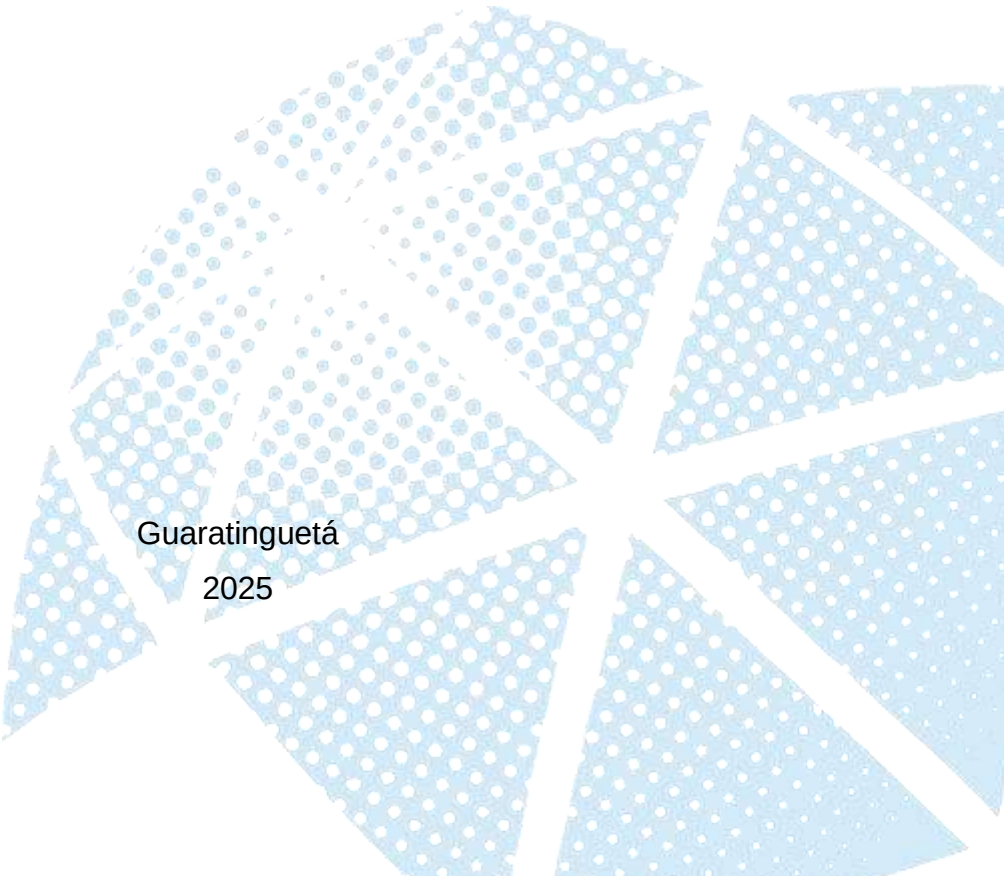


**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
CÂMPUS DE GUARATINGUETÁ**

**IVAIR ALVES DOS SANTOS**

**ANÁLISE DO PROCESSO DE FURAÇÃO DA VAT32® UTILIZANDO INSERTOS  
RECOBERTOS POR  $\text{Ti}(\text{C},\text{N}) + \text{Al}_2\text{O}_3$  E  $(\text{Ti},\text{Al})\text{N} + \text{NbN}$**

Guaratinguetá  
2025



**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA**

**IVAIR ALVES DOS SANTOS**

**ANÁLISE DO PROCESSO DE FURAÇÃO DA VAT32® UTILIZANDO INSERTOS  
RECOBERTOS POR  $\text{Ti(C,N)+Al}_2\text{O}_3$  E  $(\text{Ti,Al})\text{N+NbN}$**

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

Guaratinguetá

2025

|       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| S237a | <p>Santos, Ivair Alves dos</p> <p>Análise do processo de furação da VAT32® utilizando insertos recobertos por Ti(C,N)+ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e (Ti,Al)N+NbN / Ivair Alves dos Santos - Guaratinguetá, 2024.</p> <p>141 f : il.</p> <p>Bibliografia: f. 121-141</p> <p>Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2025.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves</p> <p>1. Ligas resistentes ao calor. 2. Aspereza de superfície.<br/>3. Usinagem. I. Título.</p> <p>CDU 669(043)</p> |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Luciana Máximo  
Bibliotecária/CRB-8 3595

## **IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA**

Este estudo aprimora a usinagem da superliga VAT32®, analisando a eficiência de revestimentos em ferramentas de metal duro no processo de furação. Os resultados apontam melhorias na qualidade superficial, menor desgaste da ferramenta e redução do consumo energético, impulsionando inovação e sustentabilidade.

