBN, entre eles:

- Materiais de fácil usinagem, como aços não endurecidos, não devem ser usinados por cBN;
- O sistema de fixação da máquina deve ser o mais rígido possível;

Quadro 5 - Propriedades de materiais ultraduros.

Propriedades dos ultraduros						
Propriedade	Material do inserto					
	94WC 5Co metal duro	Alumina cerâmica	Alumina TiC cerâmica	Nitreto de silício cerâmica	Diamante policristalino	PcBN sólido
Densidade, g/cm ³	14,7	3,9	4,3	3,2	3,4	3,1
Resist. à compressão, kN/mm ²	4,5	4,0	4,5	3,5	4,7	3,8
Dureza Knoop HK, kN/mm ²	13	16	17	13	50	28
Módulo de Young, kN/mm ²	620	380	370	300	925	680
Módulo de rigidez, kN/mm ²	250	150	160	120	430	280
Raio de Poisson	0,22	0,24	0,22	0,28	0,09	0,22
Coef. de exp. térmica, 10 ⁻⁴ /K	5,0	8,5	7,8	3,2	3,8	4,9
Condutividade térmica, W m/K	100	23	17	22	120	100
Tenacidade à fratura K _{1C} , MN m ^{3/2}	11	2,3	3,3	5,0	6,9	10

Fonte: Machado et al. (2011).

- A geometria da ferramenta deve ser negativa com ângulo de saída $\gamma=5^\circ$, para garantir a resistência aos choques, ângulo de folga α entre 5 e 9° e maior ângulo lateral possível de posição (no mínimo $\chi_r=15^\circ$) para minimizar trincas na aresta;
- A aresta de corte deve ser chanfrada, chanfro de $0,1$ mm x 20 a 45° , o que direciona os esforços de corte para o centro da ferramenta e, assim, diminui a possibilidade de quebra da aresta;
- Não utilização de fluido de corte, no corte de aços endurecidos, para que a temperatura na região de corte aumente e diminua a resistência do material da peça, facilitando o corte, sem que haja prejuízos a vida da ferramenta de cBN.

2.5 AS 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 8,3.10³ kg/m³);
- Superligas de Co (densidade de 8,3 a 9,4.10³ kg/m³);
- Superligas de Ni (densidade de 7,8 a 8,9.10³ kg/m³);
- Superligas de Ni e Al contendo Ir e Rh (densidade de 8,5 a 12,4.10³ kg/m³).

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. No Quadro 6 encontram-se as composições químicas de algumas superligas comerciais.

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 7.

Dentro de classificação de superligas, Thellaputta et al. (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, La, Mn, Si, Cu, B, Ce, Mg, V, Ta e Hf.

De acordo com Silva; 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 (γ) e fases secundária, entre elas carbonetos, fase γ' , que são estruturas com rede CFC do tipo A_3B , tipicamente $Ni_3(Al,Ti)$, e outras fases como σ , η , etc.

As notáveis propriedades mecânicas, principalmente quando em condições de trabalho a altas temperaturas, surgem devido a 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 γ' (DONACHIE, 2002; SILVA E MEI, 2006).

Quadro 6 – Composição nominal de algumas superligas comerciais.

(continua)

Liga	Composição Nominal %														
	Ni	Cr	Co	Mo	W	Nb	Al	Ti	Fe	Mn	Si	C	B	Zr	Outros
Astroloy	55,0	15,0	17,0	5,3	...	...	4,0	3,5	...	...	...	0,060	0,003	...	...
Cabot 214	75,0	16,0	...	...	...	...	4,5	...	2,5	...	...	...	...	...	0,01 Y
Hastelloy G-30	42,7	29,5	2,0	5,5	2,5	0,8	...	...	15,0	1,0	1,0	0,003	...	...	2,0 Cu
Hastelloy S	67,0	15,5	...	14,5	...	...	0,3	...	1,0	0,5	0,4	...	0,009	...	0,05 La
Haynes 230	57,0	22,0	...	2,0	14,0	...	0,3	...	...	0,5	0,4	0,100	...	...	0,02 La
Inconel 587	bal	28,5	20,0	...	...	0,7	1,2	2,3	...	...	...	0,050	0,003	0,1	...
Inconel 625	61,0	21,5	...	9,0	...	3,6	0,2	0,2	2,5	0,2	0,2	0,050	...	...	...
Inconel 718	52,5	19,0	...	3,0	...	5,1	0,5	0,9	18,5	0,2	0,2	0,040	...	...	...
Nimonic 80A	76,0	19,5	...	...	...	...	1,4	2,4	...	0,3	0,3	0,060	0,003	0,1	...
Nimonic 263	51,0	20,0	20,0	5,9	...	...	0,5	2,1	...	0,4	0,3	0,060	0,001	0,0	...
Nimonic PE.16	43,0	16,5	1,0	1,1	...	...	1,2	1,2	33,0	0,1	0,1	0,050	0,020	...	...
Pyromet 860	43,0	12,6	4,0	6,0	...	...	1,3	3,0	30,0	0,1	0,1	0,050	0,010	...	...
Unimet 710	55,0	18,0	15,0	3,0	1,5	...	2,5	5,0	...	...	...	0,070	0,020	...	...

Quadro 6 – Composição nominal de algumas superligas comerciais.

(conclusão)

Liga	Composição Nominal %														
	Ni	Cr	Co	Mo	W	Nb	Al	Ti	Fe	Mn	Si	C	B	Zr	Outros
Unitemp AF2- 1DA6	60,0	12,0	10,0	2,7	6,5	...	4,0	2,8	...	...	...	0,040	0,015	0,1	1,5 T
Waspaloy	58	19,5	13,5	4,3	...	...	1,3	3	...	...	...	0,080	0,006	...	...

Fonte: Adaptado de ASM International (2005).

Quadro 7 – Principais elementos das 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).

As superligas de Co para aplicações a elevadas temperaturas foram feitas durante a Segunda Guerra Mundial, nas primeiras turbinas desenvolvidas. 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 precipitados 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 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).

2.5.1 Usinagem de superligas

Os trabalhos que serão apresentados estão relacionados a usinagem das superligas em geral encontrados na literatura, bem como estudos para ligas comerciais, como o Inconel 718. Não há estudos na literatura sobre usinagem da liga VAT 32[®]. Nos estudos são 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 em remover material 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 sobre condições cíclicas.

As superligas possuem muitas propriedades que acabam dificultando e aumentando os custos de usinagem, entre eles (EZUGWU, WANG e MACHADO (1998); DONACHIE E 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 usinagem;
- Baixa condutividade térmica que influencia na vida das ferramentas de corte empregadas, pois estas trabalham em temperaturas mais elevadas e não condução do 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 et al. (2012) e Thellaputta et al. (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 et al. (1998), os fatores que governam a usabilidade das ligas de níquel incluem 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. Entalhe, primariamente na região da profundidade de usinagem, é o modo de falha dominante devido a camada encruada de material, adesão entre cavaco e ferramenta e 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 a 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 insertos com formato romboide. 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 insertos de cBN.

De acordo com Sarikaya; 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 a 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, o desgaste excessivo da ferramenta e conseqüentemente baixos tempos de vida. Segundo, a qualidade superficial baixa da superfície usinada devido a 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; Wright (2000), em termos de corte pode-se comparar a usinagem de superligas com o aço inox austenítico, apesar da sua usabilidade 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. Na Tabela 3, são demonstrados alguns dados de usabilidade de algumas superligas.

Tabela 3 - Dados de usabilidade 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; Wright (2000).

O desafio das pesquisas em superligas é encontrar as condições de usinagem, explorando diferentes velocidades de corte, avanços e profundidades. Também são estudados o uso de fluidos de corte em diferentes estratégias como uso em abundância, o uso otimizado, o uso de mínima quantidade de fluido (MQF), também conhecido como mínima quantidade de lubrificante (MQL), e até mesmo criogenia. 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.

Bushlya et al. (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 usinagem 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 encontrados para a ferramenta revestida. Os autores concluíram que as vantagens do revestimento da ferramenta tem uma velocidade limite onde acima de 300 m/min 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 inserto 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/ver e profundidade de usinagem 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. (2013), a vida e desgaste das ferramentas são quesitos essenciais para análise de desempenho de diferentes materiais para as ferramentas de corte. Neste estudo 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 do tipo 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 usinagem de 0,22, 0,31 e 0,53 mm 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. (2013), 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 HR_C. As ferramentas testadas foram de PcBN revestida por TiN, espessura de 2µm, PCBN sem revestimento, ambas com concentração de cBN de aproximadamente 50% no volume, e ferramentas cerâmicas de Al₂O₃ 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, de usinagem 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 micro geometria 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, o inserto 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 a alta temperatura na região de corte devido a oxidação do titânio em TiO₂. 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 et al. (2014) submeteram o Inconel 718 ao processo de faceamento com ferramenta de metal duro recoberta com TiC-Al₂O-TiN com velocidade de corte de 30 e 70 m/min, avanço de 0,15 e 0,25 mm/rev e profundidade de usinagem 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 predição de desgaste de entalhe para ferramenta de corte redonda de cerâmica (SiAlON) foi proposto para torneamento de Inconel 718. A falha por entalhe é o mecanismo mais comum de falha em ferramentas cerâmicas redondas causada principalmente pela formação de uma camada endurecida por encruamento em uma passada anterior. Essa camada 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 usinagem de 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.

Thakur; Mohanty; et al. (2014) estudaram a influência da velocidade de corte (51, 84 e 124 m/min) na qualidade superficial durante torneamento da superliga Incoloy 825 com ferramenta de metal duro sem revestimento e com revestimento de TiN-TiCN-Al₂O₃-ZrCN pelo método CVD. Analisaram para tanto a rugosidade, a estrutura cristalina da peça e a microestrutura da superfície e sub superfície com avanço fixado em 0,198 mm/rev e de usinagem de 1mm. A rugosidade obtida com a ferramenta sem recobrimento foi melhor para as velocidades baixa e média explicada pelo maior raio de ponta da ferramenta revestida. Na maior velocidade, entretanto, houve falha da ferramenta sem revestimento, o que explica um aumento muito acentuado na rugosidade obtida. Houve uma tendência de deterioração da rugosidade com o aumento da velocidade de corte para ambas as ferramentas. A usinagem não resultou em mudanças de fase do material usinado, apenas em um refino de grãos. Esse refino aumentou com o aumento da velocidade de corte.

Ghadiri Zahrani; Sedghi (2014) estudaram a relação dos parâmetros de torneamento na usinagem da superliga Monel K-500, uma super liga de alta densidade (8,5 kg/cm³), com ferramentas de metal duro sem revestimento com diferentes raios de ponta. Os valores testados foram avanço (0,1 e 0,2 mm/rev), velocidade de corte (70, 110 e 150 m/min), raio da ferramenta (0,4 e 0,8 mm) e profundidade de usinagem (1, 1,5 e 2 mm). Os parâmetros de avaliação de desempenho foram a rugosidade, o desvio dimensional da peça e o desgaste das ferramentas. As condições ótimas foram obtidas para velocidade de corte de 150 m/min, avanço de 0,2 mm/rev, profundidade de 2 mm e raio de ponta de 0,4 mm.

Thakur; Gangopadhyay (2015) em seu artigo revisional não encontraram uma clara tendência em relação a influência da velocidade de corte na rugosidade, pois muitos outros fatores influenciam dentro do fenômeno. A formação de arestas postiças em baixas velocidades e o alto desgaste da ferramenta de corte em altas velocidades prejudicam a

qualidade superficial das peças usinadas. Outros fatores como fricção e temperatura também são influentes. O aumento do avanço mostrou uma clara tendência de aumento nos valores de rugosidade atribuídos ao aumento das marcas de avanço ou a geração de um aumento de carga na aresta de corte, induzindo mais deformações plásticas e resultando em piores acabamentos. A relação da rugosidade com a profundidade de usinagem também é controversa, sendo observado que a influência na rugosidade desse parâmetro depende também da combinação com os outros parâmetros de corte.

Há uma escassez de trabalhos sobre usinagem de superligas a base de ferro-níquel, como apontado por Davoodi e Eskandari (2015), mesmo com a importância dessas para a indústria. Eles investigaram o torneamento da liga N-155 (Multimet), que é uma superliga de base ferro-níquel, com dureza de 32 HRc. Utilizaram ferramenta de metal duro revestido com TiAlN por processo PVD (deposição física de vapor) e raio de ponta de 0,4mm, com insertos tipo C. Os parâmetros de corte utilizados foram velocidade de corte entre 50 e 90 m/min e avanços entre 0,1 a 0,2 mm/rev. Através do método de superfície de resposta (MSR), encontraram que o fator de maior influência na vida da ferramenta foi a velocidade de corte. Os valores ótimos dos parâmetros de corte para a resposta vida de ferramenta, obtidos pelo MSR, foram velocidade de corte de 85,55 m/min e avanço de 0,2 mm/rev.

Em seu artigo, Sharman et al. (2015) analisaram a força de corte, alterações micro estruturais e distribuição de tensão residual no torneamento de acabamento de Inconel 718 com ferramenta de metal duro revestido de TiCN-Al₂O₃-TiN, por método CVD, com diferentes raios de ponta, de 2 até 6 mm. Os parâmetros de usinagem utilizados foram velocidade de corte 40 m/min, profundidade de usinagem de 0,25mm e avanços de 0,25; 0,3; 0,36; 0,42 e 0,5mm/rev com uso de emulsão água/óleo semissintético para lubri refrigeração. O desgaste da ferramenta mostrou ser influente no nível de alteração micro estrutural e na magnitude da tensão residual, bem como para arestas mais arredondadas (desgastadas) houve a tendência de maiores esforços de corte e potencialmente maiores temperaturas. O aumento do raio de ponta causou maiores níveis de deformação plástica não sendo recomendado para o processo de torneamento de acabamento da superliga Inconel 718.

A usinagem da superliga Inconel 825 sem fluido de corte foi investigada por Thakur e Gangopadhyay (2016). Comparou-se o torneamento de desbaste e acabamento com inserto de metal duro sem revestimento e estratégias de lubrificação de fluido em abundância e MQL, com a usinagem sem fluido de corte com inserto de metal duro revestida por TiN-TiAlN pelo processo PVD. Para o modo de desbaste os parâmetros utilizados foram velocidade de corte de 51 m/min, avanço de 0,2 mm/rev e profundidade de 1,5mm, enquanto que no modo de

acabamento os parâmetros foram 124 m/min, 0,08 mm/rev e 0,5mm. A temperatura de usinagem foi maior no torneamento a seco, enquanto no modo de desbaste a estratégia de fluido abundante teve as menores temperaturas e no modo de acabamento a estratégia MQL foi a que teve menores temperaturas. O pastilha revestido de TiN-TiAlN por PVD em usinagem a seco apresentou as menores forças de corte, resultando em economia na energia demandada para o corte e um processo ecologicamente mais amigável. A usinagem com a pastilha PVD resultou também em melhores qualidades superficiais e menores desgastes de ferramenta quando comparada com a usinagem com a ferramenta de metal duro sem revestimento e uso de fluido, abundante ou MQL.

Ren; Liu (2016) estudaram os efeitos dos parâmetros de corte no comportamento de encruamento durante o torneamento da superliga Inconel 718. Os parâmetros de corte testados foram velocidade de corte (50, 70 e 90 m/min), avanço (0,2, 0,3 e 0,4 mm/rev) e profundidade de usinagem (0,2mm) em usinagem com ferramenta de metal duro revestido por camada de AlTiN por processo PVD e sem uso de fluido de corte. A espessura da camada afetada com mudança de dureza foi por volta de 40~50 μm e quando maiores velocidades de corte eram usadas, menores eram as alterações de dureza obtidas próximos a superfície devido a geração de calor do processo, existindo um gradiente entre a profundidade de 15 μm e 50 μm . A dureza teve um aumento máximo de 1,2x o valor base de dureza da peça.

Na pesquisa de Thakur et al. (2016) foram testadas ferramentas de metal duro sem revestimento, com revestimento de multicamadas (TiAlN/TiN) PVD e pastilhas revestidas com duas camadas (TiCN/Al₂O₃) por processo CVD (deposição química de vapor) na usinagem de uma superliga de níquel Inconel 825. Foram testadas as velocidades de corte de 51, 84 e 124 m/min, avanços de 0,08 e 0,2 mm/rev e profundidade de usinagem de 1 mm sem uso de fluido de corte. O objetivo da pesquisa era entender os mecanismos de desgastes nas diferentes ferramentas testadas e analisar a influência das condições de usinagem nesses processos. Houve também a quantificação das forças de corte e rugosidade das mesmas. Os mecanismos de desgaste predominante em baixas velocidades de corte é a adesão, enquanto que para maiores velocidades a abrasão é dominante. A ferramenta recoberta com TiAlN/TiN por PVD apresentou as menores forças de corte, as maiores vidas de ferramenta comparada as outras e os melhores acabamentos superficiais. Esses resultados são justificados pelas melhores propriedades tribológicas da pastilha PVD, tendo este o menor coeficiente de atrito entre as ferramentas testadas.

Sarikaya et al. (2016) estudaram o desgaste das ferramentas e a rugosidades no torneamento da superliga a base de cobalto Haynes 25 com ferramentas de metal duro sem

revestimento. Utilizaram usinagem a seco, lubrificação convencional e MQL para a investigação do processo. A análise relacional cinza foi utilizada para otimizar e encontrar a relação das variáveis de processo com relação as respostas estudadas. Encontrou-se que o melhor método de lubrificação empregado foi o MQL, com velocidade de corte de 45 m/min, avanço de 0,12 mm/rev e profundidade de usinagem de 1 mm.

Angappan et al. (2017) estudaram a influência dos parâmetros de usinagem na rugosidade R_a , R_q e R_z , na potência de corte e na força de corte para o torneamento da superliga de base ferro-níquel Incoloy 800H. As condições de usinagem foram otimizadas para as respostas analisadas utilizando-se o método de Taguchi juntamente com o correlacional cinza (GRG – *Grey Relational Grade*), que permite realizar uma análise multiresposta. Utilizou-se ferramenta de metal duro sem revestimento com pastilha C. Os parâmetros de corte testados foram velocidade de corte de 35, 45 e 55 m/min, avanços de 0,02, 0,04 e 0,06 mm/rev e profundidades de corte de 0,5, 0,75 e 1 mm sem uso de fluido de corte. Os parâmetros de maior influência na rugosidade foram avanço, seguido da velocidade de corte e profundidade de usinagem. Com relação à força e potência de corte, o parâmetro avanço não mostrou significância estatística nas respostas, sendo a velocidade de corte o parâmetro de maior influência seguido da profundidade de usinagem. Através do método de Taguchi associado com o GRG encontrou-se as seguintes condição ótimas de usinagem, considerando as respostas analisadas, de velocidade de corte de 35 m/min, avanço de 0,06 mm/rev e profundidade de usinagem de 1 mm. O método de Taguchi se mostrou um método eficiente de investigação das condições otimizadas de usinagem.

D'Addona et al. (2017) estudaram o torneamento com altas velocidades do Inconel 718 com pastilha de metal duro revestida pelo método CVD. Foram obtidas as rugosidades das peças e os desgastes das ferramentas. Os parâmetros de corte testados foram velocidade de corte de 60, 90, 190 e 255 m/min, avanço de 0,1mm/rev e profundidade de usinagem de 0,5mm. Cada aresta nova usinara três trechos de 30 mm e em cada trecho era medido os valores de R_a . Esses valores de R_a tiveram aumento considerável de valor denotando o rápido desgaste da ferramenta de corte. O desgaste de flanco medido também aumentou com o aumento da velocidade de corte usada.

Criado et al. (2018) estudaram o torneamento de acabamento do Inconel 718 com ferramentas de PCBN revestidas por TiN e pastilhas de metal duro revestidas por TiAlN-TiN pelo método PVD. Para a ferramenta de PCBN foram usadas as velocidades de 250 e 300 m/min de velocidade de corte, avanço de 0,1 e 0,15 mm/rev e profundidade de usinagem de 0,15mm. As velocidades de corte de 50 e 70 m/min, avanço de 0,1 e 0,15 mm/rev e

profundidade de usinagem de 0,25mm foram usados no torneamento com a pastilha de metal duro. Para ambas as ferramentas foi utilizado fluido de corte a uma pressão de 7,5 bar. Apesar do tempo de vida da ferramenta de metal duro ser maior que a obtida para PCBN, as velocidades de corte 4 a 6 vezes maiores fazem com que a superfície usinada com PCBN seja maior, viabilizando sua utilização. A melhor combinação para otimizar a vida da ferramenta de PCBN foi velocidade de corte de 250 m/min e avanço de 0,15 mm/rev, pois a vida se mostrou sensível com relação ao aumento da velocidade de corte e o avanço não mostrou efeitos.

O torneamento com fluido de corte a alta pressão foi pesquisado por Sørby; Vagnorius (2018). 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 usinagem 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.

2.6 A 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 motores a diesel de alto desempenho (FARINA et al., 2013a).

De acordo com Farina et al. (2013b), a liga UNS N07751 apresenta 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 γ' , proporcionando excelente resistência mecânica a temperaturas mais altas associadas a altas resistências à corrosão, oxidação, fadiga e deformação por fluência. Porém, devido a matriz menos dura, a liga apresenta baixa resistência ao desgaste. Na Tabela 4, encontram-se as composições da liga UNS N07751 e do VAT 32®.

Tabela 4 - Composição química nominal das ligas VAT 32[®] e UNS N007751, em porcentagem mássica.

Liga	C	Si	Mn	Ni	Nb	Al	Ti	Cr	Fe
UNS N007751	0,02	0,2	0,3	Balanço	1	1,2	2,3	15,5	7,0
VAT 32 [®]	0,3	0,2	0,3	32,0	3,9	1,8	2,0	15,5	Balanço

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

Pode-se observar que, diferente da liga UNS N007751, o 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 γ' ($\text{Ni}_3(\text{Al},\text{Ti})$) e γ'' (Ni_3Nb) durante o tratamento térmico de envelhecimento. A formação dessas estruturas traz uma dificuldade maior na usinagem desta liga pois são elementos tão duros que podem ser utilizados como ferramentas de corte, como mostrado por Uhlmann et al. (2018). Na Figura 4, encontra-se a microestrutura do VAT 32[®] revelada por ataque químico Glyceregia e microscopia Eletrônica de varredura (MEV).

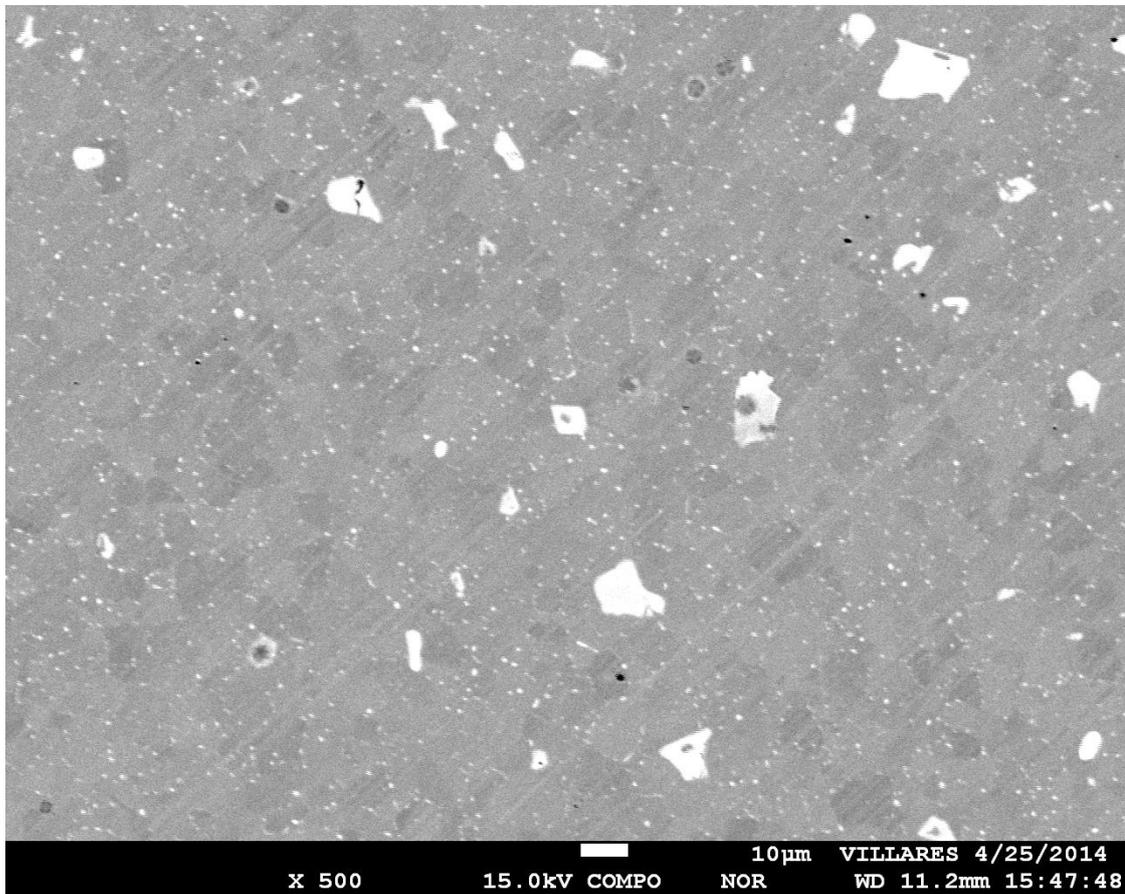
Os pontos em branco são os precipitados de NbC, no qual, através de uma análise da imagem pelo software ImageJ, apresenta proporção volumétrica de 2,5% no VAT 32[®], enquanto que, de acordo com Farina et al. (2013a), a proporção do carboneto de nióbio na liga UNS N007751 esta por volta de 0,25%.

Os autores realizaram então a comparação de desempenho entre o VAT 32[®] e a liga UNS N007751 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 na Tabela 5.

A superliga VAT 32[®] possui, nas propriedades ensaiadas, desempenho equivalente ou superior em relação à liga UNS N007751, sendo que, comparando-se a resistência à abrasão, o desempenho do VAT 32[®] é superior e associado com uma alta dureza a quente entre 700°C e 800°C.

O VAT 32[®] pode ser aplicado em substituição a UNS N007751 apresentando vantagens econômicas devido à redução da quantidade de níquel e redução também de quatro etapas de processo produtivo quando comparado à liga UNS N007751.

Figura 4 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV) do VAT 32[®] atacado quimicamente.



Fonte: Cortesia Villares Metals (2017).

Tabela 5 - Propriedades da liga VAT 32 e UNS N07751.

Teste	Liga	
	VAT 32 [®]	UNS N07751
Tempo de ruptura por fadiga sob tensão [800°C e carga de 100 MPa]	1235h	1240h
Limite de escoamento [800°C]	473 MPa	372 MPa
Resistência à fadiga [750°C e 10 ⁸ ciclos]	325 MPa	306 MPa
Energia de fratura por ensaio de impacto Charpy “V”	52 J	-
Taxa de desgaste abrasivo ⁻¹	12,46.10 ⁻⁶	9,21.10 ⁻⁶
Dureza a quente [760°C]	369 HV	270 HV
Teste de oxidação [ganho mássico 400h a 800°C]	0,250 mg/cm ²	0,542 mg/cm ²
Trabalhabilidade a quente [redução em área]	85,70%	85,30%

Fonte: Adaptado de Farina et al. (2013b).

2.7 MÉTODO DE TAGUCHI

O método de Taguchi é um método de planejamento de experimento (*Design of experiment* – DOE) projetado dentro dos conceitos de projeto robusto ou engenharia robusta. O planejamento de experimentos ou planejamento experimental é uma poderosa ferramenta utilizada para investigar e otimizar os valores dos parâmetros de processo para a melhora da qualidade de um produto ou processo. Os planejamentos experimentais de fatorial completo e de um fator por vez são comumente utilizados, mas requerem um número grande de experimentos quando o número de parâmetros de processo aumenta. Genichi Taguchi desenvolveu as bases da engenharia robusta, introduzidas nas décadas de 1950 e 1960 e a aplicação deste método foi um importante fator no rápido crescimento das indústrias japonesas pós-período da segunda guerra mundial. O método de Taguchi difere de outros métodos de controle de qualidade porque é identificado com a engenharia robusta. Ele usa a minimização da função perda de qualidade, maximização da razão sinal-ruído (*signal-to-noise ratio* - S/N) e o método ainda se utiliza de arranjos ortogonais. Fundamentalmente, o método de Taguchi tem sua estratégia baseada nos arranjos ortogonais e fatoriais fracionados onde nem todas as combinações de parâmetros são testadas. É efetiva em obter a estimativa dos efeitos principais dos fatores do processo, bem como encontrar a configuração otimizada para que o processo sofra a menor variação possível, ou seja, a configuração robusta do processo (SILVA, 2013).

De acordo com Taguchi et al. (2004) o termo robustez se refere a produtos e processos que mantem a qualidade mesmo sob a influência de fatores não controláveis, denominados ruídos. O Japão pós-guerra enfrentava escassez de matérias primas de qualidade, equipamentos de boa qualidade e engenheiros capacitados, um grande desafio para a manufatura de produtos com alta qualidade e da contínua melhora de qualidade. O termo engenharia robusta remete a um planejamento de um produto que não apresenta problemas sob quaisquer condições, onde a chave não é planejar o produto em si mas como avaliar funções sobre condições conhecidas e desconhecidas. Phadke (1989), um dos discípulos de Taguchi, estabelece, em um exemplo com abordagem de engenharia robusta, que os problemas de não uniformidades de um produto são resolvidos pela minimização do efeito da causa da variação, no caso uma má distribuição de temperatura dentro de um forno, sem controlar a causa em si, no exemplo representado pelo design do forno. O princípio fundamental da engenharia robusta é melhorar a qualidade de um produto pela minimização dos efeitos das causas de variação sem eliminar as causas, otimizando produtos ou processos

fazendo o desempenho ser minimamente sensível às várias causas de variação, chamados de ruídos.

O método de Taguchi é aplicado com sucesso na otimização de diversos processos como mostrado por Datta et al. (2009), Arce et al. (2015), Dao; Huang (2017) e Sun et al. (2018). Muitos pesquisadores utilizam o método de Taguchi no estudo de diversos fenômenos como usinagem não convencional como eletroerosão, corte laser e corte plasma (RAJYALAKSHMI E VENKATA RAMAIAH; 2013; TANG E DU, 2014; MUTHURAMALINGAM E MOHAN , 2014; LIN ET AL., 2015; MUHAMEDAGIC ET AL., 2017), processo de soldagem (TARNG ET AL., 2002; JOO ET AL., 2014; SRIRANGAN E PAULRAJ, 2016), processo de forjamento e laminação (EQUBAL ET AL., 2014; PATEL ET AL., 2014), formação de filmes finos (CHIANG E HSIEH, 2009), fenômenos tribológicos (RAMESH E SURESHA, 2014) e reciclagem de polímeros (BHATTACHARYA E BEPARI, 2014).

O uso do método de Taguchi para estudo e otimização também é destacável na área de usinagem de materiais como nos estudos de torneamento de Thakur et al. (2009), Mandal et al. (2011), Debnath et al. (2015), Sarikaya et al. (2016) e Manivel; Gandhinathan (2016), nos estudos de mandrilamento de Venkata Rao et al. (2013), de fresamento de Kivak (2014), Jozić et al. (2015) e Ratnam et al. (2016) e retificação feitos por Sahoo e Sahoo (2013) e Hadad (2015).

O primeiro objetivo da aplicação do método de Taguchi é obter o maior número possível de informações sobre o processo com o menor número de experimentos, tendo ainda a vantagem dos arranjos ortogonais possibilitarem o uso de um número misto de níveis. Outras vantagens da aplicação do método de Taguchi são a redução do custo da variação das respostas, mostra o caminho para a obtenção da condição ótima de processo durante experimentos laboratoriais, é uma importante ferramenta para aumentar a produtividade da área de desenvolvimento, pesquisa e inovação de produtos, e pode ser aplicada a qualquer processo (SILVA, 2013).

As etapas do método de Taguchi são:

- i) a seleção das respostas, parâmetros de saída do processo, que serão otimizadas;
- ii) Identificação dos parâmetros de entrada que afetam as variáveis de saída e escolha dos níveis desses fatores;
- iii) seleção apropriada do arranjo ortogonal, encontrados na literatura;
- iv) atribuir fatores e interações às colunas da matriz do arranjo ortogonal;

v) realização dos experimentos, aleatorizando a ordem para a minimização dos erros sistemáticos;

vi) análise dos resultados utilizando a análise da razão sinal-ruído (S/N) e a análise de variância (ANOVA);

vii) determinação dos parâmetros ótimos do processo;

viii) realização de experimentos de verificação, se necessários.

A otimização pela razão sinal-ruído ocorre porque ele é uma representação do inverso da variância, o que significa que a maximização dos valores das razões sinal-ruído (S/N) permitem a redução da variabilidade do processo contra as mudanças indesejáveis do ambiente do processo, também conhecido como fatores incontrolláveis ou ruídos do processo. Para a minimização da variabilidade, os níveis dos fatores que produzem os maiores valores de S/N devem ser escolhidos. Phadke (1989) e Thakur et al. (2009) separam a razão sinal-ruído (*S/N ratio*) para variáveis contínuas em três principais características:

- 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.

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

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

- 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.

$$\eta = 10 \log \frac{\mu^2}{\sigma^2} \quad (6)$$

Onde μ e σ são dados pelas Equações 7 e 8.

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

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

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

- 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.

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

A estratégia de otimização do método de Taguchi podem ser resumidos em (PHADKE, 1989):

- a) Medição dos efeitos dos fatores de controle considerando os valores de η e das médias;
- b) Para os fatores com efeitos significativos nos valores de η , selecionar os níveis que maximizam η ;
- c) Selecionar qualquer fator que não tenha efeitos sobre η 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 η 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 η e na média, pode-se selecionar o nível mais conveniente do ponto de vista de outras considerações como outras características de qualidade ou custos.

Para a verificação dos efeitos relativos dos diferentes fatores pode ser realizada a decomposição da variância, comumente chamada de análise de variância (ANOVA). ANOVA é também uma estimativa do erro de variância para os efeitos dos fatores variância dos erros de predição. Mais informações acerca da ferramenta estatística análise de variância podem ser encontrado na literatura sobre estatística como Montgomery; Runger (2012) e Triola (2017).

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 et al. (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. No caso apresentado por Sarikaya et al. (2016), estudou-se o torneamento da superliga Haynes 25, de difícil usinagem. Utilizando o método de Taguchi, duas soluções de otimização são propostas para o processo, uma otimizando-se a rugosidade superficial da peça e outra minimizando-se o desgaste da ferramenta. Para superar essa limitação, o método de Taguchi acoplado ao método de análise relacional cinza (GRA – *Grey relational analysis*) é proposto para otimização dos parâmetros em problemas com múltiplas respostas (SAHOO; SAHOO (2013) TANG, LIN; DU (2014) MIA; KHAN; ET AL. (2017)). A análise relacional cinza será abordada no subitem 2.8 . Sarikaya et al. (2016) utilizaram a análise relacional cinza (GRA) como método multiobjetivo e encontraram a condição ótima de velocidade de corte de 30m/min, fluxo de lubrificante de 180 mL/h e uso de lubrificante de base vegetal. Utilizando o método GRA obteve-se uma melhora de 39,4%. Entre os parâmetros analisados, maiores influências são encontradas para o tipo de fluido de corte, o fluxo deste fluido e em seguida a velocidade de corte.

2.8 ANÁLISE RELACIONAL CINZA (GRA)

Datta et al. (2009) indicaram que as abordagens mais comuns, em se tratando da busca de modelos de simulação, predição e otimização multiobjetivo, ou de múltiplas respostas, são a metodologia de superfície de resposta, redes neurais artificiais, algoritmos genéticos, regressão por lógica Fuzzy e funções de desejabilidade (*desirability*). Os autores utilizaram o método de análise relacional cinza (GRA – *Grey Relational Analysis*) juntamente com o método de Taguchi para encontrar os parâmetros otimizados de um processo de soldagem.

De acordo com Tang, Lin; Du (2014), a análise relacional cinza, proposta por Dr. Deng em 1982 (DENG, 1982), é largamente aplicada para avaliar e julgar o desempenho de projetos complexos e pode ser utilizado para resolver as inter-relações complicadas de processos com múltiplas respostas. O método de Taguchi se concentra na otimização do problema envolvendo uma resposta. A classificação relacional cinza (GRG – *Grey Relational Grade*) otimiza as múltiplas respostas convertendo-as em uma otimização de um simples coeficiente, a classificação relacional cinza ou GRG. Os autores investigaram, com o uso de um arranjo ortogonal de Taguchi L₉, o processo de usinagem não convencional de eletroerosão ambientalmente limpo. Com o auxílio da análise relacional cinza, otimizaram os parâmetros de processo para as múltiplas respostas investigadas.

A análise relacional cinza faz parte do estudo de sistemas cinzas. De acordo com Lin; Liu (2004) a teoria de sistemas cinzas foi concebida pelo Professor Deng Ju-long, sendo uma nova teoria e método aplicável ao estudo de problemas incertos, com poucos dados e/ou informações escassas. A teoria dos sistemas cinzas funciona em sistemas incertos com informações parcialmente conhecidas e parcialmente desconhecidas, ao extrair informações valiosas, gerando e desenvolvendo as informações parcialmente conhecidas, o que pode descrever e monitorar corretamente e efetivamente o comportamento operacional sistêmico. O nome de sistemas cinzas vem de um conceito da teoria de controle, onde as tonalidades das cores estabelecem uma relação com o grau de conhecimento de uma informação. Adota-se a cor preta para representar desconhecimento de uma informação, a cor branca representa conhecimento pleno de uma informação, e o cinza é usado para aquelas informações que são parcialmente conhecidas. Os autores expõem que três teorias para estudos de sistemas incertos são usados, a teoria de sistemas cinzas, a estatística e a matemática Fuzzy. Com a modelagem de uma pequena quantidade de dados como seu recurso, a teoria dos sistemas cinzas estuda principalmente problemas de incerteza devido a pequenas amostras e / ou informação escassa

e incompleta, que são insolúveis utilizando tanto probabilidade e estatística como matemática fuzzy. A teoria dos sistemas cinzas explora a lei da motivação do sujeito por funções de operadores sequenciais de acordo com a cobertura da informação. Estudos utilizando a teoria de sistemas cinzas tem sido realizados com sucesso na área de processos de manufatura, inclusive na área de usinagem.

De acordo com Liu et al. (2011), algumas das áreas de aplicação da teoria dos sistemas cinzas são, dentro das engenharias, aviação, voo espacial, aviação civil, tecnologia da informação, metalurgia, usinagem, petróleo, indústria química, geração de energia, eletrônica, recursos energéticos, transporte, medicina, saúde, agricultura, ciências florestais, geografia, hidrologia, sismologia, meteorologia, proteção ambiental, arquitetura, ciência comportamental, e outras.

De acordo com Lin et al. (2002), no método de análise relacional cinza (*Grey Relational Analysis - GRA*) os dados de respostas obtidos experimentalmente são primeiramente normalizados entre valores de zero a um. Esta etapa também é chamada de geração relacional cinza (*Grey Relational Generation*). Em seguida, calcula-se, a partir dos valores experimentais normalizados, o coeficiente relacional cinza (*Grey Relational Coefficient - GRC*) que expressa a relação entre o valor experimental atual com o valor experimental desejado. Então, o valor da classificação relacional cinza (*Grey Relational Grade - GRG*) é calculado pela média do coeficiente relacional cinza correspondente a cada resposta do processo. A avaliação geral das múltiplas respostas do processo é estabelecida a partir da classificação relacional cinza (GRG). Em outras palavras, a classificação relacional cinza pode ser tratada como a avaliação global dos dados experimentais para processos com múltiplas respostas. O nível ótimo dos parâmetros de processo são aqueles com a maior classificação relacional cinza. Cada etapa será resumida a seguir (DATTA ET AL. (2009); KOU ET AL. (2012) ; RAJYALAKSHMI; VENKATA RAMAIAH (2013); BOUACHA ET AL. (2014); TANG, L.; DU (2014); WOJCIECHOWSKI ET AL. (2018)):

- Etapa 1 – Normalização das características de qualidade ou geração relacional cinza (*Grey Relational Generation*)

Quando o alcance da série, valores dos fatores de qualidade, é muito grande ou quando o valor ótimo é enorme poderá ocorrer que alguns efeitos dos vários fatores analisados possa ser ignorado. Para se evitar este tipo de problema e conseguir comparar as séries correspondentes aos fatores de qualidade, normaliza-se os dados experimentais obtidos para valores entre 0 e 1. Há três tipos de normalização dos dados, de acordo com as características de qualidade analisadas, que podem ser realizadas pelas Equações 10, 11 ou 12.

a) Menor é melhor

$$X_i^*(k) = \frac{\max X_i(k) - X_i(k)}{\max X_i(k) - \min X_i(k)} \quad (10)$$

b) Maior é melhor

$$X_i^*(k) = \frac{X_i(k) - \min X_i(k)}{\max X_i(k) - \min X_i(k)} \quad (11)$$

c) Nominal é melhor

$$X_i^*(k) = 1 - \frac{|X_i(k) - \hat{X}|}{\max\{\max X_i(k) - \hat{X}, \hat{X} - \min X_i(k)\}} \quad (12)$$

Onde $X_i^*(k)$ é a série dos valores referentes aos fatores de qualidade normalizados, $X_i(k)$ é o valor k-gésimo da série correspondentes aos fatores de qualidade e \hat{X} é o valor alvo desejável para o fator de qualidade analisado.

- Etapa 2 – Determinação da sequência de desvio

A sequência de desvio são os valores absolutos da diferença entre a sequência de referência e a sequência normalizada, dada pela Equação 13.

$$\Delta_{0i}(k) = |X_0(k) - X_i^*(k)| \quad (13)$$

Onde $\Delta_{0i}(k)$ é a sequência de desvio, $X_0(k)$ é a sequência de referência igual a $\{1,1,1,1,\dots,1\}$ e $X_i^*(k)$ é a série dos valores das características de qualidade normalizados.

- Etapa 3 – Cálculo do coeficiente relacional cinza (GRC – *Grey Relational Coefficient*)

O coeficiente relacional cinza (GRC) para as sequencias expressa a relação entre o valor ideal (melhor) e valor das características de qualidade normalizados. Se as duas sequências são iguais, ou seja, o valor do fator de qualidade é o melhor, o valor de GRC é igual a um. GRC é calculado pela Equação 14.

$$\gamma(X_0(k), X_i(k)) = \frac{\Delta_{min} + \xi \Delta_{max}}{\Delta_{0i}(k) + \xi \Delta_{max}} \quad (14)$$

Onde Δ_{min} é o menor valor da sequência de desvio $\Delta_{0i}(k)$, Δ_{max} é o maior valor da sequencia de desvio $\Delta_{0i}(k)$ e ξ é o coeficiente de distinção, geralmente adotado com valor 0,5.

Kuo et al. (2008) utilizaram diferentes valores de coeficiente de distinção para o cálculo do coeficiente relacional cinza (Etapa 4 do método GRA). Os valores utilizados para o coeficiente de distinção variaram de 0,1 até 1, o que resultou em valores de coeficiente relacional cinza diferente para cada valor adotado. Com o aumento do coeficiente de distinção, maiores foram os valores do coeficiente relacional cinza. Apesar destas mudanças, não houve mudanças nos resultados da classificação relacional cinza, isto é, não importa qual é o valor do coeficiente de distinção, a ordem do coeficiente relacional cinza não se alterará. Os valores do coeficiente de distinção podem ser ajustados de acordo com o julgamento do tomador de decisões e diferentes valores adotados resultam em valores diferentes do coeficiente relacional cinza, porém sem alterações na classificação relacional cinza.

De acordo com Bouacha et al. (2014), o coeficiente de distinção ξ ou coeficiente de identificação, é fixado entre zero e um [0;1] e pode ser ajustado para ajudar a fazer uma melhor distinção entre as sequências de referências normalizadas e as sequências de comparabilidade normalizada. O valor de coeficiente de distinção de 0,5, adotado comumente nos trabalhos encontrados na literatura, oferece moderado efeito de distinção e estabilidade. Além disso, baseado em provas matemáticas, diferentes valores de coeficiente de distinção apenas mudarão a magnitude, valor relativo do coeficiente relacional, mas não mudará a classificação estabelecida pelo valor de classificação relacional cinza. Assim, o impacto do valor de coeficiente de distinção nos resultados do método Grey-Taguchi são muito pequenos.

- Etapa 4 – Determinação da classificação relacional cinza (GRG – *Grey Relational Grade*)

A avaliação geral das múltiplas características de qualidade, das múltiplas respostas, tem como base os valores da classificação relacional cinza (GRG). De acordo com Mia; Khan; et al. (2017), a classificação relacional é obtida pela multiplicação de um peso individual atribuído a cada característica de qualidade, de acordo com a análise do pesquisador. GRG indica a proximidade entre uma sequência ideal e a sequência dos valores dos fatores de qualidade e quanto maior for o valor de GRG melhor é a escolha. É determinado pela Equação 19.

$$GRG(X_0, X_i) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m w_i \gamma(X_0(k), X_i(k)) \quad (15)$$

Onde $GRG(X_0, X_i)$ é o GRG para a i -ésimo experimento, m é o número de fatores de qualidade analisados e w_i é o peso atribuído a cada variável resposta.

Após o cálculo de GRG, estipula-se uma classificação decrescente dos valores de GRG dos experimentos realizados, sendo o primeiro colocado correspondente a resposta otimizada do processo.

O uso do método de Taguchi como planejamento experimental, juntamente com a análise relacional cinza (GRA) como método de otimização multiobjetivo, é conhecido como método Grey-Taguchi.

Rajyalakshmi; Venkata Ramaiah (2013) estudaram o processo de usinagem não convencional de eletroerosão a fio do Inconel 825. O objetivo do artigo era encontrar a configuração ótima dos parâmetros de entrada, como alguns exemplos o tempo que o pulso fica ligado, a diferença de potencial elétrico aplicada ao fio e aos motores de controle de movimento e a taxa de avanço do fio, a fim de se obter as melhores respostas de taxa de remoção de material, rugosidade superficial e o pico de corrente. Com muitos parâmetros de entrada a serem avaliados, os autores adotaram o planejamento experimental de Taguchi, que com seu arranjo ortogonal L_{36} , resultou em um número reduzido de experimentos a serem realizados e permitindo a avaliação de um fator de entrada com dois níveis e 7 outros fatores de entrada com 3 níveis. Juntamente ao método de Taguchi, utilizou-se a análise relacional cinza, pois o método de Taguchi permite a avaliação e encontro da melhor configuração para uma única resposta por vez. O GRA permitiu a análise de múltiplas respostas ao mesmo tempo. O método se mostrou eficaz na otimização do processo de eletroerosão a fio da liga Inconel 825.

Prasanna et al. (2014) utilizaram o método de Taguchi e a análise relacional cinza no estudo e otimização dos parâmetros de furação de pequenos furos em liga de titânio Ti-6Al-4V, a seco, com broca de metal duro. Investigaram a influência da velocidade do *spindle*, do avanço e da pressão de ar nas variáveis de saída força de corte e nas características de corte, sobre corte, circularidade e conicidade. Encontraram que a força de corte, ao contrário do que comumente é encontrado na literatura, decresceu com o aumento do avanço e que tanto avanço como a velocidade do *spindle* tem contribuições parecidas sobre esta força. As condições de usinagem para a minimização da força de corte, analisada de forma isolada pelo método de Taguchi, levou aos parâmetros de 15 mm/min de avanço, rotação de 5000 RPM e pressão de ar de 6 bar. Ao analisar múltiplas resposta, pelo análise cinza, e considerar não somente a força de corte, mas também os parâmetros de qualidade de forma do furo, chegou-

se a configuração ótima de 10 mm/min de avanço, rotação de 5000 RPM e pressão de ar de 6 bar.

De acordo com Sharma et al. (2014), a análise Grey-Taguchi pode ser utilizada no estudo da influência e otimização dos parâmetros do processo de torneamento do aço AISI 8620 utilizando ferramenta de metal duro revestido por processo CVD, TNMG160408. Foram testadas as velocidades de corte de 150, 200 e 250 m/min, avanços de 0,07, 0,14 e 0,21 mm/rev e profundidades de corte de 0,6, 1,2 e 1,8 mm, em um arranjo ortogonal L_9 de Taguchi. Os parâmetros de avaliação utilizados foram a rugosidade R_a e a taxa de remoção de material. Realizando a análise multiobjetivo e a análise de variância (ANOVA), o fator avanço foi o mais influente nas respostas analisadas e os valores otimizados foram velocidade de corte de 150 m/min, avanço de 0,21 mm/rev e profundidade de usinagem de 0,6 mm.

Muthuramalingam; Mohan (2014) realizaram a otimização de múltiplas respostas de um processo de eletroerosão do aço inoxidável AISI 202. Através de um arranjo ortogonal L_{27} do método de Taguchi e da análise relacional cinza, encontraram a combinação ideal para a obtenção das melhores respostas de taxa de remoção de material, taxa de desgaste do eletrodo e da rugosidade superficial obtida.

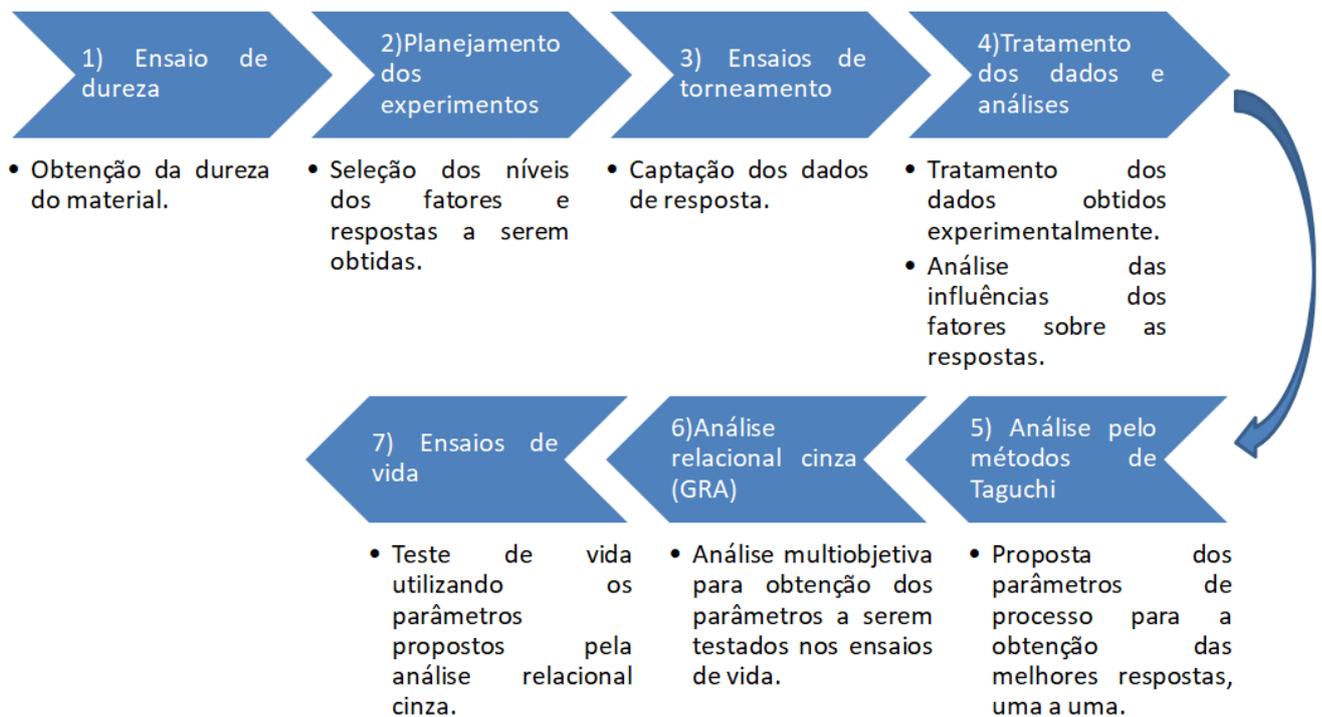
Muhamedagic et al. (2017) utilizaram o método de Taguchi e a análise relacional cinza no estudo de corte a laser de aço inoxidável X5CrNi18-10. Investigaram a influência da velocidade de corte e da pressão do gás, em um arranjo ortogonal L_9 , sobre a rugosidade R_z , a perpendicularidade do corte e a largura do corte. Apesar da análise indicar a combinação ótima de velocidade de corte 2500 mm/min e pressão de gás 8 bar, os autores recomendam a mesma velocidade de corte com a pressão de 6 bar, uma vez que a pressão de corte não mostrou efeitos significativos nas respostas analisadas.

Outros trabalhos relacionados a estudo e otimização de processos de usinagem dos materiais que utilizaram o método Grey-Taguchi com sucesso são Jayaraman; Mahesh kumar (2014), Taşkesen; Kütükde (2014), Jozić et al. (2015), Sohrabpoor et al. (2015), Manivel; Gandhinathan (2016), Ramesh et al. (2016), Mia; Bashir; et al. (2017), Wojciechowski et al. (2018) e Mia et al. (2018).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção foi subdividida abordando o corpo de prova submetido ao estudo de usinagem, a medição da dureza do material a ser usinado, 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 por fim a apresentação das ferramentas de corte juntamente com o planejamento experimental aplicado para cada uma. Na Figura 5 é apresentado o fluxograma das atividades desenvolvidas durante este trabalho.

Figura 5 - Fluxograma das etapas de trabalho.



Fonte: Próprio autor.

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[®]. Suas dimensões iniciais eram de 250 mm de comprimento e diâmetro de 82 mm, material doado pela Villares Metals. A composição química nominal da peça pode ser vista na Tabela 6.

Tabela 6 - Composição química nominal da peça de VAT 32[®].

Liga	C	Si	Mn	Ni	Nb	Al	Ti	Cr	Fe
VAT 32 [®]	0,3	0,2	0,3	32,0	3,9	1,8	2,0	15,5	Balanço

Fonte: Próprio autor.

3.2 ENSAIO DE DUREZA VICKERS

Retirou-se uma bolacha de uma das extremidades do corpo de prova, com espessura de 5mm, através de uma máquina de eletro erosão do DMT- FEG/UNESP. Mediu-se a dureza Vickers da peça, através da máquina de testes de microdureza Knoop/Vickers marca Wilson[®] Instruments modelo 401 MVD, localizada no Laboratório de Estudos de Usinagem da FEG-UNESP.

Os ensaios de dureza seguiram a norma NBR NM ISO 6507-1:2008 – Materiais metálicos – Ensaio de dureza Vickers – Parte 1: Método de Ensaio. Aplicou-se uma carga de 2,94 N (HV 0,3) durante um tempo de 10s.

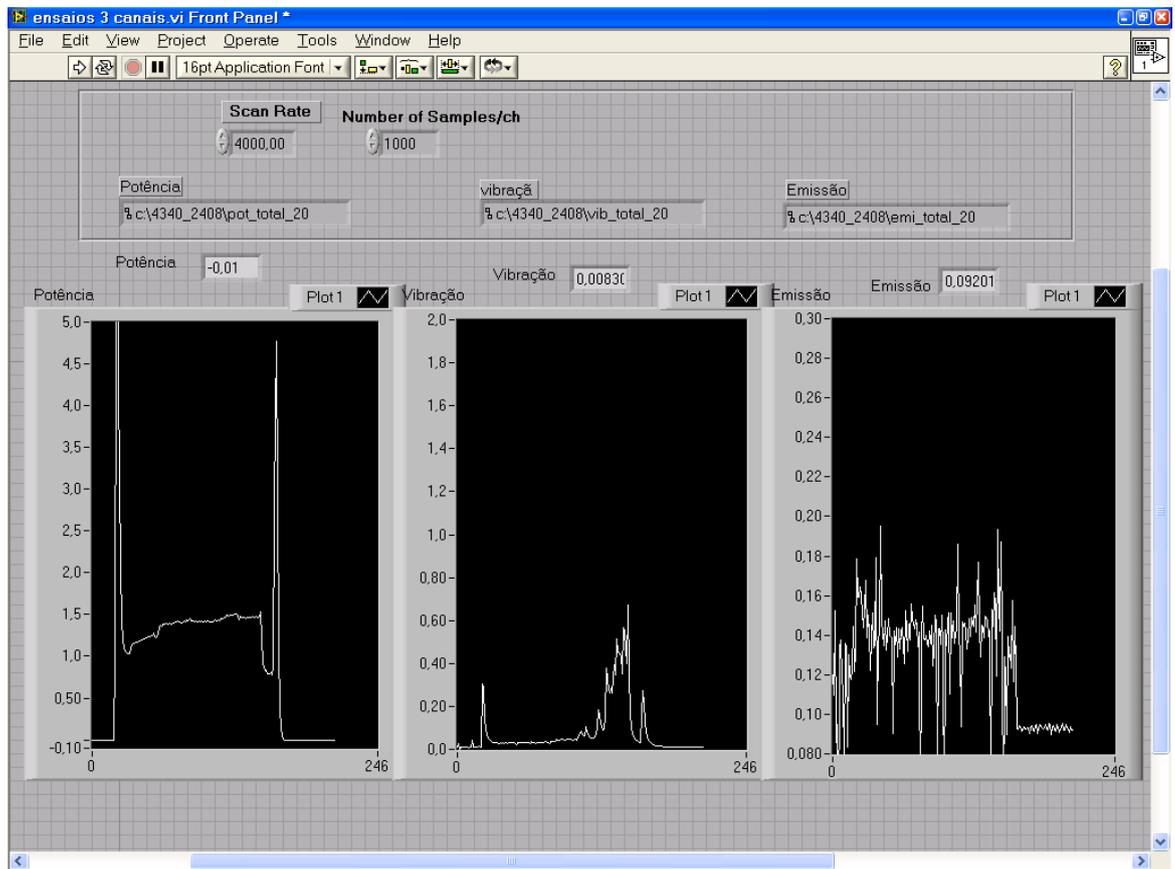
3.3 EQUIPAMENTOS PARA OS ENSAIOS DE TORNEAMENTO E O SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Os ensaios de torneamento ocorreram no centro de torneamento CNC ROMI GL 240M, com potência de 15 kW, localizado no laboratório de estudos de usinagem da FEG-UNESP.

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.

Com o auxílio do software LABVIEW[®] da National Instruments montou-se um programa supervisor, onde se podem verificar 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 unidades de tensão. Na Figura 6, tem-se a tela do programa supervisor utilizado, onde pode ser visto como foram supervisionadas a captação dos sinais de potência, vibração e emissão acústica.

Figura 6 - Tela do programa supervisorio para capturação de sinais durante os ensaios de torneamento.



Fonte: Próprio autor.

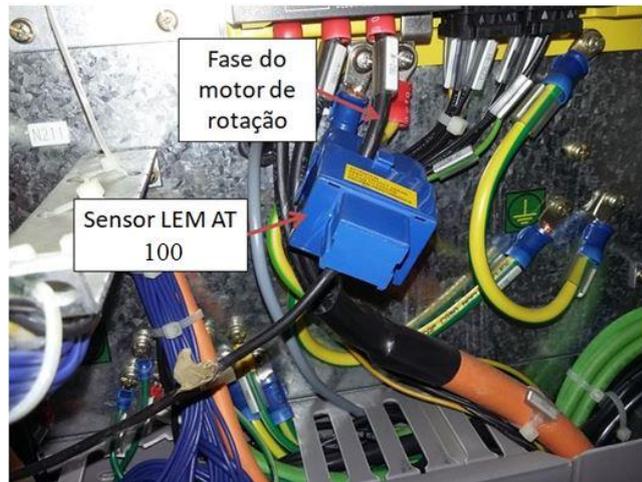
O sensor utilizado para a capturação dos dados de potência consumida é um transformador de potência da marca LEM modelo AT 100, ligado em uma das fases de entrada do motor do centro de torneamento responsável pelo movimento de rotação do mandril e da peça, como mostrado na Figura 7. Este sensor manda 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.

Todos os sinais foram captados com uma taxa de 4000 Hz, ou seja, 4000 pontos por segundo de ensaio.

Para a obtenção do sinal de emissão acústica, foi utilizado um sensor R15 α da marca Physical Acoustic Corporation, juntamente com o pre-amplificador modelo 1272, com saída RMS para o módulo de canais.

Já os sinais de vibração foram obtidos com a utilização 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.

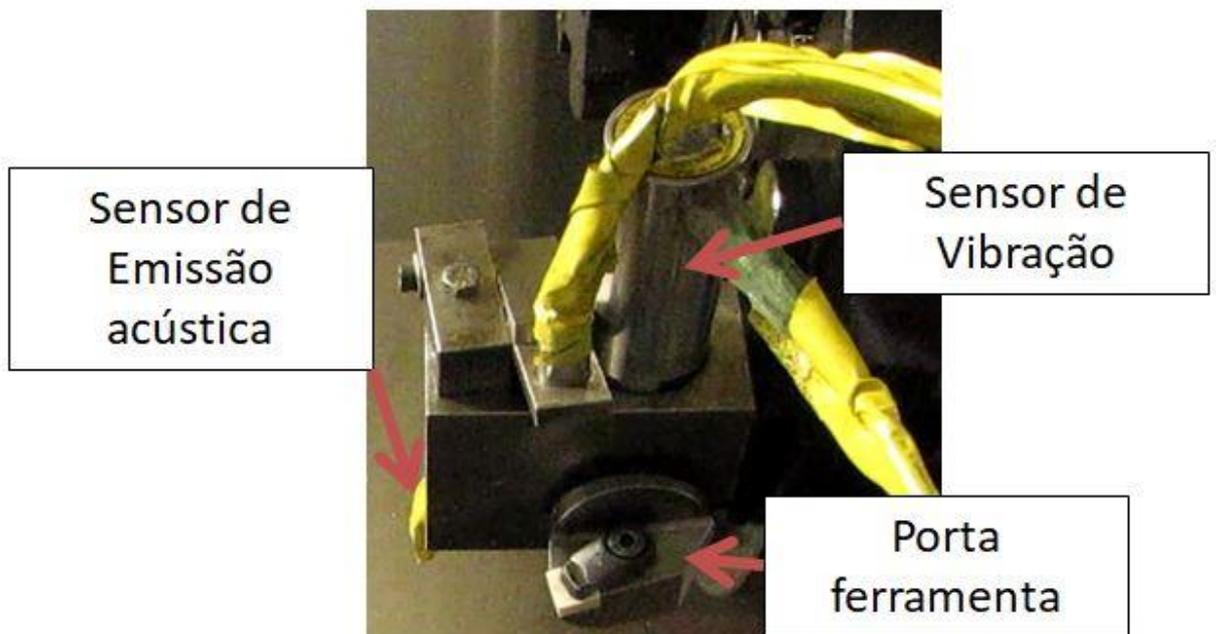
Figura 7 - Ligação do sensor de potência acoplado na entrada do motor de rotação do centro de torneamento CNC.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 8 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 é fixado de maneira que garanta a máxima rigidez com relação ao sistema do porta-ferramentas.

Figura 8 - Afixação dos sensores de vibração e emissão acústica juntamente ao porta-ferramenta.



Fonte: Próprio autor.

3.4 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 realiza 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, converte-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} correspondentes à potência, à emissão acústica e à vibração são convertidos através das Equações 16, 17 e 18, respectivamente, para os sinais nas unidades Watts (potência), V RMS (emissão acústica) e mm/s (vibração);

$$P_U = U_{cc} \cdot 10.220.0,79 \cdot \sqrt{3} \quad (16)$$

$$EA_{RMS} = U_{cc} \quad (17)$$

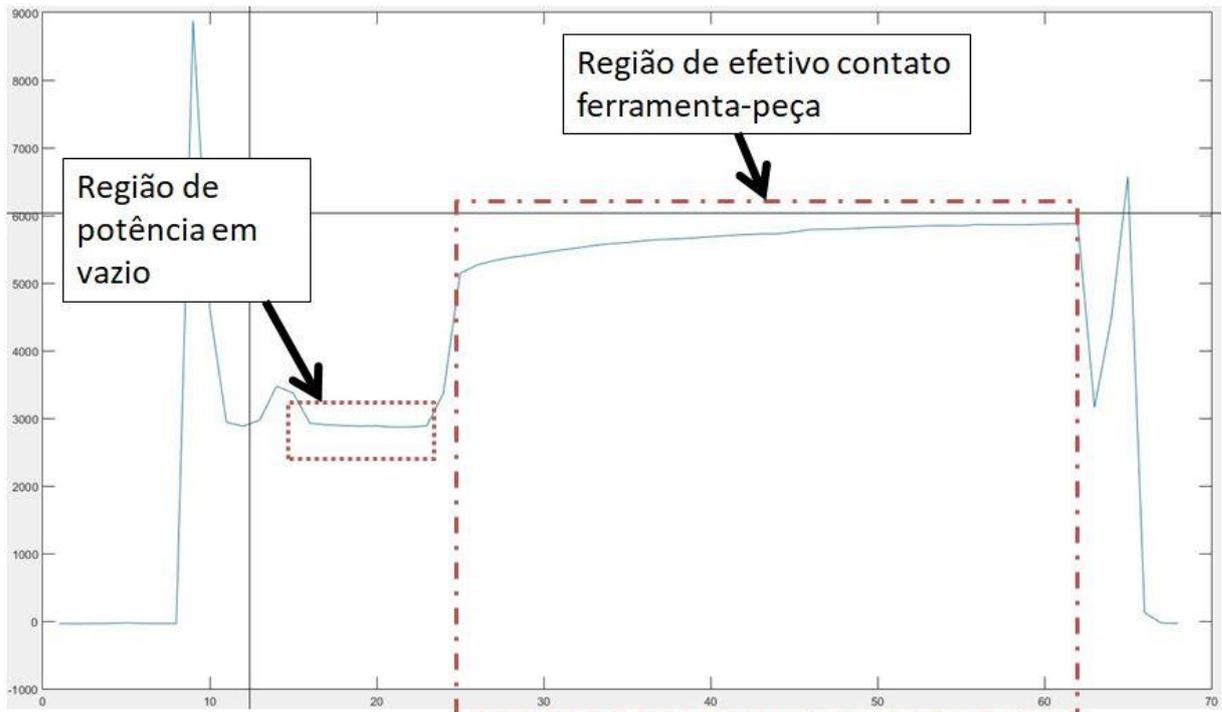
$$Vib = \frac{U_{cc} \cdot 25}{8} \quad (18)$$

As equações foram fornecidas pelos fabricantes dos sensores.

- Obtenção da potência em vazio e dos valores correspondentes do ensaio: Plotagem 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, e 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 P_U . Aproveitou-se a separação dos momentos

de efetiva remoção de material para a separação dos valores de emissão acústica e vibração. Na Figura 9 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 9 - 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.

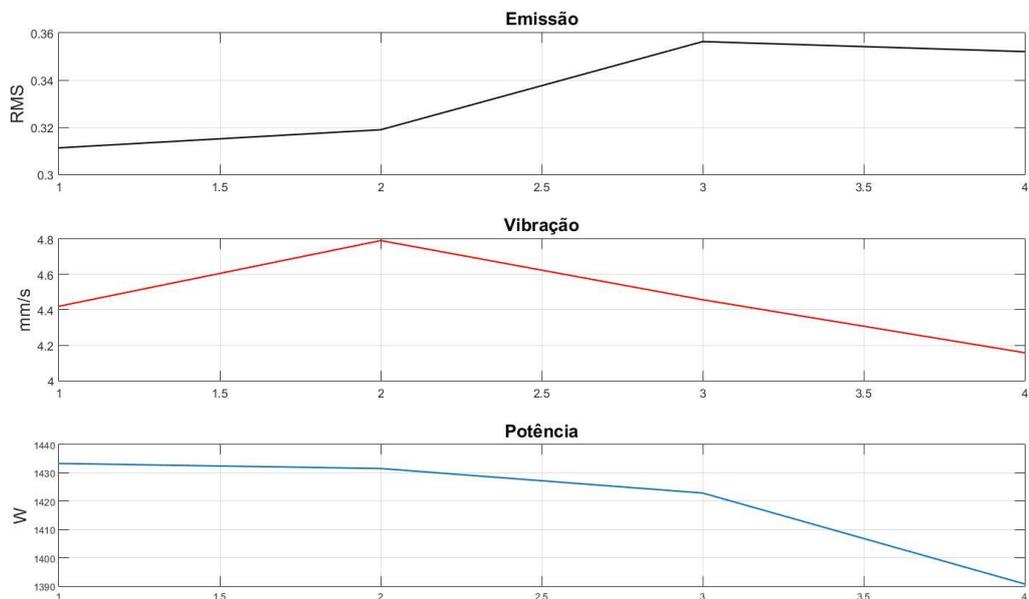
O eixo horizontal da Figura 9 representa os valores do tempo durante o ensaio, em segundos, enquanto que no eixo vertical encontram-se os valores da potência, em Watts.

- Obtenção dos valores médios: Com a separação dos momentos de efetiva remoção de material, plotou-se os gráficos de potência, emissão acústica e vibração, como mostrado na Figura 19. O programa 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.

Depois de separadas a parte do ensaio que houve efetivo contato entre ferramenta e peça, separou-se o gráfico gerado, presente na Figura 10, em três partes iguais com tempos iguais. Se o ensaio total tivesse 42 segundos, cada parte do ensaio seria de 14 segundos. Em cada uma destas partes obteve-se os valores máximos de emissão acústica e vibração. Os

fatores de qualidade que foram analisados são a média da potência de usinagem durante todo o tempo de corte, a média dos máximos de cada uma das três partes do valor de emissão acústica e a média dos máximos dos sinais de vibração. Essa estratégia de calcular a média dos máximos, separando o gráfico em três partes, ocorreu para minimizar os efeitos de defeitos na peça, como pequenas elevações ou depressões que influenciam nos valores de potência, dão um pico na vibração e emissão acústica. Esses defeitos influenciariam o valor máximo correspondente ao ensaio o que poderia ser enganoso, não caracterizando a real situação durante o tempo de corte.

Figura 10 - Exemplo dos gráficos gerados pelo programa de tratamento de dados feito com o software MATLAB[®].



Fonte: Próprio autor.

A opção de utilizar a média dos máximos de emissão acústica e vibração se deu 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.

3.5 MEDIÇÃO DE RUGOSIDADE

As rugosidade R_a e R_t foram obtidas nas peças depois de cada ensaio, com o auxílio do rugosímetro portátil da MAHR modelo MarSurf M300 + RD18 com *cut-off* de 0,8 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, com *cut-off* de acordo com a Tabela 2.

3.6 MEDIÇÃO DE DESGASTE DAS FERRAMENTAS E ANÁLISE DOS CAVACOS

Os desgastes de flanco foram obtidos depois de cada ensaio com auxílio do microscópio da MAHR modelo MarVision MM200, com deslocamento micrométrico. Este equipamento se encontra no Laboratório de Estudos de Usinagem do Departamento de Materiais e Tecnologia da FEG-UNESP.

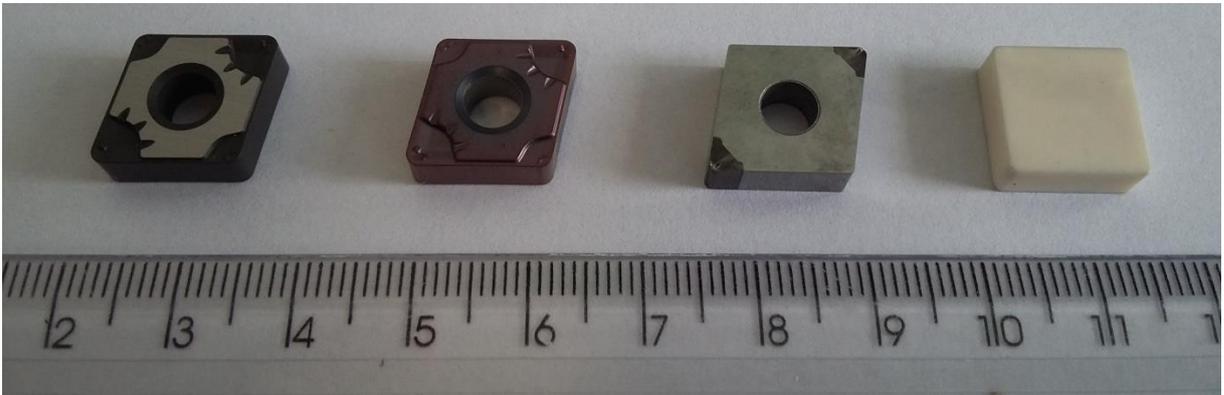
As imagens dos desgastes foram obtidas com o auxílio de lupa Zeiss modelo Stemi 2000, com aumento de até 50X. As imagens auxiliarão na avaliação dos mecanismos de desgastes presentes em cada tipo de ferramenta testada.

3.7 MATERIAIS DAS FERRAMENTAS E PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Foram testados os comportamentos de quatro tipos diferentes de pastilhas, pastilhas de metal duro revestidas pelo método de deposição física de vapor PVD, pastilhas de metal duro revestido por processo de deposição química de vapor CVD, pastilhas de cBN e as pastilhas experimentais de Al_2O_3+MgO . As três primeiras são provenientes da parceria com o grupo SECO TOOLS, enquanto que o último tipo é produzido pelo próprio grupo de pesquisa. Na Figura 11 podem ser vistos exemplos das pastilhas testadas na usinagem do VAT 32[®].

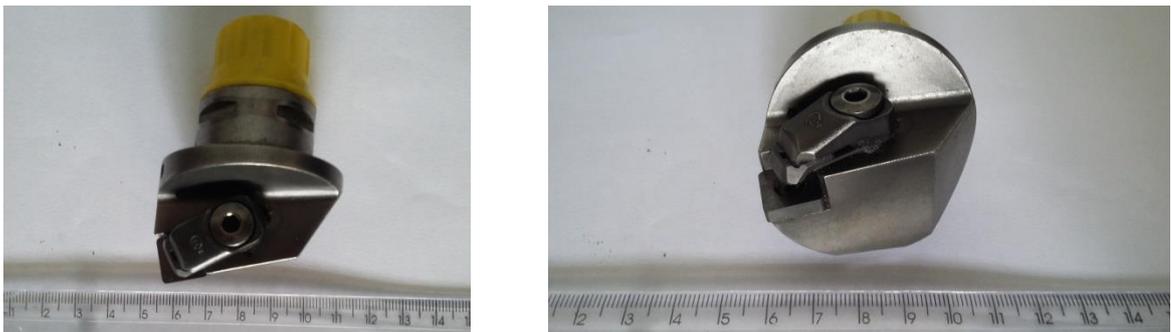
As pastilhas cerâmicas foram testadas utilizando-se o suporte da fabricante SECO TOOLS Cpto B01T9032445 (Figura 12), suporte de cunha-grampo que pode trabalhar com pastilha tipo S. O ângulo de posição (χ_r) das pastilhas no suporte é de 75°, ângulo de inclinação (λ_s) de -6° e ângulo de saída (γ_o), para as ferramentas sem quebra-cavacos, de -6°.

Figura 11 - Pastilhas testadas na usinagem da superliga VAT 32[®], respectivamente Metal Duro CVD, Metal Duro PVD, cBN e pastilha cerâmica.



Fonte: Próprio autor.

Figura 12 - Porta-ferramenta SECO TOOLS Capto B01T9032445



Fonte: Próprio autor.

As pastilhas de metal duro revestidas e as de cBN foram testadas com o uso do porta-ferramentas C4-DCLNL-27050-12M da fabricante Seco Tools, com ângulo de posição (χ_r) de 95°, ângulo de inclinação (λ_s) de -6° e ângulo de saída (γ_o), para as ferramentas sem quebra-cavacos, de -6°. O porta-ferramentas pode ser encontrado na Figura 13.

3.7.1 Insetos de Metal Duro

As pastilhas de metal duro revestido por PVD possuem cobertura nanolaminada de Ti-Al-Si-N, denominada pelo fabricante de TH1000. Sua codificação ISO é CNMG120412-MF5, indicada para operações de acabamento e semi-desbaste. É uma pastilha do tipo C, espessura de 4,76 mm, largura de 12,7 mm e raio de ponta de 1,2 mm, recomendada pelo fabricante para operações de usinagem de superligas (classe S). A nomenclatura final MF-5 é

correspondente ao formato do quebra-cavaco. É a mais utilizada pela indústria para usinagem de superligas em geral, de acordo com o fabricante e a Villares Metals.

Figura 13 - Porta-Ferramentas C4-DCLNL-27050-12M da fabricante Seco Tools.



Fonte: Seco Tools (2018).

O fabricante recomenda faixas de condições de usinagem para a ferramenta de v_c entre 95-125 m/min, f entre 0,2 e 0,45 mm/rev e a_p entre 0,4 e 2,7 mm.

Como planejamento experimental foi adotado o arranjo ortogonal de Taguchi L_8 com quatro fatores, velocidade de corte (80, 90, 100 e 110 m/min), avanço (0,25 e 0,4 mm/rev), profundidade de usinagem (0,15 e 0,25 mm) e lubrificação (fluido em abundância e usinagem a seco). O fluido de corte utilizado foi uma solução de óleo de base vegetal (VASCO 1000 da Blaser) e água com concentração de 5% e vazão de 91 L/min. As combinações dos fatores que foram testadas podem ser vistas na Tabela 7. Cada combinação experimental foi testada duas vezes a fim de validações estatísticas, com uma aresta de corte nova da ferramenta e o percurso de avanço adotado de $L_f = 30$ mm.

Tabela 7 - Combinação experimental dos fatores de acordo com arranjo ortogonal L_8 de Taguchi para a ferramenta de metal duro revestido por PVD

(continua)

Experimento	Velocidade de corte (m/min)	Avanço (mm/rev)	profundidade de usinagem (mm)	Lubrificação
8 e 9	80	0,25	0,25	Abundante
15 e 16	80	0,4	0,15	Seco
1 e 2	90	0,25	0,25	Seco
11 e 12	90	0,4	0,15	Abundante
5 e 10	100	0,25	0,15	Abundante

Tabela 7 - Combinação experimental dos fatores de acordo com arranjo ortogonal L₈ de Taguchi para a ferramenta de metal duro revestido por PVD

(conclusão)

Experimento	Velocidade de corte (m/min)	Avanço (mm/rev)	profundidade de usinagem (mm)	Lubrificação
13 e 14	100	0,4	0,25	Seco
3 e 4	110	0,25	0,15	Seco
6 e 7	110	0,4	0,25	Abundante

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. Essas análises foram realizadas através da análise de médias (ANOM) e da análise de variância (ANOVA). A análise de variância requer que os dados tenham uma distribuição normal, então, para a verificação de normalidade dos dados, foi realizado o teste de normalidade de Anderson-Darling com nível de significância de 95% ($\alpha=0,05$). Este teste é um teste de hipótese que tem como hipótese nula H_0 que a distribuição dos dados é normal e se o valor de p obtido for maior que 0,05, não se pode rejeitar a hipótese nula, ou seja, os dados são normais. Se durante a verificação de normalidade houve dados que não se encaixam na distribuição normal, foram realizados métodos de normalização desses dados, tais como os propostos por Bouacha et al. (2014), transformação por média quadrática, transformação logarítmica, transformação de Box-Cox e transformação de Johnson.

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 através da Equação 19.

$$L_c = \frac{\pi \cdot D \cdot L_f}{1000 \cdot f} \quad (19)$$

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.

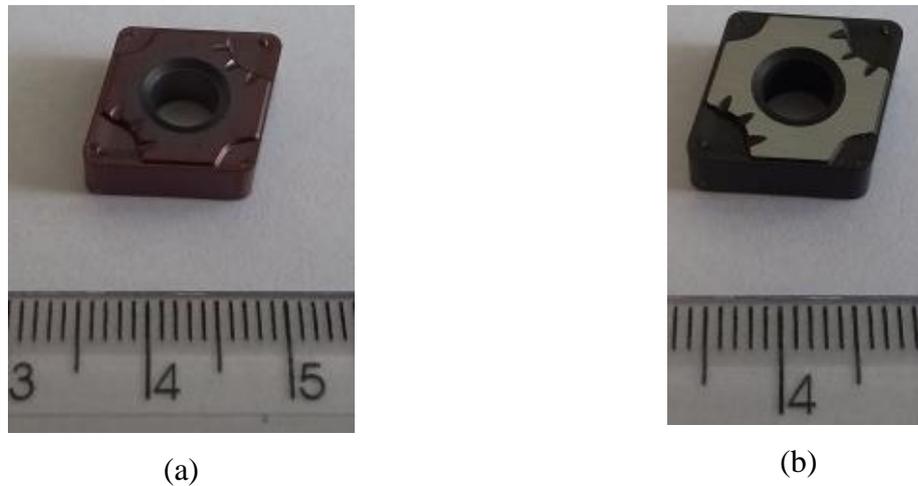
Dos mesmos ensaios, foram obtidos os valores da razão sinal-ruído η , considerando que as variáveis respostas analisadas, potência de usinagem, emissão acústica, vibração, desgaste pelo comprimento de corte e rugosidade são de característica menor é melhor, sendo utilizado para os cálculos a Equação 5. Posteriormente foram realizadas as análises de média (ANOM) e as análises de variância (ANOVA) para η a fim de levantar a configuração de fatores que resulta na menor variação do processo. Todos os testes estatísticos foram realizados no software estatístico Minitab 17.0.

Com os resultados das influências dos parâmetros de corte, foi realizada a otimização para encontrar qual foi a combinação em que se obteve as melhores respostas dentro daquelas trabalhadas experimentalmente. A otimização utilizou o método de Taguchi aliado a otimização multiobjetivo feita pela análise relacional cinza (GRA), de acordo com a metodologia demonstrada no sub-tópico 2.8 . A Etapa 1 de normalização dos fatores de qualidade foi realizada pela Equação 10, a etapa 2 de obtenção das sequências de desvios $\Delta_{0i}(k)$ pela Equação 13, a etapa 3 dos coeficientes relacionais cinzas (GRG) pela Equação 14 e a etapa 4 realizada pela Equação 15. Os pesos dos fatores de qualidade potência de usinagem, rugosidade R_a e rugosidade R_t foram colocados como 2 e os fatores emissão acústica, vibração e V_b/L_c foram colocados com peso 1, uma vez que o autor considerou que as respostas de potência de usinagem e rugosidade são de maior importância no processo de usinagem.

Após a etapa de análises, foram realizados os testes de vida até o limite de desgaste de flanco de $V_b = 0,3$ mm com os parâmetros de corte otimizados pela análise multi-resposta GRA.

A ferramenta de metal duro revestido pelo método CVD possui codificação ISO CNMG120412-MF5 e revestimento TH1500 da fabricante SECO Tools. Esse revestimento é composto por uma camada ligada ao substrato de Ti(C,N) e uma camada externa de Al_2O_3 . Sua geometria é idêntica à pastilha de metal duro revestida por PVD, tendo largura de 12,7 mm, espessura de 4,76 mm, raio de ponta 1,2 mm sendo do formato C. As pastilhas de metal duro PVD e CVD podem ser vistas na Figura 14.

Figura 14 - a) Pastilha CNMG120412-MF5 TH1000 (PVD) e b) Pastilha CNMG120412-MF5 TH1500 (CVD), ambas da SECO Tools.



Fonte: Próprio autor.

O fabricante recomenda a ferramenta de corte CNMG120412-MF5 (CVD) para usinagem de superligas (Classe S) e aços endurecidos (Classe H) em operações de acabamento e semi-desbaste, sugerindo faixas de parâmetros de corte de v_c entre 110 e 150 m/min, f entre 0,2 e 0,45 mm/rev e a_p entre 0,4 e 2,7 mm.

Adotou-se como planejamento experimental o arranjo ortogonal L_8 de Taguchi, sendo os fatores e níveis considerados velocidade de corte (120, 130, 140 e 150 m/min), avanço (0,3 e 0,5 mm/rev), profundidade de usinagem (0,25 e 0,5 mm) e lubrificação (fluido em abundância e usinagem a seco). O fluido de corte utilizado foi uma solução de óleo de base vegetal (VASCO 1000 da Blaser) e água com concentração de 5% com vazão de 91 L/min. As combinações dos fatores que serão testadas podem ser vistas na Tabela 8. Cada combinação experimental será testada duas vezes a fim de validações estatísticas. As análises realizadas foram as mesmas aplicadas para o estudo da usinagem com a ferramenta revestida pelo método PVD.

Tabela 8 - Planejamento experimental para os testes com ferramenta de metal duro revestido por CVD.

Experimento	Velocidade de corte (m/min)	Avanço (mm/rev)	profundidade de usinagem (mm)	Lubrificação
7 e 8	120	0,3	0,25	Seco
13 e 14	120	0,5	0,5	Abundante
9 e 10	130	0,3	0,25	Abundante
3 e 4	130	0,5	0,5	Seco
1 e 2	140	0,3	0,5	Seco
11 e 12	140	0,5	0,25	Abundante
15 e 16	150	0,3	0,5	Abundante
5 e 6	150	0,5	0,25	Seco

Fonte: Próprio autor.

Cada combinação foi realizada com uma aresta de corte nova da ferramenta e o percurso de avanço adotado é de $L_f = 30\text{mm}$.

Com os resultados dos efeitos principais dos parâmetros de corte sobre as variáveis potência de usinagem, desgaste de flanco por comprimento de corte, emissão acústica e vibração, realizou-se as mesmas análises com relação aos valores da razão sinal-ruído, onde foram encontrados os parâmetros em que o processo de torneamento da superliga VAT 32[®] teve menor variabilidade com relação as respostas analisadas.

Seguindo a mesma metodologia adotada para a usinagem com a ferramenta de metal duro revestida por PVD, foi realizada a otimização pelo método de Grey-Taguchi, e esses parâmetros foram posteriormente utilizados em um ensaio de vida da ferramenta CVD.

3.7.2 Insetos de cBN

Com custo mais elevado, a pastilha de cBN possui uma dureza mais elevada que os revestimentos aplicados ao metal duro, sendo seu preço superior de 8 a 10 vezes as do metal duro revestido. Seu desempenho também foi testado, mas por restrições do número de arestas disponíveis, devido ao alto custo destas pastilhas, teve-se ao todo somente oito arestas disponíveis para as experimentações.

A pastilha de cBN é uma pastilha com codificação CBN170 SECO tools, com camada superior sinterizada e pontas soldadas. A composição do composto soldado é de 65% de cristais de cBN com tamanho médio de grão de 2 μm e aglomerante cerâmico TiCN-SiCw. É uma pastilha recomendada para a usinagem de superligas (Classe S). Na Figura 15 pode se verificar a pastilha de cBN utilizada nos processos experimentais.

Figura 15 - Pastilha CBN170 da Seco Tools.



Fonte: Próprio autor.

Optou-se pela restrição do número de arestas disponíveis, a investigação por planejamento experimental de Taguchi através do arranjo ortogonal L_4 . Neste caso foram analisados dois fatores, velocidade de corte (170 e 350 m/min) e avanço (0,1 e 0,25 mm/rev). Fixou-se o valor de a_p de 0,25 mm por passada, sem uso de fluido de corte, ou seja, com usinagem a seco. Na Tabela 9 encontra-se a combinação dos fatores que foi testada, sendo que para cada uma houve uma repetição.

Tabela 9 - Combinação experimental a ser aplicada nos testes com pastilha de cBN.

Experimento	Velocidade de Corte (m/min)	Avanço (mm/rev)
1 e 2	170	0,1
5 e 6	350	0,1
3 e 4	170	0,25
7 e 8	350	0,25

Fonte: Próprio autor.

Cada combinação foi realizada com uma aresta de corte nova da ferramenta e percurso de avanço de $L_f = 30\text{mm}$.

Foram analisados a influência dos fatores sobre a potência de usinagem, a emissão acústica, a vibração, rugosidade R_a e R_t e desgaste de flanco da ferramenta, da mesma maneira que adotado para a ferramenta de metal duro recoberta pelo processo PVD e CVD.

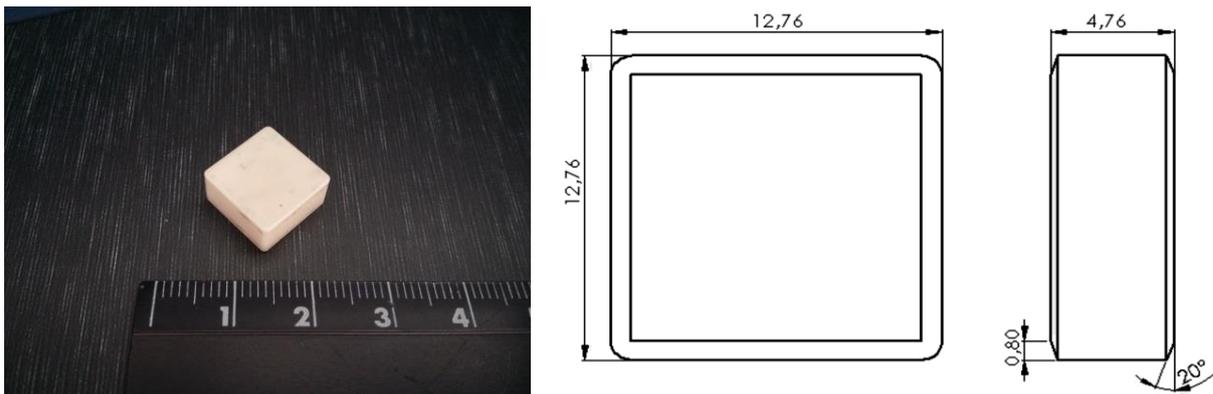
Pelo método de Taguchi e pela análise GRA foi realizada a otimização dos parâmetros de corte que foram aplicados em um teste de vida de ferramenta, com critério de desgaste de flanco máximo de $V_b = 0,3\text{ mm}$.

3.7.3 Insertos cerâmicas de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$

As pastilhas de cerâmica experimentais criadas pelo grupo de pesquisa são compostas de 99,75% em peso de Al_2O_3 , a partir de um pó de alumina α , e 0,25% em peso de MgO com partículas entre 0,40-0,60 μm de tamanho. A densidade relativa destas pastilhas é de 98,42%, resistência de 17,01 GPa e $K_{Ic} = 6,8\text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$.

Sua geometria tem codificação SNGN120408, com 12,76 mm de largura, espessura de 4,76 mm e raio de ponta de 0,8. Há ainda um chanfro nas arestas de corte de 20° , como visto na Figura 16.

Figura 16- Pastilha experimental de $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{MgO}$ SNGN120408.



Fonte: Próprio autor.

Como planejamento experimental, para os ensaios de torneamento utilizando as pastilhas cerâmicas, optou-se por um arranjo ortogonal de Taguchi L_8 . As análises feitas investigaram três fatores, velocidade de corte (350, 400, 450 e 500 m/min), avanço (0,1 e 0,25

mm/rev) e profundidade de usinagem (0,25 e 0,35 mm). Para cada combinação desses fatores, conforme a Tabela 10, foram realizadas duas vezes.

Cada combinação foi realizada com uma aresta de corte nova da ferramenta e o percurso de avanço adotado de $L_f = 30\text{mm}$.

Tabela 10 - Combinação experimental para os testes com a ferramenta de cerâmica de $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{MgO}$.

Experimento	Velocidade de corte (m/min)	Avanço (mm/rev)	profundidade de usinagem (mm)
1 e 2	350	0,1	0,35
3 e 4	350	0,25	0,25
5 e 6	400	0,1	0,35
7 e 16	400	0,25	0,25
13 e 15	450	0,1	0,25
8 e 9	450	0,25	0,35
12 e 14	500	0,1	0,25
10 e 11	500	0,25	0,35

Fonte: Próprio autor.

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, seguindo a mesma metodologia aplicada para a ferramenta de metal duro recoberta por PVD. Essas respostas foram então analisadas, encontrando-se a influência de cada fator sobre as variáveis respostas. Posteriormente os valores de η foram analisados, obtendo-se como resposta os valores dos fatores em que o processo de torneamento com pastilha cerâmica apresentou menor variabilidade das respostas analisadas.

Com base na metodologia de aplicação de Taguchi com GRA, foi encontrada a condição de corte do processo onde se obteve as melhores respostas, numa análise multiobjetiva. Esta condição encontrada foi utilizada nos testes de vida das pastilhas de cerâmica.

Como as condições de corte, as geometrias das ferramentas e os materiais de cada pastilha são muito diferentes um dos outros, a realização de uma comparação de desempenho entre os diferentes tipos de inserto utilizados é muito complexa, uma vez que esses fatores

influenciam a usinagem de qualquer material. O encontro das condições ótimas de usinagem para cada uma das pastilhas, através do método Grey-Taguchi, possibilitou a comparação do desempenho das ferramentas de corte, uma vez que cada tipo de ferramenta utilizada estava trabalhando em sua melhor combinação de parâmetros de corte, aos quais seriam utilizadas em um processo industrial.

3.8 ENSAIOS DE VIDA DAS FERRAMENTAS

Realizou-se os ensaios de vida para o cálculo do comprimento total usinado e tempo de vida para cada uma das ferramentas testadas, e como elas estavam trabalhando na melhor condição possível, comparou-se o desempenho de usinagem de cada uma no torneamento da superliga VAT 32[®]. O ensaio de vida consistiu em usinar pequenos trechos da peça, retirar a ferramenta do centro de torneamento, leva-los até o microscópio e realizar a medição do desgastes de flanco $V_{b\text{máx}}$. A condição limite de vida das ferramentas foi o valor de $V_{b\text{máx}} = 0,300$ mm.

Também foram investigadas as progressões das variáveis potência de usinagem e rugosidades R_a e R_t com o aumento do desgaste das pastilhas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados foram organizados mostrando, primeiramente, os resultados das medições de dureza para o corpo de prova de VAT 32[®] submetido aos ensaios de torneamento. Em seguida são apresentados os valores obtidos para cada ferramenta, ou seja, há uma seção que mostra todas as análises realizadas para cada ferramenta, seção 4.2 para os resultados com uso de pastilhas de metal duro PVD, seção 4.3 para os resultados com a pastilha de metal duro recoberta pelo método CVD, seção 4.4 para os resultados com a pastilha de cBN e 4.5 para a pastilha experimental de Al₂O₃ + MgO. Dentro destes itens, 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. O item 4.6 se relaciona aos ensaios de vida das ferramentas e a comparação dos seus desempenhos.

4.1 VALORES DA MEDIÇÃO DE DUREZA

Os valores dos ensaios de dureza se encontram na Tabela 11.

Tabela 11 - Valores obtidos nos ensaios de dureza Vickers do VAT 32[®].

Medição	Dureza (HV)	Medição	Dureza (HV)
1	357,2	6	350,1
2	443,8	7	345,5
3	360,0	8	347,4
4	419,9	9	356,0
5	358,2	10	415,3

Fonte: Próprio autor.

O valor médio para o ensaio de dureza Vickers obtido foi de 375,34±10% HV. Com base nestes resultados, o corpo de prova de VAT 32[®] que foi submetido aos ensaios de torneamento tinha uma dureza que era esperada, de acordo com os dados de Farina et al. (2013a), onde o VAT 32[®], a uma temperatura de até 250°C, tinha uma dureza de aproximadamente 375 HV, dureza esta que se manteve até uma temperatura de 750°C, algo bem característico das superligas.

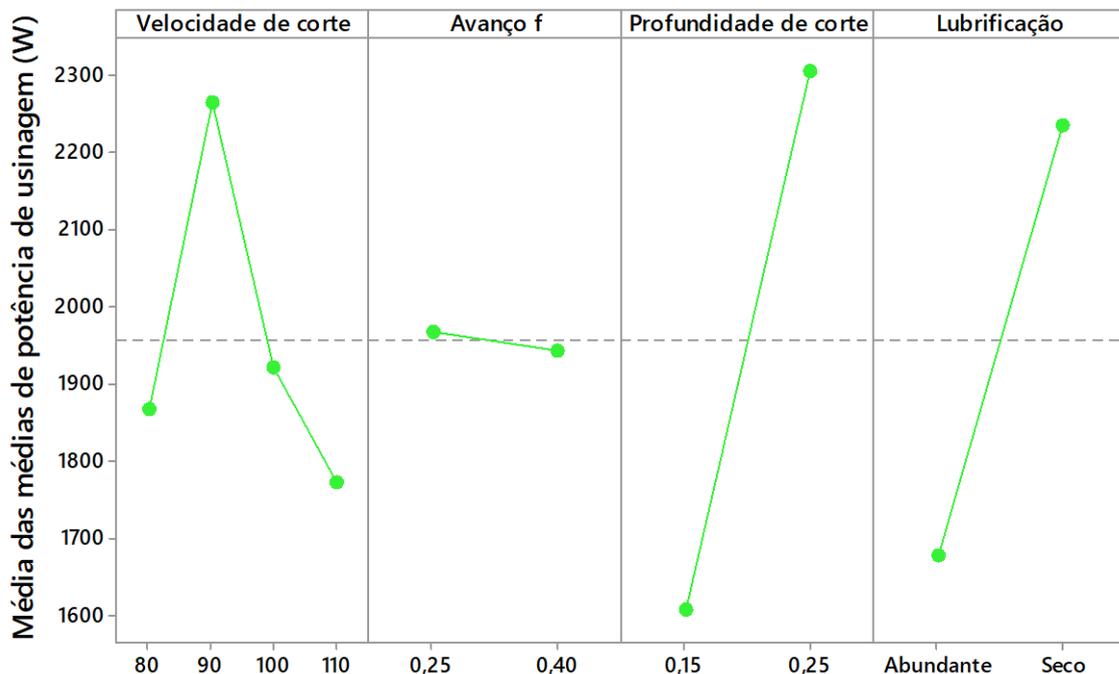
4.2 USINAGEM COM A FERRAMENTA DE METAL DURO REVESTIDO PELO MÉTODO PVD

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos para o torneamento da superliga VAT 32[®] utilizando a ferramenta de metal duro recoberta por Ti-Al-Si-N pelo método PVD, CNMG120412-MF5 com relação às respostas de potência de usinagem, V_b/L_c , parâmetros de rugosidade, emissão acústica e vibração. Um tópico sobre os desgastes encontrados e sobre os cavacos também está nesta seção. A análise relacional cinza (GRA) é outra mostrada na sequência, análise importante para a seleção das condições de corte que foram utilizadas nos ensaios de vida desta ferramenta de corte. Na última seção deste tópico também é encontrado um resumo do desempenho da ferramenta com relação as respostas.

4.2.1 Potência de Usinagem

Na Figura 17 encontra-se o gráfico de efeitos principais para os ensaios utilizando a ferramenta de metal duro PVD. Esta análise também é conhecida como análise das médias (ANOM).

Figura 17 - Efeitos principais dos fatores na média das médias de potência de corte (ANOM).



Fonte: Próprio autor.

A média das médias dos valores de potência de corte foi de 1955,8 W. Ao observar o gráfico pode-se verificar que os menores valores de potência de corte seriam obtidos usinando o corpo de prova com velocidade de corte de 110 m/min, avanço de 0,40 mm/rev, profundidade de usinagem de 0,15 mm e com a utilização de lubrificação pelo método abundante. É necessário verificar se os valores obtidos são significativos, o que é feito pela análise de variância (ANOVA) encontrada na Tabela 12.

Tabela 12 - Análise de variância para os valores médios de potência de corte

Fonte	Graus de liberdade	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
Velocidade de corte	3	274118	274118	91373	11,44	0,213	14,62
Avanço f	1	1182	1182	1182	0,15	0,766	0,06
Profundidade de usinagem	1	972607	972607	972607	121,78	0,058	51,89
Lubrificação	1	618293	618293	618293	77,41	0,072	32,99
Erro residual	1	7987	7981	7981			0,43
Total	7	1874188					

Fonte: Próprio autor.

O teste de normalidade de Anderson-Darling mostrou que a distribuição de dados para potência de usinagem é normal (P-value=0,077). A análise de variância mostrou que a influência dos fatores velocidade de corte, avanço e lubrificação não foi significativa nos valores de potência de usinagem, isto é, a mudança de nível dos fatores não ocasionou respostas estatisticamente diferentes dentro de um nível de significância de 5%. Um fator apresentaria diferentes respostas, portanto seria considerado significativo, se o valor de P da ANOVA fosse menor que o valor adotado de nível de significância de 5% ($\alpha=0,05$). Apesar do fator profundidade de usinagem ter apresentado um valor de P pouco superior a 0,05 (P-value de 0,058) os efeitos deste podem ser considerados estatisticamente significativos.

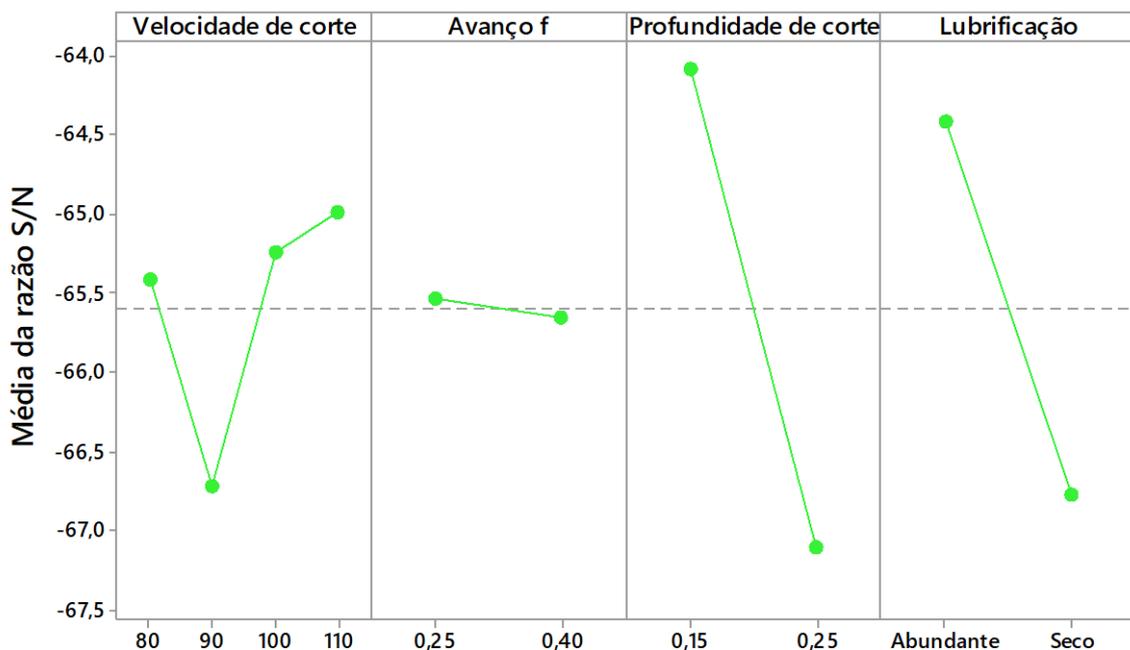
Partindo-se do ponto de vista da engenharia robusta, de acordo com Phadke (1989), pode-se realizar uma análise qualitativa através dos valores de F. Valores de F menores que um são considerados menores que o erro do modelo, valores de F maiores que dois não são tão pequenos, já para valores de F maiores que quatro pode-se assumir que os efeitos daquele fator dentro do fenômeno são grandes. Desta forma pode-se afirmar que a profundidade de

usinagem e tipo de lubrificação também são fatores com efeitos significativos no fator de qualidade potência de usinagem.

Dentre os fatores analisados, aqueles que possuem maiores contribuições na potência de usinagem são profundidade de usinagem (51,89%), tipo de lubrificação (32,99%) e velocidade de corte (14,62%). O fator avanço possui contribuição menor que a do erro, podendo então ser ignorada.

Na Figura 18 podem ser observados os valores obtidos na análise de médias (ANOM) para a razão sinal-ruído η (S/N ratio – *signal-to-noise ratio*) dos valores de potência de usinagem, obtidos pela Equação 10.

Figura 18 - ANOM para a razão sinal-ruído para potência de usinagem



Signal-to-noise: Menor é melhor

Fonte: Próprio autor.

A razão sinal-ruído é analisada quando se busca para quais valores (níveis) dos fatores, V_c , f , a_p e tipo de lubrificação, houve menor variabilidade do processo. Os maiores valores de η indicam qual é a configuração de menor variabilidade, neste caso, velocidade de corte de 110 m/min, avanço de 0,25 mm/rev, profundidade de usinagem de 0,15 mm e lubrificação abundante.

A análise dos resultados deve ser acompanhada pela análise de variância, presente na Tabela 13.

Tabela 13 - ANOVA para a razão sinal-ruído de potência de usinagem.

Fonte	Graus de liberdade	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
Velocidade de corte	3	3,5675	3,5675	1,1892	211,03	0,051	10,86
Avanço f	1	0,0351	0,0351	0,0351	6,23	0,243	0,11
profundidade de usinagem	1	18,1917	18,1917	18,1917	3228,31	0,011	55,38
Lubrificação	1	11,0481	11,0481	11,0481	1960,61	0,014	33,63
Erro residual	1	0,0056	0,0056	0,0056			0,02
Total	7	32,8480					

Fonte: Próprio autor.

O teste de normalidade de Anderson-Darling demonstrou que os valores de η para a resposta potência de usinagem estão numa distribuição normal (P-Value = 0,487). Realizando-se a análise qualitativa dos dados do ponto de vista da engenharia robusta, através da análise dos valores de F, observa-se que todos os fatores mostraram influência grande na variabilidade do processo com relação a potência de usinagem. São eles, em ordem de contribuição, profundidade de usinagem (55,38%), tipo de lubrificação (33,63%), velocidade de corte (10,86%) e avanço (0,11%).

De acordo com as análises realizadas, a configuração que otimiza, tanto para a obtenção das menores potências de corte, e por consequência um menor gasto energético para a usinagem da superliga com metal duro revestido por PVD, quanto para a obtenção da menor variabilidade do processo é $v_c= 110$ m/min, $f=0,25$ mm/rev, $a_p=0,15$ mm e uso de fluido de corte em abundância. Para a média de potência de usinagem, a partir da análise da Figura 17 é possível verificar que o valor de avanço 0,4 mm/rev foi o que resultou em menores potências de usinagem, porém a ANOVA da Tabela 12 permite concluir que não há diferença significativa entre os valores de potência de usinagem quando se alteram os valores de avanço de 0,25 mm/rev para 0,40 mm/rev. Neste caso, Phadke (1989) e Taguchi et al. (2004) orientam que a escolha do nível para o fator pode levar em conta outras características, e no caso analisado optou-se pela recomendação de avanço de 0,25 mm/rev, pois este é o valor de avanço para o qual o processo de torneamento apresentou a menor variabilidade.

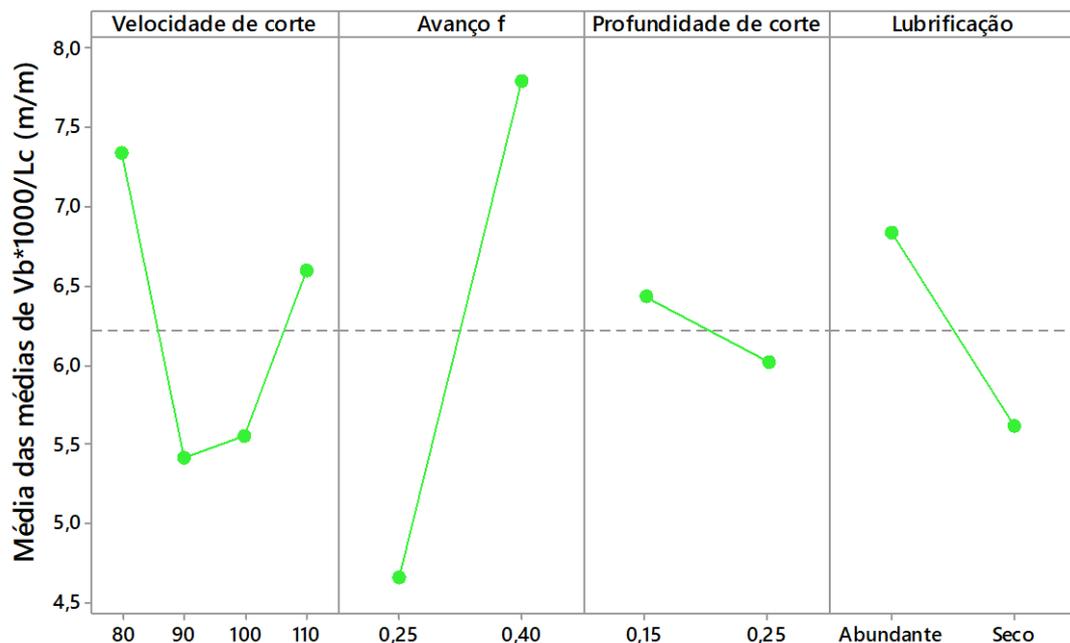
Quanto maior é a profundidade de usinagem adotada, maior é a seção da área de cavaco a ser cisalhada para a remoção de material, o que demanda maiores esforços e, por consequência, maior potência para a realização do processo de torneamento.

Não há uma tendência clara da relação entre velocidade de corte e potência de usinagem. O aumento da potência de usinagem na velocidade de 90 m/min e uma brusca queda para a velocidade de corte de 100 m/min pode ser um indício do fenômeno de formação de aresta postiça de corte, muito comum nos processos de usinagem de superligas. Portanto uso de ferramenta de metal duro revestida de Ti-Al-Si-N pelo processo PVD no torneamento da superliga VAT 32[®], deve-se evitar velocidades próximas a 90 m/min. O uso de fluido de corte em abundância resultou em valores menores de potência de corte quando comparado a usinagem a seco e auxiliou para uma menor variação do processo de torneamento da liga. Esse fluido de corte atuou como lubrificante, reduzindo o atrito entre peça-ferramenta e entre cavaco-ferramenta.