A otimização do processo beneficia indústrias automotiva, aeronáutica e nuclear, reduzindo custos e ampliando a eficiência produtiva. O monitoramento de parâmetros críticos fornece dados essenciais para aprimoramentos técnicos.

No campo educacional, os achados fortalecem a formação de engenheiros e pesquisadores, incentivando a internacionalização do conhecimento. A aplicação dos resultados na indústria promove a autossuficiência tecnológica e a competitividade da indústria nacional.

## **POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH**

This study enhances the machining of VAT32® superalloy by analyzing the efficiency of coatings on carbide tools in the drilling process. The results indicate improvements in surface quality, reduced tool wear, lower energy consumption, driving innovation and sustainability.

Process optimization benefits the automotive, aerospace, and nuclear industries by reducing costs and increasing production efficiency. Monitoring critical parameters provides essential data for technical improvements.

In the educational field, the findings strengthen the training of engineers and researchers, encouraging the internationalization of knowledge. The application of results in the industry promotes technological self-sufficiency and the competitiveness of the national industry.

**IVAIR ALVES DOS SANTOS**

**ANÁLISE DO PROCESSO DE FURAÇÃO DA SUPERLIGA VAT32®  
UTILIZANDO INSERTOS DE METAL DURO RECOBERTOS POR (Ti,Al)N+TiN,  
Ti(C,N)+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> E (Ti,Al)N+NbN**

Tese apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, para obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Data da defesa: 05/02/2025

Banca Examinado

Documento assinado digitalmente



**MANOEL CLEBER DE SAMPAIO ALVES**

Data: 05/02/2025 19:14:11-0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. MANOEL CLÉBER DE SAMPAIO ALVES  
Orientador - UNESP

Documento assinado digitalmente



**MARCOS VALERIO RIBEIRO**

Data: 08/02/2025 20:44:41-0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. MARCOS VALERIO RIBEIRO  
UNESP

Documento assinado digitalmente



**JOSE VITOR CANDIDO DE SOUZA**

Data: 10/02/2025 14:08:35-0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. JOSE VITOR CANDIDO DE SOUZA  
UNESP

Documento assinado digitalmente



**MARCEL YUZO KONDO**

Data: 07/02/2025 14:56:29-0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. MARCEL YUZO KONDO  
UNESP - ITAPEVA

Documento assinado digitalmente



**JOAO ROBERTO FERREIRA**

Data: 06/02/2025 12:09:35-0300

Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. JOAO ROBERTO FERREIRA  
UNIFEI

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a Deus, cuja força e presença me sustentaram nos momentos mais difíceis e me permitiram superar os desafios do dia a dia. Sem Ele, esta conquista não seria possível.

Manifesto minha profunda gratidão e admiração ao meu orientador, Prof. Dr. Manoel Cléber de Sampaio Alves, que foi mais do que um orientador: um amigo e mentor inestimável. Seu vasto conhecimento, conselhos sábios e incentivos constantes foram fundamentais para que eu pudesse concluir este doutorado com êxito. Agradeço a todos os docentes da Faculdade de Engenharia e Ciências- Campus de Guaratinguetá-Unesp (FEG/UNESP), cujo apoio e ensinamentos enriqueceram minha trajetória ao longo dessa jornada.

Minha especial gratidão vai aos professores Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro (FEG/UNESP), Prof. Dr. José Vitor Candido de Souza (FEG/UNESP), Prof. Dr. Sérgio Francisco dos Santos, e Prof. Dr. Marcel Yuzo Kondo (ITAPEVA/UNESP), que contribuíram de forma decisiva com suas orientações, conversas inspiradoras nos corredores, suporte técnico nos ensaios e incentivo constante ao progresso deste trabalho.

Sou grato à Villares Metals, pela generosidade em permitir a realização da pesquisa e pela doação dos materiais necessários, assim como à SECO Tools, pela doação das ferramentas de corte e suportes que viabilizaram este estudo.

Reconheço com apreço o trabalho incansável de todos os servidores técnicos, em especial o Sr. José Manoel Bernardes, do Laboratório de estudo da Usinagem (FEG/UNESP), cuja dedicação foi essencial na execução dos experimentos de usinagem.