4.2.2 Desgaste de flanco/percurso de corte L_c

Na Figura 19 tem-se a análise das médias para V_b/L_c , onde se verifica a influência dos fatores sobre a resposta desgaste da ferramenta/percurso de corte.

Figura 19-ANOM para análise dos efeitos principais dos fatores sobre a variável V_b/L_c .



Fonte: Próprio autor.

O percurso de corte foi calculado de acordo com a Equação 19. Como os valores de desgaste são muito baixos para pequenos trechos de usinagem, multiplicou-se os valores da razão V_b/L_c por 1000 para alterar a escala dos gráficos, sem prejuízo aos efeitos dos mesmos.

Os menores quocientes de V_b/L_c foram obtidos quando da utilização de velocidade de corte de 90 m/min, avanço de 0,25 mm/rev, profundidade de usinagem de 0,25 mm e usinagem a seco. A média das médias do valor de $V_b \cdot 1000/L_c$ foi de 6,225 m/m, e na análise pela ANOM é representada pela linha tracejada central. O maior afastamento dos pontos dos gráficos à linha tracejada central pode representar que os efeitos daquele nível assumido pelo fator pode ser mais significativo. Para verificar se esses efeitos são significativos é necessária a análise das variâncias, que pode ser vistas na Tabela 14.

Tabela 14 - ANOVA dos efeitos principais dos fatores na média da razão V_b/L_c .

Fonte	GL	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
Velocidade de corte	3	4,9765	4,9765	1,6588	4,59	0,328	17,64
Avanço f	1	19,6036	19,6036	19,6036	54,22	0,086	69,48
profundidade de usinagem	1	0,3331	0,3331	0,3331	0,92	0,513	1,18
Lubrificação	1	2,9384	2,9384	2,9384	8,13	0,215	10,42
Erro residual	1	0,3616	0,3616	0,3616			1,28
Total	7	28,2131					

Fonte: Próprio autor.

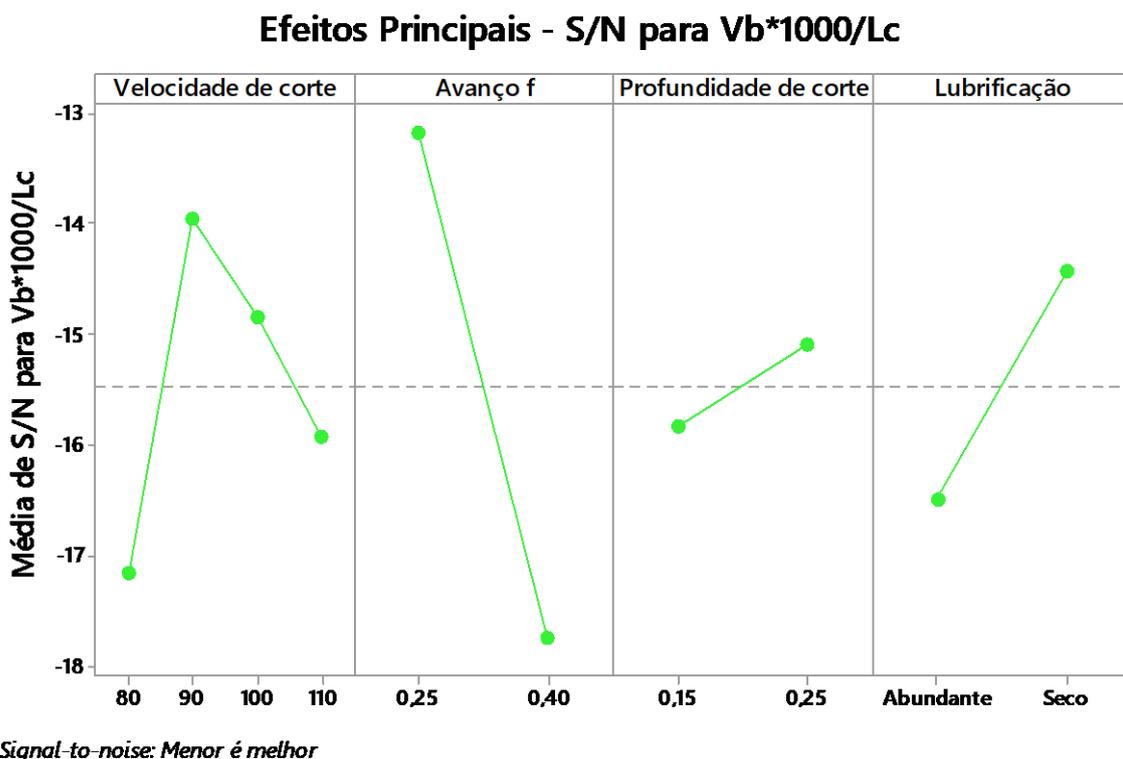
A ANOVA permite verificar que os fatores que possuem efeitos significativos, do ponto de vista de engenharia robusta, sobre os valores médios de V_b/L_c são, em ordem de contribuição, avanço (69,48%), velocidade de corte (17,64%) e forma de lubrificação (10,42%). O teste de normalidade de Anderson-Darling mostrou que a distribuição dos dados corresponde a uma distribuição normal (P-value = 0,619).

A tendência, encontrada para velocidades de corte maiores que 90 m/min, de se ter maiores desgastes com o aumento da velocidade de corte e aumento do avanço também foi encontrada por Criado et al. (2018), que usinou por torneamento a liga Inconel 718 com

ferramenta de metal duro revestida por TiAlN-TiN por PVD. Davoodi; Eskandari (2015) usinaram uma superliga de ferro-níquel N-155 com ferramenta de metal duro revestido de TiAlN por PVD e seus resultados também indicam que o tempo de vida da ferramenta, que pode ser relacionado ao desgaste, é influenciado pela velocidade de corte (contribuição de 55,84%) e pelo avanço (contribuição de 31,80%). Porém as velocidades de corte testadas foram de 50 a 90 m/min e os avanços de 0,1 a 0,2 mm. No torneamento do Inconel 825 feito por Thakur; Gangopadhyay (2016) que testaram várias estratégias de lubrificação, como usinagem a seco, com fluido em abundância e mínima quantidade de fluido, com ferramenta de metal duro recoberto de TiN-TiAlN por PVD, os desgastes de flanco foram menores quando ocorreu usinagem a seco, diferentemente do que foi encontrado no desenvolvimento desta tese.

Na Figura 20, encontra-se a análise das médias (ANOM) da razão sinal-ruído para os valores de V_b/L_c .

Figura 20 - ANOM para análise dos efeitos principais dos fatores sobre a variável V_b/L_c .



Fonte: Próprio autor.

A configuração experimental que resultou em menor variação do processo com relação ao desgaste de flanco pelo comprimento de corte foi $v_c = 90$ m/min, $f = 0,25$ mm/rev, $a_p = 0,25$

mm e usinagem a seco. Na Tabela 15 encontram-se os valores obtidos pela ANOVA para os valores de η .

Tabela 15 - ANOVA para os valores de sinal-ruído de V_b/L_c .

Fonte	GL	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
Velocidade de corte	3	11,4126	11,4126	3,8042	654,35	0,029	18,20%
Avanço f	1	41,6517	41,6517	41,6517	7164,44	0,008	66,46
profundidade de usinagem	1	1,1056	1,1056	1,1056	190,18	0,046	1,76
Lubrificação	1	8,4987	8,4987	8,4987	1461,85	0,017	26,01
Erro residual	1	0,0058	0,0058	0,0058			<0,01
Total	7	62,6744					

Dados normais (P-Value Anderson-Darling = 0,747).

Fonte: Próprio autor.

De acordo com a Tabela 15, todos os fatores mostraram influência significativa na variabilidade de V_b/L_c do processo de torneamento do VAT 32[®]. As maiores contribuições para a variabilidade são do avanço (66,46%), tipo de lubrificação (26,01%), velocidade de corte (18,20%) e profundidade de usinagem (1,76%).

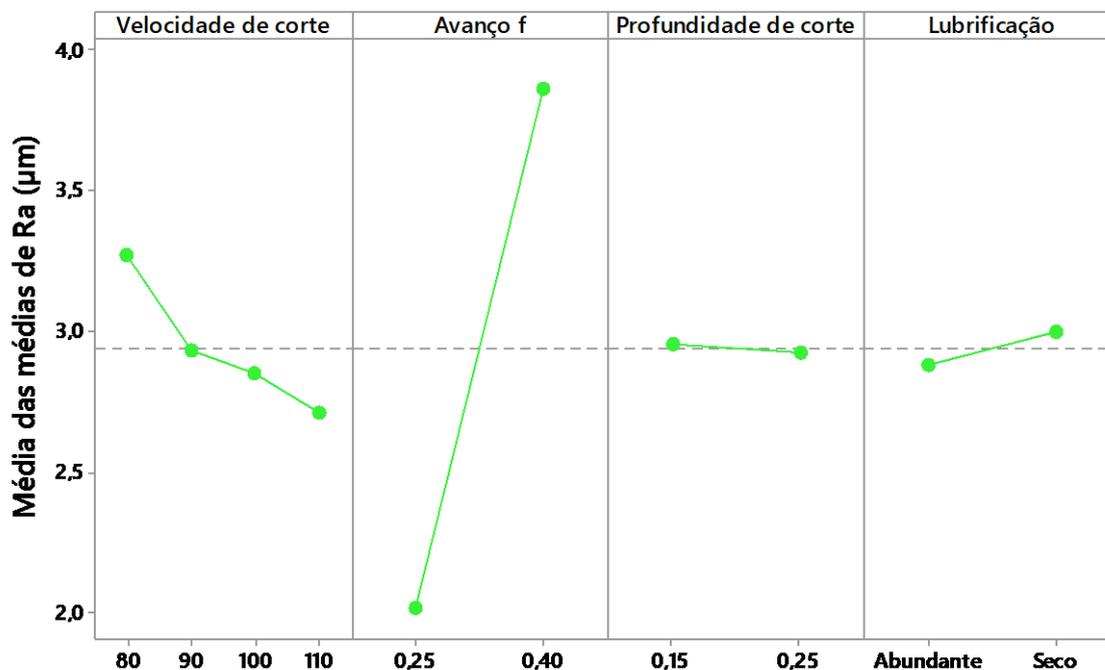
A combinação dos parâmetros de corte que resultou em menores valores de V_b/L_c e que apresentou a menor variabilidade do processo para a resposta analisada foi $v_c = 90$ m/min, $f = 0,25$ mm/rev, $a_p = 0,25$ mm e usinagem a seco.

4.2.3 Rugosidades R_a e R_t

Através da ANOM, presente na Figura 21, podem ser vistos os efeitos principais dos fatores de usinagem na resposta de rugosidade R_a .

Para o avanço de 0,25 mm/rev, através da Equação 1, tem-se um R_a teórico de 1,670 μm . A média dos valores de R_a quando usinando com pastilha de metal duro PVD com $f = 0,25$ mm/rev foi de 2,018 μm . Para o avanço de 0,40 mm/rev, tem-se pela Equação 1 um R_a teórico de 3,864 μm enquanto os valores obtidos experimentalmente tiveram a média de 4,101 μm .

Figura 21 - ANOM para os valores de R_a no torneamento com pastilha de metal duro PVD.



Fonte: Próprio autor.

A análise de médias (ANOM) mostrou que a média das médias de R_a obtidas foi de $2,941 \mu\text{m}$. Os níveis dos fatores que resultaram em menores valores de R_a , e portanto de melhor qualidade superficial, foram $v_c = 110 \text{ m/min}$, $f = 0,25 \text{ mm/rev}$, $a_p = 0,25 \text{ mm}$ e usinagem com uso de fluido de corte em abundância. Os valores da ANOVA estão presentes na Tabela 16 e demonstrarão quais desses fatores foram influentes durante o processo no valores de R_a .

Tabela 16 - ANOVA para os valores de R_a na usinagem com ferramenta de metal duro PVD.

							(continua)
Fonte	GL	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
Velocidade de corte	3	0,34130	0,34130	0,11377	0,65	0,697	4,63
Avanço f	1	6,82220	6,82220	6,82220	38,98	0,101	92,60

Tabela 16 - ANOVA para os valores de R_a na usinagem com ferramenta de metal duro PVD.

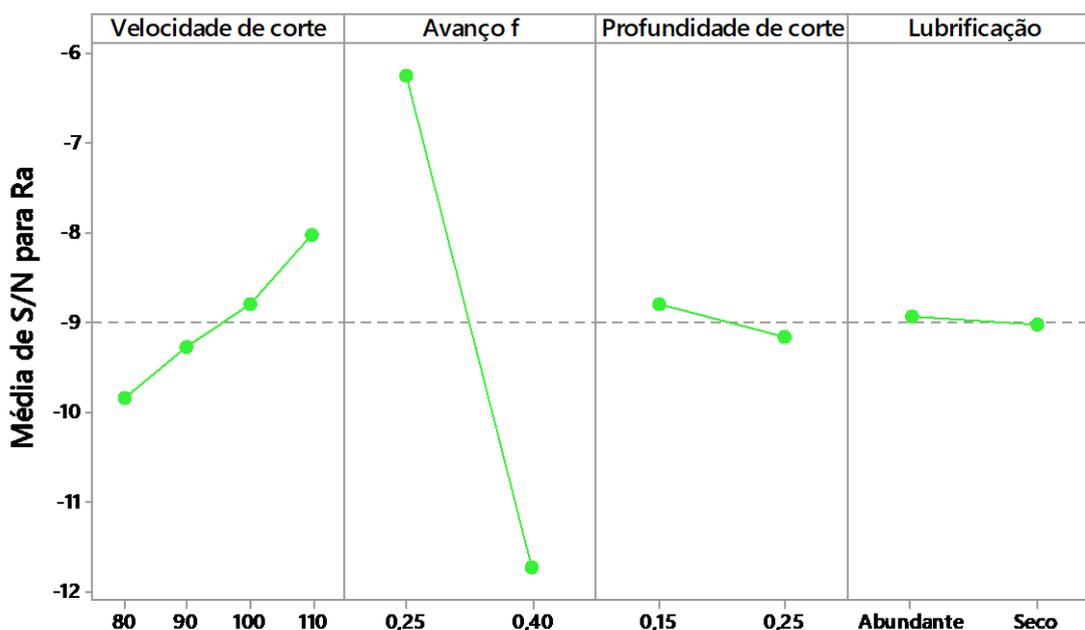
							(conclusão)
Fonte	GL	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
profundidade de usinagem	1	0,00158	0,00158	0,00158	0,01	0,940	0,02
Lubrificação	1	0,02753	0,02753	0,02753	0,16	0,760	0,37
Erro residual	1	0,17503	0,17503	0,17503			2,38
Total	7	7,36765					

Dados normais (Teste de Anderson-Darling P-value = 0,139).

Fonte: Próprio autor.

Com os dados da ANOVA pode-se concluir que o único fator analisado que possui influência significativa nos valores da rugosidade R_a é o avanço da ferramenta, o que já era esperado pelo fato dele ser levado em consideração para o cálculo da rugosidade teórica. Para menores valores de avanço foram obtidos os menores valores de rugosidade R_a . A análise de média da razão sinal-ruído η para os valores de R_a é apresentada na Figura 22.

Figura 22 - ANOM para os valores de S/N para rugosidade R_a .



Signal-to-noise: Menor é melhor

Fonte: Próprio autor.

A combinação de parâmetros que resultou em menor variabilidade nos valores de R_a é $v_c = 110$ m/min, $f = 0,25$ mm/rev, $a_p = 0,15$ mm com uso de fluido de corte em abundância. A ANOVA, presente na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, auxiliou na análise dos fatores com efeitos significativos para a variabilidade de R_a no processo.

A análise de variância dos valores da razão S/N para R_a também mostrou o efeito significativo do avanço com relação a variabilidade do processo em relação à qualidade superficial da peça, e pode ser observada na Tabela 17. Os outros fatores não apresentaram efeitos significativos na variabilidade do processo.

Tabela 17 – Análise de variância para os valores da razão sinal-ruído η para R_a .

Fonte	GL	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
Velocidade de corte	3	3,5087	3,5087	1,1696	0,59	0,716	5,34
Avanço f	1	59,9908	59,9908	59,9908	30,31	0,114	91,22
profundidade de usinagem	1	0,2653	0,2653	0,2653	0,13	0,77	0,40
Lubrificação	1	0,0176	0,0176	0,0176	0,01	0,940	0,03
Erro residual	1	1,9794	1,9794	1,9794			3,01
Total	7	65,7618					

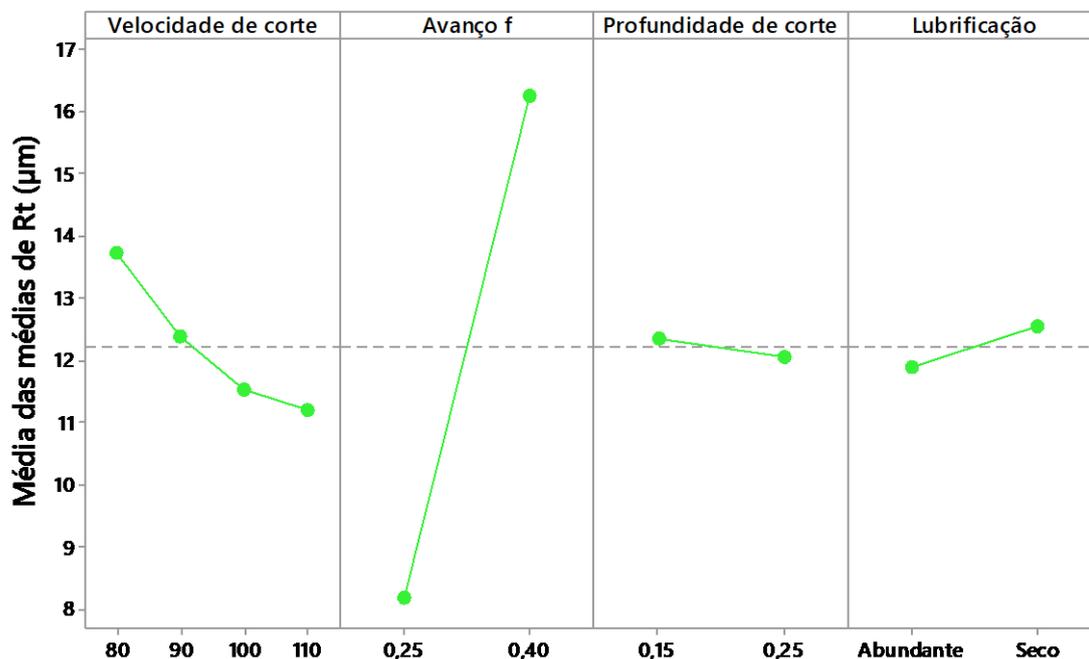
Dados normais (Teste de normalidade de Anderson-Darling P-value = 0,137).

Fonte: Próprio autor.

Os valores de R_t são mais sensíveis com relação a defeitos superficiais pontuais que a rugosidade de R_a . A análise de R_t pode ser realizada através da Figura 23, onde podem ser vistos a ANOM para os valores obtidos no torneamento com ferramenta de metal duro revestido por PVD.

Os menores valores de rugosidade R_t foram obtidos quando torneando sob as condições de $v_c = 110$ m/min, $f = 0,25$ mm/rev, $a_p = 0,25$ mm e usinagem com uso de fluido em abundância. A média das médias de R_t foi de 12,215 μ m.

A comparação entre os valores teóricos de R_t , obtidos pela Equação 2, com os obtidos experimentalmente estão presentes na Tabela 18.

Figura 23 - ANOM para os valores de R_t .

Fonte: Próprio autor.

Tabela 18 - Comparação dos valores teóricos e experimentais de rugosidade R_t .

Avanço f (mm/rev)	Valores (μm)		Desvio (%)
	R_t teórico	R_t médio experimental	
0,25	6,510	8,189	25,79
0,40	16,67	16,24	1,62

Fonte: Próprio autor.

O desvio é um indicativo da influência de outros fatores, como vibração do sistema, que afastam o processo do modelo ideal e teórico. Na Tabela 19 encontra-se a ANOVA para os valores de R_t .

Como ocorrido também com a análise da influência sobre os valores de R_a , tem-se o mesmo comportamento para R_t , ou seja, o fator de maior influência na rugosidade R_t é o avanço da ferramenta de corte, sendo este o único fator com influência significativa na rugosidade da peça nos ensaios com pastilha de metal duro revestida por Ti-Al-Si-N pelo processo PVD.

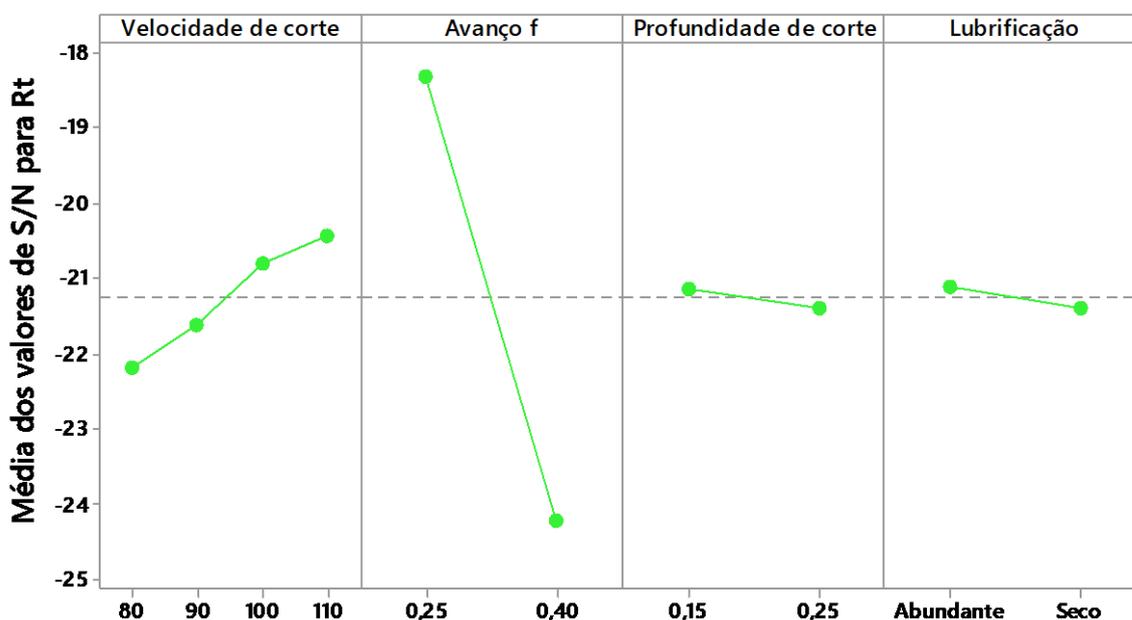
Tabela 19 - ANOVA para os valores de média R_t .

Fonte	GL	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
Velocidade de corte	3	7,529	7,529	2,510	1,98	0,472	4,72
Avanço f	1	129,644	129,644	129,644	102,08	0,063	92,93
profundidade de usinagem	1	0,194	0,194	0,194	0,15	0,763	0,14
Lubrificação	1	0,862	0,862	0,862	0,68	0,561	0,62
Erro residual	1	1,270	1,270	1,270			
Total	7	139,500					

Dados normais (Teste de normalidade Anderson-Darling P-value = 0,075).

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 24 são encontrados os dados da análise de médias para os valores da razão sinal-ruído para o parâmetro de rugosidade R_t .

Figura 24 - ANOM para os valores de S/N para R_t .

Signal-to-noise: Menor é melhor

Fonte: Próprio autor.

A ANOM para os valores de η revela que a combinação dos parâmetros de corte em que houve menor variação do processo com relação aos valores da rugosidade R_t foi $v_c = 110$ m/min, $f = 0,25$ mm/rev, $a_p = 0,15$ mm e uso de fluido de corte em abundância. Na Tabela 20

encontra-se a análise de variância para verificação dos efeitos significativo na influência da variabilidade de R_t durante o torneamento.

Tabela 20 - ANOVA para os valores de S/N para R_t .

Fonte	GL	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
Velocidade de corte	3	3,8028	3,8028	1,2676	2,07	0,463	4,32
Avanço f	1	69,3238	69,3238	69,3238	113,31	0,060	93,62
profundidade de usinagem	1	0,1352	0,1352	0,1352	0,22	0,720	0,18
Lubrificação	1	0,1740	0,1740	0,1740	0,28	0,688	0,23
Erro residual	1	0,6118	0,6118	0,6118			0,83
Total	7	74,0476					

Dados normais (Teste de normalidade de Anderson-Darling P-value = 0,104).

Fonte: Próprio autor.

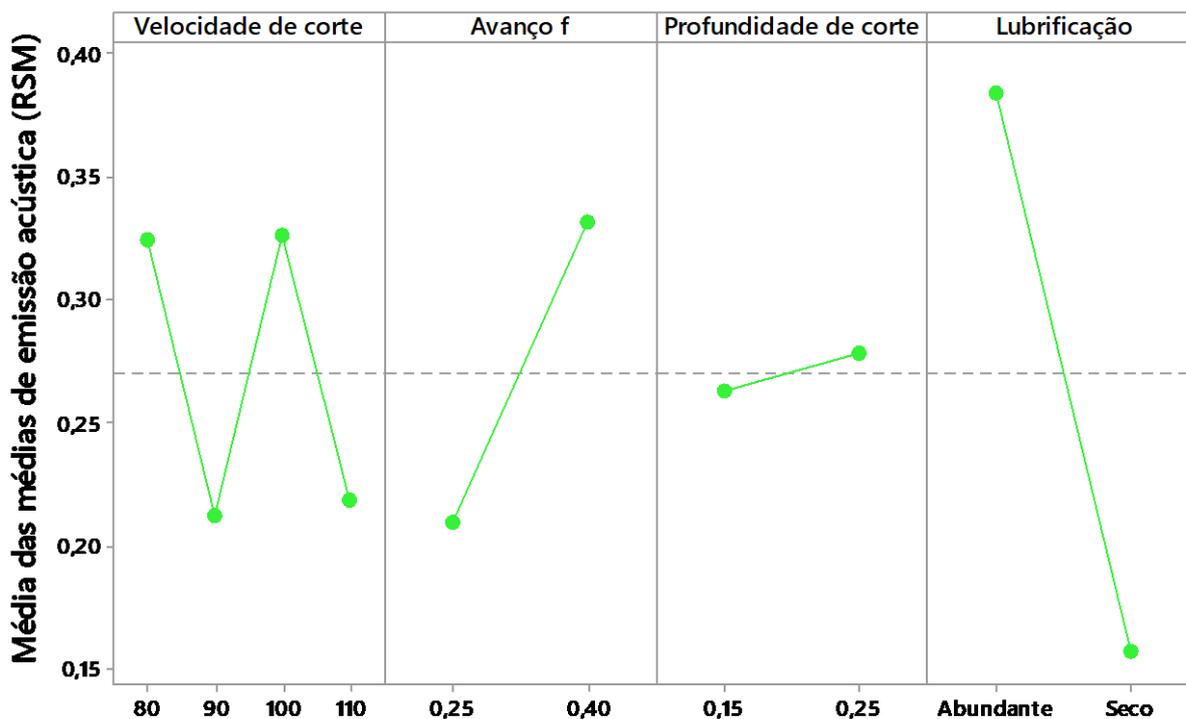
Novamente, como ocorrido para a rugosidade R_a , o fator avanço tem efeitos significativos e deve ser mantido a um nível de 0,25 mm/rev para menor variabilidade do processo. A contribuição do fator avanço para a menor variabilidade do processo em relação aos valores de R_t é de 92,93%. A velocidade de corte mostrou efeitos que não são pequenos, valor de $F > 2$, e também será considerado como um fator com efeitos significativos com base nas análises de engenharia robusta. Sua contribuição é de 4,32%.

4.2.4 Emissão acústica (EA)

Os valores médios obtidos para a resposta emissão acústica, durante o torneamento com ferramenta de metal duro PVD, estão presentes na Figura 25. Os valores apresentados são correspondentes à média dos valores de emissão acústica obtidos durante o ensaio.

A média das médias dos sinais RMS de emissão acústica foi de 0,2705 V. Os níveis dos fatores que apresentaram menores valores de EA, e conseqüentemente menor energia de quebra das ligações e atritos, foram $v_c = 90$ m/min, $f = 0,25$ mm/min, $a_p = 0,15$ mm e usinagem a seco. Para a verificação dos fatores com efeitos significativos realizou-se a ANOVA dos dados de EA, presentes na Tabela 21.

Figura 25 - Efeitos principais dos fatores na média das médias de emissão acústica (ANOM).



Fonte: Próprio autor.

Tabela 21 - Análise de variância para as médias do sinal de emissão acústica.

Fonte	GL	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
Velocidade de corte	3	0,024134	0,024134	0,008045	49,60	0,104	15,39
Avanço f	1	0,029771	0,029771	0,029771	183,56	0,047	18,99
profundidade de usinagem	1	0,000457	0,000457	0,000457	2,82	0,342	0,29
Lubrificação	1	0,102271	0,102271	0,102271	630,6	0,025	65,23
Erro residual	1	0,000162	0,000162	0,000162			0,10
Total	7	0,156794					

Dados normais (Teste de Anderson-Darling P-value = 0,1447).

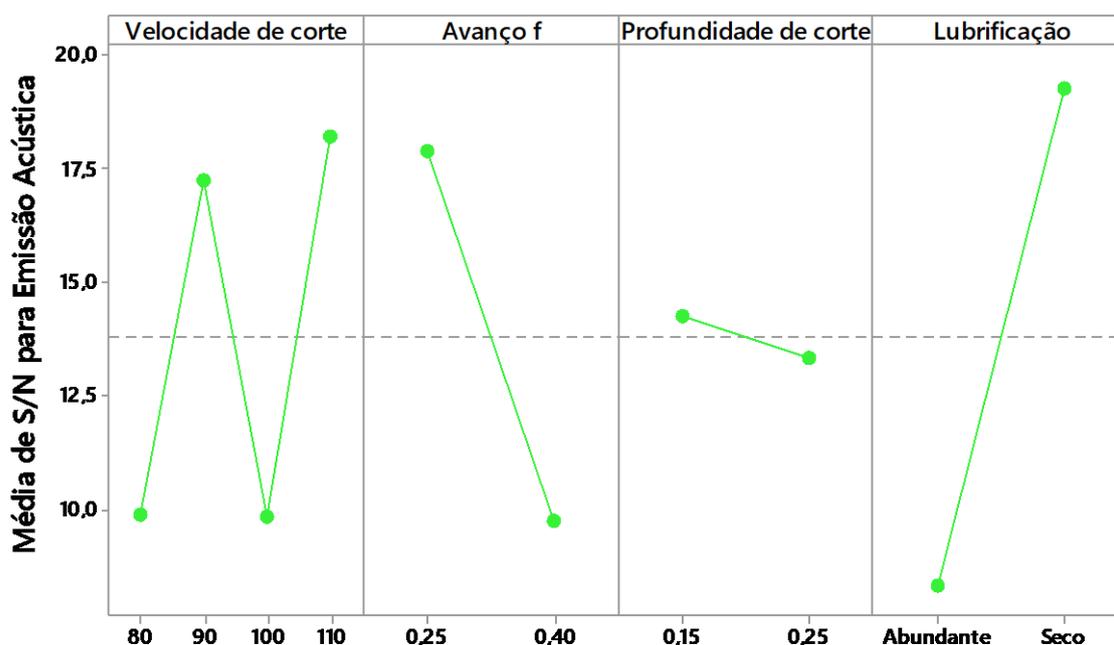
Fonte: Próprio autor.

Os fatores que possuem efeitos significativos dentro dos valores de emissão acústica são tipo de lubrificação (65,23%), velocidade de corte (15,39%), avanço (18,99%) e profundidade de usinagem (0,29%).

Não houve uma tendência clara com relação ao comportamento da emissão acústica em relação à velocidade de corte. Entre os valores testados de avanço e profundidade de usinagem, houve a tendência de aumento do sinal de emissão acústica e na usinagem a seco foram obtidos os menores valores de emissão.

Para verificação do processo com relação a variabilidade do sinal de emissão acústica, foram calculados as razões sinal-ruído. A análise de média pode ser encontrada na Figura 26.

Figura 26 - Análise de médias (ANOM) para η do sinal de emissão acústica.



Signal-to-noise: Menor é melhor

Fonte: Próprio autor.

Os níveis dos fatores que resultaram na menor variação da resposta emissão acústica são $v_c = 110$ m/min, $f = 0,25$ mm/rev, $a_p = 0,15$ mm e usinagem a seco.

A realização do Teste de normalidade Anderson-Darling revelou que os dados de η para emissão acústica não possuem distribuição normal (P-value < 0,005), sendo necessária a transformação dos dados. A transformação de Johnson para este conjunto de dados é dada pela Equação 20, calculada pelo software Minitab.

$$\eta_{normalizada} = -1,33002 + 0,505881 \cdot \sinh^{-1}[(\eta - 7,96860)/0,201022] \quad (20)$$

Os valores transformados da razão sinal-ruído foram então submetidos à análise de variância. Esses valores, após a transformação de Johnson, possuem distribuição normal de acordo com um novo teste de Anderson-Darling (P-value = 0,507). A ANOVA dos dados transformados pode ser vista na Tabela 22.

Tabela 22 - Análise de variância dos valores de S/N para emissão acústica.

Fonte	GL	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
Velocidade de corte	3	0,3834	0,3834	0,1278	0,82	0,649	5,29
Avanço f	1	1,0045	1,0045	1,0045	6,47	0,239	13,86
profundidade de usinagem	1	0,2466	0,2466	0,2466	1,59	0,427	3,40
Lubrificação	1	5,4573	5,4573	5,4573	35,12	0,106	75,30
Erro residual	1	0,1554	0,1554	0,1554			2,14
Total	7	7,2472					

Fonte: Próprio autor.

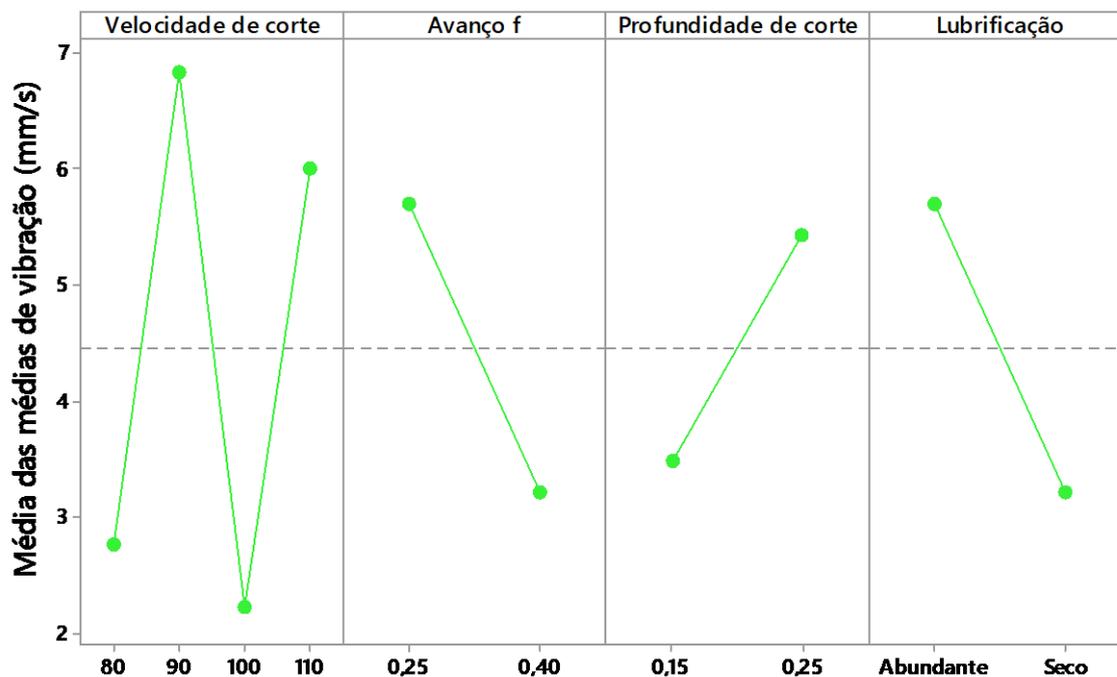
Os fatores que possuem efeitos significativos para a variação do processo com relação a emissão acústica são, em ordem decrescente de contribuição, estratégia de lubrificação (75,3%) e avanço (13,86%).

4.2.5 Vibração

Na Figura 27 encontram-se os valores médios de vibração obtidos na usinagem com a pastilha de metal duro revestida por PVD.

Os menores valores de vibração foram obtidos quando ocorreu o torneamento com $v_c = 100$ m/min, $f = 0,40$ mm/rev, $a_p = 0,15$ mm e usinagem a seco. A média das médias de vibração foi de 4,462 mm/s. Foi então realizada a análise de variância para os valores de vibração, presentes na Tabela 23.

Figura 27 - Análise de média (ANOM) para vibração.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 23 - ANOVA para os valores médios de vibração.

Fonte	GL	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
Velocidade de corte	3	31,594	31,594	10,531	2,80	0,408	46,98
Avanço f	1	12,184	12,184	12,184	3,24	0,323	18,11
profundidade de usinagem	1	7,449	7,449	7,449	1,98	0,393	11,08
Lubrificação	1	12,264	12,264	12,264	3,26	0,322	18,24
Erro residual	1	3,762	3,762	3,762			5,59
Total	7	67,254					

Dados normais (Teste de normalidade Anderson-Darling P-value=0,067).

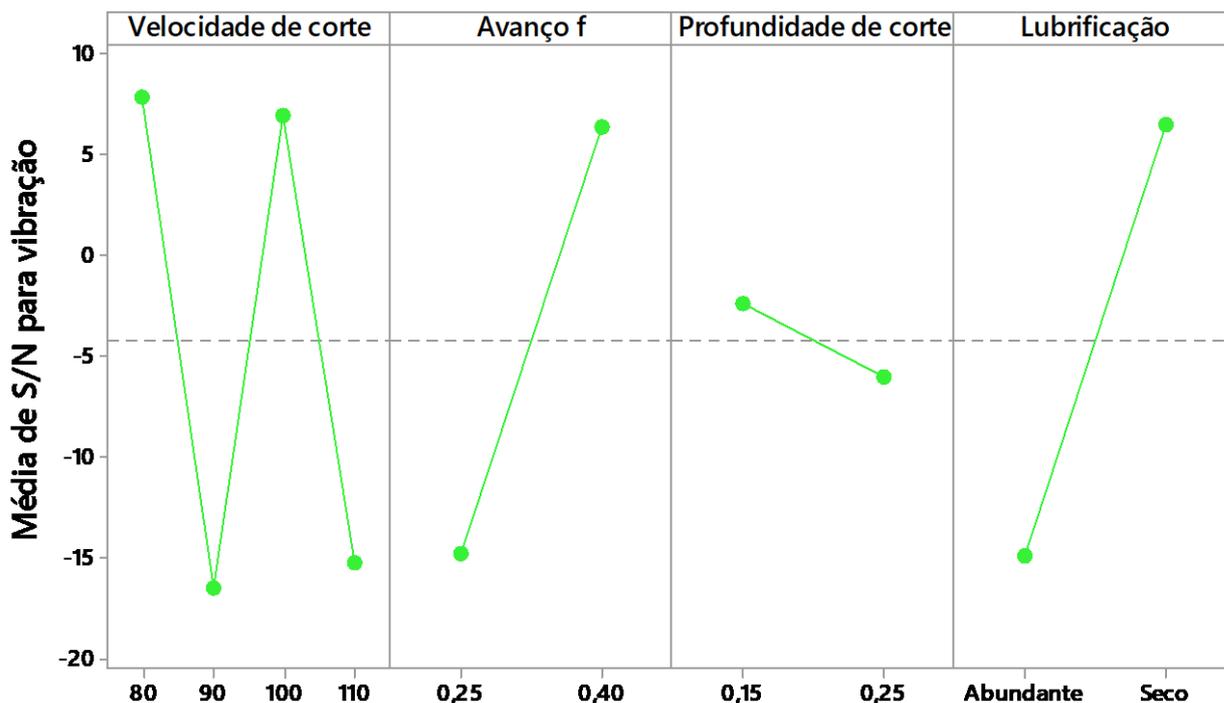
Fonte: Próprio autor.

Os resultados da ANOVA indicam que os parâmetros de corte que possuem efeitos significativos, em ordem decrescente de contribuição, sobre os valores de vibração são velocidade de corte (46,98%), tipo de lubrificação (18,24%) e avanço (18,11%).

Como ocorrido para emissão acústica, não houve uma tendência clara da relação entre vibração e velocidade de corte. Dentro dos valores testados, o aumento do avanço resultou em menores valores de vibração e o aumento de a_p resultou em maiores valores de vibração.

Na Figura 28 se encontram os valores da ANOM para a razão sinal-ruído da vibração.

Figura 28 - ANOM para a razão sinal-ruído de vibração.



Signal-to-noise: Menor é melhor

Fonte: Próprio autor.

Para a menor variabilidade do processo com relação à vibração, a combinação dos parâmetros de corte deve ser $v_c = 80$ m/min, $f = 0,4$ mm/rev, $a_p = 0,15$ mm e usinagem a seco.

Quando os dados de S/N foram submetidos ao teste de normalidade constatou-se que eles não apresentavam distribuição normal (Anderson-Darling P-value < 0,005). Realizou-se então a transformação de Johnson para normalização dos dados através da Equação 21. A transformação foi realizada pelo software Minitab.

$$\eta_{normalizado} = -0,482274 + 0,385977 * \text{Asinh}((\eta + 14,9156)/0,531772) \quad (21)$$

Com os dados de η normalizados, realizou-se a análise de variância dos dados de razão sinal-ruído para vibração. A ANOVA está presente na Tabela 24.

Tabela 24 - Análise de variância dos dados normalizados de η para vibração.

Fonte	GL	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
Velocidade de corte	3	4,0237	4,0237	1,3412	1,98	0,471	44,70
Avanço f	1	0,9598	0,9598	0,9598	1,42	0,444	10,66
profundidade de usinagem	1	1,8636	1,8636	1,8636	2,76	0,345	20,71
Lubrificação	1	1,4770	1,4770	1,4770	2,19	0,379	16,41
Erro residual	1	0,6759	0,6759	0,6759			7,51
Total	7	9,0000					

Dados normais (Teste de Anderson-Darling P-value = 0,541).

Fonte: Próprio autor.

Os efeitos de profundidade de usinagem (20,71%) e tipo de lubrificação (16,41%) não são tão pequenos para serem ignorados, pois o valor de F é superior a 2, o que indica que seus efeitos são pelo menos duas vezes maiores que os erros residuais. O restante dos parâmetros de corte não possuem efeitos significativos sobre a variabilidade do processo avaliando-se a vibração.

4.2.6 Desgastes das ferramentas e cavacos

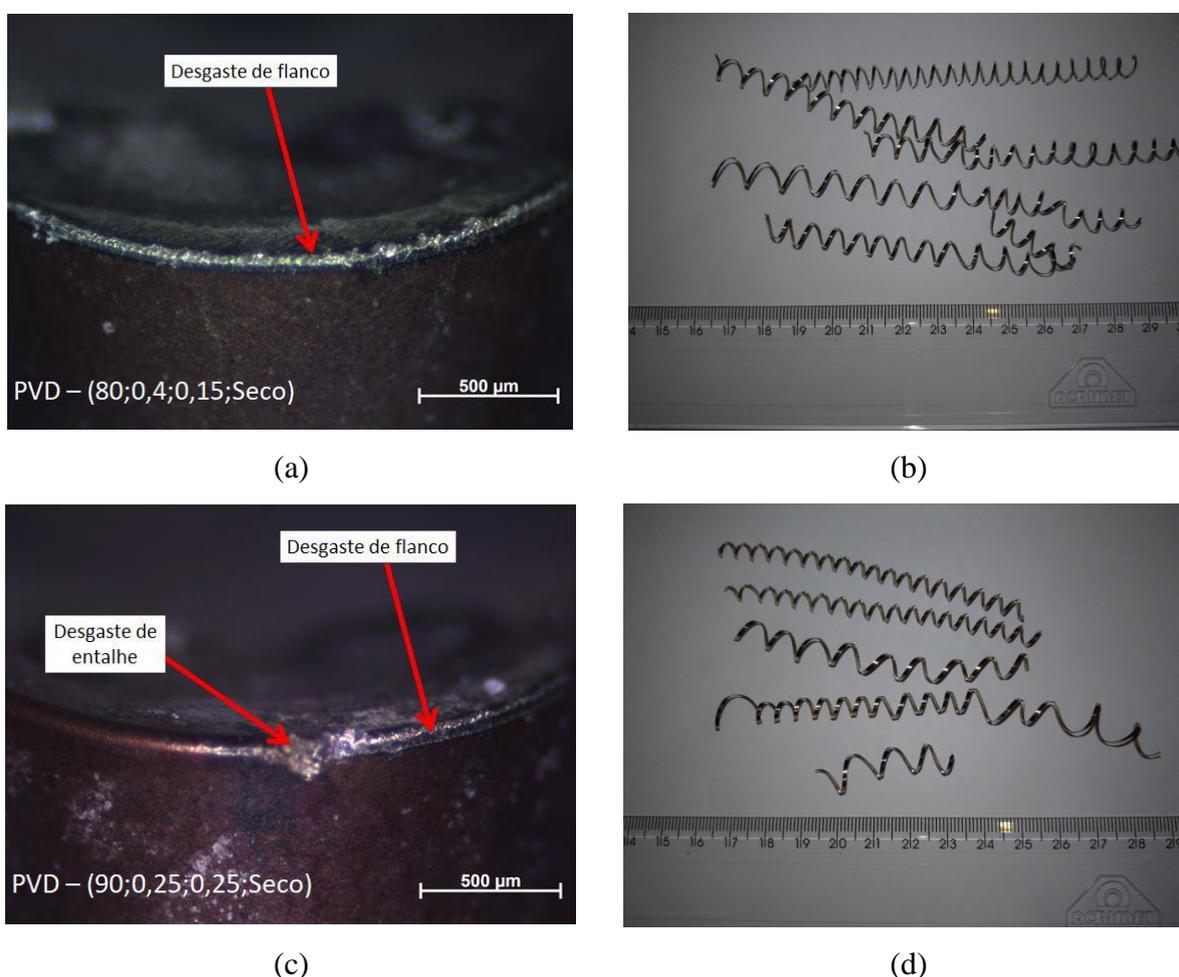
Nas Figura 29 e 30 são encontradas as arestas das ferramentas de metal duro revestidos pelo método PVD juntamente com os cavacos gerados durante o torneamento. Os cavacos adjacentes as arestas de corte nas figuras são os obtidos durante o torneamento com os parâmetros de corte para aquela aresta.

Os desgastes mais comuns nas ferramentas de metal duro PVD foram o desgaste de flanco e desgaste de entalhe. Também foi possível verificar um desgaste abrasivo grande na superfície de saída do cavaco. Foram obtidos cavacos de cisalhamento, onde há a sobreposição de lamelas, com formato, de acordo com a norma ISO 3695:1993, helicoidal tipo arruela curtos e longos.

4.2.7 Análise relacional cinza e obtenção para as condições do teste de vida

A análise da usinagem com o método de Taguchi, através das ANOVAS, ANOMS e razão sinal-ruído, encontrou a condição de corte otimizada para cada resposta analisada na usinagem com a ferramenta de metal duro recoberta por Ti-Al-Si-N pelo processo PVD. Esses resultados estão resumidos na Tabela 25. Nessa tabela são apresentados os níveis dos parâmetros recomendados para otimizar cada resposta para os valores médios. Também é possível verificar a contribuição de cada fator e a tendência de aumento ou diminuição da resposta com a variação do nível. Os fatores, ou seja os parâmetros de corte, estão nas linhas da tabela, enquanto nas colunas encontram-se as respostas analisadas.

Figura 29 – (a) e (c) Arestas de corte das ferramentas de metal duro PVD; (b) e (d) Cavacos gerados na usinagem do VAT 32[®].

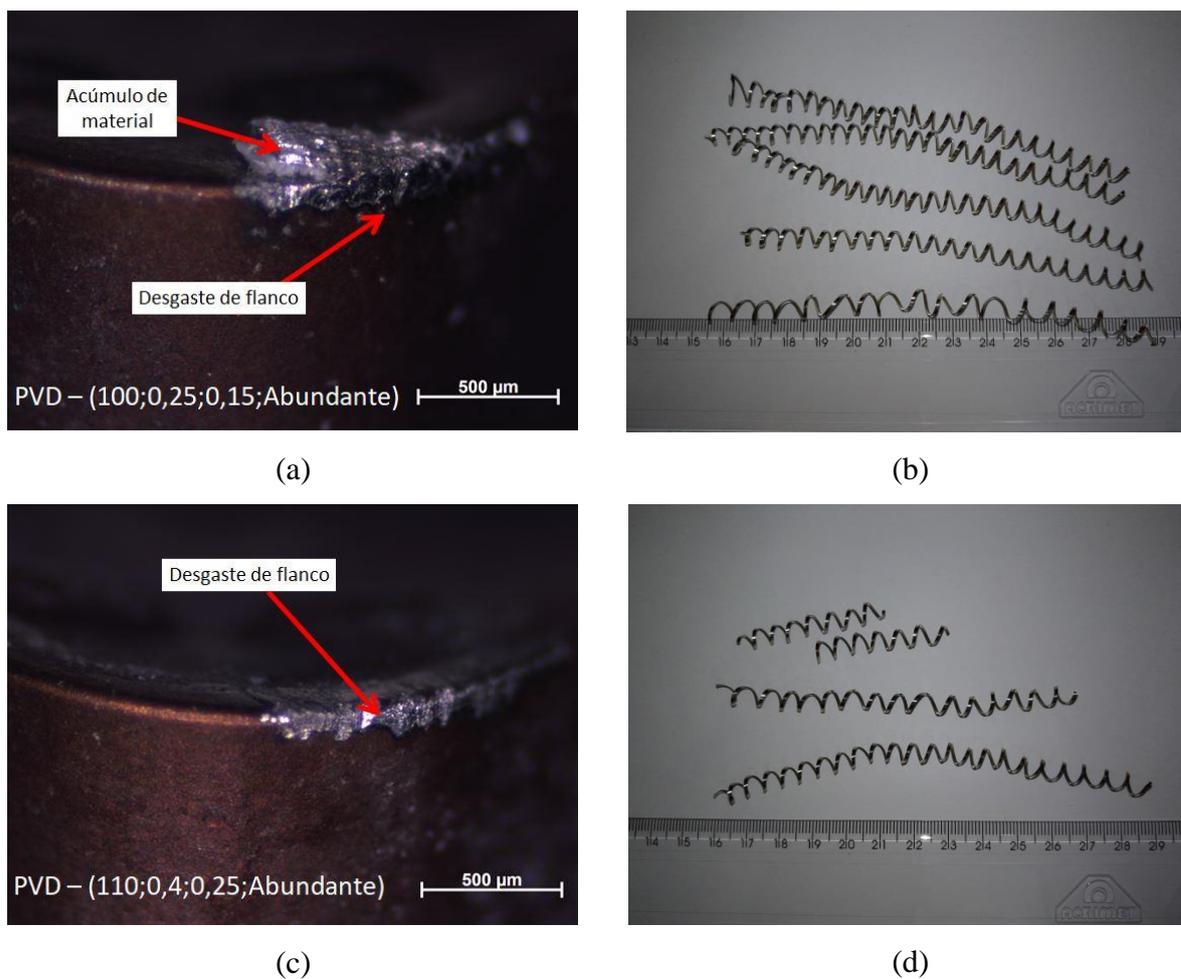


Fonte: Próprio autor.

Ainda na Tabela 25, analisando-se a coluna “Potência de usinagem” tem-se que o valor médio desta resposta no torneamento com a ferramenta PVD foi de 1955,8 W, que a velocidade de corte recomendada para o menor valor de potência é de 110 m/min, que o

avanço não é significativo, que a profundidade recomendada é de 0,15 mm e que recomenda-se o uso de fluido de corte em abundância para a obtenção dos menores valores da variável resposta.

Figura 30 – (a) e (c) Arestas de corte das ferramentas de metal duro PVD; (b) e (d) Cavacos gerados na usinagem do VAT 32[®].



Fonte: Próprio autor.

A Tabela 26 é similar à Tabela 25, com a diferença de que em vez da otimização ser com relação aos valores médios das respostas, tem-se a otimização para os valores da razão sinal-ruído, otimizando o processo para o ponto de menor variabilidade das respostas.

Pela Tabela 26, a configuração experimental de menor variabilidade para potência de usinagem, coluna “Potência de usinagem”, é $v_c = 110$ m/min, $f = 0,25$ mm/rev, $a_p = 0,15$ mm com uso de fluido de corte em abundância.

Tabela 25 - Valores ótimos dos parâmetros de corte para o torneamento do VAT 32[®] com ferramenta de metal duro revestida por Ti-Al-Si-N pelo processo PVD para os valores médios das respostas.

Fator	Respostas					
	Potência de usinagem	Vb.1000/Lc	R _a	R _t	Emissão Acústica	Vibração
Média	1955,8 W	6,222 m/m	2,941 µm	12,215 µm	0,2705 V RMS	4,462 mm/s
v _c (m/min)	110 (14,62%)	90 (17,64%)	NS	NS	110 (15,39%)	100 (46,98%)
f (mm/rev)	NS	0,25 (69,48%)↗	0,25 (92,6%)↗	0,25 (92,93%)↗	0,25 (18,99%)↗	0,4 (18,11%)↗
a _p (mm)	0,15 (51,89%)↗	NS	NS	NS	0,15 (0,29%)↗	0,15 (18,24%)↘
Lubrificação	Abundante (32,99%)	Seco (10,42%)	NS	NS	Seco (65,23%)	NS

NS → Efeito não significativo; Valores entre parênteses correspondem à contribuição do fator experimental (linha) na resposta (coluna); ↗ → Tendência de aumento da resposta com o aumento do parâmetro de corte; ↘ → Tendência de diminuição da resposta com o aumento do parâmetro de corte.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 26 - Valores otimizados dos parâmetros de corte para o torneamento do VAT 32[®] com ferramenta de metal duro revestida por Ti-Al-Si-N pelo processo PVD com relação aos valores de η .

Fator	Respostas					
	Potência de usinagem	Vb.1000/Lc	R _a	R _t	Emissão Acústica	Vibração
v _c (m/min)	110 (10,86%)	90 (18,2%)	NS	110 (4,32%)	NS	NS
f (mm/rev)	0,25 (0,11%)	0,25 (66,46%)	0,25 (91,22%)	0,25 (93,62%)	0,25 (13,88%)	NS
a _p (mm)	0,15 (55,38%)	0,25 (1,76%)	NS	NS	0,NS	0,15 (20,71%)
Lubrificação	Abundante (33,63%)	Seco (26,01%)	NS	NS	Seco (75,30%)	Seco (16,41%)

Fonte: Próprio autor.

Nem todas as condições de otimização são iguais para todas os fatores de qualidade analisados. Um exemplo é de que se deseja-se otimizar o processo para obtenção da menor variação de potência de usinagem necessita-se utilizar $v_c = 110$ m/min, mas se o desejo é otimizar V_b/L_c a recomendação é o uso de $v_c = 90$ m/min. A aplicação do método de Grey-Taguchi objetivou o encontro de uma única condição otimizada capaz de obter as melhores respostas ao mesmo tempo. O método consiste em transformar um problema de múltiplas respostas (multiobjetivo) em um problema de uma única resposta a ser otimizada. Esse único fator a ser otimizado chama-se classificação relacional cinza (GRG) e sua obtenção será detalhada na sequência.

A realização da análise relacional cinza (GRA) levou em consideração os valores médios das respostas potência de usinagem, rugosidade R_a e R_t , V_b/L_c , emissão acústica e vibração. A primeira etapa foi utilizar a Equação 10 para a normalização das respostas analisadas. Todas as respostas foram classificadas como do tipo “menor é melhor” e seus valores normalizados podem ser encontrados na Tabela 27. Esta etapa também é chamada de geração relacional cinza (*Grey Relational Generation*).

Tabela 27 – Geração relacional cinza, normalização das variáveis respostas para a ferramenta de metal duro PVD.

Experimento	$X_i^*(k)$					
	R_a	R_t	$V_b.1000/L_c$	Potência	Emissão Acústica	Vibração
1	1,0000	0,9876	0,8760	0,2213	0,9013	0,2314
2	0,5851	0,6830	1,0000	0,0000	0,9268	0,0000
3	0,9520	0,9658	0,8261	0,6995	0,9143	0,5015
4	0,9232	0,9563	0,6896	0,9021	1,0000	0,5928
5	0,8761	0,9122	0,6405	0,9835	0,1057	0,5322
6	0,0887	0,1697	0,1760	0,6334	0,0287	0,2216
7	0,3792	0,4306	0,0000	0,7693	0,0000	0,1823
8	0,9355	0,8349	0,5145	0,6326	0,0862	0,4120
9	1,0119	0,8861	0,5287	0,7094	0,0709	0,4360
10	0,9341	0,7685	0,6944	1,0000	0,0771	0,5445
11	0,1256	0,2014	0,3667	0,9335	0,1108	0,5149
12	0,2712	0,2760	0,1801	0,7677	0,0761	0,4035
13	0,3566	0,4412	0,4644	0,3501	0,3424	0,9944
14	0,3648	0,2612	0,5370	0,3467	0,3369	0,9973
15	0,2814	0,2076	0,0707	0,7035	0,3522	1,0000
16	0,0000	0,0000	0,1269	0,7516	0,3633	0,9960

Fonte: Próprio autor.

A segunda etapa consistiu na obtenção das seqüências de desvio $\Delta_{0i}(k)$ através da Equação 13. Os valores obtidos podem ser vistos na Tabela 28.

Tabela 28 - Obtenção da seqüência de desvio $\Delta_{0i}(k)$ para os fatores de qualidade analisados.

Experimento	$\Delta_{0i}(k)$					
	R_a	R_t	Vb.1000/L _c	Potência	Emissão Acústica	Vibração
1	0,0119	0,0000	0,1240	0,7787	0,0987	0,7686
2	0,4267	0,3046	0,0000	1,0000	0,0732	1,0000
3	0,0598	0,0218	0,1739	0,3005	0,0857	0,4985
4	0,0887	0,0313	0,3104	0,0979	0,0000	0,4072
5	0,1358	0,0754	0,3595	0,0165	0,8943	0,4678
6	0,9232	0,8179	0,8240	0,3666	0,9713	0,7784
7	0,6327	0,5570	1,0000	0,2307	1,0000	0,8177
8	0,0763	0,1527	0,4855	0,3674	0,9138	0,5880
9	0,0000	0,1014	0,4713	0,2906	0,9291	0,5640
10	0,0778	0,2191	0,3056	0,0000	0,9229	0,4555
11	0,8863	0,7862	0,6333	0,0665	0,8892	0,4851
12	0,7407	0,7116	0,8199	0,2323	0,9239	0,5965
13	0,6553	0,5464	0,5356	0,6499	0,6576	0,0056
14	0,6470	0,7264	0,4630	0,6533	0,6631	0,0027
15	0,7305	0,7799	0,9293	0,2965	0,6478	0,0000
16	1,0119	0,9876	0,8731	0,2484	0,6367	0,0040

Fonte: Próprio autor.

A terceira etapa da análise relacional cinza (GRA) foi encontrar o coeficiente relacional cinza (*Grey relational Coefficient - GRC*) γ . A obtenção foi realizada pela Equação 14 e seus valores podem ser encontrados na Tabela 29.

Tabela 29 - Obtenção dos coeficientes relacionais cinzas (GRC) γ dos fatores de qualidade.

(continua)

Experimento	γ					
	R_a	R_t	Vb.1000/L _c	Potência	Emissão Acústica	Vibração
1	0,9770	1,0000	0,8012	0,3910	0,8351	0,3941
2	0,5425	0,6185	1,0000	0,3333	0,8724	0,3333
3	0,8942	0,9577	0,7419	0,6246	0,8536	0,5008
4	0,8508	0,9404	0,6170	0,8363	1,0000	0,5512
5	0,7884	0,8676	0,5817	0,9680	0,3586	0,5166

Tabela 29 - Obtenção dos coeficientes relacionais cinzas (GRC) γ dos fatores de qualidade.

(conclusão)

Experimento	γ					
	R _a	R _t	Vb.1000/L _c	Potência	Emissão Acústica	Vibração
6	0,3540	0,3765	0,3776	0,5770	0,3398	0,3911
7	0,4443	0,4699	0,3333	0,6843	0,3333	0,3795
8	0,8689	0,7638	0,5073	0,5765	0,3537	0,4596
9	1,0000	0,8296	0,5148	0,6324	0,3499	0,4699
10	0,8667	0,6927	0,6207	1,0000	0,3514	0,5233
11	0,3634	0,3858	0,4412	0,8826	0,3599	0,5076
12	0,4058	0,4097	0,3788	0,6828	0,3512	0,4560
13	0,4357	0,4747	0,4828	0,4348	0,4319	0,9890
14	0,4388	0,4047	0,5192	0,4335	0,4299	0,9946
15	0,4092	0,3877	0,3498	0,6278	0,4356	1,0000
16	0,3333	0,3333	0,3641	0,6681	0,4399	0,9920

Fonte: Próprio autor.

Com os valores de GRC, utilizou-se a Equação 15 para encontrar o valor da classificação relacional cinza (GRG). Os pesos utilizados para a análise dos fatores de qualidade foram peso 2 para as variáveis de rugosidade e potência de corte, e peso 1 para os demais parâmetros. Na Tabela 30 são encontrados os valores de GRG juntamente com classificação dos valores para a escolha dos parâmetros otimizados.

Tabela 30 - Valores da classificação relacional cinza (GRG) e classificação dos experimentos realizados.

(continua)

Experimento	Velocidade de corte v _c (m/min)	Avanço f (mm/rev)	Profundidade de usinagem a _p (mm)	Lubrificação	GRG	Classificação
1	90	0,25	0,25	Seco	0,7518	3
2	90	0,25	0,25	Seco	0,5771	8
3	110	0,25	0,15	Seco	0,7833	2
4	110	0,25	0,15	Seco	0,8248	1
5	100	0,25	0,15	Abundante	0,7450	4
6	110	0,4	0,25	Abundante	0,4137	16
7	110	0,4	0,25	Abundante	0,4715	14
8	80	0,25	0,25	Abundante	0,6377	7
9	80	0,25	0,25	Abundante	0,6954	6
10	100	0,25	0,15	Abundante	0,7349	5

Tabela 30 - Valores da classificação relacional cinza (GRG) e classificação dos experimentos realizados.

(conclusão)

Experimento	Velocidade de corte v_c (m/min)	Avanço f (mm/rev)	Profundidade de usinagem a_p (mm)	Lubrificação	GRG	Classificação
11	90	0,4	0,15	Abundante	0,5080	11
12	90	0,4	0,15	Abundante	0,4647	15
13	100	0,4	0,25	Seco	0,5105	10
14	100	0,4	0,25	Seco	0,4998	12
15	80	0,4	0,15	Seco	0,5150	9
16	80	0,4	0,15	Seco	0,4962	13

Fonte: Próprio autor.

A configuração dos parâmetros de corte encontrada para a obtenção das melhores respostas é com o maior valor de classificação relacional cinza (GRG). Quanto mais próximo o valor de GRG for de 1 (um), mais próximas as respostas estarão do valor considerado ideal para cada fator de qualidade analisado. No caso do torneamento da superliga VAT 32[®] com ferramenta de metal duro revestido por Ti-Al-Si-N pelo método PVD, as condições de corte são as utilizadas no experimento 4, $v_c = 110$ m/min, $f = 0,25$ mm/rev, $a_p = 0,15$ mm com usinagem a seco. Esses parâmetros foram então utilizados em um ensaio de vida para encontrar o comprimento de usinagem total até o fim da vida da ferramenta.

4.3 USINAGEM COM A FERRAMENTA DE METAL DURO REVESTIDA PELO PROCESSO CVD

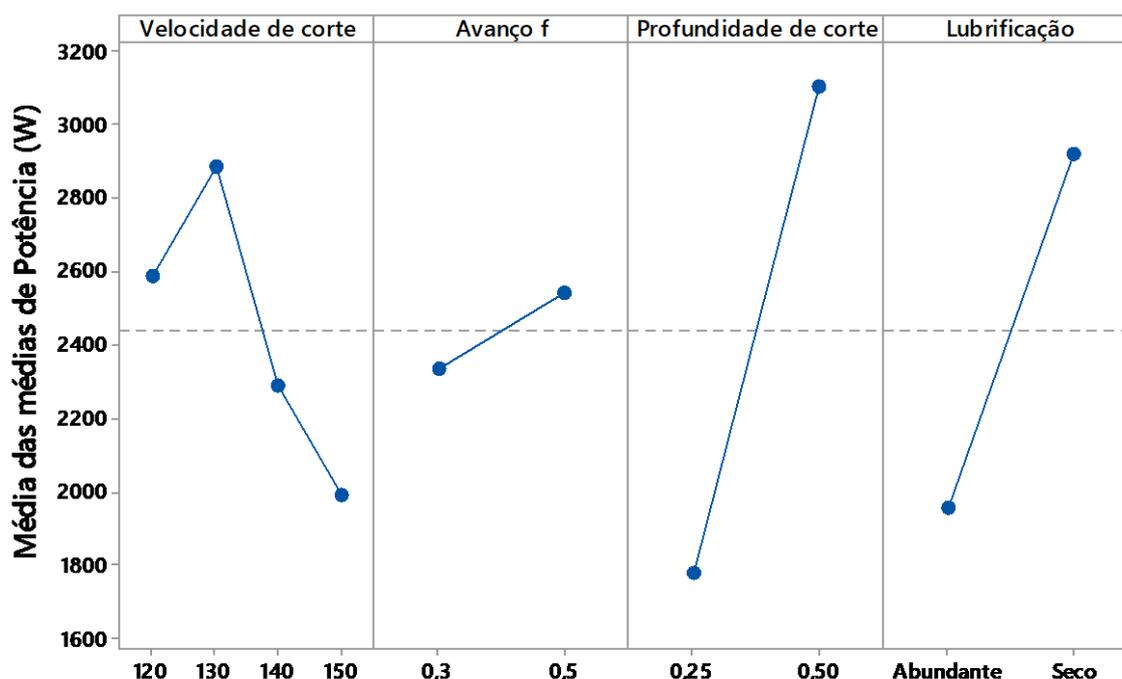
Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos para o torneamento da superliga VAT 32[®] utilizando a ferramenta de metal duro recoberta por Ti(C,N)+Al₂O₃ pelo método CVD, CNMG120412-MF5 com relação aos fatores de qualidade, também vistos na seção 4.2 deste trabalho. Um tópico sobre os desgastes encontrados e sobre os cavacos também está nesta seção. A análise relacional cinza (GRA) é outra mostrada na sequência, análise importante para a seleção das condições de corte que foram utilizadas nos ensaios de vida desta ferramenta de corte. Na última seção deste tópico também é encontrado um resumo do desempenho da ferramenta com relação às respostas.

Na Tabela 8 encontra-se a matriz experimental utilizada para os ensaios de torneamento com a utilização da pastilha de metal duro revestida por CVD. Esta tabela traz a sequência de experimentos realizados.

4.3.1 Potência de usinagem

Na Figura 31 são expostos os dados de potência de usinagem, obtidos durante o torneamento do VAT 32[®] com ferramenta de metal duro CVD.

Figura 31 – ANOM para os valores de potência de usinagem no torneamento do VAT 32[®] com pastilha de metal duro CVD.



Fonte: Próprio autor.

Os níveis dos fatores experimentais para os menores valores da variável resposta forma $v_c = 150$ m/min, $f = 0,3$ mm/rev, $a_p = 0,25$ mm com uso de fluido de corte em abundancia. A média das médias de potência de usinagem, representada pela linha tracejada da Figura 31, foi de 2447 W. Como complemento da análise de médias, na Tabela 31 são encontrados os valores da análise de variância para potência de usinagem com a ferramenta de metal duro revestida pelo método de deposição química de vapor.

Tabela 31 - Análise de variância para as médias de potência de usinagem com pastilha de metal duro CVD.

Fonte	GL	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
Velocidade de corte	3	885840	885840	295280	90,38	0,077	13,89%
Avanço f	1	88603	88603	88603	27,12	0,121	1,39%
profundidade de usinagem	1	3525753	3525753	3525753	1079,19	0,019	55,27%
Lubrificação	1	1875447	1875447	1875447	574,05	0,027	29,40%
Erro residual	1	3267	3267	3267			0,05
Total	7	6378911					

Dados normais (Teste de Anderson-Darling P-value = 0,400)

Fonte: Próprio autor.

A análise de variância revelou que os fatores de corte com efeitos significativos nos valores de potência de usinagem são profundidade de usinagem (55,27%), tipo de lubrificação (29,40%), velocidade de corte (13,89%) e avanço (1,39%). Essa análise dos efeitos significativos leva em conta os estudos de engenharia robusta.

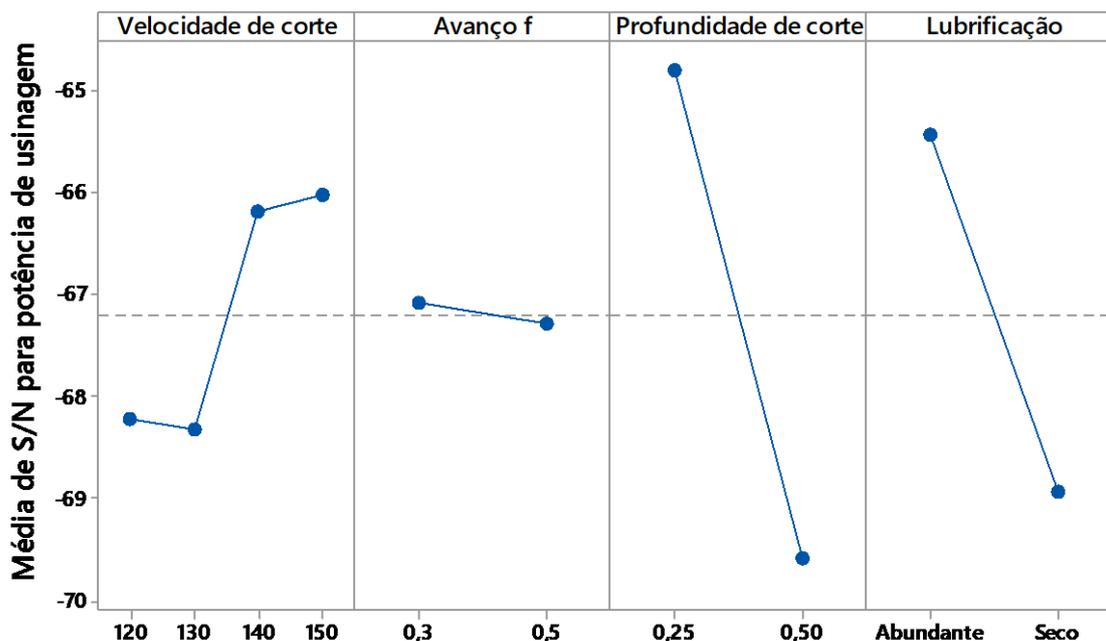
Quanto maior é a profundidade de usinagem, maior é o volume de material a ser removido, o que demanda maior energia para o rompimento das ligações durante a formação do cavaco. No caso da usinagem com fluido ocorreu que menores potências de corte foram obtidas devido a diminuição do atrito entre cavaco-ferramenta e peça-ferramenta, o que diminui a perda de energia por este mecanismo, ocasionando menores potências de usinagem. O comportamento da potência de usinagem com relação a velocidade de corte entre 120 e 130 m/min ocorreu devido ao aparecimento de maior desgaste de entalhe da ferramenta e de desgaste da superfície de saída do cavaco na ferramenta, o que modificou a geometria da ferramenta alterando-se os esforços de corte e, conseqüentemente, a potência requerida. Maiores potências de usinagem eram esperados para um aumento no avanço da ferramenta, pois, de acordo com Angappan et al. (2017), maiores esforços são necessários devido a uma maior quantidade de material em contato com a ferramenta de corte.

Na Figura 32 é apresentada a análise de média para os valores da razão sinal-ruído η do método de Taguchi para a variável resposta potência de usinagem.

Mesmo se a característica de qualidade for do tipo “menor é melhor”, os níveis dos fatores que determinam onde o processo teve menor variabilidade são definidos pelos maiores

valores de η . Desta forma, para o torneamento com ferramenta de metal duro revestido por CVD, a combinação de menor variabilidade do processo é $v_c = 150$ m/min, $f = 0,3$ mm/rev, $a_p = 0,25$ mm com uso de fluido em abundância. Com o uso destes parâmetros de corte serão otimizadas tanto a média de potência como a variabilidade do processo. Presente na Tabela 32 estão os valores obtidos na análise de variância para S/N de potência de corte.

Figura 32 - ANOM para os valores de η da variável resposta potência de usinagem.



Signal-to-noise: Menor é melhor

Fonte: Próprio autor.

Tabela 32 - ANOVA para os valores da razão sinal-ruído para potência de usinagem.

Fonte	GL	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
Velocidade de corte	3	9,4366	9,4366	3,1455	5,03	0,314	11,72
Avanço f	1	0,0829	0,0829	0,0829	0,13	0,778	0,10
Prof. de usinagem	1	45,9012	45,9012	45,9012	73,41	0,074	57,02
Lubrificação	1	24,4570	24,4570	24,4570	39,12	0,101	30,38
Erro residual	1	0,6253	0,6253	0,6253			0,78
Total	7	80,5030					

Dados normais (Teste de Anderson-Darling P-value = 0,966).

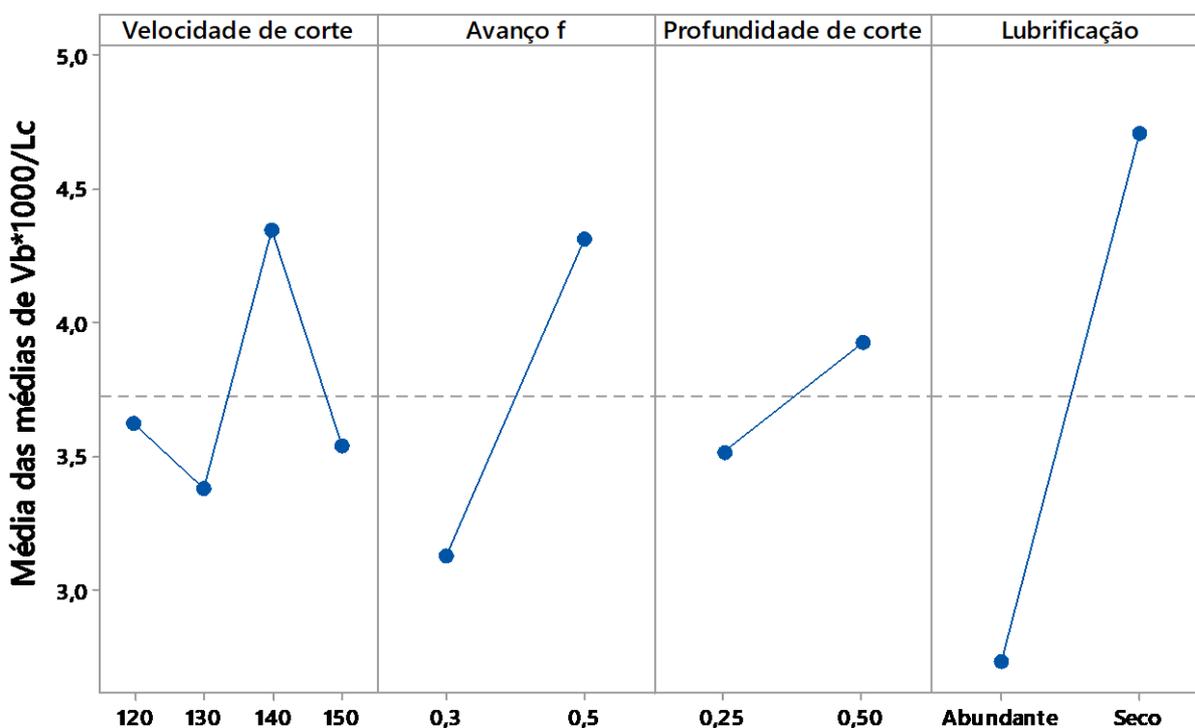
Fonte: Próprio autor.

Os fatores com influência significativa para a variabilidade da potência de usinagem foram, em ordem decrescente de contribuição, profundidade de usinagem (57,02%), tipo de lubrificação (30,38%) e velocidade de corte (11,72).

4.3.2 Desgaste de flanco/comprimento de corte L_c

A análise da média dos valores de $V_b \cdot 1000/L_c$ está apresentada na Figura 33.

Figura 33 - ANOM para os valores médios da relação $V_b \cdot 1000/L_c$ para a ferramenta de metal duro CVD.



Fonte: Próprio autor.

Os menores valores de desgaste de flanco por comprimento de corte foram obtidos para os níveis $v_c = 130$ m/min, $f = 0,3$ mm/rev, $a_p = 0,25$ mm e fluido em abundância. A média das médias para os valores de $V_b \cdot 1000/L_c$ foi de 3,725 m/m. Na Tabela 33 podem ser encontrados os valores da análise de variância para o $V_b \cdot 1000/L_c$.

Efeitos significativos sobre os valores de $V_b \cdot 1000/L_c$ foram encontrados para os parâmetros de corte tipo de lubrificação (64,39%), avanço (23,00%), velocidade de corte (9,15%) e profundidade de usinagem (2,82%), pois seus valores de F foram maiores que 4. A

otimização pelos valores de S/N de $V_b.1000/L_c$ trará a combinação dos parâmetros de corte que resultaram em menor variabilidade.

Tabela 33 - Análise de variância para as médias de $V_b.1000/L_c$.

Fonte	GL	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
Velocidade de corte	3	1,1107	1,1107	0,37023	4,82	0,320	9,15%
Avanço f	1	2,7935	2,7935	2,7935	36,38	0,105	23,00%
profundidade de usinagem	1	0,3425	0,3425	0,3425	4,46	0,282	2,82%
Lubrificação	1	7,8193	7,8193	7,8193	101,82	0,063	64,39%
Erro residual	1	0,0768	0,0768	0,0768			0,63%
Total	7	12,1428					

Dados normais (Teste de Anderson-Darling P-value = 0,052).

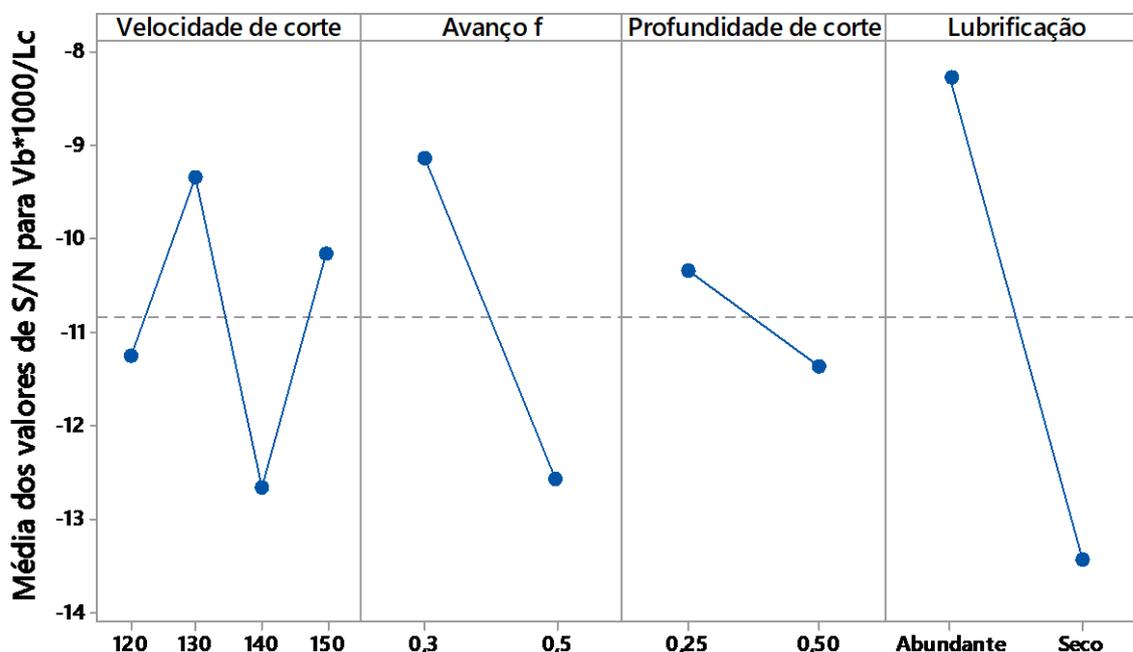
Fonte: Próprio autor.

O uso de fluidos de corte resultou em menores desgastes de flanco, o que corrobora a hipótese de menor atrito nas interfaces cavaco-ferramenta e peça-ferramenta devido à ação lubrificante da emulsão utilizada em abundância. Com o aumento do avanço houve aumento do desgaste o que é justificado pelo aumento da potência de usinagem, onde a ferramenta é exposta a maiores esforços, o que aumenta seu desgaste por abrasão. Bhatt et al. (2010), torneando Inconel 718 com velocidade de corte de 100 m/min, encontrou maiores vidas da ferramenta de metal duro recoberta por CVD para menores avanços, o que equivale a dizer que maiores desgastes foram obtidos com maiores avanços de ferramenta, o que também ocorreu durante a usinagem do VAT 32[®]. Houve a tendência de maiores desgastes na superfície de saída dos cavacos para maiores avanços da ferramenta o que indica mecanismo de desgaste de adesão dos cavacos à peça, como também mostrado por Akhtar et al. (2014).

Apesar da potência de corte ter sido maior para a velocidade de corte de 130 m/min, causada pela mudança da geometria da aresta devido ao desgaste de entalhe e da superfície de saída da ferramenta, o desgaste de flanco apresentou menor valor para a mesma velocidade, indicando que o mecanismo de desgaste por abrasão foi de menor intensidade comparado ao desgaste por oxidação, causador de entalhe. O aumento do desgaste com relação ao aumento de profundidade de usinagem também é justificado pela maior remoção de material pela ferramenta de corte.

A análise de médias para η de $V_b.1000/L_c$ está presente na Figura 34.

Figura 34 - Efeitos principais para os valores de S/N de $V_b.1000/L_c$.



Signal-to-noise: Menor é melhor

Fonte: Próprio autor.

A análise dos efeitos principais da razão sinal-ruído para o desgaste de flanco por comprimento usinado revelou que a menor variabilidade da variável resposta ocorre quando $v_c = 130$ m/min, $f = 0,3$ mm/rev, $a_p = 0,25$ mm com uso de fluido de corte em abundância. A análise de variância, presente na Tabela 34, indica quais fatores tiveram efeitos significativos para a variabilidade de V_b/L_c .

Todos os parâmetros de corte mostraram efeitos significativos na variabilidade do processo com relação aos valores de V_b/L_c obtidos. A contribuição de cada um, em ordem decrescente, foi de 58,06% para tipo de lubrificação, 26,01% para avanço, 13,61% para velocidade de corte e 2,3% para avanço.

4.3.3 Rugosidade R_a e R_t

Os valores do parâmetro de rugosidade R_a são apresentados na Figura 35, onde são encontrados os efeitos principais dos parâmetros de corte sobre o indicativo de qualidade superficial R_a .

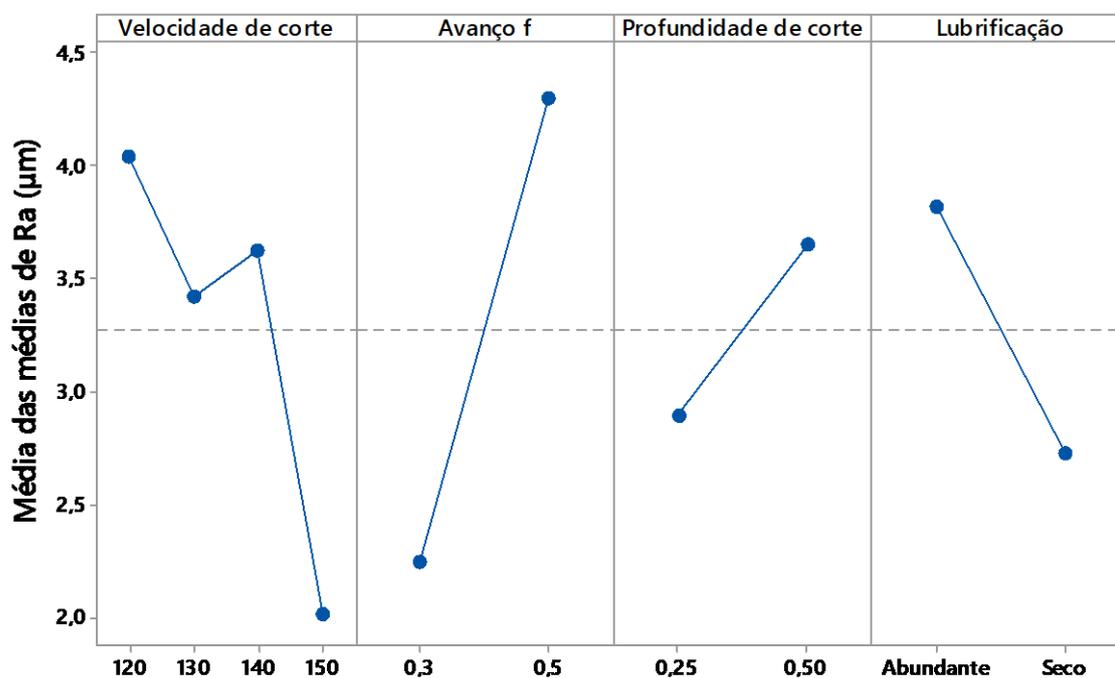
Tabela 34 - ANOVA para os valores de η relacionados a $V_b.1000/L_c$.

Fonte	GL	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
Velocidade de corte	3	12,4597	12,4597	4,1532	220,34	0,049	13,61
Avanço f	1	23,8025	23,8025	23,8025	1262,79	0,018	26,01
profundidade de usinagem	1	2,1056	2,1056	2,1056	111,71	0,060	2,3
Lubrificação	1	53,1316	53,1316	53,1316	2818,79	0,012	58,06
Erro residual	1	0,0188	0,0188	0,0188			0,02
Total	7	91,5183					

Dados normais (Teste de Anderson-Darling P-value = 0,087).

Fonte: Próprio autor.

Figura 35 - Efeitos Principais dos valores médios de rugosidade R_a para a ferramenta de metal duro CVD.



Fonte: Próprio autor.

A análise dos efeitos principais na média de R_a mostrou que os menores valores foram obtidos quando utilizado 150 m/min para v_c , 0,3 mm/rev para f , 0,25 mm para a_p com usinagem a seco. A média das médias dos valores de R_a foi de 3,274 μm .

Os dados de R_a foram submetidos ao teste de normalidade Anderson-Darling que rejeitou a hipótese nula ($P\text{-value} < 0,005$), o que mostra uma distribuição não normal do conjunto de dados. Para a realização da análise de variância foi necessário aplicar a transformação de Johnson para a normalização do conjunto dos valores de R_a no torneamento com pastilha de metal duro CVD. A Equação 22 foi obtida pelo software Minitab e então utilizada para a transformação dos dados de R_a .

$$Ra_{normalizado} = -0,644454 + 0,347002 \cdot \text{Asinh}((Ra - 2,12449)/0,0958844) \quad (22)$$

Foi então possível realizar a análise de variância para verificação da contribuição e significância dos efeitos principais dos parâmetros de corte sobre R_a . A ANOVA está presente na Tabela 35.

Tabela 35 - ANOVA para os valores normalizados de R_a .

Fonte	GL	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
Velocidade de corte	3	3,6750	3,6750	1,22500	6,22	0,014	42,24
Avanço f	1	1,5896	1,5896	1,58957	8,07	0,019	18,27
profundidade de usinagem	1	0,4328	0,4328	0,43281	2,20	0,172	4,97
Lubrificação	1	1,2317	1,2317	1,23174	6,26	0,034	14,16
Erro residual	1	1,7722	1,7722	0,19691			20,36
Total	7	8,7013					

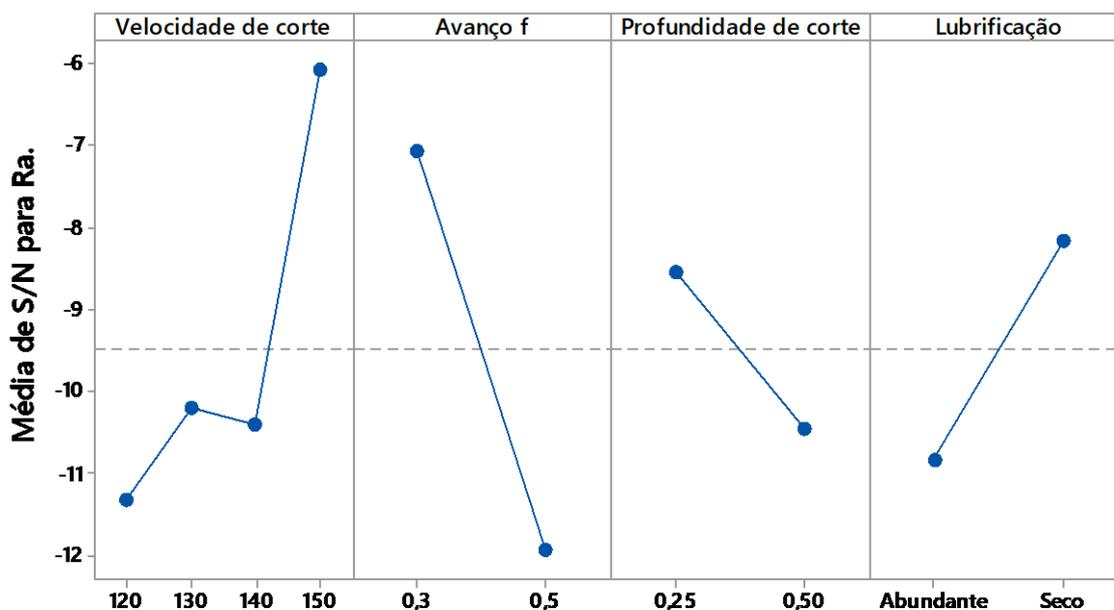
Dados normais (Teste de Anderson-Darling $P\text{-value} = 0,131$).

Fonte: Próprio autor.

Pela análise de variância, os fatores velocidade de corte (42,24%), avanço da ferramenta (18,27%) e o tipo de lubrificação (14,16%) tiveram efeitos significativos nos valores médios de R_a . O fator profundidade de usinagem (4,97%) teve um efeito que não é pequeno o suficiente para ser ignorado ($2 < F < 4$) e para os valores de R_a , a influência de ruídos do processo (erro residual) foi alta (20,36%). Neste caso, a análise pelos valores de sinal-ruído η

é altamente recomendada para se garantir um processo de qualidade mesmo com a presença de ruídos com efeito muito significativo no processo, um processo robusto. A Figura 36 traz os valores dos efeitos principais da razão sinal-ruído para R_a .

Figura 36 – ANOM dos efeitos principais para os valores η de R_a .



Signal-to-noise: Menor é melhor

Fonte: Próprio autor.

Os níveis dos fatores que resultaram em menor variabilidade dos valores de R_a no torneamento do VAT 32[®] com a ferramenta CVD foram $v_c = 150$ m/min, $f = 0,3$ mm/rev, $a_p = 0,25$ mm e usinagem a seco.

O valor P-value do teste de normalidade de Anderson-Darling para os valores η de R_a foi de 0,033 o que resulta na rejeição da hipótese nula de normalidade dos dados, ou seja, os valores da razão sinal-ruído de R_a não possuem distribuição normal. Realizou-se então a transformação de Johnson, realizada pela aplicação da Equação 23, para a normalização dos dados.

$$\eta_{normalizado} = -0,0356683 + 0,328786 \cdot \ln((\eta + 15,1987)/(-5,22218 - \eta)) \quad (23)$$

Em seguida, foi realizada a análise de variância, presente na Tabela 36.

Tabela 36 - ANOVA dos dados normalizados da razão sinal-ruído para a variável resposta R_a .

Fonte	GL	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
Velocidade de corte	3	3,2370	3,2370	1,0790	3,91	0,352	44,85
Avanço f	1	1,0903	1,0903	1,0903	3,96	0,297	15,10
profundidade de usinagem	1	1,0073	1,0073	1,0073	3,65	0,307	13,96
Lubrificação	1	1,6076	1,6076	1,6076	5,83	0,250	22,73
Erro residual	1	0,2756	0,2756	0,2756			3,82
Total	7	7,2178					

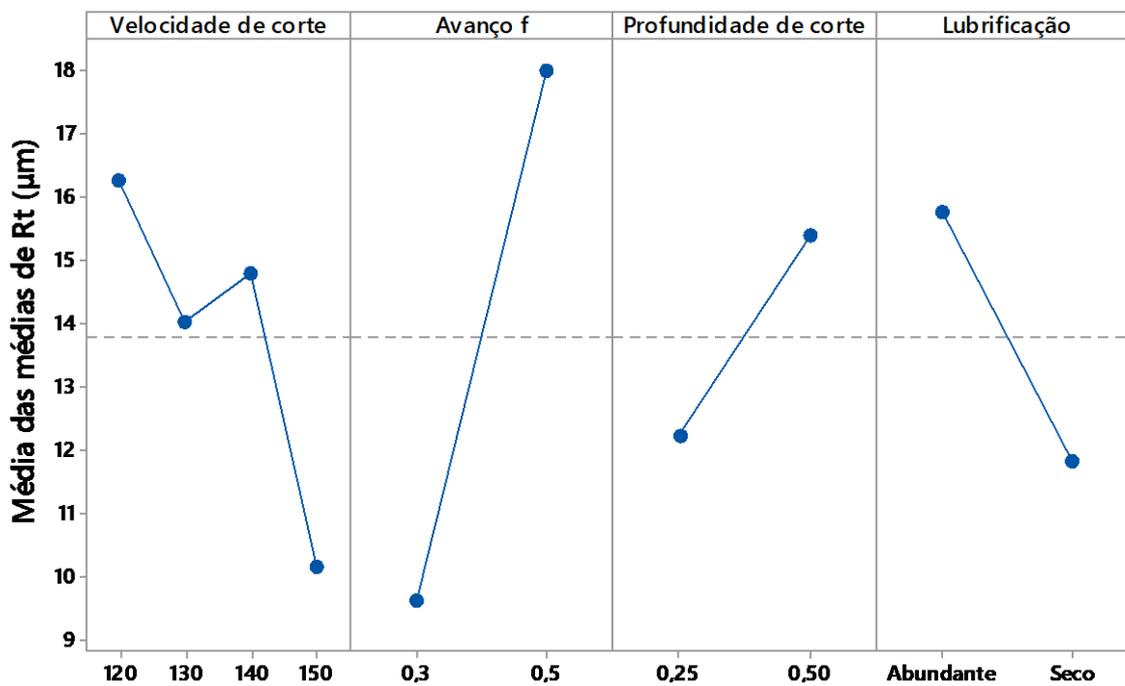
Dados normais (Teste de Anderson-Darling P-value = 0,406).

Fonte: Próprio autor.

O tipo de lubrificação mostrou um efeito significativo sobre a variabilidade de R_a no processo de torneamento com a pastilha de metal duro CVD. Os efeitos de velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem não são pequenos suficientemente para serem ignorados, do ponto de vista qualitativo de um processo robusto. Os ruídos se mostraram pouco influentes na variabilidade do processo com relação aos valores de R_a .

Thakur; Gangopadhyay; et al. (2014), trabalhando na usinagem de Inconel 825 com ferramenta de metal duro recoberta por TiN/TiCN/Al₂O₃/ZrCN pelo método CVD, encontraram uma tendência de rugosidade R_a maior em velocidades de corte maiores, variando de 50 a 120 m/min, justificada pelo aparecimento de aresta postiça de corte. A tendência encontrada na usinagem do VAT 32[®] foi de menores rugosidade R_a para maiores velocidades de corte, porém trabalhou-se com níveis acima de 120 m/min, o que pode ter inibido ou diminuído o aparecimento de APC nas ferramentas com o aumento da velocidade de corte, resultando em melhores acabamentos. Menores avanços resultaram em melhores superfícies acabadas seguindo o que a literatura afirma. A ausência de fluido de corte resultou em melhores acabamentos, o que é justificado pela alteração das condições dinâmicas de corte quando utilizando-se fluido em abundância o que causou maiores vibrações, conforme será visto no item 4.3.5, e rugosidades mais altas.

Na Figura 37 são encontrados os efeitos principais para os valores do parâmetro de rugosidade R_t .

Figura 37 - Efeitos principais para os valores médios de R_t .

Os menores valores de rugosidade R_t foram obtidos quando torneando com velocidade de corte de 150 m/min, avanço de 0,3 mm/rev, profundidade de usinagem de 0,25 mm em usinagem a seco. A média das médias dos valores de R_t foi de 13,806 μm . O teste de normalidade de Anderson-Darling revelou que os dados não possuem distribuição normal ($P\text{-value} < 0,005$). Houve a tentativa de transformação dos dados para uma distribuição normal, porém nenhuma das transformações testadas, entre elas Box-Cox, Johnson, Weisbull, logarítmica, exponencial e logarítmica natural, se mostrou efetiva pra transformar os dados em uma distribuição normal. Desta maneira não foi possível realizar a análise de variância para a média dos dados de R_t . Uma alternativa encontrada foi a realização do teste de comparação de Tukey, com nível de confiança de 95 % ($\alpha=0,05$), para averiguar se as médias diferiam entre si entre os diferentes níveis dentro de um mesmo fator. O teste de Tukey é um teste que não consegue averiguar os efeitos principais e só foi realizado porque os dados de R_t eram não-normais e nenhuma tentativa de normalização resultou em êxito. Os dados obtidos podem ser encontrados na Tabela 37.

No teste de Tukey, diferentes letras da coluna grupo indicam que as médias do valor de R_t para aquele nível difere dos outros. Grupos com a mesma letra não possuem médias diferentes umas das outras. No caso apresentado, o único fator que mostrou diferentes médias com a alteração do nível foi o avanço.

Tabela 37 - Teste de Tukey para os fatores com relação a variável resposta R_t .

Fator	Nível	Média	Grupo
Velocidade de corte	120	16,25	A
	130	14,03	A
	140	14,79	A
	150	10,15	A
Avanço	0,3	9,633	A
	0,5	17,98	B
profundidade de usinagem	0,25	12,23	A
	0,5	15,38	A
Lubrificação	Abundante	15,77	A
	Seco	11,84	A

Fonte: Próprio autor.

Com as Equações 1 e 2, foram calculados os valores teóricos das rugosidade R_a e R_t , respectivamente. A comparação entre os valores teóricos e os obtidos experimentalmente é encontrada na Tabela 38.

Tabela 38 - Comparação entre as rugosidades teóricas e as obtidas experimentalmente no torneamento com a pastilha de metal duro CVD.

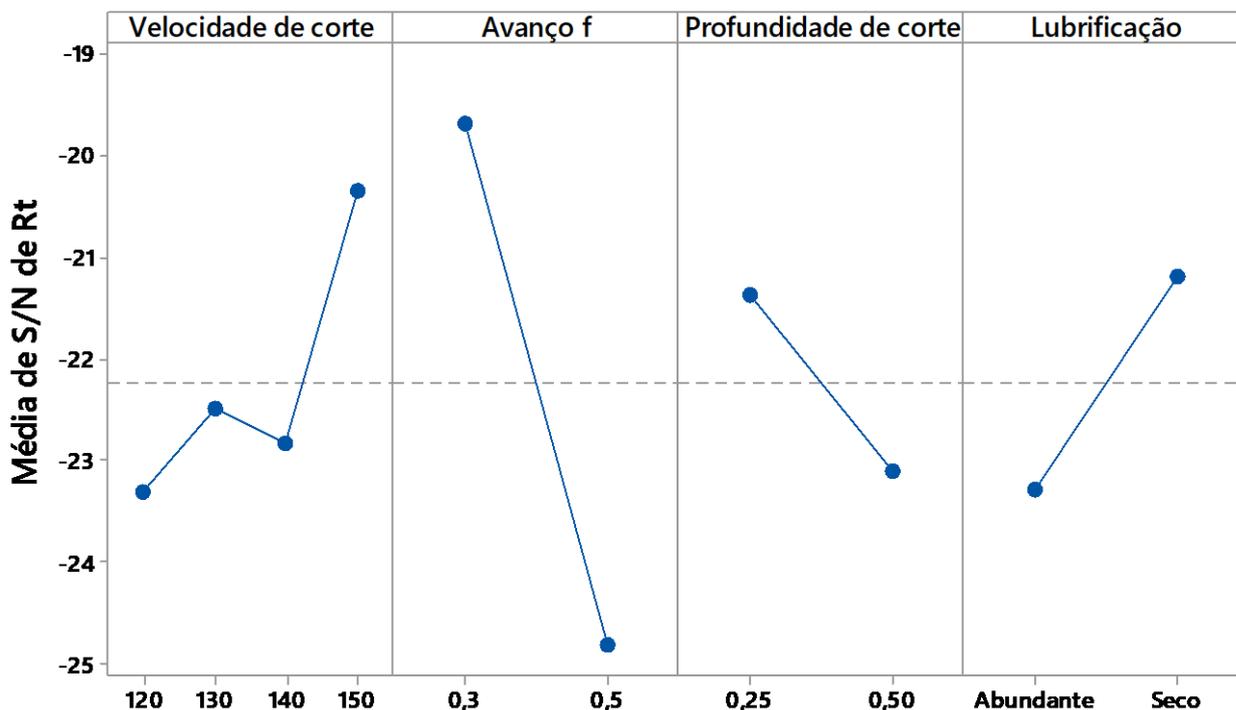
Avanço (mm/rev)	R_a		Desvio	R_t		Desvio
	Teórico	Experimental		Teórico	Experimental	
0,3	2,406 μm	2,250 μm	6,48%	9,375 μm	9,632 μm	10,38%
0,5	6,682 μm	4,297 μm	35,69%	26,04 μm	17,98 μm	30,95%

Fonte: Próprio autor.

Valores de avanço mais altos resultaram em maiores desvios entre as rugosidades teóricas e experimentais.

Na Figura 38 encontram-se os valores da razão sinal-ruído de R_t . Esses dados serão utilizados para encontrar a condição de corte de menor variabilidade com relação à resposta R_t .

A configuração de menor variabilidade do processo de torneamento da superliga VAT 32[®] com relação aos valores de R_t é $v_c = 150$ m/min, $f = 0,3$ mm/rev, $a_p = 0,25$ mm em usinagem a seco.

Figura 38 - Efeitos principais para a razão sinal-ruído de R_t .

Signal-to-noise: Menor é melhor

Fonte: Próprio autor.

No teste de Anderson-Darling os dados de η para os valores de R_t rejeitaram a hipótese nula de normalidade (P-Value = 0,02), isto quer dizer que os dados da razão sinal-ruído para R_t não são normais. Os dados então foram submetidos a transformação de Johnson, através da Equação 24, para normalizar os dados e possibilitar a realização da análise de variância.

$$\eta_{normalizado} = -0,231745 + 0,261921 \cdot \ln((\eta + 27,4132)/(-19,2397 - \eta)) \quad (24)$$

A análise de variância dos dados normalizados de η para R_t está apresentada na Tabela 39.

Os fatores com efeitos significativos para a variação do processo com relação à R_t são avanço (59,66%), lubrificação (19,93%) e profundidade de usinagem (16,32%).

4.3.4 Emissão Acústica

Os valores médios de emissão acústica obtidos durante o torneamento da liga com ferramenta de metal duro CVD são encontrados na análise de médias (ANOM) da Figura 39, onde também são possíveis de serem observados os efeitos principais dos parâmetros de corte.

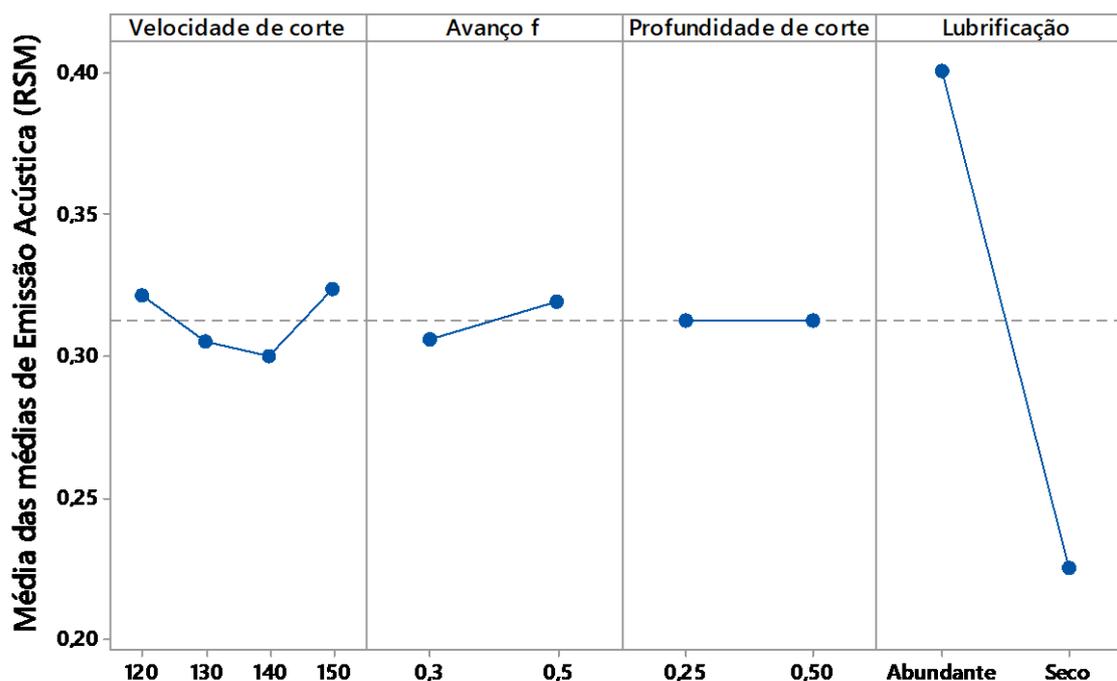
Tabela 39 - ANOVA para os dados normalizados da razão sinal-ruído para R_t .

Fonte	GL	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
Velocidade de corte	3	0,1208	0,1208	0,04025	0,30	0,834	1,94
Avanço f	1	3,7093	3,7093	3,7093	27,70	0,120	59,66
profundidade de usinagem	1	1,0147	1,0147	1,0147	7,58	0,222	16,32
Lubrificação	1	1,2390	1,2390	1,2390	9,25	0,202	19,93
Erro residual	1	0,1339	0,1339	0,1339			2,15
Total	7	6,2177					

Dados normais (Teste de Anderson-Darling P-value = 0,596).

Fonte: Próprio autor.

Figura 39 - ANOM com os efeitos principais na média dos valores de emissão acústica para a ferramenta de metal duro CVD.



Fonte: Próprio autor.

Os menores valores do sinal de emissão acústica foram obtidos para $v_c = 140$ m/min, $f = 0,3$ mm/rev, $a_p = 0,25$ mm em usinagem a seco. A média das médias dos valores de emissão acústica foi de 0,3126. Pelo gráfico da análise de médias, aparentemente, o tipo de lubrificação exerceu uma influência grande nos valores de emissão, porém este tipo de afirmativa só pode ser considerada com o acompanhamento da análise de variância.

No teste de Anderson-Darling de normalidade, houve a rejeição da hipótese nula ($P\text{-value} < 0,005$), o que equivale a dizer que os dados de emissão acústicas não possuem distribuição normal. A transformação de Johnson foi novamente utilizada para a normalização dos dados através da Equação 25.

$$EA_{normalizada} = -0,000274529 + 0,473065 \cdot \ln((EA - 0,199623)/(0,424438 - EA)) \quad (25)$$

Após a normalização dos dados de emissão acústica, realizou-se a análise de variância para os dados das médias de EA normalizados, presente na Tabela 40.

Tabela 40 - ANOVA para os dados normalizados de Emissão Acústica.

Fonte	GL	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
Velocidade de corte	3	4,2068	4,2068	1,4023	3,32	0,071	11,93
Avanço f	1	1,6536	1,6536	1,6536	3,91	0,079	4,69
profundidade de usinagem	1	0,0001	0,0001	0,0001	0,00	0,987	<0,01
Lubrificação	1	25,5918	25,5918	25,5918	60,52	0,000	75,58
Erro residual	1	3,8061	3,8061	3,8061			10,79
Total	7	35,2584					

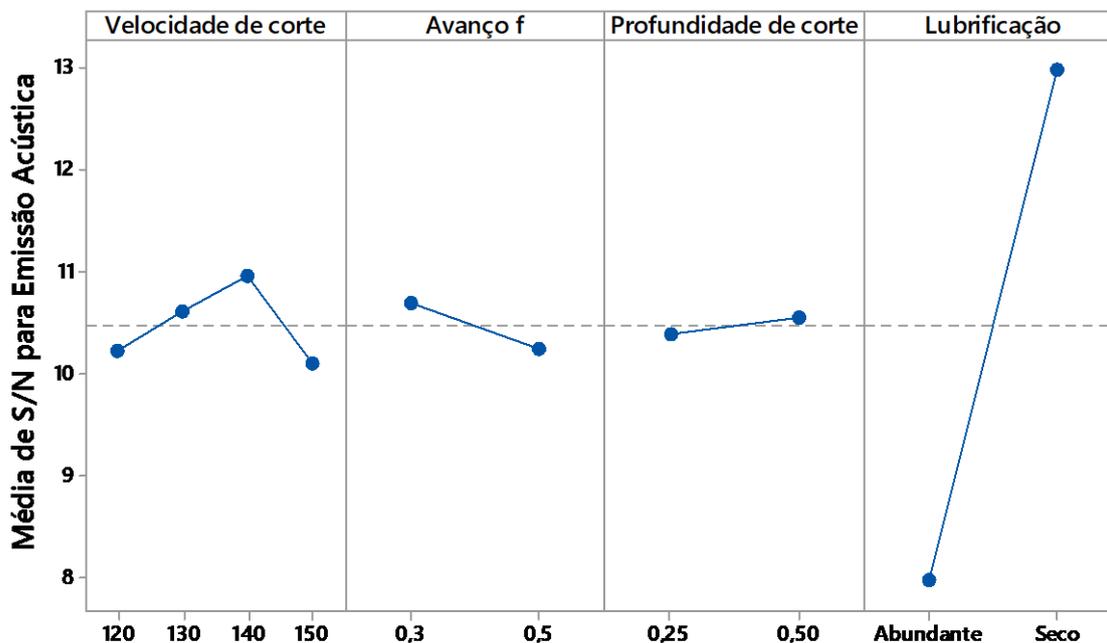
Dados normais (Teste de Anderson-Darling $P\text{-value} = 0,206$).

Fonte: Próprio autor.

Com a análise de variância é possível afirmar que o tipo de lubrificação (75,58%) teve efeitos significativos para os valores de emissão acústica. Os efeitos de velocidade de corte (11,93%) e de avanço não são pequenos o suficiente para serem desprezados. Já os ruídos do processo, representados pela fonte erro residual, se mostraram com um contribuição expressiva para os valores de emissão acústica.

Na Figura 40 encontra-se a análise de médias para os valores de S/N de emissão acústica.

Figura 40 - Efeitos principais para os valores da razão sinal-ruído de emissão acústica.



Signal-to-noise: Menor é melhor

Fonte: Próprio autor.

Os valores que otimizam o processo do ponto de vista da variabilidade do sinal emissão acústica são $v_c = 140$ m/min, $f = 0,3$ mm/rev, $a_p = 0,5$ mm em usinagem a seco. Comparando os valores com os obtidos na otimização da média de emissão acústica, houve uma diferença no nível de profundidade de usinagem, porém este fator não mostrou ser significativo na média de EA.

Os dados S/N de emissão acústica também não são dados com distribuição normal de acordo com teste de Anderson-Darling realizado (P-Value = 0,022). Fez-se então, para possibilitar a realização da análise de variância, a transformação de Johnson que normalizou o conjunto de dados pela Equação 26.

$$\eta_{normalizado} = 0,199736 + 0,2400269 \cdot \ln((\eta - 7,69435)/(13,9124 - \eta)) \quad (26)$$

Na Tabela 41 encontram-se a análise de variância dos dados da razão sinal-ruído para emissão acústica normalizada.

Tabela 41 – Análise de variância dos dados η de emissão acústica normalizados.

Fonte	GL	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
Velocidade de corte	3	1,35554	1,35554	0,45185	20,75	0,160	18,37
Avanço f	1	0,58035	0,58035	0,58035	26,66	0,122	7,86
profundidade de usinagem	1	0,02840	0,02840	0,02840	1,30	0,458	0,04
Lubrificação	1	5,39338	5,39338	5,39338	247,72	0,040	79,08
Erro residual	1	0,02177	0,02177	0,02177			0,03
Total	7	7,37944					

Dados normais (Teste de Anderson-Darling P-value = 0,206).

Fonte: Próprio autor.

Os valores da ANOVA demonstram que os fatores com efeitos significativos para a variabilidade do processo, analisando-se emissão acústica, são tipo de lubrificação (79,08%), velocidade de corte (18,37%) e avanço (7,86%).

4.3.5 Vibração

Na Figura 41 são encontrados os efeitos principais para os fatores com relação ao sinal de vibração adquirido durante os ensaios com a pastilha de metal duro revestida pelo método CVD.

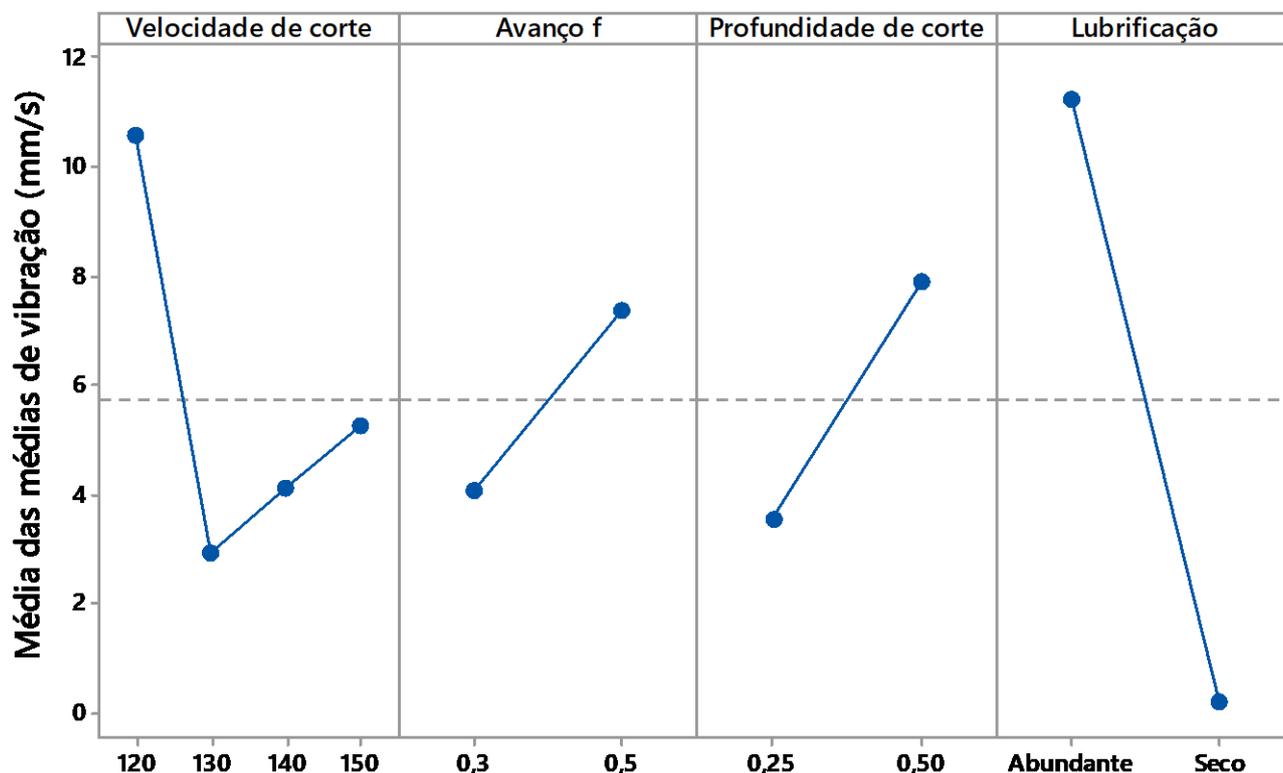
Os níveis dos fatores que apresentaram as menores médias do sinal de vibração foram $v_c = 130$ m/min, $f = 0,3$ mm/rev, $a_p = 0,25$ mm com usinagem a seco. A média dos valores médios de vibração foi de 5,720 mm/s.

Os dados de vibração não possuem distribuição normal, de acordo com o teste de Anderson-Darling (P-value < 0,005). Normalizou-se os dados das médias de vibração pela transformação de Johnson, utilizando-se a Equação 27.

$$V_{normalizada} = 0,894505 + 0,352527 \cdot \ln((V - 0,0469595)/(21,9235 - V)) \quad (27)$$

Após a normalização, realizou-se a análise de variância para os dados normalizados de vibração, que podem ser observados na Tabela 42.

Figura 41 - Efeitos principais para a média do sinal de vibração.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 42 - ANOVA dos dados normalizados das médias de vibração.

Fonte	GL	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
Velocidade de corte	3	3,3953	3,3953	1,1318	7,18	0,009	14,30
Avanço f	1	1,4909	1,4909	1,4909	9,45	0,013	6,28
profundidade de usinagem	1	0,1361	0,1361	0,1361	0,86	0,377	0,57
Lubrificação	1	17,3029	17,3029	17,3029	109,70	0,000	72,87
Erro residual	1	1,4196	1,4196	1,4196			5,97
Total	7	23,7448					

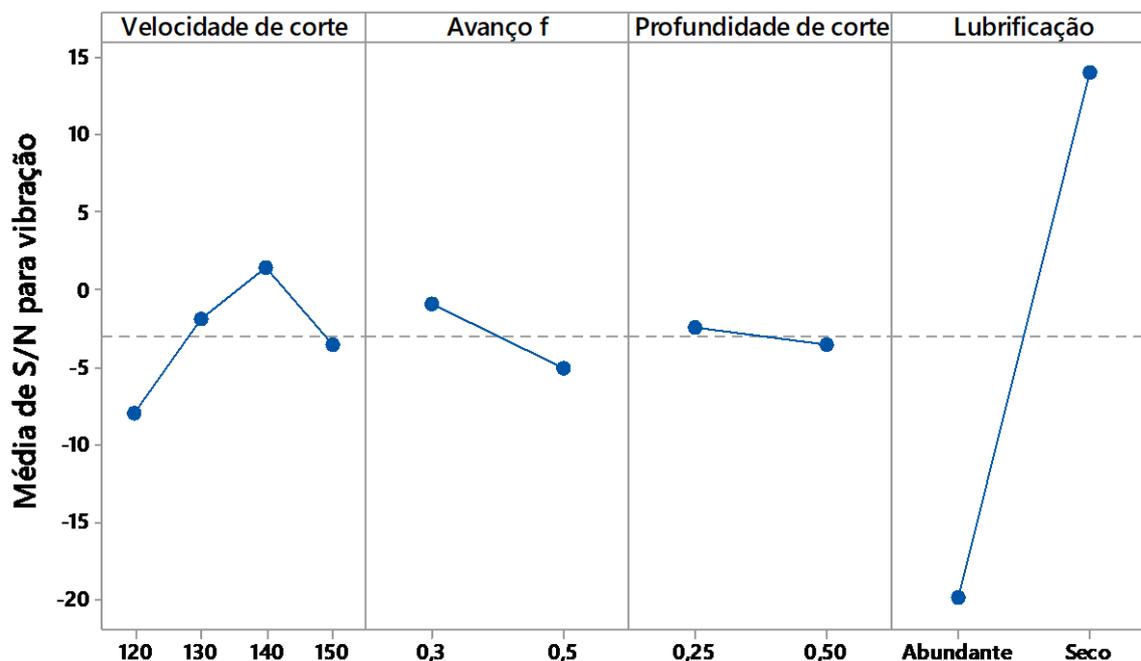
Dados normais (Teste de Anderson-Darling P-value = 0,203).

Fonte: Próprio autor.

Os valores de vibração sofrem influência significativa dos fatores tipo de lubrificação (72,87%), velocidade de corte (14,30%) e avanço (6,28%). Levantados os fatores que possuem efeitos na média dos valores de vibração, realizou-se a análise com relação à

variabilidade do processo. Para tanto, apresenta-se a Figura 42 com os valores dos efeitos principais de η . Os valores da razão sinal-ruído foram calculado pela Equação 9.

Figura 42 - Efeitos principais para os valores de η referentes a vibração do processo.



Signal-to-noise: Menor é melhor

Fonte: Próprio autor.

A análise dos efeitos principais de S/N para vibração permite concluir que os níveis aos quais o processo teve menor variação com relação a vibração foram $v_c = 140$ m/min, $f = 0,3$ mm/rev, $a_p = 0,25$ mm com usinagem a seco. Na Tabela 43 pode-se observar a análise de variância dos efeitos principais dos fatores na razão sinal-ruído de vibração.

O tipo de lubrificação (94,24%) é o fator com maior efeito em relação à variabilidade da vibração no processo de torneamento analisado. Os fatores velocidade de corte (3,78%) e avanço, por possuírem um valor de F maior que dois e menor que quatro, possuem efeitos que não são pequenos o suficiente para serem desconsiderados.

4.3.6 Desgastes das ferramentas e geometria dos cavacos

Nas Figuras 43 e 44 são mostradas as arestas das ferramentas de metal duro revestidos de $Ti(C,N)+Al_2O_3$ pelo método CVD juntamente com os cavacos gerados durante o

torneamento. Os cavacos adjacentes às arestas de corte nas figuras são os obtidos durante o torneamento com os parâmetros de corte para aquela aresta.

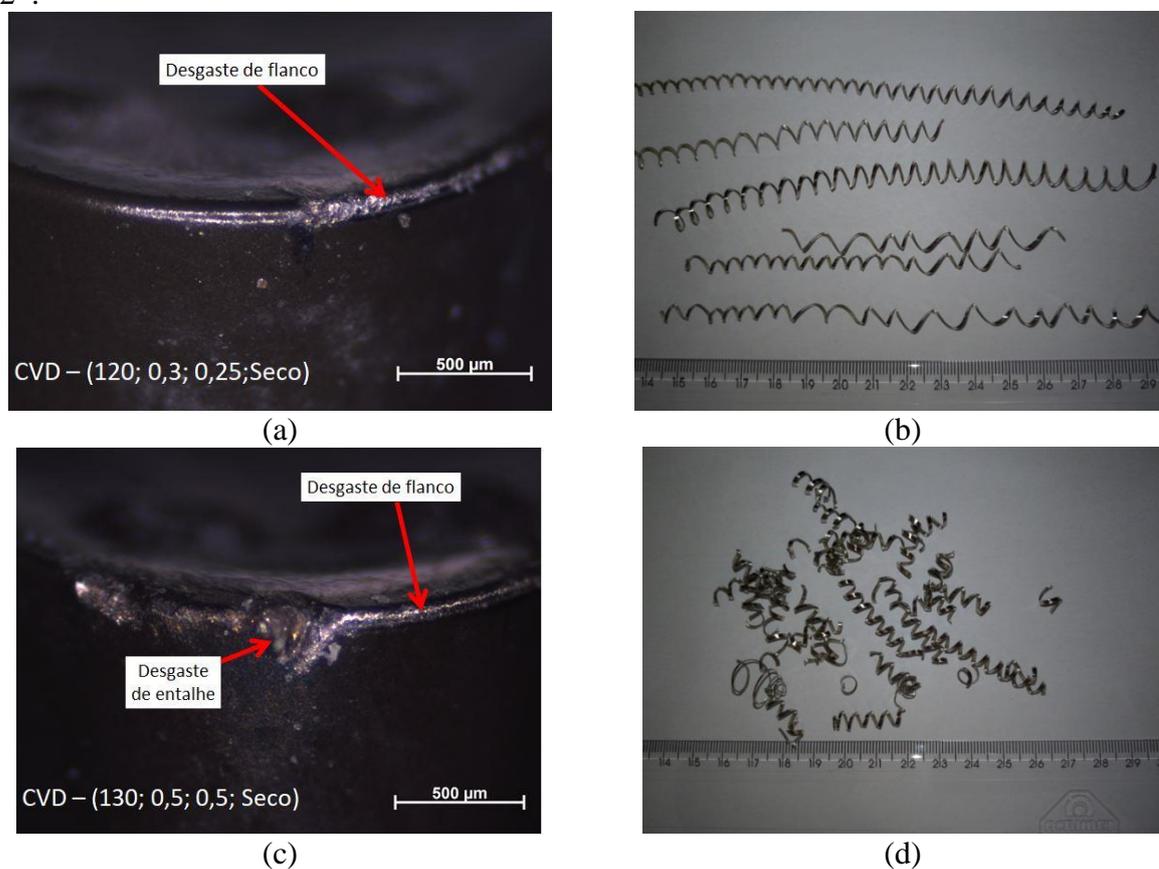
Tabela 43 - Análise de variância dos valores de razão sinal-ruído de vibração.

Fonte	GL	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
Velocidade de corte	3	92,33	92,33	30,78	2,64	0,418	3,78
Avanço f	1	34,13	34,13	34,13	2,92	0,337	1,40
profundidade de usinagem	1	2,68	2,68	2,68	0,23	0,715	0,11
Lubrificação	1	2303,76	2303,76	2303,76	197,34	0,045	94,24
Erro residual	1	11,67	11,67	11,67			0,48
Total	7	2444,57					

Dados normais (Teste de Anderson-Darling P-value = 0,090).

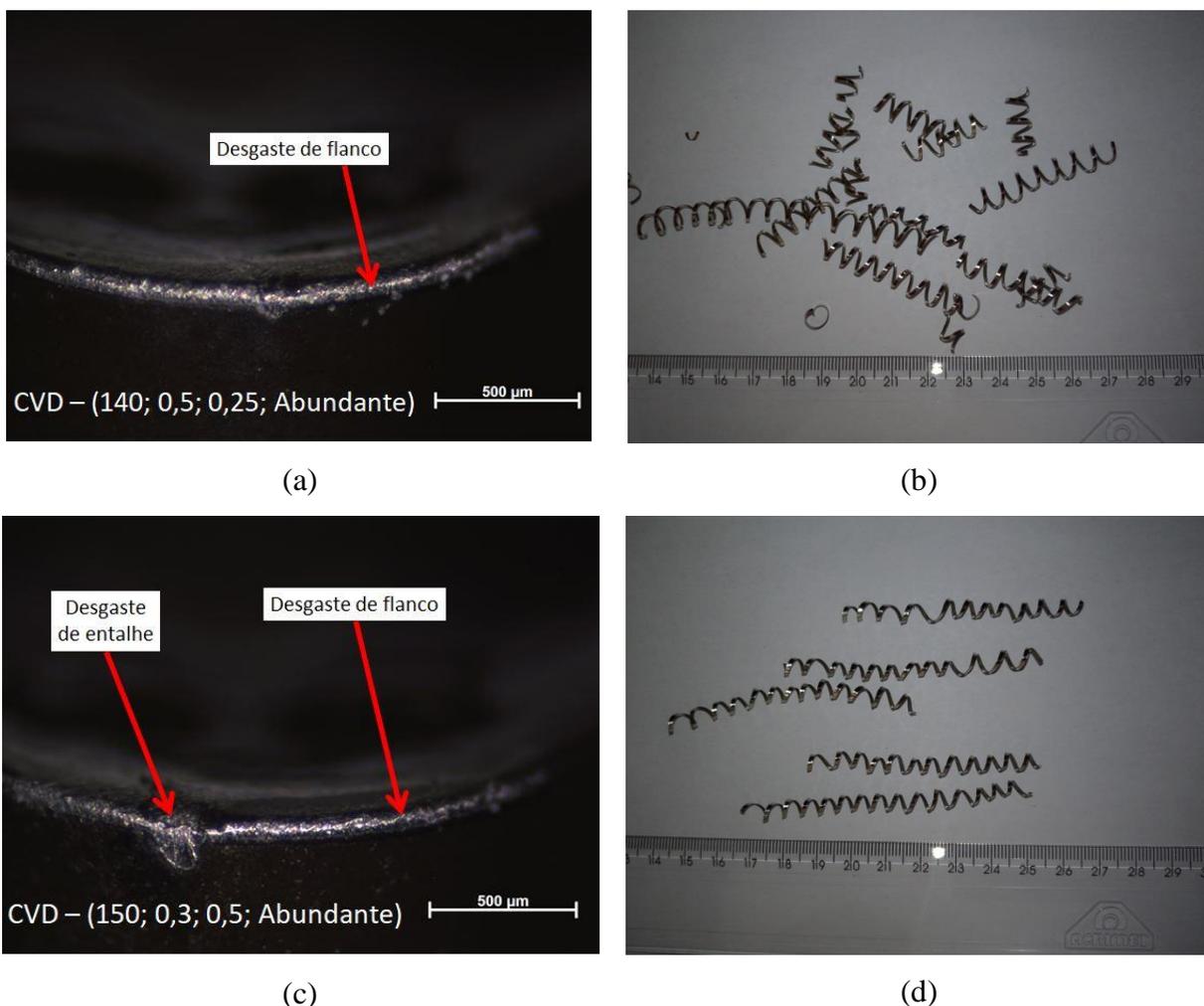
Fonte: Próprio autor.

Figura 43 - Desgastes das arestas de corte e os cavacos gerados no torneamento do VAT 32[®].



Fonte: Próprio autor.

Figura 44 - Desgastes das ferramentas de corte CVD e formato dos cavacos gerados.



Fonte: Próprio autor.

Os desgastes das ferramentas mais frequentes foram os desgastes de flanco, causado por mecanismo abrasivo, e o desgaste de entalhe, causado por oxidação. Esses dois tipos de desgastes são muito comuns na usinagem de superligas.

Os cavacos são de cisalhamento, onde ocorre a sobreposição de lamelas, com formatos helicoidais longos e curtos. Os cavacos se mostraram quebradiços.

4.3.7 Análise relacional cinza e obtenção para as condições do teste de vida da pastilha de metal duro CVD

A condição de corte para a obtenção das melhores respostas analisadas, usando a ferramenta de metal duro recoberta por $Ti(C,N)+Al_2O_3$ pelo processo CVD, são mostradas na Tabela 44. Nessa tabela são apresentados os níveis dos parâmetros recomendados para a

obtenção dos melhores valores médios em cada resposta, sendo também possível verificar a contribuição de cada fator e a tendência de aumento ou diminuição da resposta com a variação do nível.

Na Tabela 45 encontram-se os resultados para η , objetivando-se a obtenção da variabilidade do processo.

Tabela 44 - Valores otimizados dos parâmetros de corte para as médias no torneamento do VAT 32[®] com ferramenta de metal duro revestida por Ti(C,N)+Al₂O₃ pelo processo CVD.

Fator	Fator de qualidade					
	Potência de usinagem	Vb.1000/Lc	R _a	R _t	Emissão Acústica	Vibração
Média	2447 W	3,725 m/m	3,274 μ m	13,806 μ m	0,3126 V RMS	5,72 mm/s
v _c (m/min)	150 (13,84%)	130 (9,15%)	150 (42,24%)	*	140 (11,93%)	130 (14,30%)
f (mm/rev)	0,3 (1,39%)↗	0,3 (23,00%)↗	0,3 (18,27%)↗	*	0,3 (4,69%)↗	0,3 (6,28%)↗
ap (mm)	0,25 (55,27%)↗	0,25 (2,82%)↗	0,25 (4,97%)↗	*	NS	NS
Lubrificação	Abundante (29,40%)	Abundante (64,39%)	Seco (14,16%)	*	Seco (75,58%)	Seco (72,87%)

NS → Efeito não significativo; * → Não possível de avaliar; Valores entre parênteses correspondem a contribuição; ↗ → Tendência de aumento da resposta com o aumento do parâmetro de corte; ↘ → Tendência de diminuição da resposta com o aumento do parâmetro de corte.

Fonte: Próprio autor.

É possível verificar na Tabela 45 que o avanço de 0,3 mm/rev é o nível que apresentou a menor variabilidade para a maioria das respostas. Para as outras variáveis, essa relação não é clara.

Ao observar-se os dados, é difícil escolher uma única condição para se obter as melhores respostas, pois cada característica de qualidade tem uma configuração dos parâmetros de corte ótima. A análise relacional cinza (GRA) foi então aplicada para transformar este problema multiobjetivo em um de objetivo simples em que se otimiza um único fator resposta, o GRC.

Tabela 45 - Valores otimizados dos parâmetros de corte para a razão sinal-ruído das respostas no torneamento do VAT 32[®] com ferramenta de metal duro revestida por Ti(C,N)+Al₂O₃ pelo processo CVD.

Fator	Fator de qualidade					
	Potência de usinagem	Vb.1000/Lc	R _a	R _t	Emissão Acústica	Vibração
v _c (m/min)	150 (11,72%)	130 (13,61%)	150 (44,85%)	NS	140 (11,93%)	140 (3,78%)
f (mm/rev)	NS	0,3 (26,01%)	0,3 (15,10%)	0,3 (59,66%)	0,3 (4,69%)	0,3 (1,40%)
a _p (mm)	0,25 (57,02%)	0,25 (2,30%)	0,25 (13,96%)	0,25 (16,32%)	NS	NS
Lubrificação	Abundante (30,38%)	Abundante (58,06%)	Seco (22,73%)	Seco (2,15%)	Seco (79,08%)	Seco (94,24%)

NS → Efeito não significativo; Valores entre parênteses correspondem a contribuição.

Fonte: Próprio autor.

O primeiro passo do GRA é a chamada geração relacional cinza, que consiste em normalizar os dados dos fatores de qualidade para que eles possam ser comparáveis. Utilizou-se a Equação 10 para todas as variáveis respostas, uma vez que elas são do tipo “menor é melhor”. A geração relacional cinza pode ser vista na Tabela 46.

Tabela 46 - Geração relacional cinza ou normalização dos dados de qualidade para o torneamento com pastilha de metal duro CVD.

(continua)

Experimento	R _a	R _t	VB.1000/L _c	Potência de usinagem	Emissão Acústica	Vibração
1	0,9113	0,8604	0,0671	0,2769	0,9828	0,9969
2	0,8553	0,8271	0,0000	0,2635	1,0000	1,0000
3	0,1923	0,3116	0,0447	0,0000	0,8924	0,9917
4	0,3817	0,3161	0,0145	0,0538	0,8535	0,9878
5	1,0000	1,0000	0,0341	0,7094	0,7800	0,9896
6	0,9237	0,6193	0,0566	0,7334	0,8725	0,9952
7	0,8687	0,9037	0,6108	0,6295	0,8675	0,9918
8	0,7862	0,8381	0,2188	0,5915	0,8543	0,9856
9	0,8644	0,8527	0,9867	0,8144	0,2198	0,7577
10	0,8342	0,8313	1,0000	0,8112	0,1581	0,7294
11	0,1720	0,2452	0,4017	1,0000	0,1129	0,6226
12	0,1359	0,1981	0,4674	0,8954	0,1168	0,6300

Tabela 46 - Geração relacional cinza ou normalização dos dados de qualidade para o torneamento com pastilha de metal duro CVD.

(conclusão)

Experimento	R_a	R_t	VB.1000/ L_c	Potência de usinagem	Emissão Acústica	Vibração
13	0,0128	0,0000	0,5145	0,4496	0,1076	0,0811
14	0,0000	0,0386	0,4211	0,3824	0,0000	0,0000
15	0,8978	0,8329	0,8892	0,6098	0,1233	0,5240
16	0,8414	0,7916	0,8802	0,7638	0,0159	0,5289

Fonte: Próprio autor.

Na Tabela 47 tem-se os valores das sequências de desvio $\Delta_{0i}(k)$, segunda etapa de GRA.

Tabela 47 - Obtenção das sequências de desvio.

Experimento	$\Delta_{0i}(k)$					
	R_a	R_t	VB.1000/ L_c	Potência de usinagem	Emissão Acústica	Vibração
1	0,0887	0,1396	0,9329	0,7231	0,0172	0,0031
2	0,1447	0,1729	1,0000	0,7365	0,0000	0,0000
3	0,8077	0,6884	0,9553	1,0000	0,1076	0,0083
4	0,6183	0,6839	0,9855	0,9462	0,1465	0,0122
5	0,0000	0,0000	0,9659	0,2906	0,2200	0,0104
6	0,0763	0,3807	0,9434	0,2666	0,1275	0,0048
7	0,1313	0,0963	0,3892	0,3705	0,1325	0,0082
8	0,2138	0,1619	0,7812	0,4085	0,1457	0,0144
9	0,1356	0,1473	0,0133	0,1856	0,7802	0,2423
10	0,1658	0,1687	0,0000	0,1888	0,8419	0,2706
11	0,8280	0,7548	0,5983	0,0000	0,8871	0,3774
12	0,8641	0,8019	0,5326	0,1046	0,8832	0,3700
13	0,9872	1,0000	0,4855	0,5504	0,8924	0,9189
14	1,0000	0,9614	0,5789	0,6176	1,0000	1,0000
15	0,1022	0,1671	0,1108	0,3902	0,8767	0,4760
16	0,1586	0,2084	0,1198	0,2362	0,9841	0,4711

Fonte: Próprio autor.

A terceira etapa da análise relacional cinza é o cálculo do chamado coeficiente relacional cinza (GRC) γ , realizado com uso da Equação 14 e que pode ser observado na Tabela 48.

Tabela 48 - Cálculo do coeficiente relacional cinza (GRC) γ para o torneamento com pastilha de metal duro CVD.

Experimento	γ (GRC)					
	R_a	R_t	VB.1000/ L_c	Potência de usinagem	Emissão Acústica	Vibração
1	0,8494	0,7817	0,3489	0,4088	0,9667	0,9939
2	0,7756	0,7430	0,3333	0,4044	1,0000	1,0000
3	0,3823	0,4207	0,3436	0,3333	0,8230	0,9836
4	0,4471	0,4223	0,3366	0,3457	0,7734	0,9762
5	1,0000	1,0000	0,3411	0,6324	0,6944	0,9797
6	0,8676	0,5678	0,3464	0,6522	0,7968	0,9905
7	0,7920	0,8385	0,5623	0,5744	0,7905	0,9839
8	0,7004	0,7555	0,3903	0,5503	0,7744	0,9719
9	0,7866	0,7724	0,9740	0,7293	0,3906	0,6736
10	0,7510	0,7477	1,0000	0,7259	0,3726	0,6488
11	0,3765	0,3985	0,4552	1,0000	0,3605	0,5699
12	0,3665	0,3841	0,4842	0,8270	0,3615	0,5747
13	0,3362	0,3333	0,5073	0,4760	0,3591	0,3524
14	0,3333	0,3421	0,4635	0,4474	0,3333	0,3333
15	0,8302	0,7495	0,8186	0,5617	0,3632	0,5123
16	0,7592	0,7058	0,8067	0,6792	0,3369	0,5149

Fonte: Próprio autor.

A quarta etapa consistiu na obtenção da classificação relacional cinza (GRG), através da Equação 15, e classificação dos experimentos realizados. O peso dos fatores de qualidade potência de usinagem, rugosidade R_a e R_t foi estabelecido como dois, enquanto peso um foi atribuído aos demais parâmetros de qualidade. Esta etapa pode ser vista na Tabela 49.

Tabela 49 - Valores da classificação relacional cinza (GRC) dos dados de qualidade do processo de torneamento com pastilha de metal duro CVD.

(continua)

Experimento	Velocidade de corte v_c (m/min)	Avanço f (mm/rev)	Profundidade de usinagem a_p (mm)	Lubrificação	GRC	Classificação
1	140	0,3	0,5	Seco	0,7099	5
2	140	0,3	0,5	Seco	0,6866	7
3	130	0,5	0,5	Seco	0,4914	14
4	130	0,5	0,5	Seco	0,5018	13
5	150	0,5	0,25	Seco	0,8089	1

Tabela 49 - Valores da classificação relacional cinza (GRC) dos dados de qualidade do processo de torneamento com pastilha de metal duro CVD.

(conclusão)

Experimento	Velocidade de corte v_c (m/min)	Avanço f (mm/rev)	Profundidade de usinagem a_p (mm)	Lubrificação	GRC	Classificação
6	150	0,5	0,25	Seco	0,7010	6
7	120	0,3	0,25	Seco	0,7496	2
8	120	0,3	0,25	Seco	0,6832	8
9	130	0,3	0,25	Abundante	0,7350	3
10	130	0,3	0,25	Abundante	0,7189	4
11	140	0,5	0,25	Abundante	0,5484	11
12	140	0,5	0,25	Abundante	0,5084	12
13	120	0,5	0,5	Abundante	0,3900	15
14	120	0,5	0,5	Abundante	0,3751	16
15	150	0,3	0,5	Abundante	0,6641	9
16	150	0,3	0,5	Abundante	0,6608	10

Fonte: Próprio autor.

Os parâmetros de corte para a realização dos ensaios de vida da ferramenta de metal duro revestida de $Ti(C,N)+Al_2O_3$ são os correspondentes ao experimento com a classificação 1, experimento 5. Esses valores do experimento 5 foram utilizados na obtenção do comprimento de corte nos ensaios de vida, que serão demonstrados no item 4.6, e são de $v_c = 150$ m/min, $f = 0,5$ mm/ver, $a_p = 0,25$ mm e usinagem a seco.

4.4 USINAGEM COM A FERRAMENTA DE CBN

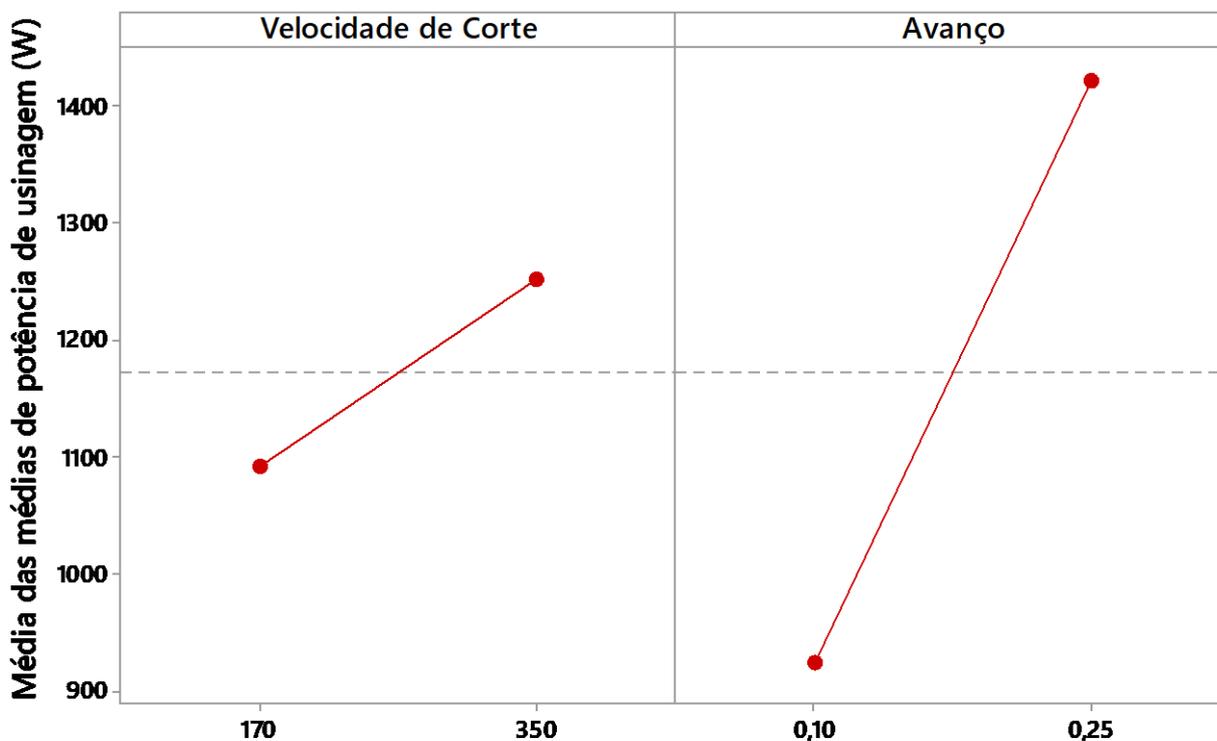
Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos para o torneamento da superliga VAT 32[®] utilizando a ferramenta de cBN 170 com relação aos fatores de qualidade, também vistos nas seções 4.2 e 4.3 deste trabalho. Um sub-tópico sobre os desgastes encontrados e sobre os cavacos também está nesta seção. A análise relacional cinza (GRA) é outra mostrada na sequência, análise importante para a seleção das condições de corte que foram utilizadas nos ensaios de vida desta ferramenta de corte. Na última seção deste tópico também é encontrado um resumo do desempenho da ferramenta com relação às respostas.

Na Tabela 9 encontra-se a matriz experimental utilizada para os ensaios de torneamento com a utilização da pastilha de cBN. Esta tabela traz a sequência de experimentos realizados.

4.4.1 Potência de usinagem

Na Figura 45 encontra-se o gráfico dos efeitos principais sobre a média da potência de usinagem para o torneamento do VAT 32[®] com a ferramenta de cBN 170.

Figura 45 - Efeitos principais dos fatores sobre a média dos valores de potência de usinagem para a ferramenta de cBN.



Fonte: Próprio autor.

Os menores valores de potência de usinagem foram obtidos no torneamento com $v_c = 170$ m/min e $f = 0,10$ mm/rev. A média das médias de potência de usinagem foi de 1172 W.

Na Tabela 50 encontra-se a análise de variância para os valores da média de potência de usinagem para os dados obtidos com o uso da pastilha de cBN.

O parâmetro avanço (87,24%) teve efeitos significativos sobre os valores de potência de usinagem, o que equivale a afirmar que a média da potência de usinagem quando $f = 0,1$ mm/rev é diferente da média de potência quando $f = 0,25$ mm/rev. O efeito da velocidade de

o corte não é pequeno o suficiente para ser desprezado. O valor da contribuição da velocidade de corte para com a potência de usinagem é de 8,99%.

Tabela 50 - ANOVA para a média de potência de usinagem.

Fonte	GF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
Velocidade de corte	1	25459	25459	25459	2,38	0,366	8,99
Avanço	1	247160	247160	247160	23,10	0,131	87,24
Erro residual	1	10698	10698	10698			3,78
Total	3	283317					

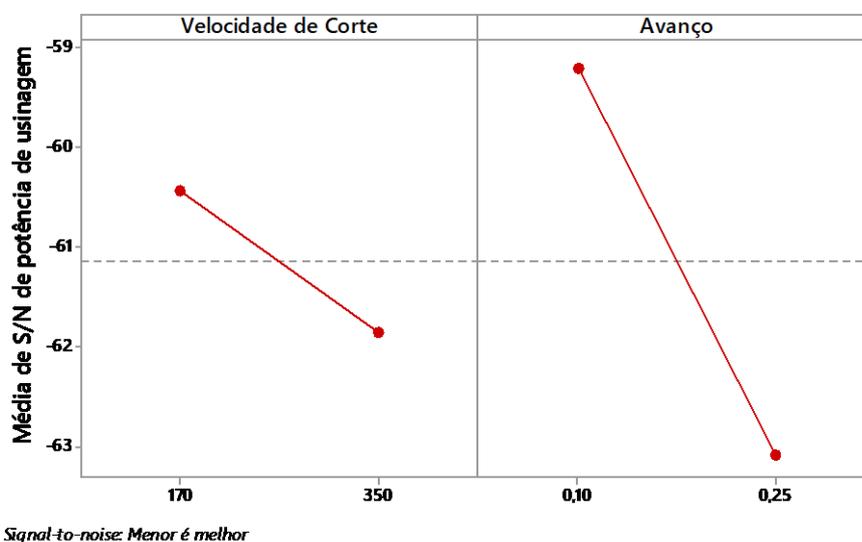
Dados normais (Teste Anderson-Darling P-value = 0,726)

Fonte: Próprio autor.

O aumento da potência de usinagem com o aumento da velocidade de corte e do avanço está de acordo com os resultados também encontrados por Bouacha et al. (2014) na usinagem do Inconel 718 com ferramenta de PcBN. Outro ponto comum é a contribuição do avanço maior que a contribuição da velocidade de corte na potência.

Na Figura 46 podem ser vistos os efeitos principais dos valores da razão sinal-ruído para a variável resposta potência de usinagem. Os valores de η foram calculados pela Equação 9, pois quanto menor for o valor de potência de usinagem, melhor é o processo do ponto de vistas dos custos.

Figura 46 - Efeitos principais para os valores de η relacionados a potência de usinagem.



Fonte: Próprio autor.

A configuração que apresentou menor variabilidade dos valores de potência de usinagem foi $v_c = 170$ m/min e $f = 0,10$ mm/rev, caracterizado pelos maiores valores da razão sinal-ruído. Na Tabela 51 pode ser vista a análise de variância dos valores de η para potência de usinagem.

Tabela 51 - ANOVA para S/N de potência de usinagem.

Fonte	GF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
Velocidade de corte	1	2,037	2,037	2,037	1,81	0,407	11,29
Avanço	1	14,879	14,879	14,879	13,21	0,171	82,46
Erro residual	1	1,126	1,126	1,126			6,24
Total	3	18,043					

Dados normais (Teste Anderson-Darling P-value = 0,395)

Fonte: Próprio autor.

O parâmetro avanço é o único que possui efeitos significativos sobre a variabilidade do processo de torneamento, com uma contribuição de 82,46%. Esse efeito é significativo, pois o valor de F para o fator é maior que quatro.

4.4.2 Desgaste de flanco V_b /comprimento usinado L_c

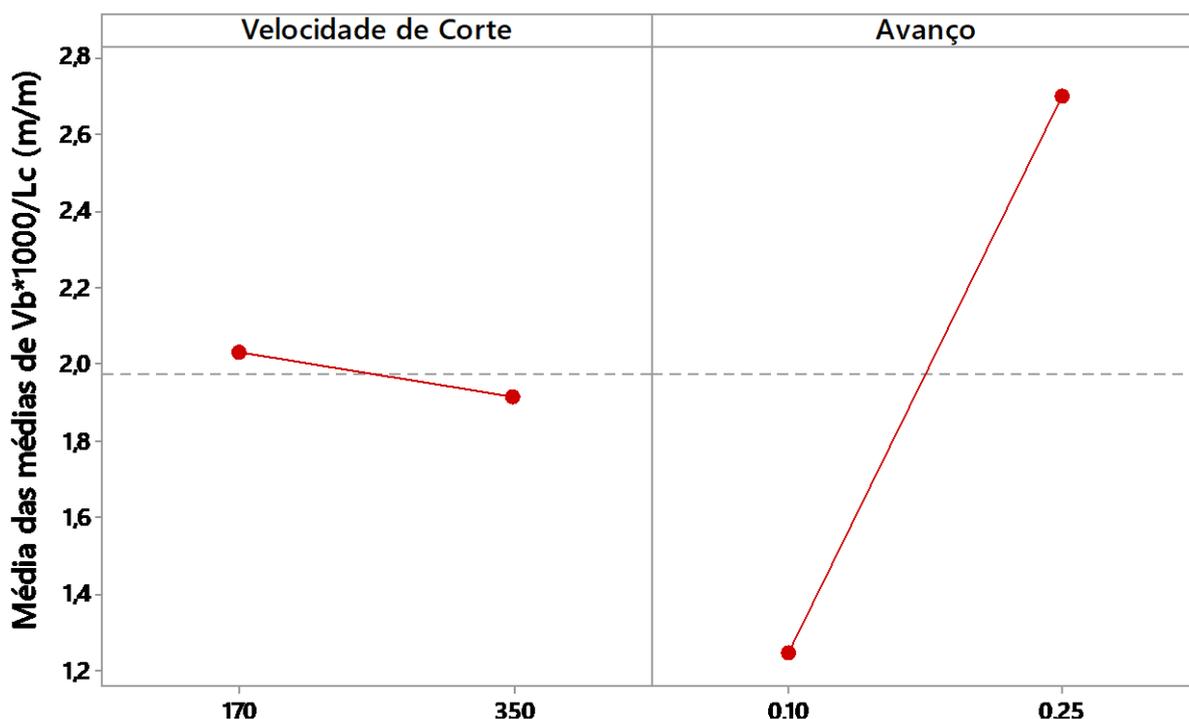
Na Figura 47, podem ser vistos os valores médios do desgaste por comprimento usinado.

Os menores valores de desgastes por comprimento usinado foram obtidos na usinagem com $v_c = 350$ m/min e $f = 0,10$ mm/rev. Ocorre um estranhamento afirmar que os menores desgastes foram obtidos com a maior velocidade de corte, o que precisa ser confirmado pela análise de variância. A ANOVA para os valores médios de $V_b \cdot 1000 / L_c$ estão apresentados na Tabela 52.

Não houve diferença significativa no desgaste de flanco/comprimento usinado nas diferentes velocidades de corte utilizadas. O fator avanço possui efeitos significativos nos valores da variável resposta analisada ($F=24,53$), com contribuição de 94,12%. De acordo com Criado et al. (2018), ao utilizar a ferramenta de PcBN na usinagem de Inconel 718, o avanço não mostrou efeitos significativos no desgaste de flanco quando alterada de 0,1

mm/rev para 0,15 mm/rev. A análise da usinagem do VAT 32[®] com a ferramenta de cBN mostrou que entre os avanços de 0,1 e 0,25 mm/rev os valores de desgaste de flanco, com a tendência de V_b maiores em avanços maiores.

Figura 47 - Análise de médias para os valores de desgaste de flanco por comprimento usinado.



Fonte: Próprio autor.

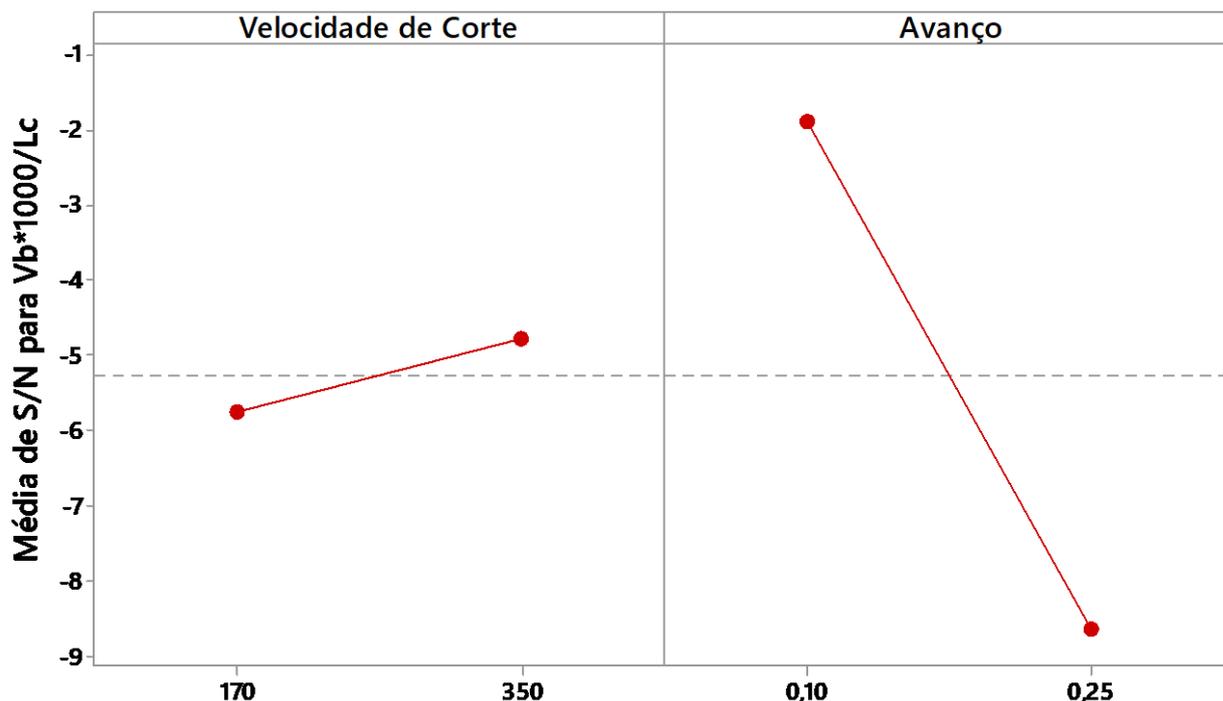
Tabela 52 - ANOVA para os valores médios de $V_b \cdot 1000 / L_c$.

Fonte	GF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
Velocidade de corte	1	0,9850	0,9850	0,9850	0,53	0,599	2,04
Avanço	1	45,3973	45,3973	45,3973	24,53	0,127	94,12
Erro residual	1	1,8509	1,8509	1,8509			3,84
Total	3	48,2331					

Dados normais (Teste Anderson-Darling P-value = 0,122).

Fonte: Próprio autor.

Para analisar a variabilidade do processo com relação ao desgaste, realizou-se a análise dos valores da razão sinal-ruído de Taguchi, calculado pela Equação 9. Os efeitos principais de S/N são encontrados na Figura 48.

Figura 48 - Efeitos principais para os valores de η de $V_b \cdot 1000/L_c$.

Signal-to-noise: Menor é melhor

Fonte: Próprio autor.

Os valores dos fatores que causaram menor variabilidade do processo foram $v_c = 350$ m/min e $f = 0,10$ mm/rev. Novamente, é preciso confirmar que esses fatores possuem efeitos significativos nos valores da razão sinal-ruído de V_b/L_c . A média das médias da relação V_b/L_c foi de 1,974.

Na Tabela 53 encontra-se a análise de variância para S/N de V_b/L_c .

Tabela 53 - ANOVA dos valores de S/N para $V_b \cdot 1000/L_c$.

Fonte	GF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
Velocidade de corte	1	0,9850	0,9850	0,9850	0,53	0,599	2,04
Avanço	1	45,3973	45,3979	45,3979	24,53	0,127	94,12
Erro residual	1	1,8509	1,8509	1,8509			3,84
Total	3	48,2331					

Dados normais (Teste Anderson-Darling P-value = 0,257).

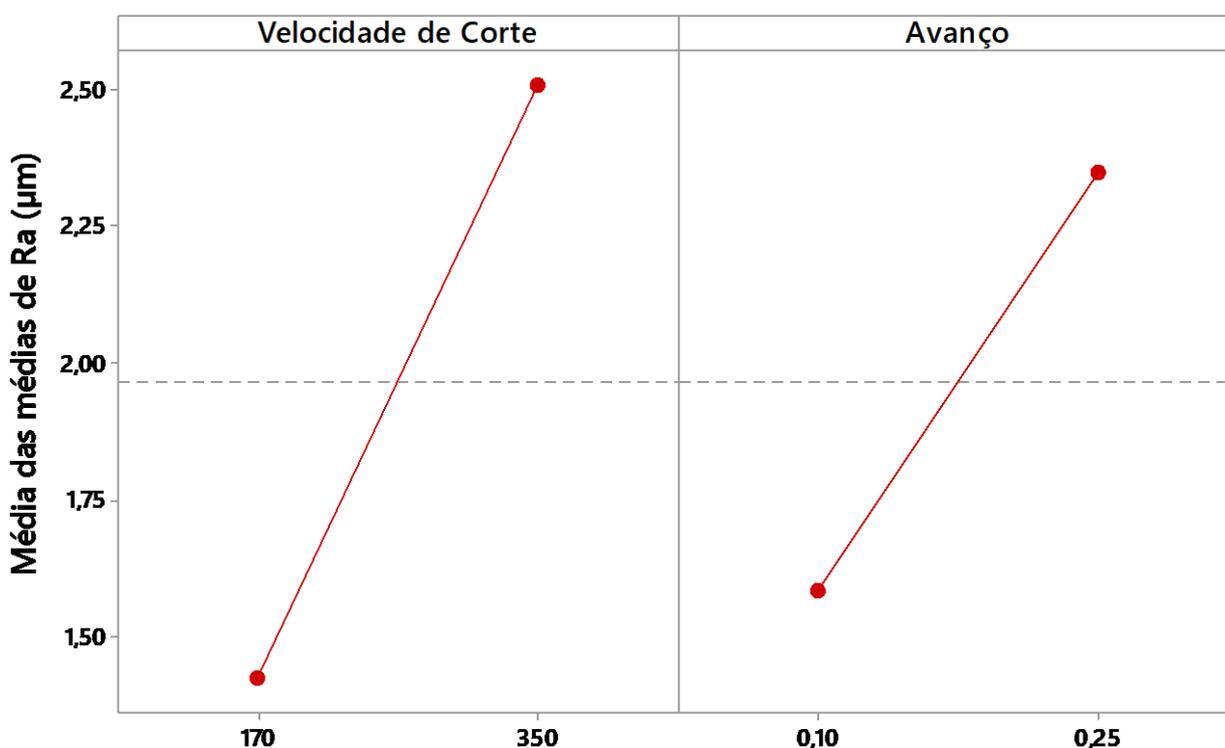
Fonte: Próprio autor.

Pela ANOVA, o fator que possui efeitos significativos na variabilidade dos valores de $V_b.1000/L_c$ no processo de torneamento com a ferramenta de cBN é o avanço, com uma contribuição de 94,12%.

4.4.3 Rugosidades R_a e R_t

Na Figura 49 encontram-se os efeitos principais dos fatores para os valores de R_a .

Figura 49 - Efeitos principais para as médias de rugosidade R_a .



Fonte: Próprio autor.

Os valores médios mais baixos de rugosidade R_a foram obtidos quando utilizada a velocidade de corte de 170 m/min e avanço de 0,10 mm/rev. A média das médias dos valores de R_a com a utilização das pastilhas de cBN foi de 1,967 μm . Na Tabela 54 está a análise de variância para os valores das médias de R_a .

Pela análise de variância dos valores médios de R_a , é possível verificar que o efeito a velocidade de corte é consideravelmente significativo, com contribuição 57,04%. Já o efeito do avanço foi muito pequeno, $F < 2$. Maiores velocidades de corte ocasionaram maiores esforços e potência de usinagem, o que causou lascamentos na ferramenta de cBN, verificáveis no item 4.4.6, ferramenta esta muito dura e frágil. Esse efeito foi tão grande que

encobriu os efeitos comumente conhecidos do avanço sobre a qualidade superficial durante a usinagem. O comportamento de maiores rugosidades para maiores velocidades de corte aconteceu no trabalho de Criado et al. (2018) quando as ferramentas estavam desgastadas depois de várias passadas, o que alterou a geometria e modificou o acabamento. Este pode ter acontecido na usinagem do VAT 32[®] mas por modificações causadas pelo lascamento da ferramenta, mesmo usando comprimentos de corte baixos.

Tabela 54 - ANOVA para os valores médios de R_a .

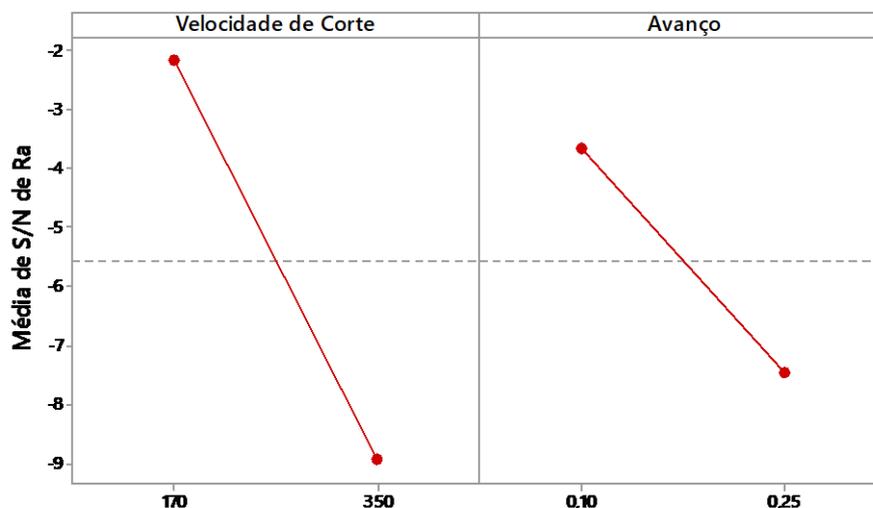
Fonte	GF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
Velocidade de corte	1	1,1668	1,1668	1,1668	3,93	0,298	57,04
Avanço	1	0,5817	0,5817	0,5817	1,96	0,395	28,44
Erro residual	1	0,2972	0,2972	0,2972			14,53
Total	3	2,0456					

Dados normais (Teste Anderson-Darling P-value = 0,421).

Fonte: Próprio autor.

Para verificar a configuração que minimiza a variabilidade do valor de R_a no processo de torneamento, é necessário analisar os valores da razão sinal-ruído η para R_a . Para o cálculo de η , utilizou-se da Equação 9 e os valores dos efeitos principais estão presentes na Figura 50, onde podem ser obtidos os níveis dos fatores que apresentaram menor variação.

Figura 50 - Efeitos principais para os valores de η de R_a .



Signal-to-noise: Menor é melhor

Fonte: Próprio autor.

A análise dos valores da razão sinal-ruído leva a conclusão de que para a menor variabilidade de R_a no processo é necessário utilizar $v_c = 170$ m/min e $f = 0,10$ mm/rev. Foi então preciso verificar se esses fatores possuem efeitos significativos, o que foi realizado através da análise de variância de η . A ANOVA para os valores de S/N podem ser vistos na Tabela 55.

Tabela 55 - ANOVA para os valores da razão sinal-ruído de R_a .

Fonte	GF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
Velocidade de corte	1	45,79	45,79	45,79	1,88	0,401	54,16
Avanço	1	14,41	14,41	14,41	0,59	0,593	17,04
Erro residual	1	24,35	24,35	24,35			28,80
Total	3	84,54					

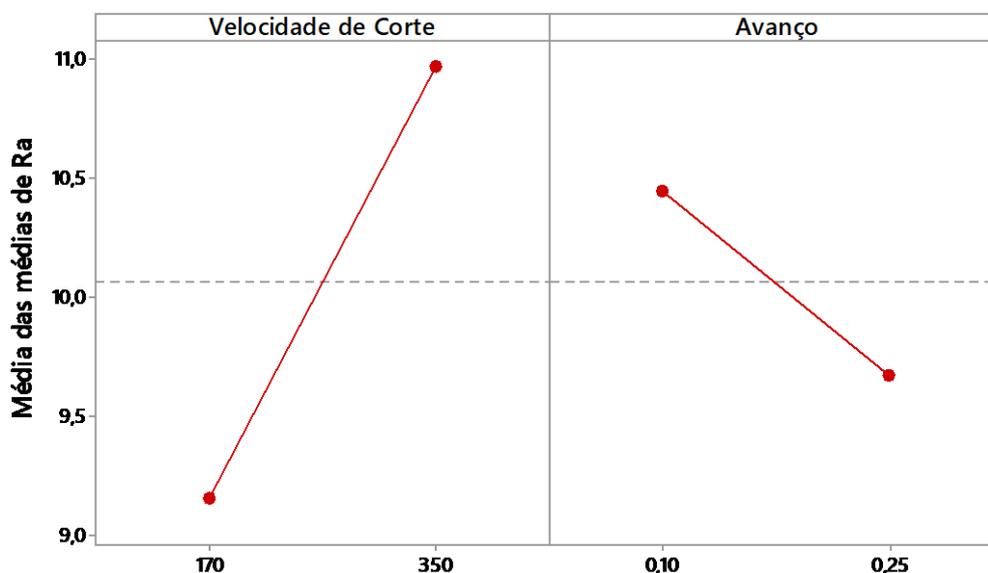
Dados normais (Teste Anderson-Darling P-value = 0,125).

Fonte: Próprio autor.

Através da ANOVA de S/N dos valores de R_a , nenhum dos fatores analisados teve efeitos significativos para a variabilidade do processo.

Com relação aos valores de rugosidade R_t , foram calculados os efeitos principais dos fatores, sendo realizada a análise de médias (ANOM), presente na Figura 51.

Figura 51 - ANOM dos valores médios de R_t .



Fonte: Próprio autor.

Os valores de R_t são mais sensíveis a defeitos superficiais pontuais do que os valores de R_a , mesmo assim percebeu-se uma tendência igual onde maiores valores de rugosidade para maiores velocidades de corte foram encontrados. Novamente, a explicação se encontra na maior degradação das arestas de corte sob alta velocidade de corte.

Os menores valores de R_t foram obtidos para $v_c = 170$ m/min e $f = 0,25$ mm/rev. A média das médias de rugosidade R_t foi de $10,064 \mu\text{m}$. Os valores de R_t foram então submetidos a análise de variância para averiguação dos efeitos dos fatores velocidade de corte e avanço. A ANOVA pode ser vista na Tabela 56.

Tabela 56 - Análise de variância para os valores médios de R_t .

Fonte	GF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
Velocidade de corte	1	3,2963	3,2963	3,2963	2,44	0,362	62,86
Avanço	1	0,5979	0,5979	0,5979	0,44	0,626	11,40
Erro residual	1	1,3493	1,3493	1,3493			25,73
Total	3	5,2435					

Dados normais (Teste Anderson-Darling P-value = 0,245).

Fonte: Próprio autor.

A análise de variância dos valores médios de R_t revelou que o efeito da velocidade de corte não é pequeno o suficiente para ser desprezado, com contribuição de 62,86%. O avanço, por sua vez, não possui efeitos significativos nos valores de R_t dentro dos valores testados.

Comparou-se então os valores teóricos esperados, calculado pelas Equações 1 e 2, com os valores de R_a e R_t obtidos experimentalmente para o torneamento com a patilha de cBN. Essa comparação pode ser vista na Tabela 57.

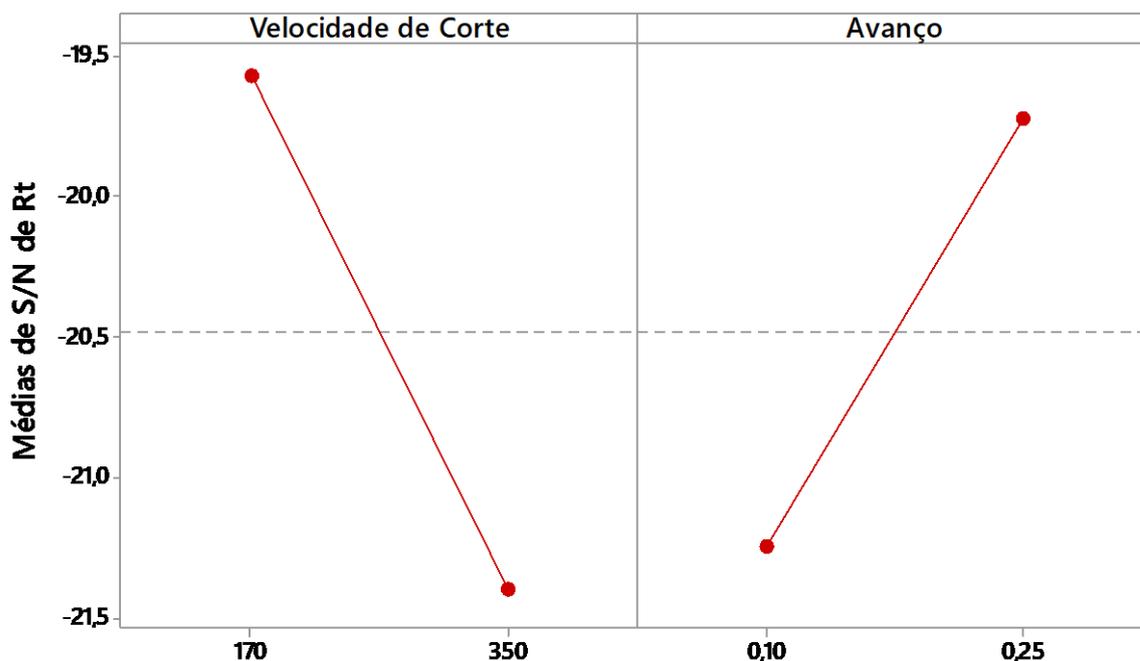
Tabela 57 - Comparativo entre os valores teóricos e experimentais de R_a e R_t .

Avanço (mm/rev)	R_a		Desvio	R_t		Desvio
	Teórico	Experimental		Teórico	Experimental	
0,10	0,267 μm	1,586 μm	494%	1,042 μm	10,451 μm	903%
0,25	1,670 μm	2,349 μm	40,66%	6,510 μm	9,678 μm	48,66%

Fonte: Próprio autor.

Realizou-se então a análise de médias para os valores da razão sinal-ruído, buscando-se encontrar uma condição de corte com menor variação dos valores de R_t durante o processo de torneamento. A ANOM para η de R_t pode ser vista na Figura 52.

Figura 52 - ANOM e efeitos principais dos valores da razão sinal-ruído (S/N) de R_t .



Signal-to-noise: Menor é melhor

Fonte: Próprio autor.

A menor variabilidade do processo de torneamento do VAT 32[®] com a ferramenta de cBN foi alcançada utilizando-se $v_c = 170$ m/min e $f = 0,25$ mm/rev. Na Tabela 58 encontra-se a ANOVA para os valores de S/N onde foram averiguados se os efeitos sobre a variabilidade de R_t foram significativos.

Tabela 58 - ANOVA dos valores da razão sinal-ruído para R_t .

Fonte	GF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
Velocidade de corte	1	3,350	3,350	3,350	2,22	0,376	46,57
Avanço	1	2,335	2,335	2,335	1,55	0,431	32,46
Erro residual	1	1,509	1,509	1,509			20,98
Total	3	7,194					

Dados normais (Teste Anderson-Darling P-value = 0,060).

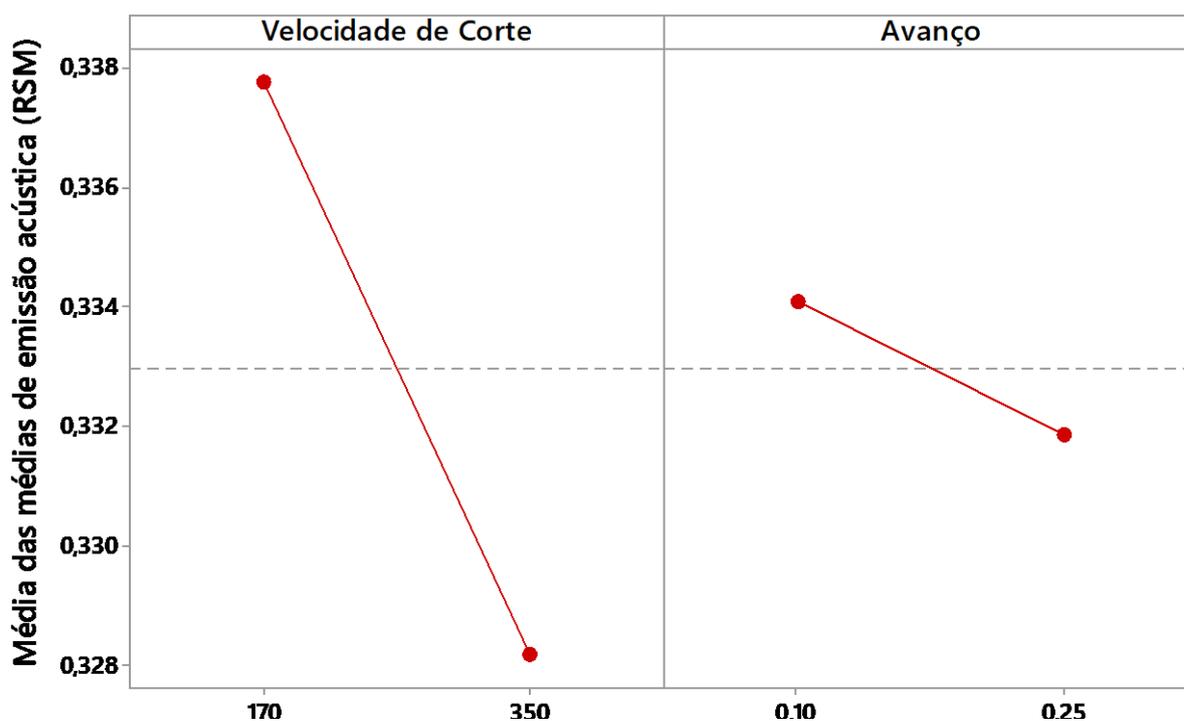
Fonte: Próprio autor.

Apenas o fator velocidade de corte mostrou efeito que não é pequeno a ponto de ser desprezado na otimização e obtenção da menor variabilidade do torneamento com a ferramenta cBN.

4.4.4 Emissão acústica

Com os dados de emissão acústica foram obtidos os efeitos principais dos fatores através da análise de médias ANOM, presente na Figura 53. A linha tracejada representa o valor médio das médias dos sinais de emissão acústica.

Figura 53 - Efeitos principais dos fatores sobre a variável resposta emissão acústica.



Fonte: Próprio autor.

Os níveis dos fatores que resultaram em menores valores dos sinais de emissão acústica foram $v_c = 350$ m/min e $f = 0,25$ mm/rev. A média das médias dos valores de emissão acústica foi de $0,3330 V_{RSM}$. Para avaliar se os efeitos dos fatores são significativos nos valores médios de emissão acústica, realizou-se a análise de variância, que pode ser observada na Tabela 59.

De acordo com a análise de variância realizada, nenhum dos fatores possui efeitos significativos para os valores de emissão acústica. Um ponto importante é que os erros

residuais possuíram um valor de contribuição muito alto, o que pode indicar que fatores não analisados possam ter uma influência grande para a variável de emissão acústica.

Tabela 59 - ANOVA para os valores médios do sinal de missão acústica.

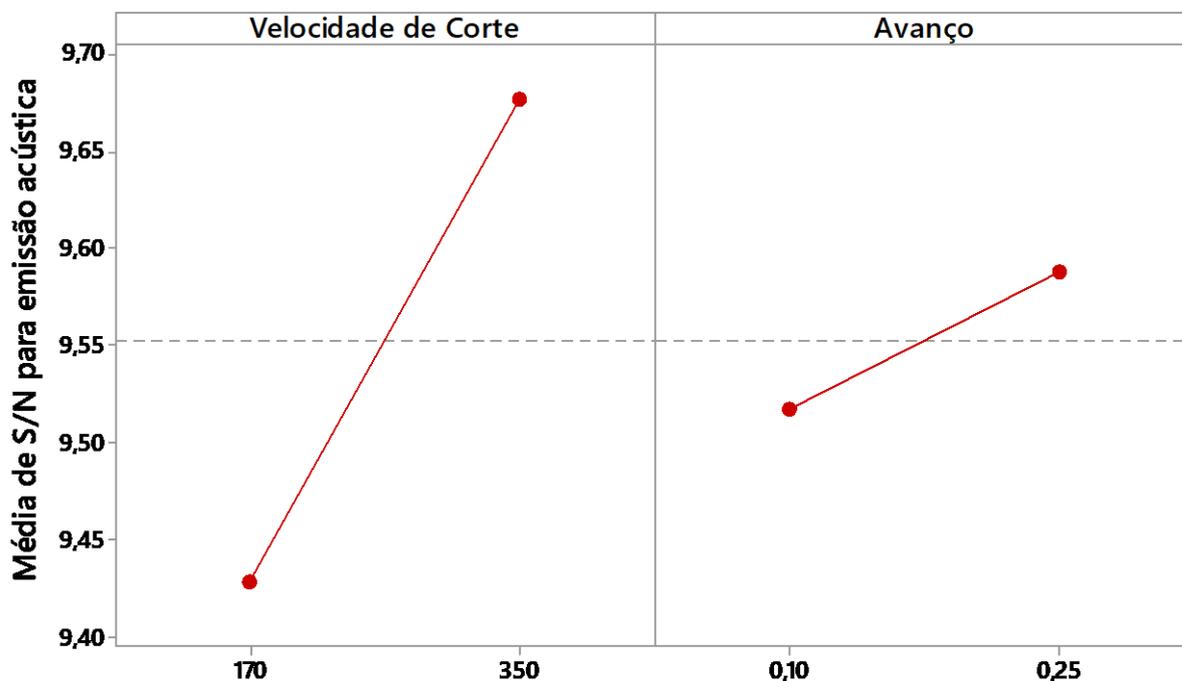
Fonte	GF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
Velocidade de corte	1	0,000091	0,000091	0,000091	0,28	0,692	21,26
Avanço	1	0,000005	0,000005	0,000005	0,02	0,922	1,16
Erro residual	1	0,000331	0,000331	0,000331			77,34
Total	3	0,000428					

Dados normais (Teste de Anderson-Darling P-value = 0,326).

Fonte: Próprio autor.

Os valores de η para emissão acústica foram analisados e podem ser observados na Figura 54.

Figura 54 - Efeitos principais para os valores da razão sinal-ruído de emissão acústica.



Signal-to-noise: Menor é melhor

Fonte: Próprio autor.

Os parâmetros que apresentaram a menor variabilidade durante o processo de torneamento foram $v_c = 350$ m/min e $f = 0,25$ mm/rev. Para a verificação da significância dos efeitos desses parâmetros sobre a variabilidade do sinal de emissão acústica, foi realizada a análise de variância, que está apresentada na Tabela 60.

Tabela 60 - ANOVA da razão sinal-ruído para os valores de emissão acústica.

Fonte	GF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
Velocidade de corte	1	0,062176	0,062176	0,062176	0,27	0,693	21,13
Avanço	1	0,005040	0,005040	0,005040	0,02	0,906	1,71
Erro residual	1	0,227044	0,227044	0,227044			77,16
Total	3	0,294260					

Dados normais (Teste de Anderson-Darling P-value = 0,774).

Fonte: Próprio autor.

Da mesma forma como ocorrido para os valores médios de emissão acústica, nenhum dos fatores mostrou efeitos significativos nos valores da razão sinal-ruído de EA. Os ruídos do processo tem uma influência grande dentro dos valores de S/N de emissão, com contribuição de 77,16%.

4.4.5 Vibração

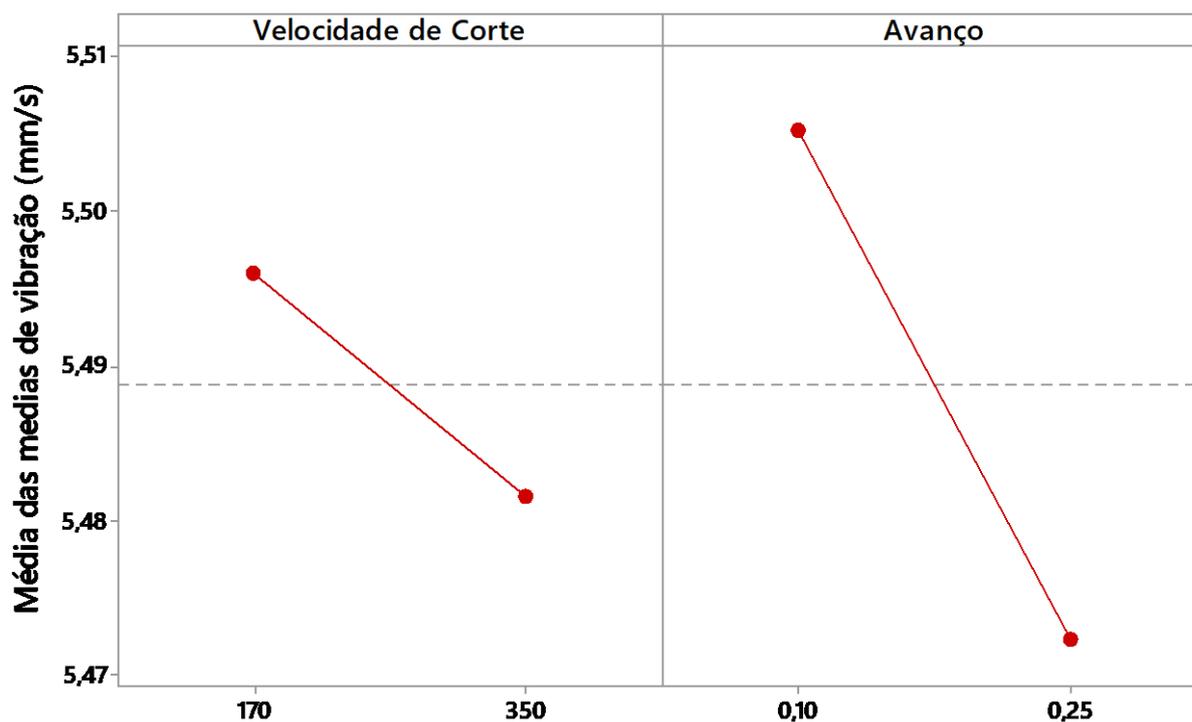
Os valores dos efeitos principais dos fatores de velocidade de corte e avanço para os valores de vibração é mostrado na Figura 55.

A média das médias de vibração foi de 5,489 mm/s. A análise gráfica dos efeitos revelou que os menores valores de vibração foram obtidos quando os parâmetros de velocidade de corte e avanço assumiram, respectivamente, os valores de 350 m/min e 0,25mm/rev. Essas análise gráfica precisa ser acompanhada pela análise de variância das médias para estabelecer quais destes fatores teve efeitos significativos sobre o sinal de vibração. A ANOVA pode ser observada na Tabela 61.

A análise de vibração auxilia a explicação de rugosidades altas para velocidades de corte altas. No caso das condições dinâmicas de corte, as vibrações obtidas não diferiram estatisticamente nas diferentes condições de corte, sendo então as rugosidades influenciadas pelo lascamento das ferramentas.

Como ocorrido também com o sinal de emissão acústica na usinagem com a ferramenta de cBN, nenhum dos fatores mostrou efeitos significativos sobre os valores de vibração e a contribuição do erro residual é grande (73,83%), indicando a possibilidade de haver outros fatores que não foram medidos que influenciam os valores de vibração.

Figura 55 - Efeitos principais para os valores médios de vibração no uso da ferramenta de cBN.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 61 - Análise de variância dos valores médios de vibração.

Fonte	GF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
Velocidade de corte	1	0,000208	0,000208	0,000208	0,06	0,850	4,22
Avanço	1	0,001080	0,001080	0,001080	0,30	0,682	21,93
Erro residual	1	0,003636	0,003636	0,003636			73,83
Total	3	0,004925					

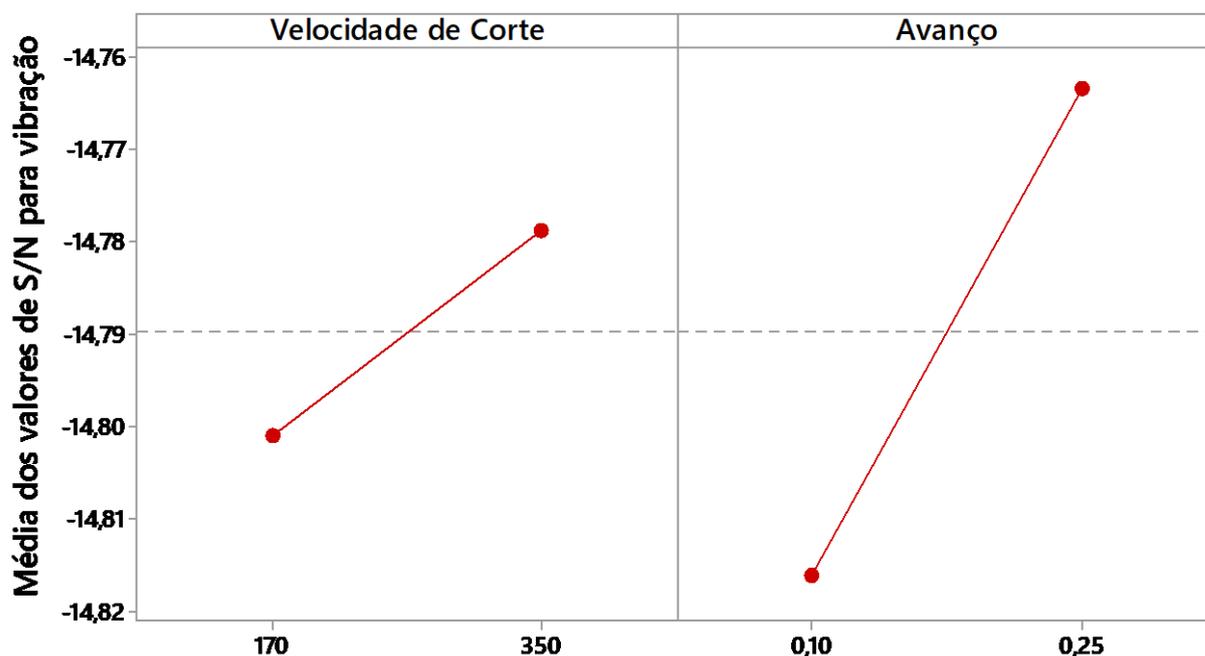
Dados normais (Teste de Anderson-Darling P-value = 0,427)

Fonte: Próprio autor.

Na Figura 56 encontram-se os efeitos dos fatores sobre os valores das razões sinal-ruído para vibração.

A menor variabilidade do processo de torneamento com relação aos valores de vibração foi obtida quando a ferramenta de cBN usinou com $v_c = 350$ m/min e $f = 0,25$ mm/rev. Foi necessário verificar se os efeitos sobre η de vibração são significativos através de ANOVA, presente na Tabela 62.

Figura 56 - Efeitos principais dos fatores de corte sobre S/N de vibração.



Signal-to-noise: Menor é melhor

Fonte: Próprio autor.

Tabela 62 - ANOVA dos valores de S/N para a variável vibração.

Fonte	GF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
Velocidade de corte	1	0,000493	0,000493	0,000493	0,05	0,856	3,94
Avanço	1	0,002785	0,002785	0,002785	0,30	0,681	22,23
Erro residual	1	0,009249	0,009249	0,009249			73,83
Total	3	0,012527					

Dados normais (Teste de Anderson-Darling P-value = 0,637).

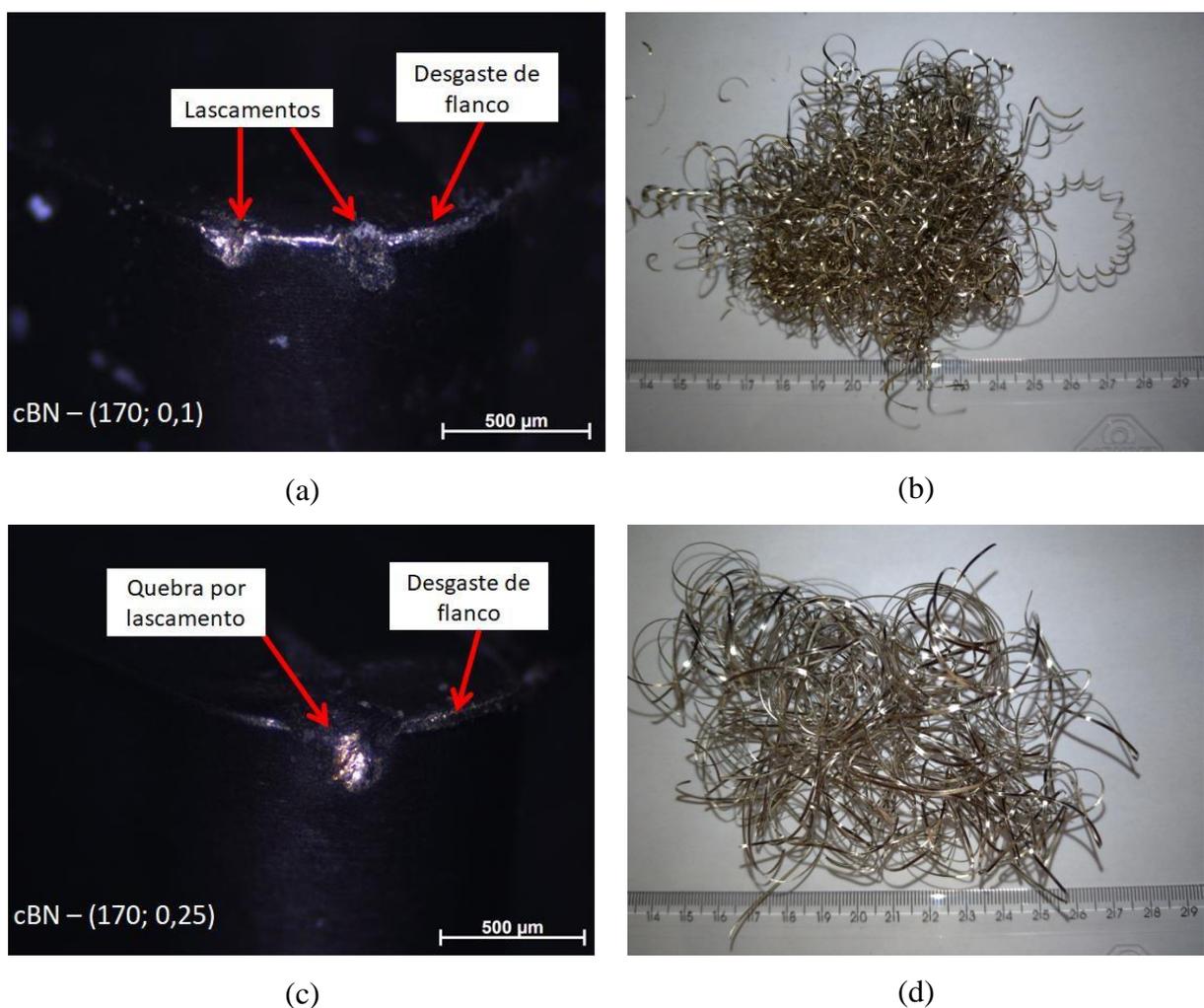
Fonte: Próprio autor.

Pela análise de variância dos valores de S/N de vibração, nenhum dos fatores analisado mostrou efeitos significativos. Os ruídos do processo tiveram uma influência grande sobre a variabilidade do processo, indicando que outros fatores não mensurados tem influência sobre a vibração do sistema.

4.4.6 Análise dos desgastes das ferramentas e dos cavacos gerados

Os desgastes das ferramentas de cBN e os cavacos gerados durante o torneamento da superliga VAT 32[®] podem ser observados nas Figuras 57 e 58. Nessas figuras, a condição de corte está marcada na imagem do desgaste e o cavaco adjacente é o cavaco gerado durante o corte com aquela condição.

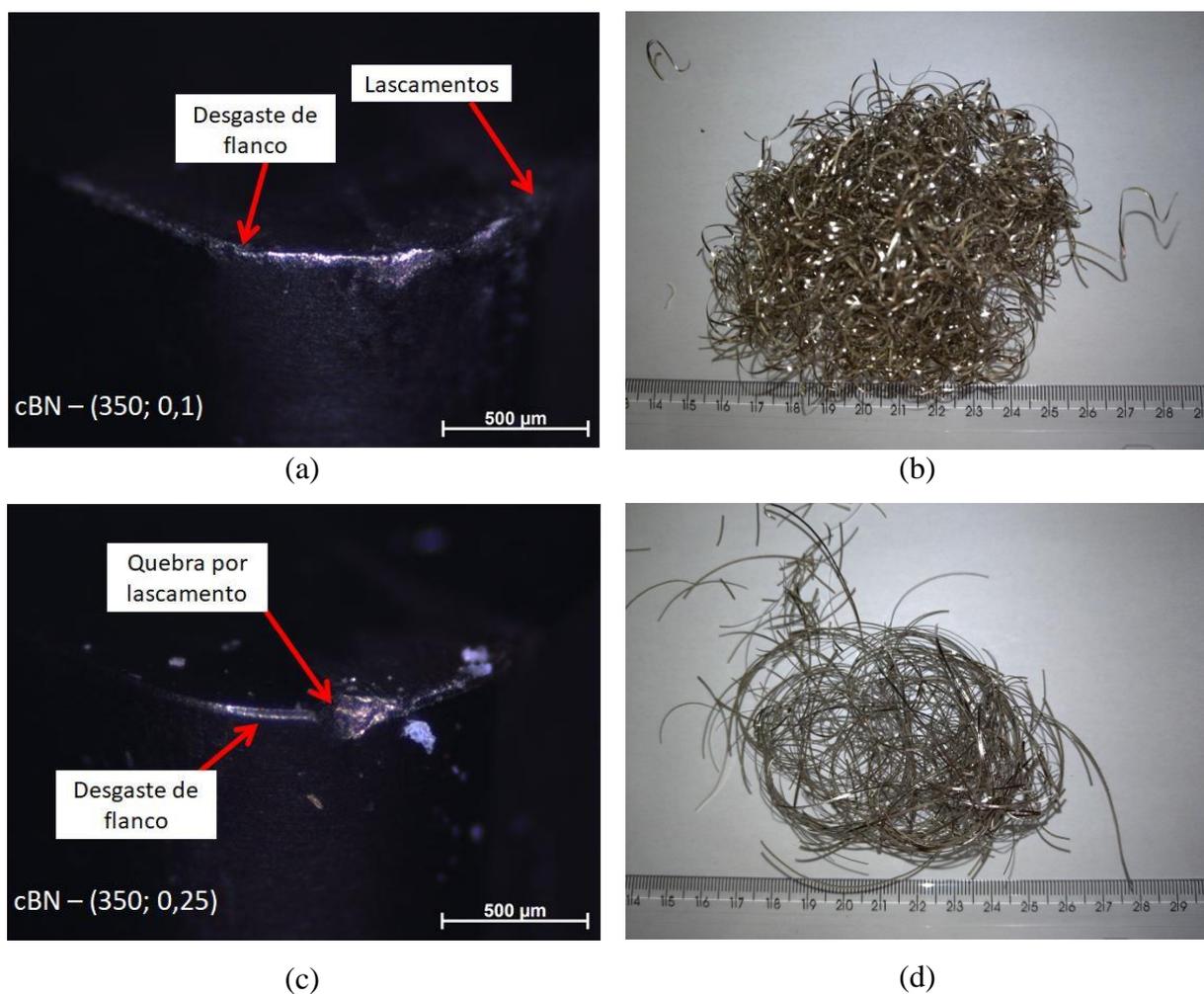
Figura 57 - Desgastes das ferramentas de cBN 170 e cavacos gerados durante a usinagem com $v_c=170$ m/min.



Fonte: Próprio autor.

A ferramenta de cBN apresentou os desgastes de flanco, ocasionados por mecanismos abrasivo relacionados ao atrito ferramenta-peça. Ocorreram também lascamentos e quebras por lascamentos das arestas de corte. O lascamento ocorre devido a dureza alta do material da ferramenta.

Figura 58 - Desgastes das ferramentas de corte de cBN 170 e cavacos gerados na usinagem com $v_c=350\text{m/min}$.



Fonte: Próprio autor.

A matriz austenítica do VAT 32[®] é menos dura do que os carbonetos de nióbio na liga, e, durante o torneamento, a ferramenta de cBN não encontrava dificuldade no corte da matriz austenítica. Mas, quando a ferramenta encontrava um carboneto de nióbio, ocorria um choque mecânico devido a diferença de dureza da microestrutura. Estes choques ocasionaram a quebra por lascamento. Outro ponto importante é a formação do cavaco em fita do tipo emaranhado. Estes cavacos em fita causaram o desgaste excessivo na superfície de saída da

ferramenta, fragilizando o aresta pela retirada de material por abrasão, o que possivelmente auxiliou na quebra das arestas das ferramentas de cBN 170. Os cavacos observados eram cavacos de cisalhamento do tipo fita emaranhada. Este cavaco é prejudicial ao acabamento superficial, pois se acumula próximo à ferramenta de corte, entrando em contato com a superfície já usinada, o que prejudica os valores de rugosidade. Este pode ser um dos fatores que contribuíram para que os erros residuais relacionados aos parâmetros de rugosidade, emissão acústica e vibração sejam tão altos. A quebra das ferramentas é outro fator que pode ter contribuído para os erros residuais altos.

4.4.7 Análise relacional cinza e seleção das condições para o ensaio de vida

A condição de corte otimizada para a média de cada resposta analisada com o corte usando a ferramenta de cBN170 são mostradas na Tabela 63. Na tabela também é possível verificar a contribuição de cada fator e a tendência de aumento ou diminuição da resposta com a variação do nível.

Tabela 63 - Valores otimizados dos parâmetros de corte para o torneamento do VAT 32[®] com ferramenta de cBN170, relacionados as médias dos parâmetros de qualidade.

Fator	Parâmetro de qualidade					
	Potência de usinagem	Vb.1000/Lc	R _a	R _t	Emissão Acústica	Vibração
Média das médias	1172 W	1,974 m/m	1,967 µm	10,064 µm	0,3330 V RMS	5,489 mm/s
v _c (m/min)	170 (8,99%)	NS	170 (57,04%)	170 (62,86%) ↗	NS	NS
f (mm/rev)	0,1 (87,24%) ↗	0,1 (94,12%) ↗	NS	NS	NS	NS

NS → Efeito não significativo; Valores entre parênteses correspondem a contribuição; ↗ → Tendência de aumento da resposta com o aumento do parâmetro de corte; ↘ → Tendência de diminuição da resposta com o aumento do parâmetro de corte.

Fonte: Próprio autor.

Os níveis ótimos dos fatores para a minimização da variabilidade do processo de torneamento do VAT 32[®] podem ser encontrados na Tabela 64.

Como realizado para as outras ferramentas de corte, realizou-se a escolha dos parâmetros de corte para os testes de vida com base na análise relacional cinza. Sua primeira etapa consistiu na normalização dos dados dos fatores de qualidade pela Equação 10, etapa

esta também conhecida como geração relacional cinza. A normalização pode ser encontrada na Tabela 65.

Com os valores normalizados para que a variação e a magnitude dos valores dos parâmetros não tenham influência sobre a análise e para que eles possam ser comparados entre si, realizou-se a etapa de obtenção das sequências de desvio $\Delta_{oi}(k)$ pela Equação 13, e que podem ser observadas na Tabela 66.

Tabela 64 - Valores otimizados dos parâmetros de corte para a menor variabilidade do processo de torneamento do VAT 32[®] com ferramenta cBN170.

Fator	Parâmetro de qualidade					
	Potência de usinagem	Vb.1000/Lc	R _a	R _t	Emissão Acústica	Vibração
v _c (m/min)	NS	NS	NS	170 (46,57%)	NS	NS
f (mm/rev)	0,1 (82,46%)	0,1 (94,12%)	NS	NS	NS	NS

NS → Efeito não significativo; Valores entre parênteses correspondem a contribuição; ↗ → Tendência de aumento da resposta com o aumento do parâmetro de corte; ↘ → Tendência de diminuição da resposta com o aumento do parâmetro de corte.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 65 - Etapa de geração relacional cinza para normalização dos dados de qualidade do processo de torneamento com pastilha de cBN.

Experimento	R _a	R _t	VB.100/L _c	Potência de usinagem	Emissão Acústica	Vibração
1	0,977	0,984	0,700	1,000	0,285	0,561
2	0,934	0,450	0,847	0,961	0,855	0,677
3	0,707	0,705	0,174	0,370	0,211	0,596
4	0,471	0,673	0,163	0,127	0,125	0,421
5	1,000	1,000	0,879	0,633	0,000	0,000
6	0,000	0,000	1,000	0,687	0,705	0,868
7	0,390	0,595	0,234	0,360	1,000	1,000
8	0,488	0,687	0,000	0,000	0,735	0,621

Fonte: Próprio autor.

Tabela 66 - Obtenção das sequências de desvio $\Delta_{0i}(k)$ dos parâmetros de qualidade do torneamento com pastilha de cBN.

Experimento	$\Delta_{0i}(k)$					
	R_a	R_t	VB.100/ L_c	Potência de usinagem	Emissão Acústica	Vibração
1	0,023	0,016	0,300	0,000	0,715	0,439
2	0,066	0,550	0,153	0,039	0,145	0,323
3	0,293	0,295	0,826	0,630	0,789	0,404
4	0,529	0,327	0,837	0,873	0,875	0,579
5	0,000	0,000	0,121	0,367	1,000	1,000
6	1,000	1,000	0,000	0,313	0,295	0,132
7	0,610	0,405	0,766	0,640	0,000	0,000
8	0,512	0,313	1,000	1,000	0,265	0,379

Fonte: Próprio autor.

A terceira etapa da GRA consistiu na obtenção dos valores de coeficiente relacional cinza γ (GRC) pela Equação 14 e que pode ser vista na Tabela 67.

Tabela 67 - Coeficiente relacional cinza γ dos fatores de qualidade analisados no torneamento do VAT 32[®] com pastilha de cBN.

Experimento	γ (GRC)					
	R_a	R_t	VB.100/ L_c	Potência de usinagem	Emissão Acústica	Vibração
1	0,956	0,969	0,625	1,000	0,412	0,533
2	0,884	0,476	0,765	0,928	0,775	0,608
3	0,630	0,629	0,377	0,442	0,388	0,553
4	0,486	0,605	0,374	0,364	0,364	0,463
5	1,000	1,000	0,805	0,577	0,333	0,333
6	0,333	0,333	1,000	0,615	0,629	0,791
7	0,450	0,553	0,395	0,439	1,000	1,000
8	0,494	0,615	0,333	0,333	0,654	0,569

Fonte: Próprio autor.

A quarta etapa da GRA foi realizada através da aplicação da Equação 15 para a obtenção dos valores da classificação relacional cinza (GRG). Os valores obtidos e a classificação geral dos experimentos podem ser encontradas na Tabela 68.

Tabela 68 - Obtenção da classificação relacional cinza (GRC) e classificação geral dos experimentos com pastilha de cBN.

Experimento	Velocidade de corte v_c (m/min)	Avanço f (mm/rev)	GRC	Classificação
1	170	0,1	0,824	1
2	170	0,1	0,747	2
3	170	0,25	0,525	6
4	170	0,25	0,457	8
5	350	0,1	0,736	3
6	350	0,1	0,554	5
7	350	0,25	0,586	4
8	350	0,25	0,493	7

Fonte: Próprio autor.

A classificação relacional cinza de maior valor foi obtida no experimento um, o que significa que durante esse experimento, obteve-se os valores dos parâmetros de qualidade mais próximos do considerado ideal. Portanto, os ensaios de vida para a ferramenta cBN170 foram realizados utilizando-se $v_c = 170$ m/min e $f = 0,1$ mm/rev.

4.5 ENSAIOS COM AS FERRAMENTAS CERÂMICAS DE Al_2O_3+MgO

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos para o torneamento da superliga VAT 32[®] utilizando a ferramenta experimental cerâmica de Al_2O_3+MgO com relação aos fatores de qualidade, da mesma maneira vistas nas seções 4.2, 4.3 e 4.4 para as outras ferramentas de corte. Um sub-tópico sobre os desgastes encontrados e sobre os cavacos também está nesta seção. A análise relacional cinza (GRA) é outra mostrada na sequência, análise importante para a seleção das condições de corte que foram utilizadas nos ensaios de vida desta ferramenta de corte. Na última seção deste tópico também é encontrado um resumo do desempenho da ferramenta com relação às respostas.

A sequência experimental pode ser encontrada na Tabela 10.

4.5.1 Potência de usinagem

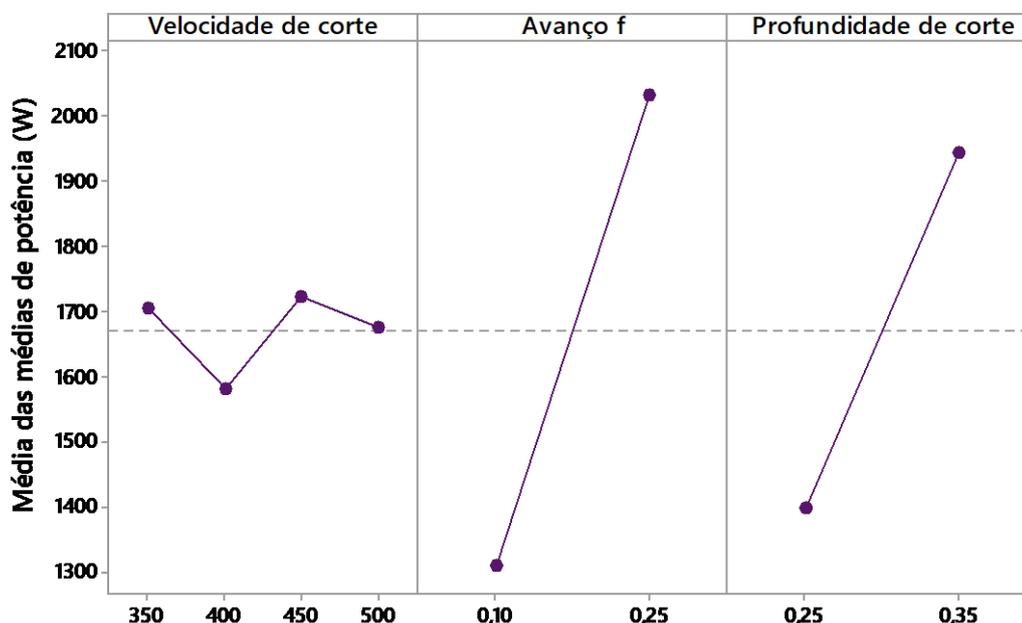
Os valores dos efeitos principais para potência de usinagem no torneamento da superliga VAT 32[®] com a ferramenta experimental cerâmica de alumina e óxido de magnésio foram calculados e podem ser vistos na Figura 59.

A média das médias de potência de usinagem para a ferramenta cerâmica foi de 1671,8 W, representada na Figura 59 pela linha tracejada. As menores médias de potência de usinagem foram obtidas na $v_c = 400$ m/min, $f = 0,10$ mm/rev e $a_p = 0,25$ mm. Foi então realizada a análise de variância das médias para verificar se os efeitos dos fatores são significativos. Essa ANOVA está apresentada na Tabela 69.

Os fatores avanço e profundidade de usinagem demonstraram efeitos significativos sobre a média de potência de usinagem, com contribuições respectivas de 61,38% e 34,88%. Isso quer dizer que valores estatisticamente diferentes de potência foram obtidos quando o avanço mudou de 0,1 para 0,25 mm/rev e quando o a_p passou de 0,25 para 0,35 mm. A velocidade de corte não apresentou efeitos significativos na potência de usinagem para a pastilha cerâmica, dentro dos valores testados entre 350 e 500 m/min.

Pinheiro (2018) estudou o torneamento da superliga Inconel 718 com a ferramenta cerâmica de Al_2O_3+MgO . Os parâmetros estudados foram $v_c = 300, 400$ e 500 m/min, $f = 0,10, 0,20$ e $0,30$ mm/rev e $a_p = 0,20, 0,35$ e $0,50$ mm em usinagem a seco. Em relação a potência de usinagem, o comportamento de usinagem da pastilha cerâmica para o Inconel 718 e para o VAT 32[®] são muito similares. Os efeitos de avanço e profundidade de usinagem foram significativos e os valores de velocidade de corte não se mostraram significativos. O aumento da potência de corte com aumento do avanço e da profundidade de usinagem se deve ao aumento do volume de material que está sendo removido.

Figura 59- Efeitos principais para a média de potência de usinagem no torneamento com pastilha cerâmica.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 69 - ANOVA para os valores médios de potência de usinagem para ferramenta cerâmica.

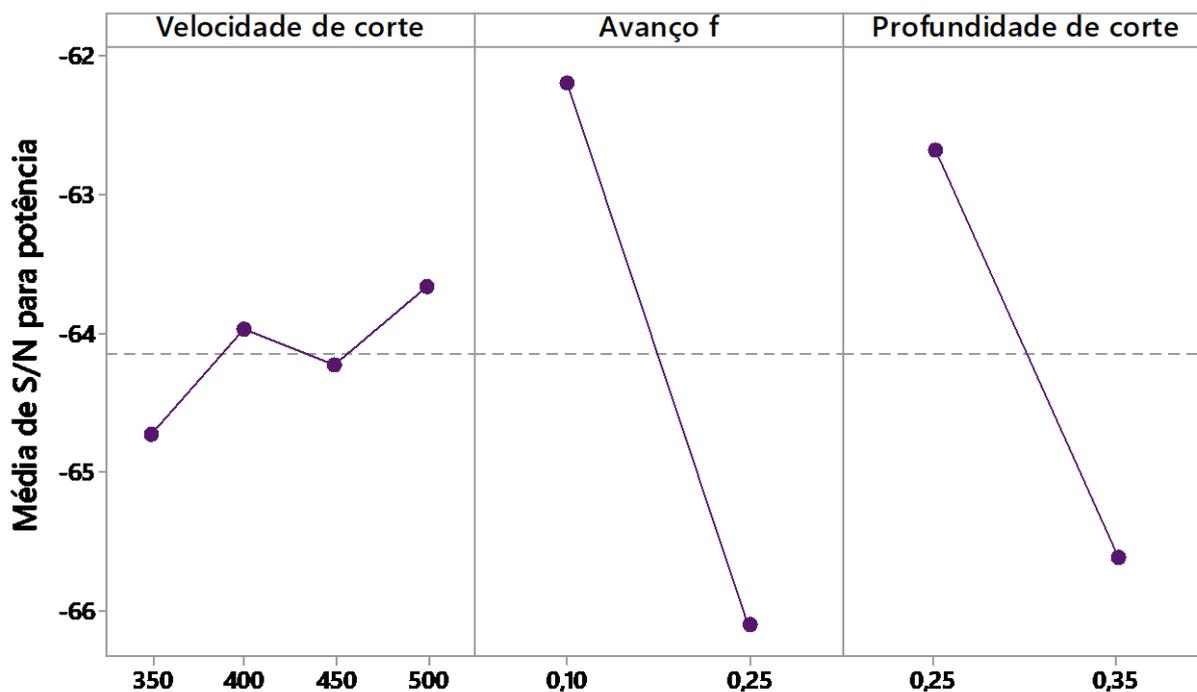
Fonte	GF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
v_c	3	23169	23169	7723	0,38	0,780	1,36
f	1	1044955	1044955	1044955	51,68	0,019	61,38
a_p	1	593800	593800	593800	29,37	0,032	34,88
Erro residual	2	40438	40438	40438			2,38
Total	7	1702362					

Dados normais (Teste de Anderson-Darling P-value = 0,436).

Fonte: Próprio autor.

Para encontrar uma configuração de processo que menos interfira nos valores de potência de usinagem, obteve-se os valores da razão sinal-ruído para potência, através da Equação 9. Os efeitos principais dos fatores sobre os valores de η podem ser observados na Figura 60.

Figura 60 - Efeitos principais para os valores de η de potência de usinagem.



Signal-to-noise: Menor é melhor

Fonte: Próprio autor.

A menor variabilidade do processo com relação a potência de usinagem foi alcançada utilizando-se $v_c = 500$ m/min, $f = 0,10$ mm/rev e $a_p = 0,25$ mm, níveis nos quais foram obtidos os maiores valores da razão sinal-ruído. Os dados então foram submetidos à análise de variância para observação da significância dos efeitos sobre a variabilidade do processo. A ANOVA de η pode ser encontrada na Tabela 70.

Tabela 70 - ANOVA para os valores de η para potência de usinagem da ferramenta cerâmica.

Fonte	GF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
v_c	3	1,226	1,226	0,4085	0,57	0,686	2,44
f	1	30,353	30,353	30,353	42,55	0,023	60,40
a_p	1	17,244	17,244	17,244	24,17	0,039	34,32
Erro residual	2	1,427	1,427	1,427			2,84
Total	7	50,249					

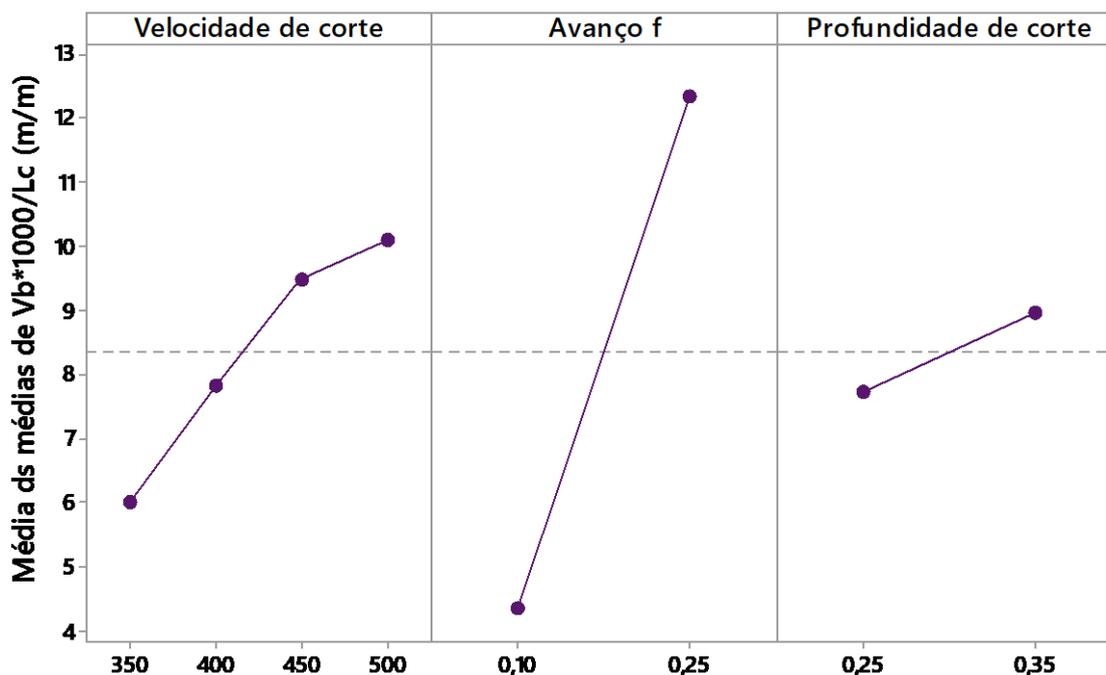
Dados normais (Teste de Anderson-Darling P-value = 0,543).

Fonte: Próprio autor.

Os fatores com maiores contribuições para a variabilidade da potência de usinagem no processo de torneamento do VAT 32[®] com ferramenta cerâmica são, em ordem decrescente de contribuição, avanço (60,40%) e profundidade de usinagem (34,32%). O fator velocidade de corte não mostrou efeitos significativos sobre os valores de S/N de potência de usinagem.

4.5.2 Desgaste de flanco V_B /comprimento de corte L_c

Os dados experimentais de desgaste por comprimento usinado foram submetidos à análise de médias para levantamento dos efeitos principais dos fatores sobre esta variável resposta. Esses efeitos podem ser vistos na Figura 61.

Figura 61 - Análise de médias para os valores de $V_b \cdot 1000 / L_c$.

Fonte: Próprio autor.

A média das médias de $V_b \cdot 1000 / L_c$ foi de 8,353 m/m. Os menores valores de desgaste foram obtidos com a $v_c = 350$ m/min, $f = 0,10$ mm/rev e $a_p = 0,25$ mm. Foi necessário, no entanto, realizar uma análise de variância para identificação dos efeitos significativos para o processo. A ANOVA pode ser observada na Tabela 71.

Tabela 71 - Análise de variância para a média de $V_b \cdot 1000 / L_c$.

Fonte	GF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
v_c	3	20,081	20,081	6,694	0,95	0,551	12,24
f	1	126,868	126,868	126,868	17,93	0,051	77,32
a_p	1	2,993	2,993	2,993	0,42	0,582	1,82
Erro residual	2	14,148	14,148	14,148			8,62
Total	7	164,090					

Dados normais (Teste de Anderson-Darling P-value = 0,196).

Fonte: Próprio autor.

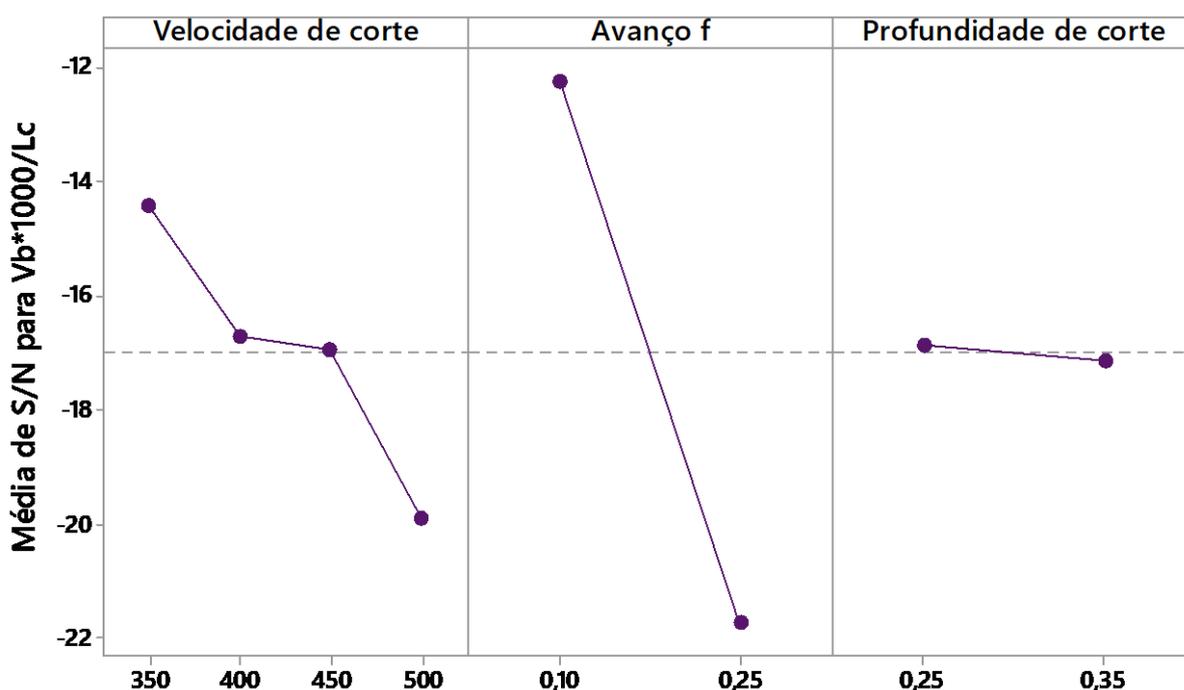
Para os valores médios de desgaste por comprimento de corte, observou-se que o avanço foi o único fator com influência significativa, com contribuição de 77,32%. Pelo valor de F ser menor que 2, velocidade de corte e profundidade de usinagem não apresentaram

desgastes diferentes para os diferentes níveis testados.

Comparando os resultados obtidos com os de Pinheiro (2018), o avanço também foi o único fator avaliado que mostrou efeitos significativos na relação do desgaste de flanco pelo comprimento usinado. Maiores avanços resultaram numa razão de desgaste maior. Para ferramentas de metal duro e cBN, o aumento da velocidade de corte gera uma maior temperatura na interface ferramenta-peça e cavaco-peça, o que acelera o desgaste. As ferramentas cerâmicas de alumina são notoriamente isolantes térmicos, o que resulta na diminuição dos efeitos negativos de altas velocidades de corte no desgaste das ferramentas. Bushlya et al. (2013) testaram ferramentas de corte de alumina reforçada com *whiskers* de SiC e verificaram que os efeitos da velocidade de corte e do avanço foram pouco significativos na vida das pastilhas. Isso é um indicativo de que a carga mecânica sobre a ferramenta experimental de $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{MgO}$, testada nesta tese, teve maior influência no desgaste de flanco do que a carga térmica, isso durante a usinagem do VAT 32[®].

Investigou-se posteriormente a variabilidade do processo pelos valores de S/N da variável $\text{Vb}.1000/\text{L}_c$. Os efeitos principais dos valores da razão sinal-ruído podem ser vistos na Figura 62.

Figura 62 - Efeitos principais para S/N de $\text{Vb}.1000/\text{L}_c$ no tornemanto com ferramenta cerâmica.



Signal-to-noise: Menor é melhor

Fonte: Próprio autor.

Pelo gráfico de efeitos pode-se observar que a menor variabilidade do processo com relação a razão desgaste/comprimento usinado foi obtida quando o nível dos fatores foram $v_c = 350$ m/min, $f = 0,10$ mm/rev e $a_p = 0,25$ mm. Foi necessário verificar, utilizando a análise de variância, quais desses fatores tinham efeitos significativos na variabilidade do processo em relação a resposta analisada. Essa análise pode ser encontrada na Tabela 72.

Tabela 72 - ANOVA de S/N para a resposta $V_b.1000/L_c$ na usinagem com pastilha de cerâmica.

Fonte	GF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
v_c	3	29,986	29,986	9,995	0,94	0,553	12,94
f	1	180,216	180,216	180,216	16,90	0,054	77,79
a_p	1	0,145	0,145	0,145	0,01	0,918	0,06
Erro residual	2	21,328	21,328	21,328			9,20
Total	7	231,675					

Dados normais (Teste de Anderson-Darling P-value = 0,543).

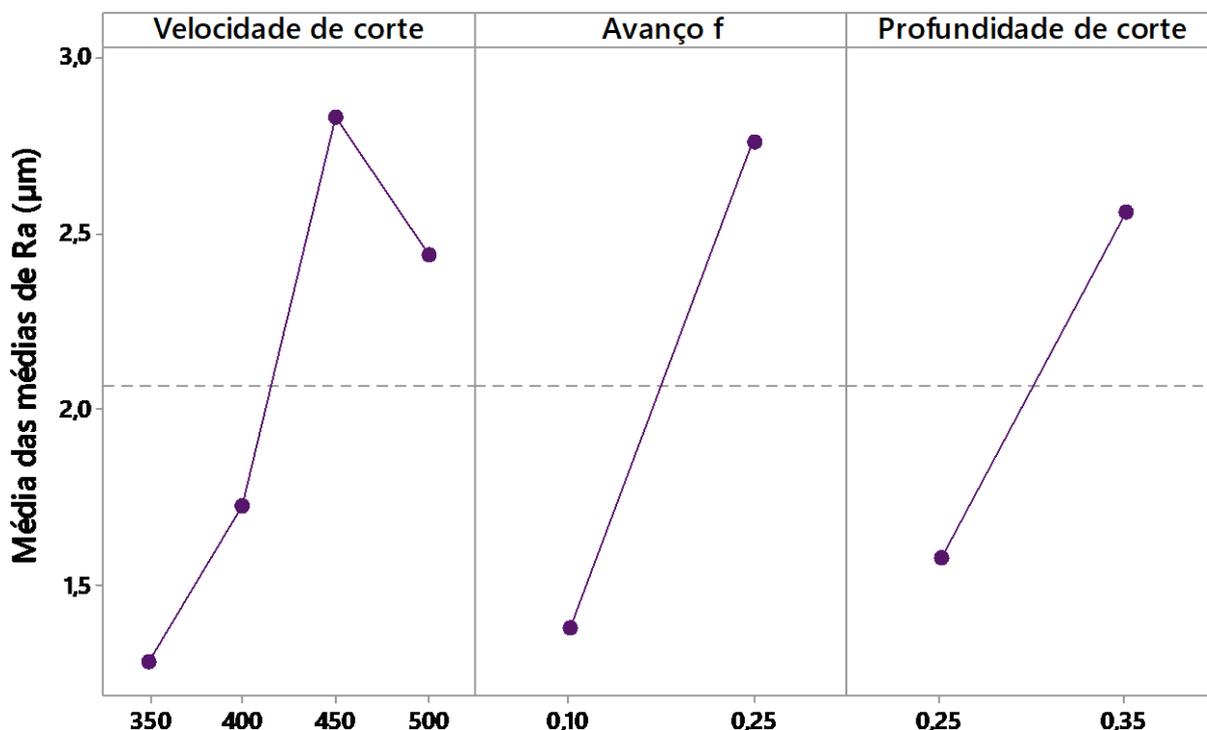
Fonte: Próprio autor.

Dentre os fatores analisados, apenas o avanço mostrou influência significativa na variabilidade de $V_b.1000/L_c$, com uma contribuição de 77,79%. Os outros fatores podem assumir qualquer valor dentro dos níveis testados uma vez que não possuem efeitos significativos para a variabilidade do processo, otimizando-se $V_b.1000/L_c$.

4.5.3 Rugosidades R_a e 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_a e R_t . Na Figura 63 é apresentada à análise de médias dos valores de R_a no torneamento com ferramenta de cerâmica.

Figura 63 - Análise de médias para rugosidade R_a no torneamento com pastilha de cerâmica.



Fonte: Próprio autor.

Os menores valores de rugosidade, pontos mais baixos do gráfico de efeitos, foram obtidos para os parâmetros de corte $v_c = 350$ m/min, $f = 0,10$ mm/rev e $a_p = 0,25$ mm. Os dados então foram submetidos a análise de variância para verificação da significância dos efeitos sobre os valores médios de R_a .

Na preparação dos dados para a realização da ANOVA, realizou-se o teste de Anderson-Darling para averiguação da normalidade dos dados, algo fundamental para a aplicação da ANOVA. Com o teste verificou-se que os dados de rugosidade R_a não eram normais (P-value = 0,038). Aplicou-se então a transformação de Johnson, aplicando-se a Equação 28, para a normalização dos dados.

$$Ra_{normalizado} = 1,23925 + 0,711114 \cdot \ln\left(\frac{Ra - 0,646719}{7,56992 - Ra}\right) \quad (28)$$

Com os dados de R_a normalizados pela transformação de Johnson, realizou-se a análise de variância, que pode ser vista na Tabela 73.

Tabela 73 - ANOVA dos dados normalizados de R_a para a usinagem com ferramenta de cerâmica.

Fonte	GF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
v_c	3	5,8155	5,8155	1,9385	2,54	0,116	33,30
f	1	7,5465	7,5465	7,5465	9,87	0,010	43,22
a_p	1	3,8812	3,8812	3,8812	5,08	0,048	22,23
Erro residual	2	0,2186	0,2186	7,6463			1,25
Total	7	17,4618	17,4618				

Dados normais (Teste de Anderson-Darling P-value = 0,978).

Fonte: Próprio autor.

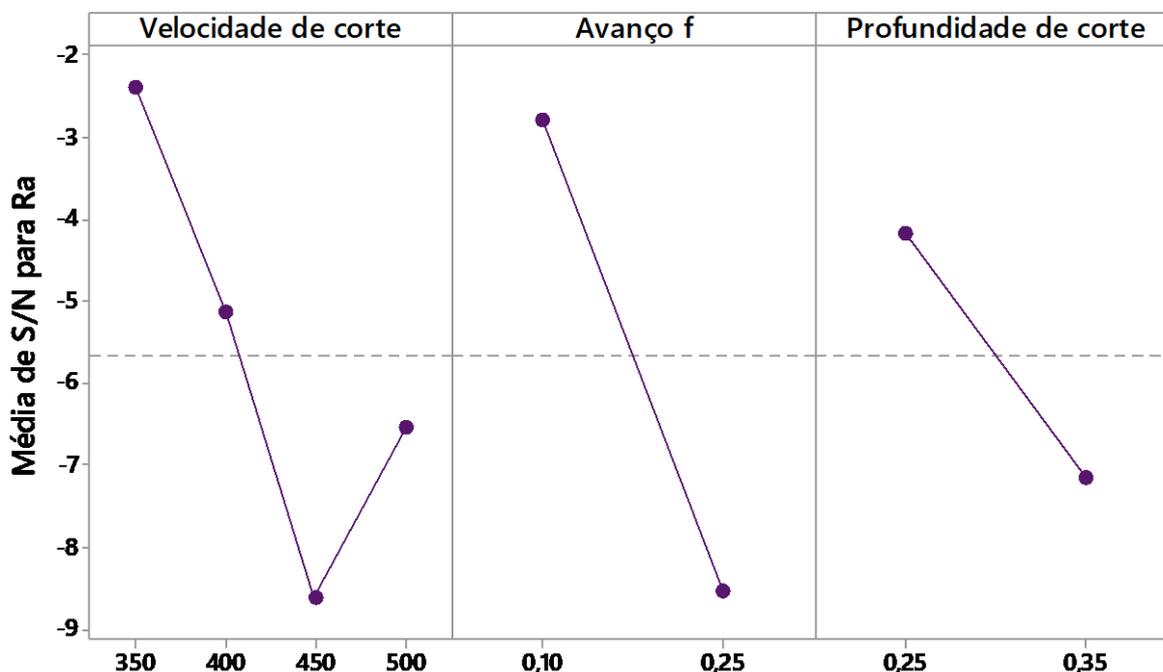
Os fatores que exerceram efeitos significativos nos valores médios de R_a foram avanço e profundidade de usinagem, com contribuições respectivas de 43,22% e 22,23%. Os efeitos da velocidade de corte não são pequenos o suficiente para serem desprezados, $F > 2$.

A influência do avanço sobre os valores de rugosidade já era esperado de acordo com Machado et al. (2011) e Diniz et al. (2006), onde menores avanços resultam em acabamentos superficiais melhores, ou seja menores valores de R_a . A influência do avanço sobre R_a também foi encontrada por Pinheiro (2018).

Em seguida, investigou-se a combinação dos parâmetros para a obtenção de um processo robusto do ponto de vista da rugosidade R_a . Levantou-se então os valores da razão sinal-ruído η pela Equação 9. Os efeitos principais para os valores de S/N para a variável R_a podem ser vistos na Figura 64.

Os níveis dos fatores em que o processo apresentou menor variação nos valores de R_a foram $v_c = 350$ m/min, $f = 0,10$ mm/rev e $a_p = 0,25$ mm. Em seguida foi necessário realizar a análise de variância para os valores de η para R_a , e que podem ser vistos na Tabela 74. Esses valores foram obtidos pela Equação 9.

Figura 64 - Efeitos principais para os valores de S/N de R_a para ensaios com pastilha cerâmica.



Signal-to-noise: menor é melhor

Fonte: Próprio autor.

Tabela 74 - ANOVA dos valores de S/N para R_a no torneamento com ferramenta cerâmica.

Fonte	GF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
v_c	3	40,89	40,89	13,632	2,57	0,293	30,12
f	1	66,29	66,29	66,29	12,49	0,072	48,84
a_p	1	17,93	17,93	17,93	3,38	0,208	13,21
Erro residual	2	10,62	10,62	10,62			7,82
Total	7	135,73					

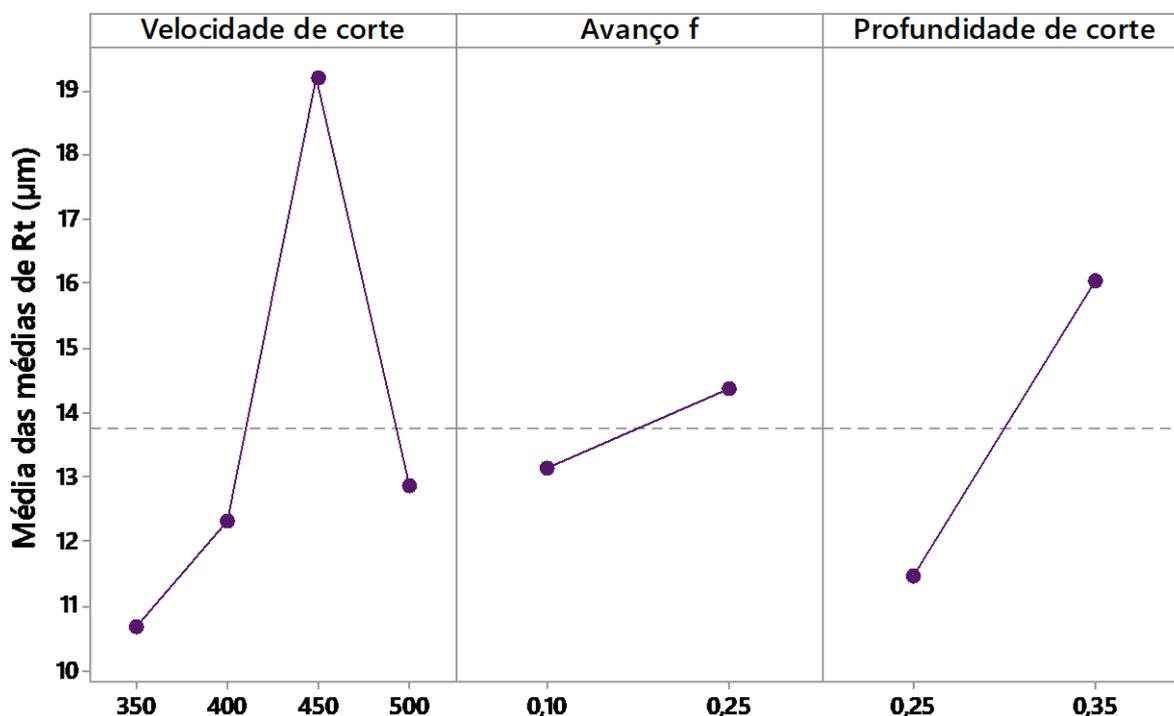
Dados normais (Teste de Anderson-Darling P-value = 0,199).

Fonte: Próprio autor.

Os efeitos de velocidade de corte e profundidade de usinagem, com valores de F maiores que dois e menores que 4, não possuem efeitos pequenos a ponto de serem desprezados, enquanto os efeitos do fator avanço são significativos para a variabilidade do processo em relação a R_a , com contribuição de 48,84%.

Com relação ao parâmetro de rugosidade R_t , a análise dos fatores que o influenciaram está presente na Figura 65.

Figura 65 - Efeitos principais para as médias de R_t obtidas na usinagem com pastilha cerâmica.



Fonte: Próprio autor.

A média das médias de R_t para usinagem do VAT 32[®] com ferramenta cerâmica foi de 13,765 μm . Os menores valores de R_t foram obtidos para $v_c = 350$ m/min, $f = 0,10$ mm/rev e $a_p = 0,25$ mm. Com o gráfico de efeitos principais, foi aplicada a análise de variância para os valores médios de R_t para levantamento das significâncias dos efeitos sobre a resposta analisada. A ANOVA pode ser vista na Tabela 75.

Tabela 75 - ANOVA para os valores médios de R_t .

Fonte	GF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
v_c	3	83,100	83,100	27,700	1,60	0,407	51,00
f	1	3,029	3,029	3,029	0,17	0,717	1,86
a_p	1	42,154	42,154	42,154	2,43	0,259	25,87
Erro residual	2	34,672	34,672	34,672			21,28
Total	7	162,955					

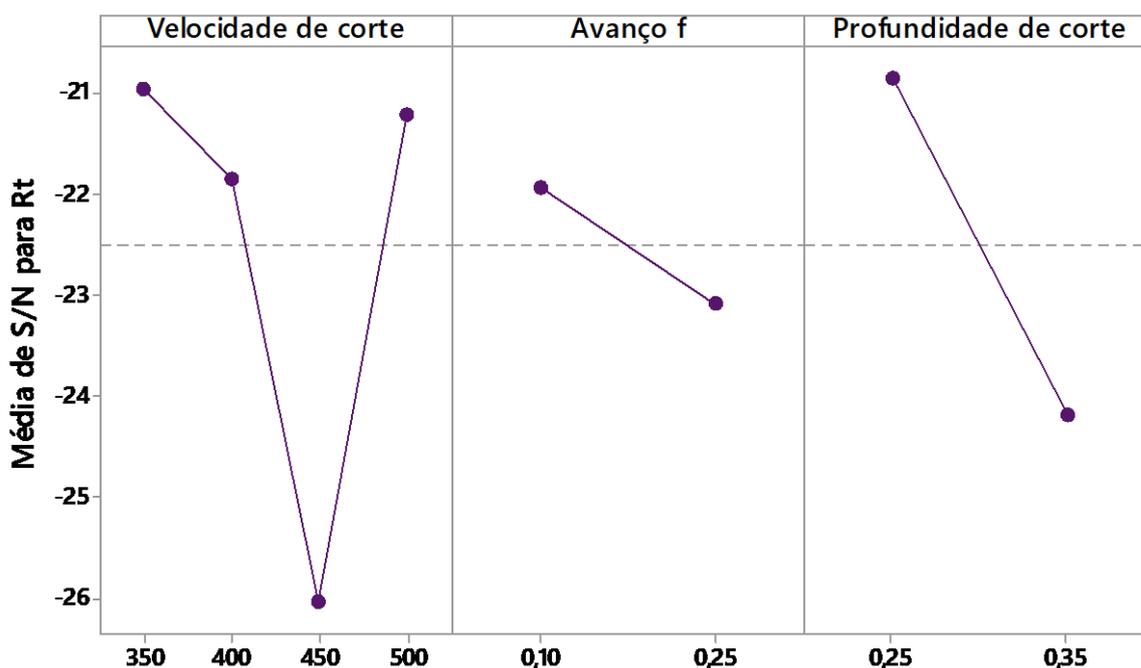
Dados normais (Teste de Anderson-Darling P-value = 0,524).

Fonte: Próprio autor.

Pela análise de variância, os fatores de velocidade de corte e avanço não mostraram efeitos significativos. Com um valor F de 2,43, o fator profundidade de usinagem não possui efeitos tão pequenos sobre R_t para serem desconsiderados.

Para a obtenção de uma configuração de processo robusta, analisou-se os valores da razão sinal-ruído de R_t . Na Figura 66, podem ser observados os efeitos principais da razão sinal-ruído dos fatores sobre R_t .

Figura 66 - Efeitos principais para S/N de R_t no processo de usinagem com ferramenta cerâmica.



Signal-to-noise: Menor é melhor

Fonte: Próprio autor.

A configuração de menor variabilidade dos valores de R_t no processo foram obtidas para $v_c = 350$ m/min, $f = 0,10$ mm/rev e $a_p = 0,25$ mm. Para averiguar se esses fatores possuem efeitos significativos sobre a variabilidade de R_t , foi realizada a análise de variância dos dados de η para R_t , que podem ser vistos na Tabela 76.

A ANOVA permitiu verificar que os efeitos de velocidade de corte e avanço não são significativos na variabilidade de R_t . O fator profundidade de usinagem tem efeitos que não são pequenos o suficiente para serem desconsiderados.

Tabela 76 - ANOVA dos valores médios de η para R_t .

Fonte	GF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
v_c	3	34,002	34,002	11,334	1,36	0,451	45,07
f	1	2,595	2,595	2,595	0,31	0,633	3,44
a_p	1	22,154	22,154	22,154	2,65	0,245	29,36
Erro residual	2	16,697	16,697	16,697			22,13
Total	7	75,448					

Dados normais (Teste de Anderson-Darling P-value = 0,581).

Fonte: Próprio autor.

Os valores teóricos de R_a e R_t também foram calculados para os avanços de 0,1 e 0,25 mm/rev e raio de ponta da ferramenta cerâmica de 0,4 mm, através das Equações 1 e 2. A comparação dos valores pode ser vista na Tabela 77.

Tabela 77 - Comparação da rugosidade teóricas e as obtidas experimentalmente no torneamento do VAT 32 com ferramenta de cerâmica.

Avanço (mm/rev)	R_a		Desvio	R_t		Desvio
	Teórico	Experimental		Teórico	Experimental	
0,10	0,802 μm	1,383 μm	72,44%	3,125 μm	13,149 μm	3207%
0,25	5,011 μm	2,757 μm	44,98%	19,531 μm	14,380 μm	26,37%

Fonte: Próprio autor.

Os valores em que a rugosidade experimental foi inferior a proposta pela teórica se deve ao fato de avaria das arestas de corte, o que modificou a geometria dessa aresta, resultado, em muitos casos, esses valores discrepantes.

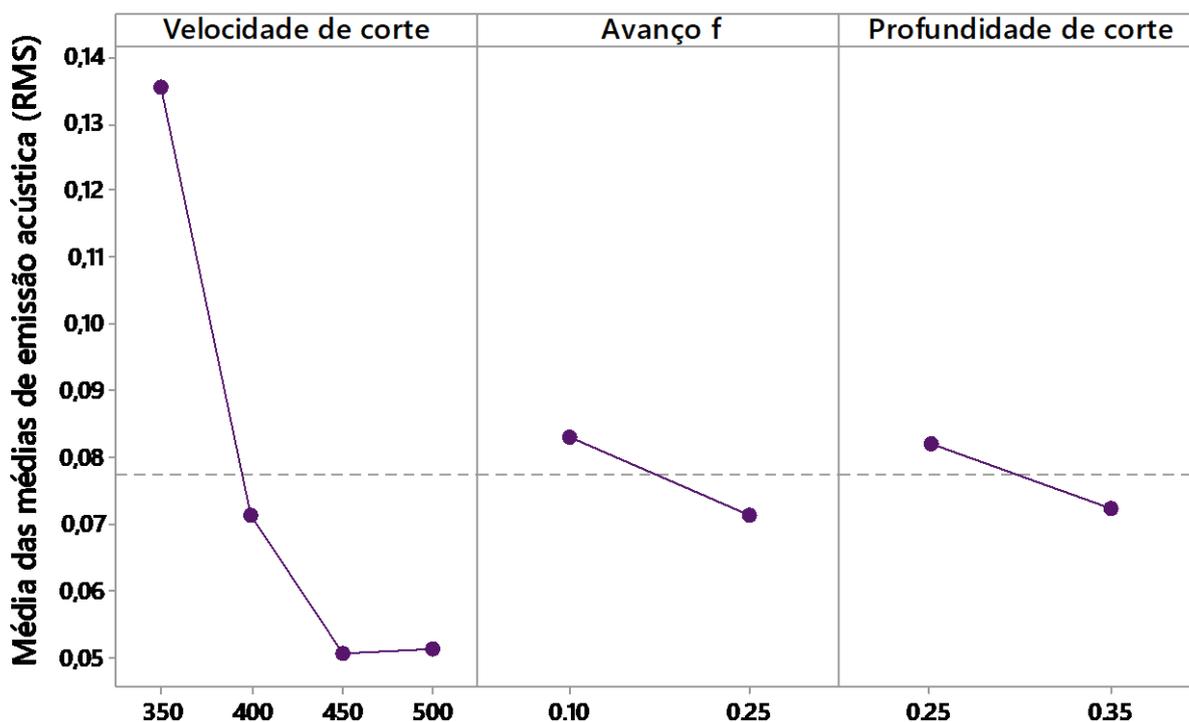
4.5.4 Emissão acústica

Com os sinais adquiridos de emissão acústica, foi realizada a análise de médias para averiguação dos efeitos dos fatores sobre a resposta. Os efeitos principais nos sinais de emissão acústica podem ser vistos na Figura 67.

Os menores valores de emissão acústica foram obtidos para $v_c = 450$ m/min, $f = 0,25$ mm/rev e $a_p = 0,35$ mm. A média das médias dos valores de emissão acústica para a ferramenta cerâmica foi de 0,0772 V RMS. Os efeitos precisaram passar por uma análise de

variância para verificar se são significativos para o sinal de emissão acústica. Um teste de normalidade de Anderson-Darling, realizado durante a preparação dos dados na análise de variância, mostrou que os dados de emissão acústica não possuem distribuição normal ($P\text{-value} < 0,005$). Para transformar o conjunto de dados para uma distribuição normal, utilizou-se da transformação de Johnson, pela Equação 29.

Figura 67 - Efeitos principais para os sinais de emissão acústica no tornemanto com ferramenta de cerâmica.



Fonte: Próprio autor.

$$EA_{normalizado} = -0,380619 + 0,459999 \cdot A_{senh}((EA - 0,0585889)/0,00345373) \quad (29)$$

A ANOVA dos dados normalizados de emissão acústica foi realizada e pode ser encontrada na Tabela 78.

Os efeitos de velocidade de corte (68,40%), profundidade de usinagem (15,16%) e avanço (14,68%) mostraram significância nos valores de emissão acústica. Comparando os dados com os encontrados por Pinheiro (2018), são os mesmos fatores significativos com relação ao sinal de emissão acústica, tanto na usinagem do VAT 32[®] como no torneamento do Inconel 718, porém maiores valores de velocidade de corte, avanço e profundidade resultaram no aumento de emissão acústica no VAT 32[®], enquanto no Inconel 718, na pesquisa de

Pinheiro (2018), a tendência é oposta, maiores valores de v_c , f , e a_p resultam em maiores valores de emissão acústica.

Tabela 78 - ANOVA dos dados normalizados de emissão acústica para usinagem com ferramenta de cerâmica.

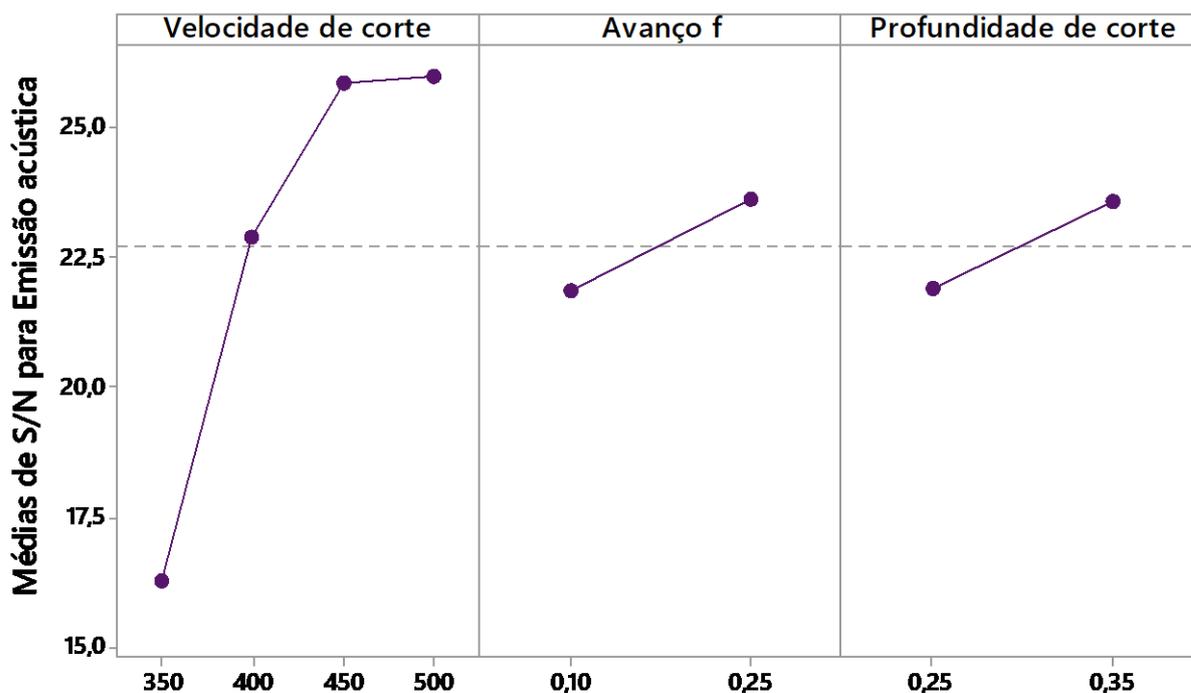
Fonte	GF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
v_c	3	7,7237	7,7237	2,5745	5,51	0,017	68,40
f	1	1,6571	1,6571	1,6571	3,54	0,089	14,68
a_p	1	1,7124	1,7124	1,7124	3,66	0,085	15,16
Erro residual	2	0,1980	0,1980	0,1980			1,75
Total	7	11,2912					

Dados normais (Teste de Anderson-Darling P-value = 0,813).

Fonte: Próprio autor.

A análise de variabilidade do processo com relação à emissão acústica foi realizada pelo cálculo e análise dos valores da razão sinal-ruído. A análise das médias de η para os valores de emissão acústica são encontrados na Figura 68.

Figura 68 – Efeitos principais da razão sinal-ruído para os valores de emissão acústica.



Signal-to-noise: Menor é melhor

Fonte: Próprio autor.

A velocidade de corte de 500 m/min, avanço de 0,25 mm/rev e profundidade de 0,35 mm foram os níveis nos quais o processo de torneamento do VAT 32[®] com ferramenta cerâmica apresentou a menor variabilidade do sinal de emissão acústica. Uma análise de variância foi então utilizada para encontrar se os efeitos desses fatores são significativos. A ANOVA de S/N de emissão acústica pode ser vista na Tabela 79.

Tabela 79 - ANOVA de S/N para o sinal de emissão acústica no torneamento com ferramenta de cerâmica.

Fonte	GF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
v_c	3	124,714	124,714	41,5713	1506,17	0,001	91,31
f	1	6,343	6,343	6,343	229,81	0,004	4,64
a_p	1	5,477	5,477	5,477	198,42	0,005	4,01
Erro residual	2	0,055	0,055	0,055			0,04
Total	7	136,589					

Dados normais (Teste de Anderson-Darling P-value = 0,148).

Fonte: Próprio autor.

Todos os fatores mostraram efeitos significativos sobre a variabilidade de emissão acústica, sendo que velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem possuem, respectivamente, a contribuição de 91,31%, 4,64% e 4,01%.

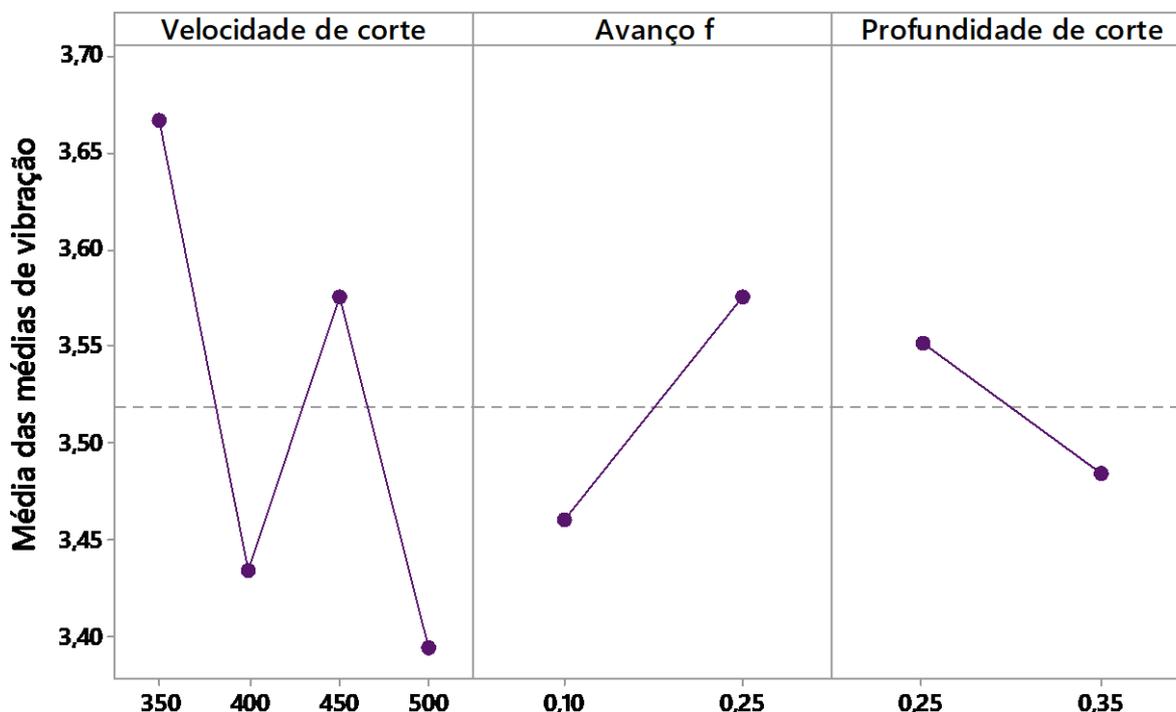
4.5.5 Vibração

Com a aquisição dos dados de vibração, realizou-se à análise dos efeitos principais dos fatores, que pode ser vista na Figura 69.

Os valores de menor vibração foram obtidos para $v_c = 500$ m/min, $f = 0,10$ mm/rev e $a_p = 0,35$ mm. A média das médias de vibração para os ensaios com a ferramenta de cerâmica foi de 3,518 mm/s. Os valores de vibração foram então submetidos a uma análise de variância para verificação da significância dos efeitos dos fatores sobre os valores médios de vibração. A ANOVA pode ser vista na Tabela 80.

Nenhum dos fatores mostrou efeitos estatisticamente significativos para a média dos valores de vibração. Este resultado também foi encontrado na usinagem do Inconel 718 com ferramenta cerâmica (Al_2O_3+MgO) por Pinheiro (2018).

Figura 69 - Análise de médias para os valores médios de vibração no torneamento com a pastilha cerâmica.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 80 - ANOVA dos valores médios de vibração para o torneamento com ferramenta cerâmica.

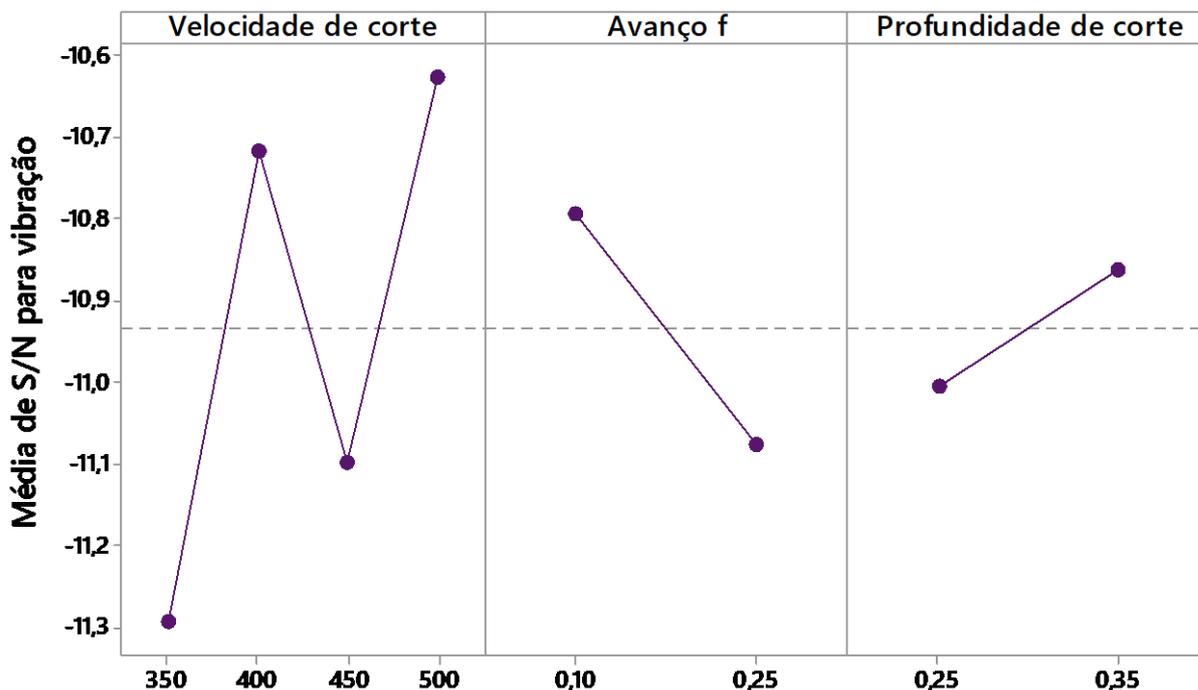
Fonte	GF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
v_c	3	0,095315	0,095315	0,031772	1,89	0,364	57,87
f	1	0,026738	0,026738	0,026738	1,59	0,334	16,23
a_p	1	0,009098	0,009098	0,009098	0,54	0,538	5,51
Erro residual	2	0,033562	0,033562	0,033562			20,38
Total	7	0,164713					

Dados normais (Teste de Anderson-Darling P-value = 0,148)

Fonte: Próprio autor.

Realizou-se então a análise das razões sinal-ruído para verificar se os fatores possuem efeitos significativos para a variabilidade do processo com relação a vibração. Na Figura 70 é possível de ser visto a análise de média dos valores S/N para vibração.

Figura 70 – Efeitos principais para a razão sinal-ruído de vibração.



Signal-to-noise: Menor é melhor

Fonte: Próprio autor.

Os níveis dos fatores que apresentaram maiores valores da razão sinal-ruído para vibração foram $v_c = 500$ m/min, $f = 0,10$ mm/rev e $a_p = 0,35$ mm. Com este resultado, realizou-se a análise de variância para verificar se os efeitos dos fatores são significativos para a variabilidade do processo. A ANOVA de η para vibração pode ser vista da Tabela 81.

Tabela 81 - ANOVA de S/N para vibração na usinagem com ferramenta cerâmica.

Fonte	GF	Seq SS	Adj SS	Adj MS	F	P	Contribuição (%)
v_c	3	0,60040	0,60040	0,20013	1,86	0,369	59,00
f	1	0,16003	0,16003	0,16003	1,49	0,347	15,73
a_p	1	0,04179	0,04179	0,04179	0,39	0,597	4,11
Erro residual	2	0,21531	0,21531	0,21531			21,16
Total	7	1,01753					

Dados normais (Teste de Anderson-Darling P-value = 0,148).

Fonte: Próprio autor.

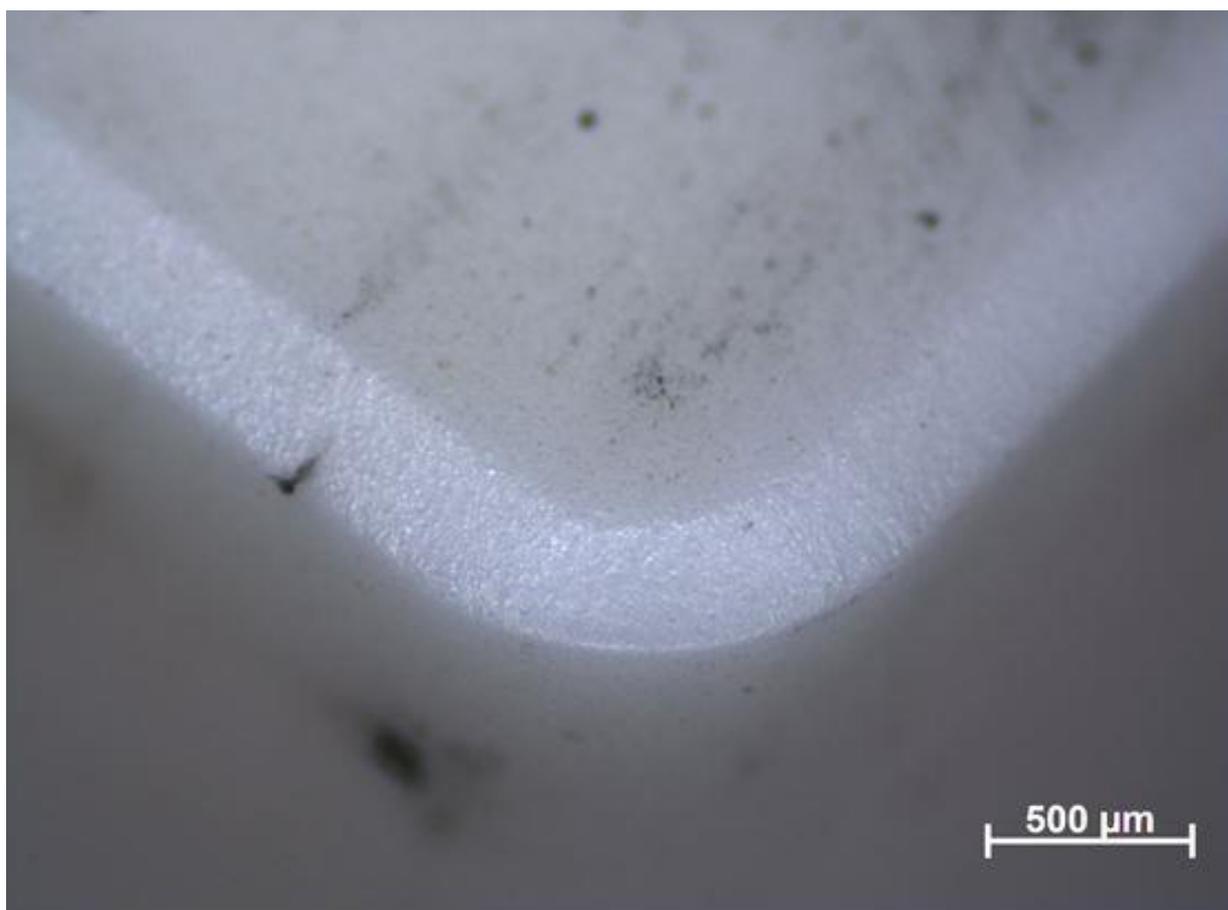
Como ocorrido para os valores médios de vibração, a ANOVA dos valores de S/N mostrou que nenhum dos fatores exerceu influência significativa sobre a variabilidade do processo de torneamento do VAT 32[®] com uso da ferramenta de cerâmica.

4.5.6 Desgastes das ferramentas de cerâmica e cavacos gerados

Na Figura 71 encontra-se a imagem de uma aresta de corte nova da ferramenta experimental de $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{MgO}$.

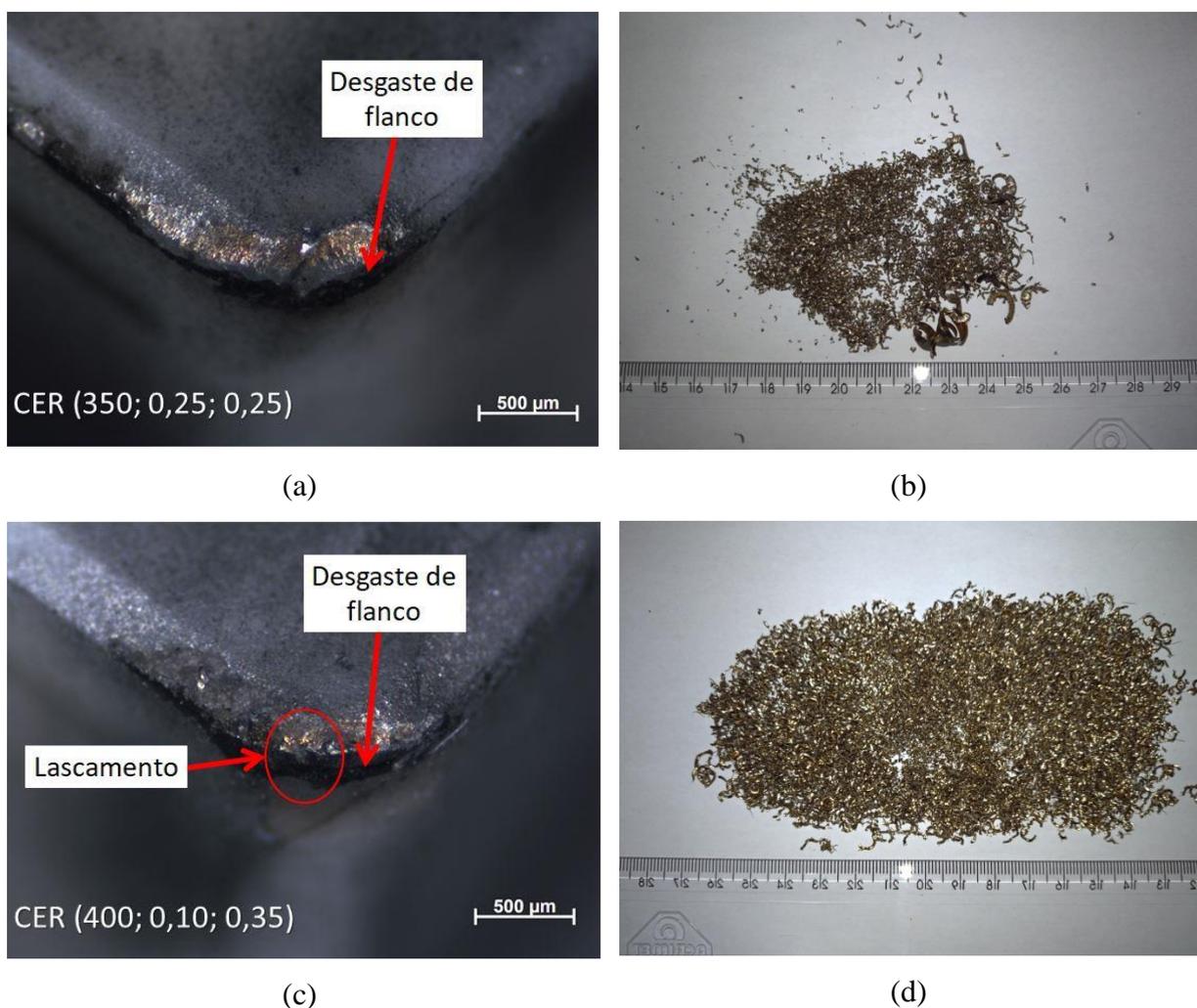
Nas Figuras 72 e 73, podem ser vistas as arestas de corte após os ensaios realizados de torneamento do VAT 32[®]. As condições de corte em que a arestas foram empregadas estão juntamente com as imagens e o cavaco que se encontra adjacente foi obtido durante o ensaio com os mesmos parâmetros de corte.

Figura 71 - Aresta de corte da pastilha de $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{MgO}$.



Fonte: Próprio autor.

Figura 72 - Desgastes das arestas de corte para a ferramenta cerâmica de $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{MgO}$ e cavacos gerados durante o torneamento do VAT 32[®] com $v_c = 350$ e 400 m/min.

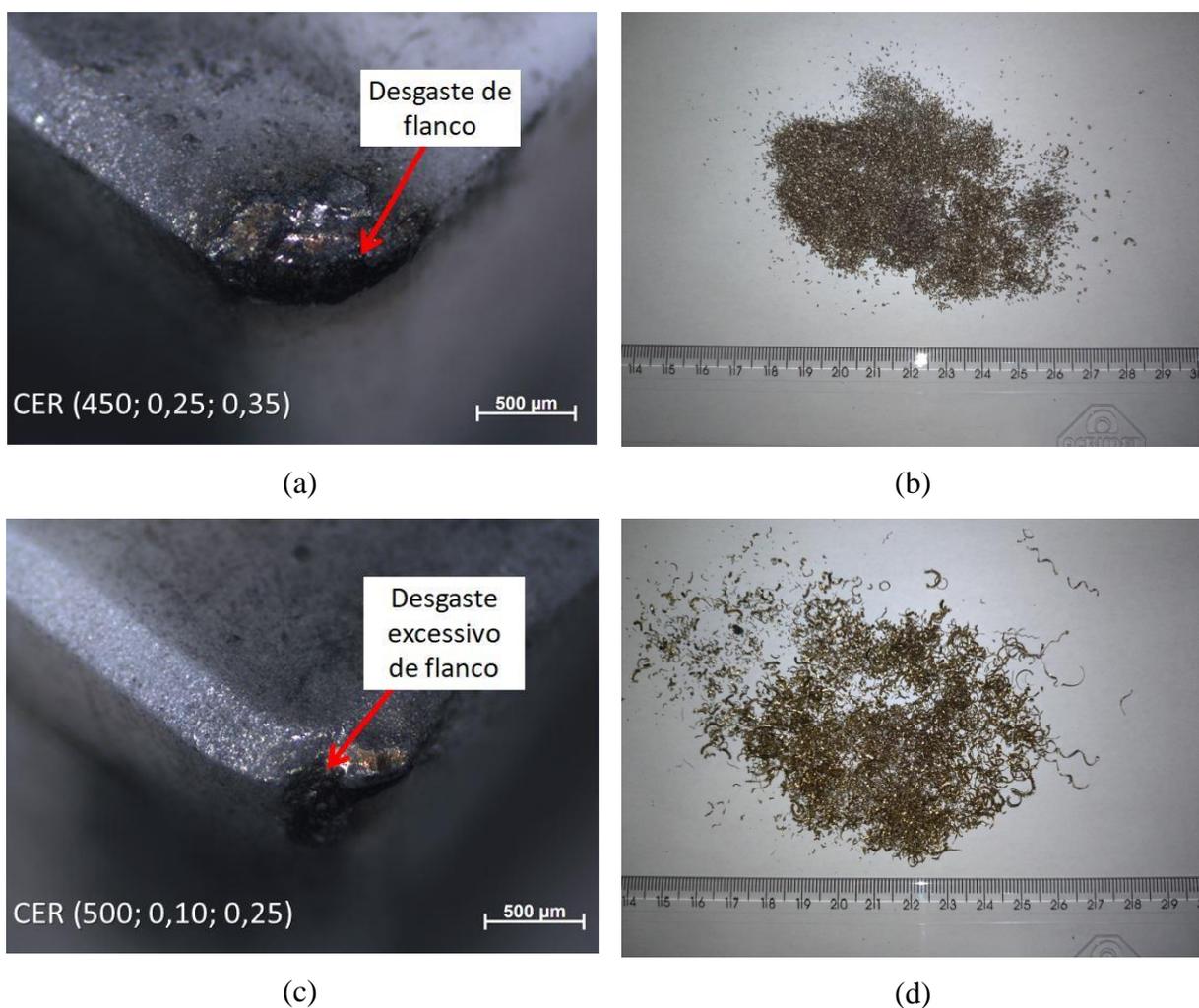


Fonte: Próprio autor.

Ao se 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.

Os cavacos gerados pelo uso da ferramenta cerâmica têm características diferentes dos cavacos gerados pelas outras ferramentas. Os tipos de cavacos gerados são de arco solto e fragmentados. Os cavacos apesar de terem formato fragmentado, a característica dos cavacos é de cisalhamento.

Figura 73 - Desgastes das arestas de corte para a ferramenta cerâmica de $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{MgO}$ e cavacos gerados durante o torneamento VAT 32[®] com $v_c = 450$ e 500 m/min.



Fonte: Próprio autor.

4.5.7 Análise relacional cinza e seleção dos parâmetros de corte para os ensaios de vida da ferramenta experimental de cerâmica

A condição de corte otimizada para cada resposta analisada com o corte usando a ferramenta cerâmica de $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{MgO}$ é mostrada na Tabela 82. Nessa tabela são apresentados os níveis dos parâmetros recomendados para alcançar as melhores respostas, em seus valores médios. Na tabela também é possível verificar a contribuição de cada fator em relação às variáveis analisadas, e a tendência de aumento ou diminuição da resposta com a variação do nível daquele fator.

Na Tabela 83 são apresentados os valores otimizados dos fatores para minimizar a variabilidade do processo com relação às respostas analisadas.

Tabela 82 - Valores otimizados dos fatores para as médias das variáveis resposta no torneamento do VAT 32[®] com ferramenta cerâmica de Al₂O₃+MgO.

Fator	Variável resposta					
	Potência de usinagem	Vb.1000/Lc	R _a	R _t	Emissão Acústica	Vibração
Média das médias	1671,8 W	8,353 m/m	2,070 μm	13,765 μm	0,0772 V V RMS	3,518 mm/s
v _c (m/min)	NS	NS	350 (33,30%)	NS	450 (68,40%)	NS
f (mm/rev)	0,10 (61,38%)↗	0,10 (77,32%)↗	0,10 (43,22%)↗	NS	0,25 (14,68%)↘	NS
a _p (mm)	0,25 (34,88%)↗	NS	0,25 (22,23%)↗	0,25 (25,87%)↗	0,35 (15,16%)↘	NS

NS → Efeito não significativo; Valores entre parênteses correspondem a contribuição; ↗ → Tendência de aumento da resposta com o aumento do parâmetro de corte; ↘ → Tendência de diminuição da resposta com o aumento do parâmetro de corte.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 83 - Valores otimizados dos fatores para a minimização da variabilidade das variáveis resposta no torneamento do VAT 32[®] com ferramenta cerâmica de Al₂O₃+MgO.

Fator	Variável resposta					
	Potência de usinagem	Vb.1000/Lc	R _a	R _t	Emissão Acústica	Vibração
v _c (m/min)	NS	NS	350 (30,12%)	NS	500 (91,31%)	NS
f (mm/rev)	0,10 (60,40%)	0,10 (77,79%)	0,10 (48,84%)	NS	0,25 (4,64%)	NS
a _p (mm)	0,25 (34,32%)	NS	0,25 (13,21%)	0,25 (25,87%)	0,35 (4,01%)	NS

NS → Efeito não significativo; Valores entre parênteses correspondem a contribuição.

Fonte: Próprio autor.

A realização da análise relacional cinza para encontrar a melhor condição de corte e selecionar os parâmetros de usinagem consistiu, em primeiro lugar, na normalização dos dados, também conhecida por geração relacional cinza (GRA), utilizando-se a Equação 10. Esta etapa pode ser vista na Tabela 84.

Tabela 84 - Geração relacional cinza dos dados de qualidade obtidos nos ensaios de torneamento com ferramenta cerâmica.

Experimento	R _a	R _t	VB.100/L _c	Potência de usinagem	Emissão Acústica	Vibração
1	0,993	0,635	0,998	0,309	0,000	0,317
2	1,000	1,000	0,655	0,641	0,039	0,340
3	0,628	0,588	0,576	0,278	0,825	0,340
4	0,939	0,646	0,988	0,641	0,794	0,917
5	0,956	0,422	0,911	0,565	0,823	0,784
6	0,646	0,715	0,960	0,765	0,701	0,762
7	0,785	0,719	0,436	0,436	0,753	0,669
8	0,000	0,000	0,321	0,109	1,000	0,000
9	0,621	0,671	0,000	0,017	0,855	0,926
10	0,495	0,427	0,145	0,017	0,928	1,000
11	0,249	0,282	0,573	0,000	0,914	0,644
12	0,921	0,858	0,676	1,000	0,800	0,543
13	0,743	0,509	0,990	0,841	0,835	0,526
14	0,890	0,911	0,763	0,932	0,823	0,861
15	0,853	0,156	1,000	0,850	0,785	0,841
16	0,785	0,719	0,436	0,436	0,753	0,669

Fonte: Próprio autor.

Depois dos dados normalizados, realizou-se o cálculo da sequência de desvio $\Delta_{0i}(k)$, segunda etapa da análise relacional, pela Equação 13. Esta etapa pode ser observada na Tabela 85.

Tabela 85 - Obtenção das sequências de desvio $\Delta_{0i}(k)$ para os dados de qualidade na usinagem com a ferramenta de cerâmica.

(continua)

Experimento	$\Delta_{0i}(k)$					
	R _a	R _t	VB.100/L _c	Potência de usinagem	Emissão Acústica	Vibração
1	0,007	0,365	0,002	0,691	1,000	0,683
2	0,000	0,000	0,345	0,359	0,961	0,660
3	0,372	0,412	0,424	0,722	0,175	0,660
4	0,061	0,354	0,012	0,359	0,206	0,083
5	0,044	0,578	0,089	0,435	0,177	0,216
6	0,354	0,285	0,040	0,235	0,299	0,238
7	0,215	0,281	0,564	0,564	0,247	0,331
8	1,000	1,000	0,679	0,891	0,000	1,000

Tabela 85 - Obtenção das sequências de desvio $\Delta_{0i}(k)$ para os dados de qualidade na usinagem com a ferramenta de cerâmica.

(conclusão)

Experimento	$\Delta_{0i}(k)$					
	R _a	R _t	VB.100/L _c	Potência de usinagem	Emissão Acústica	Vibração
9	0,379	0,329	1,000	0,983	0,145	0,074
10	0,505	0,573	0,855	0,983	0,072	0,000
11	0,751	0,718	0,427	1,000	0,086	0,356
12	0,079	0,142	0,324	0,000	0,200	0,457
13	0,257	0,491	0,010	0,159	0,165	0,474
14	0,110	0,089	0,237	0,068	0,177	0,139
15	0,147	0,844	0,000	0,150	0,215	0,159
16	0,215	0,281	0,564	0,564	0,247	0,331

Fonte: Próprio autor.

Depois do cálculo das sequências de desvio, obteve-se os coeficientes relacionais cinzas γ (GRC), através da Equação 15, dos dados de qualidade geradas no torneamento com pastilha cerâmica. Esta etapa é apresentada na Tabela 86.

Tabela 86 - Cálculo do coeficiente relacional cinza γ (GRC) da usinagem com ferramenta cerâmica.

(continua)

Experimento	γ					
	R _a	R _t	VB.100/L _c	Potência de usinagem	Emissão Acústica	Vibração
1	0,986	0,578	0,996	0,420	0,333	0,423
2	1,000	1,000	0,592	0,582	0,342	0,431
3	0,573	0,548	0,541	0,409	0,740	0,431
4	0,891	0,586	0,976	0,582	0,708	0,858
5	0,920	0,464	0,849	0,535	0,738	0,698
6	0,585	0,637	0,926	0,680	0,626	0,678
7	0,699	0,640	0,470	0,470	0,669	0,602
8	0,333	0,333	0,424	0,359	1,000	0,333
9	0,569	0,603	0,333	0,337	0,775	0,871

Tabela 86 - Cálculo do coeficiente relacional cinza γ (GRC) da usinagem com ferramenta cerâmica.

(conclusão)

Experimento	γ					
	R_a	R_t	VB.100/ L_c	Potência de usinagem	Emissão Acústica	Vibração
10	0,498	0,466	0,369	0,337	0,875	1,000
11	0,400	0,410	0,540	0,333	0,853	0,584
12	0,864	0,779	0,607	1,000	0,714	0,522
13	0,661	0,505	0,981	0,758	0,752	0,513
14	0,820	0,848	0,679	0,880	0,738	0,782
15	0,773	0,372	1,000	0,769	0,700	0,759
16	0,699	0,640	0,470	0,470	0,669	0,602

Fonte: Próprio autor.

Os valores de GRC foram então utilizados para o cálculo da classificação relacional cinza (GRG), pela Equação 15. Os pesos utilizados foram peso dois para os fatores de qualidade rugosidade R_a e R_t e potência de usinagem. O peso um foi admitido para as variáveis Vb.1000/ L_c , emissão acústica e vibração. A classificação pode ser vista na Tabela 87.

Tabela 87 - Classificação relacional cinza dos dados de qualidade do torneamento com ferramenta cerâmica.

(continua)

Experimento	Velocidade de corte (m/min)	Avanço (mm/rev)	profundidade de usinagem (mm)	GRC	Classificação
1	350	0,1	0,35	0,6357	9
2	350	0,25	0,25	0,7254	4
3	350	0,25	0,25	0,5305	14
4	350	0,1	0,35	0,7399	3
5	400	0,1	0,35	0,6801	6
6	400	0,1	0,35	0,6705	8
7	400	0,25	0,25	0,5955	10
8	450	0,25	0,35	0,4233	16
9	450	0,25	0,35	0,5553	12
10	500	0,25	0,35	0,5384	13
11	500	0,25	0,35	0,4738	15
12	500	0,1	0,25	0,7920	2
13	450	0,1	0,25	0,6771	7
14	500	0,1	0,25	0,8108	1

Tabela 87 - Classificação relacional cinza dos dados de qualidade do torneamento com ferramenta cerâmica.

(conclusão)

Experimento	Velocidade de corte (m/min)	Avanço (mm/rev)	profundidade de usinagem (mm)	GRC	Classificação
15	450	0,1	0,25	0,6987	5
16	400	0,25	0,25	0,5955	10

Fonte: Próprio autor.

Os parâmetros adotados para a realização dos ensaios de vida da ferramenta cerâmica foram os correspondentes ao experimento com o maior valor de GRC. Então, para os testes de vida, foram selecionados a velocidade de corte de 500 m/min, avanço de 0,10 mm/rev e profundidade de usinagem de 0,25 mm.

4.6 ENSAIOS DE VIDA DAS FERRAMENTAS DE CORTE

Na Tabela 88 são colocados os parâmetros de corte otimizadas, selecionadas pelo método Grey-Taguchi, para cada ferramenta de corte.

Tabela 88 - Parâmetros de corte para os ensaios de vida das ferramentas.

Ferramenta	Velocidade de corte (m/min)	Avanço (mm/rev)	profundidade de usinagem (mm)	Tipo de lubrificação
Metal duro PVD	110	0,25	0,15	Usinagem a seco
Metal duro CVD	150	0,50	0,25	Usinagem a seco
cBN 170	170	0,10	0,25	Usinagem a seco
Cerâmica mista	500	0,10	0,25	Usinagem a seco

Fonte: Próprio autor.

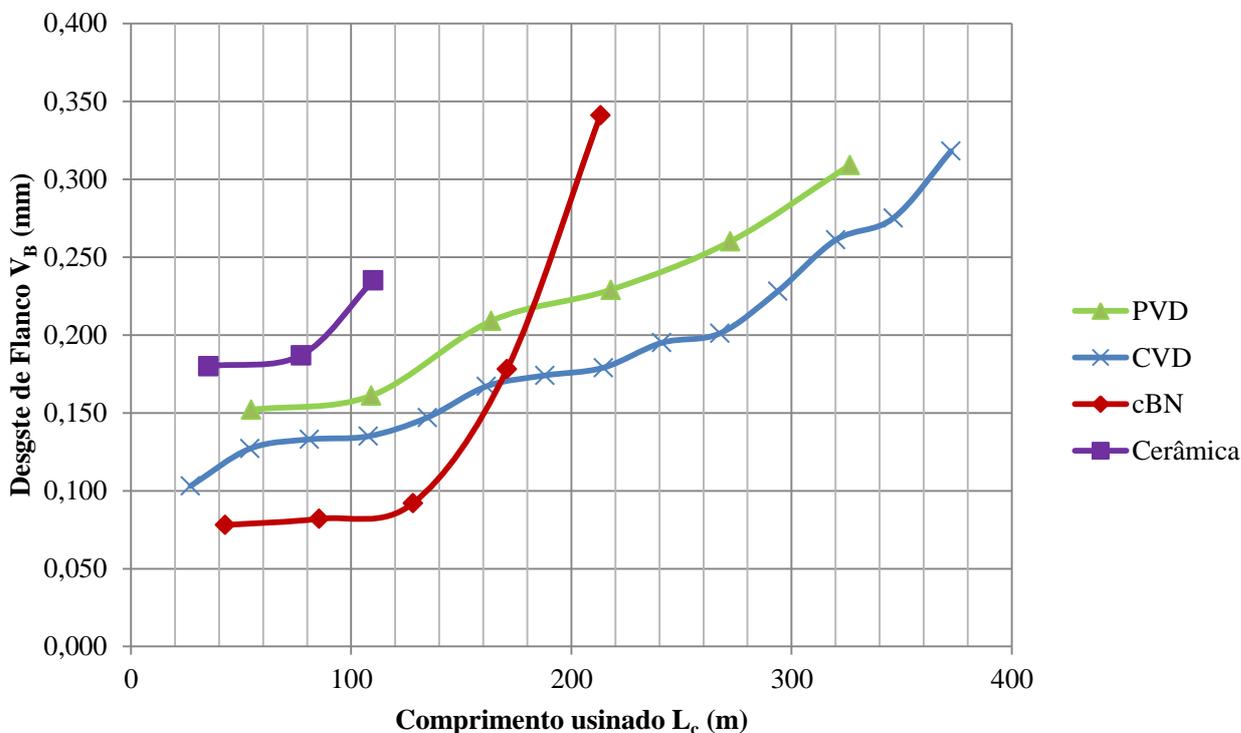
Os resultados dos testes de vida para as ferramentas de metal duro PVD, metal duro CVD, cBN e pastilha experimental cerâmica podem ser vistos na Figura 74.

O comprimento de corte total usinado pela ferramenta é o comprimento torneado até a pastilha atingir o limite de desgaste de flanco de $V_B = 0,300$ mm.

Trabalhando nas condições otimizadas e comparando-se os desempenhos das ferramentas do ponto de vista do fator vida, a ferramenta de metal duro revestida por

Ti(C,N)+Al₂O₃ pelo processo CVD foi a ferramenta que teve o melhor desempenho entre as ferramentas testadas, dentro dos conjuntos de parâmetros de cortes testados e analisados.

Figura 74 - Ensaio de vida das ferramentas de corte



Fonte: Próprio autor.

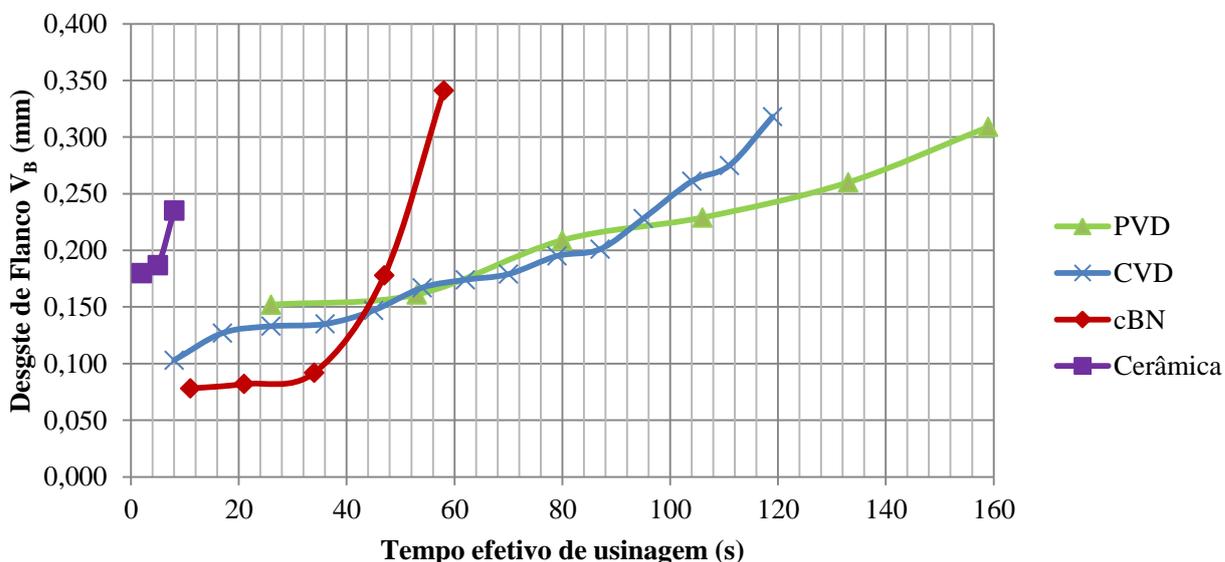
Os ensaios de vida com a ferramenta cerâmica precisaram ser interrompidos antes do desgaste de flanco atingir $V_B = 0,300$ mm por uma quebra da aresta de corte. Uma nova tentativa ocorreu e novamente houve quebra. Este é um indicativo que os parâmetros de corte utilizados possam não ser adequados ao torneamento da superliga VAT 32[®]. Os desgastes das ferramentas de metal duro, ambas PVD e CVD, tiveram uma progressão mais próximos de uma função linear que as ferramentas de cerâmica e de cBN.

Na Figura 75 são apresentadas as evoluções dos desgastes com relação ao tempo efetivo de usinagem, aquele tempo em que há contato entre ferramenta e peça.

Os tempos de vida das ferramentas são os valores máximos do tempo efetivo de usinagem. Foi estabelecida pelo mesmo critério adotado para a obtenção do comprimento total de usinagem, até que a ferramenta chegasse no limite de $V_B = 0,300$ mm de desgaste de flanco. Esse tempo de vida para a ferramenta cerâmica foi de 8 s, para a ferramenta de cBN de 58 s, para a pastilha CVD de 120 s e para a pastilha de PVD de 160 s. O tempo de vida é

afetado pelas velocidades de corte e avanços, portanto uma comparação de desempenho entre as ferramentas pode levar a conclusões equivocadas.

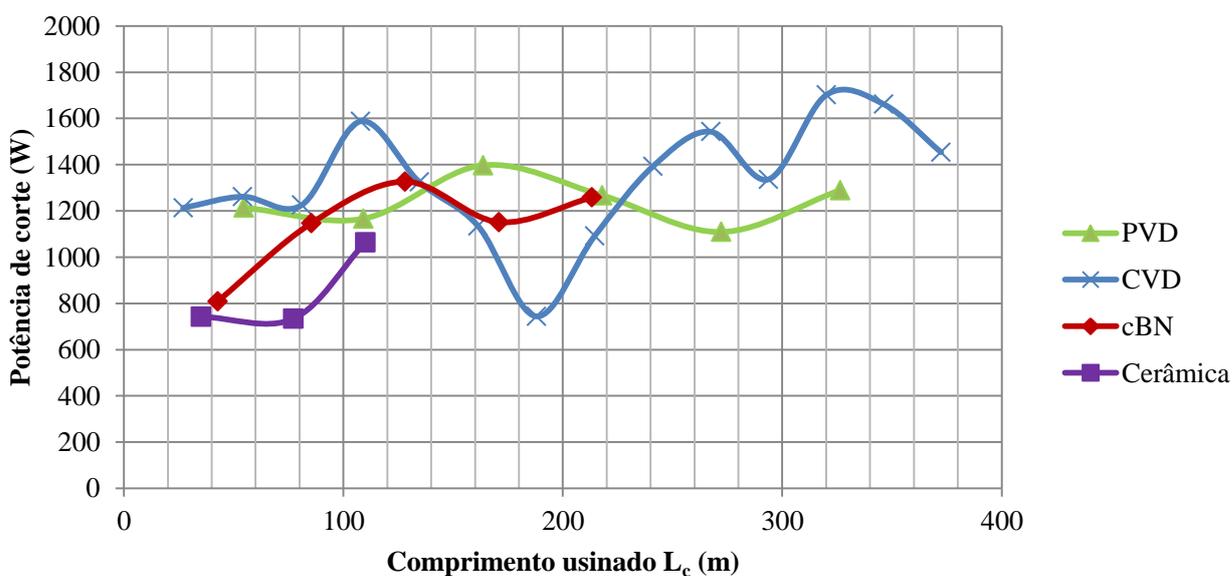
Figura 75- Desgastes de flanco das ferramentas em função do tempo efetivo de usinagem.



Fonte: Próprio autor.

Na Figura 76 encontram-se as evoluções dos valores de potência de usinagem pelo comprimento usinado das quatro diferentes ferramentas testadas.

Figura 76 - Evolução da potência de usinagem pelo comprimento de usinagem.

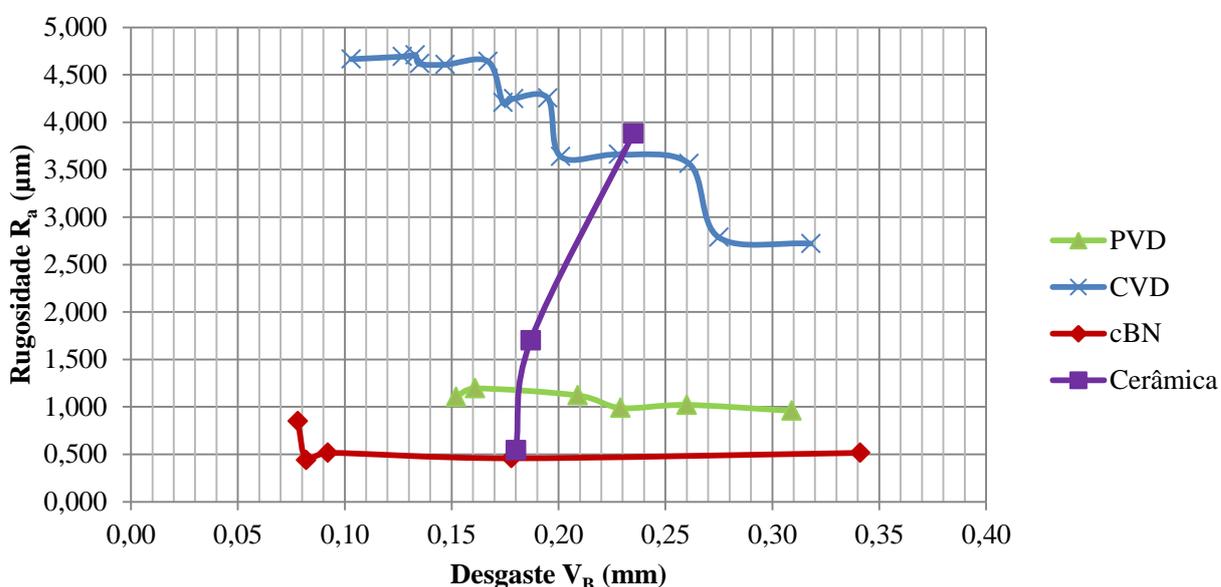


Fonte: Próprio autor.

Somente a ferramenta de cerâmica mostrou uma tendência de aumento da potência de usinagem com a progressão do comprimento usinado. O comportamento com relação as outras ferramentas de corte é indefinido, com variações positivas e negativas ao longo do comprimento usinado. A mesma situação foi encontrada analisando-se a progressão da potência com relação ao desgaste de flanco V_B .

Nas Figuras 77 e 78 encontram-se, respectivamente, os valores das rugosidades R_a e R_t com relação ao desgaste de flanco das ferramentas.

Figura 77 - Progressão da rugosidade R_a com relação ao aumento do desgaste da ferramenta nos ensaios de vida.



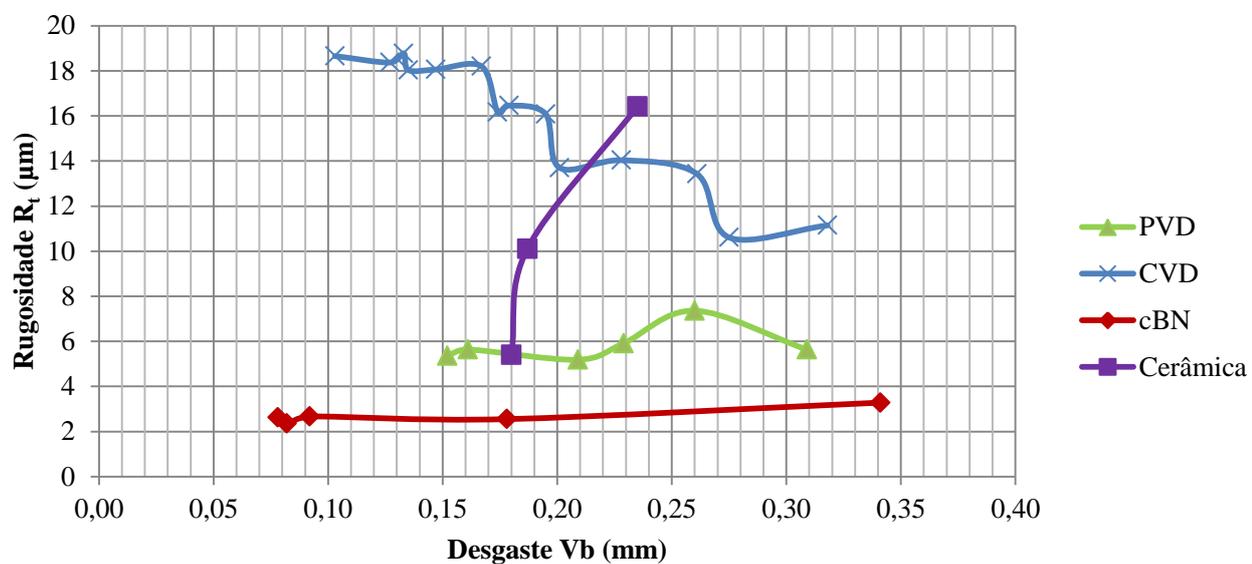
Fonte: Próprio autor.

Nos ensaios de vida com a ferramenta de metal duro PVD, a rugosidade R_a sofreu pouca alteração com o aumento do desgaste de flanco da ferramenta, enquanto no fim de vida, a rugosidade R_t sofreu aumento. O comportamento da ferramenta de metal duro CVD em relação as rugosidade R_a e R_t foi interessante, pois houve uma tendência de diminuição dos valores de rugosidade com o avanço do desgaste de flanco da ferramenta. Para a ferramenta de cBN houve a tendência das rugosidade R_a e R_t sofrerem pouca variação ao longo do seu uso até atingir o V_B limite.

Do ponto de vista da qualidade superficial da peça, em termos de valores de R_a e R_t , a ferramenta de metal duro revestida por Ti-Al-Si-N (PVD) apresentou um desempenho muito superior ao da ferramenta de metal duro revestido por Ti(C,N)+Al₂O₃ por CVD. Isto é devido

aos valores de avanço serem muito diferentes entre as ferramentas testadas, e como vistos, o avanço é um fator muito importante para a obtenção de menores valores de R_a e R_t . Kivak (2014) testou ferramentas de metal duro com dois revestimentos, Ti-Al-N pelo método PVD e TiCN+Al₂O₃ pelo método CVD, no fresamento da do aço Hadfield. Ambas as ferramentas foram testadas com os parâmetros de corte $v_c = 90, 120$ e 150 m/min e $f = 0,09, 0,12$ e $0,15$ mm/rev. Foram avaliadas as respostas de rugosidade e desgaste da ferramenta. Para uma mesma condição de corte, o desempenho da ferramenta de metal duro CVD foi superior ao da ferramenta PVD para a variável desgaste de flanco, justificado pela maior espessura de camadas presentes na ferramenta de CVD. A ferramenta PVD sofreu rápida deformação da aresta de corte devido a menor espessura de camada e o encruamento do material durante a usinagem acelerou este processo. Outra vantagem da ferramenta CVD é a barreira térmica formada pela camada de Al₂O₃, de baixa condutividade térmica, que protege o substrato de desgastes ocasionados pela elevação da temperatura. Koseki et al. (2015) testaram o torneamento do Inconel 718 com diferentes ferramentas de metal duro revestidas de TiN por diferentes métodos, PVD e CVD. A ferramenta CVD apresentou melhor resistência ao desgaste do que a ferramenta PVD, exibindo também menor deformação plástica. Thakur et al. (2016) estudaram o torneamento da superliga Incoloy 825, de base ferro-níquel, com ferramenta de metal duro com diferentes revestimentos, TiCN+Al₂O₃ por CVD e TiAlN/TiN por PVD. A ferramenta PVD apresentou maiores tempos de vida e melhores acabamentos da peça quando comparadas à ferramenta recoberta por CVD, o que foi justificado pelos menores coeficientes de atrito apresentados pelo revestimento PVD.

Figura 78 - Progressão da rugosidade R_t com relação ao aumento do desgaste da ferramenta nos ensaios de vida.



Fonte: Próprio autor.

5 CONCLUSÕES

Foi realizado neste trabalho o estudo do torneamento cilíndrico externo da nova superliga VAT 32[®], com diferentes ferramentas de corte.

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. Através da análise da razão sinal-ruído η , pode-se também selecionar o conjunto dos fatores para se ter um processo de torneamento robusto.

A influência dos parâmetros de corte nas variáveis resposta para cada ferramenta utilizada foi encontrada, bem como os parâmetros para se obter um processo robusto, ou seja, de menor variabilidade.

O avanço da ferramenta (f) se mostrou frequentemente influente na maioria das características de qualidade analisadas, com a tendência de aumento dos valores das características com o aumento do valor de f , excetuando-se uma situação inversa encontrada para emissão acústica com ferramenta de cerâmica.

O uso de fluido de corte em abundância para o torneamento com ferramenta de metal duro PVD e CVD resultou em menores potências de usinagem quando comparada a usinagem sem fluido de corte. Com relação ao desgaste das ferramentas, o fluido auxiliou a pastilha CVD a ter menores desgastes enquanto que para a pastilha PVD os desgastes das ferramentas com uso de fluido foram maiores.

A profundidade de usinagem teve efeitos sobre a potencia de usinagem, emissão acústica no uso de ferramenta de metal duro PVD, efeitos sobre potência, desgaste e rugosidade R_a para a patilha de metal duro CVD e efeitos sobre potência, desgaste, R_a e emissão acústica com a ferramenta cerâmica. O aumento de a_p causou, em sua maioria, um aumento dos valores das características de qualidade citadas, com exceção da vibração com ferramenta de metal duro PVD e de emissão acústica para a ferramenta cerâmica.

A velocidade de corte teve efeitos significativos nas variáveis potência, desgaste de ferramenta, emissão acústica e vibração no torneamento com a ferramenta de metal duro PVD, efeitos significativos nos valores de potência, desgaste de ferramenta, R_a , emissão acústica e vibração para a ferramenta CVD, efeitos também na potência, R_a e R_t da pastilha de cBN e no torneamento com cerâmica os efeitos foram significativos sobre R_a e emissão acústica. Não foi encontrada uma tendência clara de uma relação linear entre velocidade de

corte e as variáveis resposta analisadas, o que indica a existência de outros fenômenos envolvendo diretamente os valores de v_c empregados.

Com o método de Grey-Taguchi, encontrou-se a combinação dos fatores de corte ótima para cada tipo de ferramentas testadas, objetivando-se a obtenção das melhores características de qualidade possíveis. Para a ferramenta de metal duro PVD, dentre os valores testados, a condição ótima de torneamento encontrada foi $v_c = 110$ m/min, $f = 0,25$ mm/rev, $a_p = 0,15$ mm em usinagem a seco. Para a pastilha CVD a condição ótima foi $v_c = 150$ m/min, $f = 0,50$ mm/rev, $a_p = 0,25$ mm em usinagem a seco. A proposta ótima para a ferramenta de cBN foi $v_c = 170$ m/min e $f = 0,10$ mm/ver, e para a de cerâmica as condições otimizadas, dentre as testadas nos experimentos, foram de $v_c = 500$ m/min, $f = 0,10$ mm/rev e $a_p = 0,25$ mm. A superliga de ferro-níquel VAT 32[®] mostrou-se uma liga de difícil usinagem.

Nos ensaios de vida, nos quais cada um dos tipos de ferramenta trabalhou na sua condição otimizada, o melhor desempenho em relação ao comprimento usinado total até o fim de vida foi da ferramenta de metal duro CVD. Porém quando analisada a rugosidade das peça usinada, o destaque é dado a ferramenta de PVD, pois seu comprimento total de usinagem é pouco inferior aos obtidos pela ferramenta CVD mas os valores de rugosidade obtidos são muito inferiores, cerca de pelo menos 3 vezes menor.

Com relação ao desempenho da ferramenta de cerâmica experimental, a análise dos desgastes mostrou que a aresta de corte da ferramenta de formato quadrado sofreu uma degradação muito alta, o que pode indicar que a geometria desta ferramenta, chanfro de 20° e inserto tipo S, para a usinagem de superligas pode não ser a adequada. O baixo desempenho na análise de vida da ferramenta cerâmica pode ser um indicativo de que, apesar do método de Grey-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. Recomenda-se então mais estudos com o uso desta ferramenta experimental.

Como trabalhos futuros, um aprofundamento sobre os fatores que influenciam emissão acústica e vibração, bem como se há relação de correlação entre as variáveis respostas, pode ser desenvolvido. Outras geometrias de insertos, com arestas mais robustas, devem ser testadas com relação ao material cerâmico Al₂O₃+MgO, bem como outras combinações de cerâmicas mistas.

REFERÊNCIAS

- AKHTAR, W.; SUN, J.; SUN, P.; CHEN, W.; SALEEM, Z. Tool wear mechanisms in the machining of Nickel based super-alloys: A review. **Frontiers of Mechanical Engineering**, v. 9, n. 2, p. 106–119, 2014.
- ALVES, S. M. **Adequação ambiental do processo de retificação através de um novo conceito de fluido de corte**. 2005. 183 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.
- 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**, v. 31, n. 9, p. 4159–4165, 2017.
- ARCE, M. E.; SAAVEDRA, Á.; MÍGUEZ, J. L.; GRANADA, E. The use of grey-based methods in multi-criteria decision analysis for the evaluation of sustainable energy systems: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 47, p. 924–932, 2015. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.010>>. Acesso em: 21 jan. 2016.
- ASM INTERNATIONAL. **Properties and selection irons, steels and high performance alloys**: ASM Handbook. Novelty, OH: ASM International, 2005. v.1
- BHATT, A.; ATTIA, H.; VARGAS, R.; THOMSON, V. Wear mechanisms of WC coated and uncoated tools in finish turning of Inconel 718. **Tribology International**, v. 43, n. 5–6, p. 1113–1121, 2010. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2009.12.053>>. Acesso em: 18 jan. 2015.
- BHATTACHARYA, D.; BEPARI, B. Feasibility study of recycled polypropylene through multi response optimization of injection moulding parameters using grey relational analysis. **Procedia Engineering**, v. 97, p. 186–196, 2014. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.241>>. Acesso em: 03 jun. 2016.
- BOUACHA, K.; YALLESE, M. A.; KHAMEL, S.; BELHADI, S. Analysis and optimization of hard turning operation using cubic boron nitride tool. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 45, p. 160–178, 2014. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2014.04.014>>. Acesso em: 19 maio 2015.
- BUSHLYA, V.; ZHOU, J.; AVDOVIC, P.; STÅHL, J. E. 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**, v. 66, n. 9–12, p. 2013–2021, 2013.
- 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**, v. 3, n. 1, p. 370–375, 2012. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2010.03.093>>. Acesso em: 18 jan. 2015.
- CHIANG, Y. M.; HSIEH, H. H. The use of the Taguchi method with grey relational analysis to optimize the thin-film sputtering process with multiple quality characteristic in color filter

manufacturing. **Computers and Industrial Engineering**, v. 56, n. 2, p. 648–661, 2009. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cie.2007.12.020>>. Acesso em: 03 jun. 2016.

COSTA, A. F. **Análise comparativa de ferramentas revestidas por PVD e CVD no torneamento do aço ABNT 8620**. 2016. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

CRIADO, V.; DÍAZ-ÁLVAREZ, J.; CANTERO, J. L.; MIGUÉLEZ, M. H. Study of the performance of PCBN and carbide tools in finishing machining of Inconel 718 with cutting fluid at conventional pressures. **Procedia CIRP**, v. 77, p. 634–637, 2018. Elsevier B.V. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212827118310382>>. Acesso em: 20 dez. 2018.

D'ADDONA, D. M.; RAYKAR, S. J.; NARKE, M. M. High speed machining of inconel 718: tool wear and surface roughness analysis. **Procedia CIRP**, v. 62, p. 269–274, 2017. The Author(s). Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2017.03.004>>. Acesso em: 20 dez. 2018.

DAO, T. P.; HUANG, S. C. Optimization of a two degrees of freedom compliant mechanism using Taguchi method-based grey relational analysis. **Microsystem Technologies**, v. 23, n. 10, p. 4815–4830, 2017. Springer Berlin Heidelberg.

DATTA, S.; NANDI, G.; BANDYOPADHYAY, A. Application of entropy measurement technique in grey based Taguchi method for solution of correlated multiple response optimization problems: a case study in welding. **Journal of Manufacturing Systems**, v. 28, n. 2–3, p. 55–63, 2009. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://www.jimmunol.org/cgi/doi/10.4049/jimmunol.177.11.7567>>. Acesso em: 03. jun 2016.

DAVOODI, B.; ESKANDARI, B. Tool wear mechanisms and multi-response optimization of tool life and volume of material removed in turning of N-155 iron-nickel-base superalloy using RSM. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 68, p. 286–294, 2015. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2015.03.006>>. Acesso em: 18 jan. 2015.

DEBNATH, S.; REDDY, M. M.; YI, Q. S. Influence of cutting fluid conditions and cutting parameters on surface roughness and tool wear in turning process using Taguchi method. **Measurement**, v. 78, p. 111–119, 2015. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263224115004789>>. Acesso em: 03 jan. 2016.

DENG, J.-L. Control problems of grey systems. **Systems and Control Letters**, v. 1, n. 5, p. 288–294, 1982.

DINIZ, A. E.; COPPINI, F. C.; LEMOS, N. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 5. ed. São Paulo: Artliber, 2006.

DONACHIE, M. J.; DONACHIE, S. J. **Superalloy: a technical guide**. 2nd ed. Materials Park, Ohio: ASM International, 2002.

EQUBAL, M. I.; KUMAR, R.; SHAMIM, M.; OHDAR, R. K. A grey-based Taguchi method to optimize hot forging process. **Procedia Materials Science**, v. 6, p. 1495–1504, 2014. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2211812814004945>>. Acesso em: 06 jun. 2016.

EUZEBIO, C. D. G. **Uma contribuição da aplicação de modelos fuzzy empregados na detecção da queima de peças na retificação plana**, 2012. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2012.

EZUGWU, E.O; WANG, Z.M.; MACHADO, A.R. The machinability of nickel-based alloys : a review. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 86, n. 1–3, p. 1–16, 1998. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013698003148>>. Acesso em: 03 jan. 2015.

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

FAN, Y. H.; HAO, Z. P.; ZHENG, M. L.; SUN, F. L.; YANG, S. C. Study of surface quality in machining nickel-based alloy Inconel 718. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 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: 17 nov. 2016.

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**. p.8, 2013b. Disponível em: <<http://papers.sae.org/2013-01-1153/>>. Acesso em: 17 nov. 2016.

GHADIRI ZAHRANI, E.; SEDGHI, A. Experimental investigation of precision turning of Monel K-500 under dry conditions. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 73, n. 9–12, p. 1265–1272, 2014.

HADAD, M. An experimental investigation of the effects of machining parameters on environmentally friendly grinding process. **Journal of Cleaner Production**, v. 108, p. 217–231, 2015. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.092>>. Acesso em: 15 fev. 2016.

HARA, C. M. **Uma contribuição para o monitoramento de retificação cilíndrica de mergulho**. 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**. 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**. 2002. 179 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

JAYARAMAN, P.; MAHESH KUMAR, L. Multi-response optimization of machining parameters of turning AA6063 T6 aluminium alloy using grey relational analysis in Taguchi method. **Procedia Engineering**, v. 97, p. 197–204, 2014. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.242>>. Acesso em: 15 jul. 2016.

JOO, S. M.; BANG, H. S.; KWAK, S. Y. Optimization of hybrid CO2 laser-GMA welding parameters on dissimilar materials AH32/STS304L using Grey-based Taguchi analysis. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, v. 15, n. 3, p. 447–454, 2014.

JOZIC, S.; BAJIC, D.; CELENT, L. Application of compressed cold air cooling: Achieving multiple performance characteristics in end milling process. **Journal of Cleaner Production**, v. 100, p. 325–332, 2015.

KIVAK, T. Optimization of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of Hadfield steel with PVD and CVD coated inserts. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 50, n. 1, p. 19–28, 2014.

KOSEKI, S.; INOUE, K.; MORITO, S.; OHBA, T.; USUKI, H. Comparison of TiN-coated tools using CVD and PVD processes during continuous cutting of Ni-based superalloys. **Surface and Coatings Technology**, v. 283, p. 353–363, 2015. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.10.071>>. Acesso em: 20 ago. 2015

KOU, G.; LU, Y.; PENG, Y.; SHI, Y. Evaluation of Classification Algorithms Using Mcdm and Rank Correlation. **International Journal of Information Technology & Decision Making**, v. 11, n. 1, p. 197–225, 2012. Disponível em: <<http://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S0219622012500095>>. Acesso em: 15 jun. 2016.

KUO, Y.; YANG, T.; HUANG, G. W. The use of grey relational analysis in solving multiple attribute decision-making problems. **Computers and Industrial Engineering**, v. 55, n. 1, p. 80–93, 2008.

LANÇONI, P. N. **Estudo comparativo de medição de força de corte no processo de retificação**. 2008. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2008.

LIN, C. L.; LIN, J. L.; KO, T. C. Optimisation of the EDM process based on the orthogonal array with fuzzy logic and grey relational analysis method. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 19, n. 4, p. 271–277, 2002.

LIN, M. Y.; TSAO, C. C.; HUANG, H. H.; WU, C. Y.; HSU, C. Y. Use of the grey-Taguchi method to optimise the micro-electrical discharge machining (micro-EDM) of Ti-6Al-4V alloy. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**, v. 28, n. 6, p. 569–576, 2015.

LIN, Y.; LIU, S. A historical introduction to grey systems theory. *In: CONFERENCE CONFERENCE ON SYSTEMS, MAN AND CYBERNETICS, 2004, The Hague, Netherlands. Proceedings [...].* The Hague: IEEE, 2004. p. 2403–2408, v. 3.

LIU, S.; FORREST, J.; YANG, Y. A brief introduction to grey systems theory. **Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Grey Systems and Intelligent Services, GSIS'11 - Joint with the 15th WOSC International Congress on Cybernetics and Systems**, p. 1–9, 2011.

MACHADO, Á. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. DA. **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**, v. 71, n. 9–12, p. 1587–1598, 2014.

MANDAL, N.; DOLOI, B.; MONDAL, B.; DAS, R. Optimization of flank wear using Zirconia Toughened Alumina (ZTA) cutting tool: Taguchi method and Regression analysis. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 44, n. 10, p. 2149–2155, 2011. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2011.07.022>>. Acesso em: 14 maio 2017.

MANIVEL, D.; GANDHINATHAN, R. Optimization of surface roughness and tool wear in hard turning of austempered ductile iron (grade 3) using Taguchi method. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 93, p. 108–116, 2016. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2016.06.055>>. Acesso em 20 abr. 2017

MIA, M.; BASHIR, M. AL; KHAN, M. A.; DHAR, N. R. Optimization of MQL flow rate for minimum cutting force and surface roughness in end milling of hardened steel (HRC 40). **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 89, n. 1–4, p. 675–690, 2017. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.

MIA, M.; KHAN, M. A.; RAHMAN, S. S.; DHAR, N. R. Mono-objective and multi-objective optimization of performance parameters in high pressure coolant assisted turning of Ti-6Al-4V. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 90, n. 1–4, p. 109–118, 2017. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.

MIA, M.; RIFAT, A.; TANVIR, M. F.; et al. Multi-objective optimization of chip-tool interaction parameters using Grey-Taguchi method in MQL-assisted turning. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 129, n. June, p. 156–166, 2018. Elsevier. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.07.014>>. Acesso em 20 dez. 2018

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

MUHAMEDAGIC, K.; BEGIC-HAJDAREVIC, D.; AHMET, C.; MEHMEDOVIC, M.

Multi-Response optimization of plasma cutting parameters using grey relational analysis. **Annals of DAAAM and Proceedings of the International DAAAM Symposium**, p. 1074–1082, 2017.

MUNOA, J.; BEUDAERT, X.; DOMBOVARI, Z.; et al. Chatter suppression techniques in metal cutting. **CIRP Annals: Manufacturing Technology**, v. 65, n. 2, p. 785–808, 2016. CIRP. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.004>>. Acesso em: 15 jan. 2017.

MUTHURAMALINGAM, T.; MOHAN, B. Application of Taguchi-grey multi responses optimization on process parameters in electro erosion. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 58, p. 495–502, 2014. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2014.09.029>>. Acesso em: 15 jun. 2016.

NAKAI, M. E. **Avaliação de modelos neurais aplicados na estimação de parâmetros da retificação de cerâmicas avançadas**, 2012. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia de Bauru, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2012.

PATEL, G. C. M.; KRISHNA, P.; PARAPPAGOUDAR, M. B. Optimization of Squeeze Cast Process Parameters Using Taguchi and Grey Relational Analysis. **Procedia Technology**, v. 14, p. 157–164, 2014. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2212017314000577>>. Acesso em: 17 jun. 2016.

PHADKE, M. S. **Quality engineering using robust design**. Englewood Cliffs, New Jersey: P T R Prentice-Hall, 1989.

PINHEIRO, Cleverson. **Avaliação da usinagem do Inconel 718 via metodologia de Taguchi**. 2018. 204 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Materiais e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2018.

PRASANNA, J.; KARUNAMOORTHY, L.; VENKAT RAMAN, M.; PRASHANTH, S.; RAJ CHORDIA, D. Optimization of process parameters of small hole dry drilling in Ti-6Al-4V using Taguchi and grey relational analysis. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 48, n. 1, p. 346–354, 2014. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2013.11.020>>. Acesso em: 17 jun. 2016

QUINTANA, G.; CIURANA, J. Chatter in machining processes: A review. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 51, n. 5, p. 363–376, 2011. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmactools.2011.01.001>>. Acesso em: 25 mar. 2015

RAJYALAKSHMI, G.; VENKATA RAMAIAH, P. Multiple process parameter optimization of wire electrical discharge machining on Inconel 825 using Taguchi grey relational analysis. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 69, n. 5–8, p. 1249–1262, 2013.

RAMESH, B. N.; SURESHA, B. Optimization of tribological parameters in abrasive wear mode of carbon-epoxy hybrid composites. **Materials and Design**, v. 59, p. 38–49, 2014. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2014.02.023>>. Acesso em:

15 jan. 2015.

RAMESH, S.; VISWANATHAN, R.; AMBIKA, S. Measurement and optimization of surface roughness and tool wear via grey relational analysis, TOPSIS and RSA techniques. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 78, p. 63–72, 2016. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2015.09.036>>. Acesso em: 12 jan. 2017.

RATNAM, C.; ARUN VIKRAM, K.; BEN, B. S.; MURTHY, B. S. N. Process monitoring and effects of process parameters on responses in turn-milling operations based on SN ratio and ANOVA. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 94, p. 221–232, 2016. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2016.07.090>>. Acesso em: 12 jan. 2017.

REN, X.; LIU, Z. Influence of cutting parameters on work hardening behavior of surface layer during turning superalloy Inconel 718. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, p. 2319–2327, 2016. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s00170-016-8350-9>>. Acesso em: 09 mar. 2017

SAHOO, A. K.; SAHOO, B. Performance studies of multilayer hard surface coatings (TiN/TiCN/Al₂O₃/TiN) of indexable carbide inserts in hard machining: Part-II (An experimental approach). **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 46, n. 8, p. 2854–2867, 2013. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2012.09.023>>. Acesso em: 16 jan. 2015.

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**, v. 91, p. 347–357, 2015.

SARIKAYA, M.; YILMAZ, V.; GÜLLÜ, A. Analysis of cutting parameters and cooling/lubrication methods for sustainable machining in turning of Haynes 25 superalloy. **Journal of Cleaner Production**, v. 133, p. 172–181, 2016.

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.

SHARMA, S. K.; RIZVI, S. A.; KORI, R. P. Optimization of process parameters in turning of AISI 8620 steel using Taguchi and grey Taguchi analysis. **Int. Journal of Engineering Research and Applications**, v. 4, n. 3, p. 51–57, 2014.

SHARMAN, A. R. C.; HUGHES, J. I.; RIDGWAY, K. The effect of tool nose radius on surface integrity and residual stresses when turning Inconel 718. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 216, p. 123–132, 2015. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.09.002>>. Acesso em: 21 jan. 2016.

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**, 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**, v. 61, p. 27–47, 2012. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmactools.2012.05.007>>. Acesso em: 25 mar. 2015.

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.

SOHRABPOOR, H.; KHANGHAH, S. P.; TEIMOURI, R. Investigation of lubricant condition and machining parameters while turning of AISI 4340. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 76, n. 9–12, p. 2099–2116, 2015.

SØRBY, K.; VAGNORIUS, Z. High-Pressure Cooling in Turning of Inconel 625 with Ceramic Cutting Tools. **Procedia CIRP**, v. 0, p. 0–3, 2018. Elsevier B.V. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.221>>. Acesso em 12 jan. 2019

SRIRANGAN, A. K.; PAULRAJ, S. Multi-response optimization of process parameters for TIG welding of Incoloy 800HT by Taguchi grey relational analysis. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, v. 19, n. 2, p. 811–817, 2016. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jestch.2015.10.003>>. Acesso em: 04 maio 2017.

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

STEPAN, G.; KISS, A. K.; GHALAMCHI, B.; SOPANEN, J.; BACHRATHY, D. Chatter avoidance in cutting highly flexible workpieces. **CIRP Annals: manufacturing technology**, v. 66, n. 1, p. 377–380, 2017. CIRP. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2017.04.054>>. Acesso em: 09 mar. 2018.

SUN, G.; ZHANG, H.; FANG, J.; LI, G.; LI, Q. A new multi-objective discrete robust optimization algorithm for engineering design. **Applied Mathematical Modelling**, v. 53, p. 602–621, 2018. Elsevier Inc. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apm.2017.08.016>>. Acesso em: 09 jan. 2019.

TAGUCHI, G.; CHOWDHURY, S.; WU, Y. **Taguchi's Quality Engineering Handbook**. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2004.

TANG, L.; DU, Y. T. Multi-objective optimization of green electrical discharge machining Ti-6Al-4V in tap water via grey-taguchi method. **Materials and Manufacturing Processes**, v. 29, n. 5, p. 507–513, 2014.

TANG, L.; DU, Y. T. Experimental study on green electrical discharge machining in tap water of Ti-6Al-4V and parameters optimization. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 70, n. 1–4, p. 469–475, 2014.

TARNG, Y. S.; JUANG, S. C.; CHANG, C. H. The use of grey-based Taguchi methods to determine submerged arc welding process parameters in hardfacing. **Journal of Materials**

Processing Technology, v. 128, n. 1–3, p. 1–6, 2002.

TAŞKESEN, A.; KÜTÜKDE, K. Experimental investigation and multi-objective analysis on drilling of boron carbide reinforced metal matrix composites using grey relational analysis. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 47, n. 1, p. 321–330, 2014.

THAKUR, A.; GANGOPADHYAY, S. State-of-the-art in surface integrity in machining of nickel-based super alloys. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 100, p. 25–54, 2015. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2015.10.001>>. Acesso em: 22 dez. 2016

THAKUR, A.; GANGOPADHYAY, S. Dry machining of nickel-based super alloy as a sustainable alternative using TiN/TiAlN coated tool. **Journal of Cleaner Production**, v. 129, p. 256–268, 2016. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.074>>. Acesso em: 22 dez. 2016.

THAKUR, A.; GANGOPADHYAY, S.; MAITY, K. P. Effect of cutting speed and tool coating on machined surface integrity of ni-based super alloy. **Procedia CIRP**, v. 14, n. 7, p. 541–545, 2014. Acesso em: 22 dez. 2016.

THAKUR, A.; GANGOPADHYAY, S.; MAITY, K. P.; SAHOO, S. K. Evaluation on Effectiveness of CVD and PVD Coated Tools during Dry Machining of Incoloy 825. **Tribology Transactions**, v. 59, n. 6, p. 1048–1058, 2016. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2016.05.027>>. Acesso em 22 dez. 2016.

THAKUR, A.; MOHANTY, A.; GANGOPADHYAY, S. Comparative study of surface integrity aspects of Incoloy 825 during machining with uncoated and CVD multilayer coated inserts. **Applied Surface Science**, v. 320, p. 829–837, 2014. Elsevier B.V. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2014.09.129>>. Acesso em: 22 dez. 2016.

THAKUR, D. G.; RAMAMOORTHY, B.; VIJAYARAGHAVAN, L. An experimental analysis of effective high speed turning of superalloy Inconel 718. **Journal of Materials Science**, v. 44, n. 12, p. 3296–3304, 2009. Acesso em: 22 dez. 2016.

THELLAPUTTA, G. R.; CHANDRA, P. S.; RAO, C. S. P. Machinability of nickel based superalloys: A review. **Materials Today: Proceedings**, v. 4, n. 2, p. 3712–3721, 2017. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.266>>. Acesso em: 11 fev. 2018.

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

TRIOLA, M. **INTRODUÇÃO À ESTATÍSTICA**. 12th ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

UHLMANN, E.; HINZMANN, D.; KROPIDLOWKSI, K.; et al. Increased tool performance with niobium carbide based cutting materials in dry cylindrical turning. **Procedia CIRP**, v. 0, n. Hpc, p. 541–544, 2018. Elsevier B.V. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.238>>. Acesso em: 18 jan. 2019 .

VENKATA RAO, K.; MURTHY, B. S. N.; MOHAN RAO, N. Cutting tool condition monitoring by analyzing surface roughness, work piece vibration and volume of metal removed for AISI 1040 steel in boring. **Measurement: Journal of the International Measurement Confederation**, v. 46, n. 10, p. 4075–4084, 2013. Elsevier Ltd. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2013.07.021>>. Acesso em: 15 jun. 2016.

WOJCIECHOWSKI, S.; W. MARUDA, R.; M. KROLCZYK, G.; NIESŁONY, P. Application of signal to noise ratio and grey relational analysis to minimize forces and vibrations during precise ball end milling. **Precision Engineering**, v. 51, n. October 2017, p. 582–596, 2018.

ZHUANG, K.; ZHU, D.; ZHANG, X.; DING, H. Notch wear prediction model in turning of Inconel 718 with ceramic tools considering the influence of work hardened layer. **Wear**, v. 313, n. 1–2, p. 63–74, 2014. Elsevier. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2014.02.007>>. Acesso em: 15 jan. 2015.