Estendo ainda meus agradecimentos a todos os técnicos administrativos, colaboradores da biblioteca e equipe da secretaria de pós-graduação da UNESP, que sempre estiveram prontos a ajudar durante minha caminhada acadêmica e por fim, a todas as pessoas que, de maneira direta ou indireta, contribuíram para a concretização deste grande desafio, deixo meu mais sincero agradecimento. Muito obrigado!

“O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001”.

“O aprendizado é o que nos faz atingir  
nossos objetivos e alcançar nossos  
sonhos”.

Ayrton Senna.

## RESUMO

Superligas são aplicadas na fabricação de peças e equipamentos que exijam resistência à altas temperaturas ou à corrosão para uso em temperaturas superiores a 540°C, podendo ser a base de níquel, ferro-níquel ou cobalto. A superliga VAT32® é amplamente utilizada em setores como as indústrias automotiva, aeronáutica e nuclear, devido às suas elevadas propriedades mecânicas. No entanto, essas mesmas propriedades tornam sua usinagem um desafio. A VAT32® é uma liga de níquel endurecida por precipitação, com elevados teores de Ni, Fe, Cr e C com elevada resistência à abrasão pela presença de partículas duras (carbeto de nióbio e titânio). Quando usinadas produzem alto desgaste das ferramentas devido à presença de carbeto duros em sua microestrutura e por sofrer endurecimento por deformação. Neste sentido, este estudo analisa a influência de dois diferentes revestimentos em ferramentas comerciais de metal duro e dos parâmetros de corte no processo de furação em cheio de uma superliga de Ni (VAT32®), usando broca de insertos intercambiáveis. Os testes foram realizados com ferramentas comerciais revestidas por Ti(C,N)+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e por ferramentas revestidas com TiAlN+NbN, utilizando um delineamento de experimentos do tipo Fatorial completo com duas repetições para cada condição totalizando 36 experimentos sendo 2 conjuntos de ferramentas (Ti(C,N)+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e TiAlN+NbN), 3 velocidades de corte (20, 40 e 60m/min), 3 avanços (0.04, 0.06 e 0.08mm/rot) e 2 repetições para cada condição. Analisou-se a qualidade dos furos executados por meio dos parâmetros de rugosidade média R<sub>a</sub>. A eficiência das ferramentas testadas foi verificada analisando os desgastes e avarias. Analisou-se ainda a usinabilidade da VAT32® através da potência consumida, vibração e emissão acústica e cavacos gerados durante o processo. A análise dos resultados permite concluir que o recobrimento de TiAlN+NbN proporcionou menores rugosidades, menores desgastes, e um menor consumo de potência em relação ao recobrimento de Ti(C,N)+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Maiores velocidades de corte e maiores avanços proporcionaram maiores vibrações e maior consumo de potência.

**Palavras-chave:** Rugosidade; revestimentos; superliga; potência de corte; desgaste.



## ABSTRACT

Superalloys are used in the manufacturing of components and equipment requiring resistance to high temperatures and/or corrosion for applications at temperatures above 540°C. These alloys can be based on nickel, iron-nickel, or cobalt. The VAT32® superalloy is widely used in sectors such as the automotive, aerospace, and nuclear industries due to its high mechanical properties. However, these same properties make its machining a challenge. VAT32® is a precipitation-hardened nickel alloy with high levels of Ni, Fe, Cr, and C, offering high abrasion resistance due to the presence of hard particles (niobium and titanium carbides). When machined, it causes significant tool wear due to the hard carbides in its microstructure and its tendency to undergo strain hardening. This study analyzes the influence of two different coatings on commercial carbide tools and the cutting parameters during the drilling process of a Ni superalloy (VAT32®) using indexable insert drills. Tests were conducted with commercial tools coated with  $\text{Ti(C,N)+Al}_2\text{O}_3$  and tools coated with  $\text{TiAlN+NbN}$ , employing a full factorial experimental design with two repetitions for each condition, totaling 36 experiments. The experimental setup included two sets of tools ( $\text{Ti(C,N)+Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{TiAlN+NbN}$ ), three cutting speeds (20, 40, and 60 m/min), three feed rates (0.04, 0.06, and 0.08 mm/rev), and two repetitions per condition. The quality of the drilled holes was evaluated through average roughness ( $R_a$ ) parameters. The efficiency of the tested tools was assessed by analyzing wear and damage. Additionally, the machinability of VAT32® was evaluated through power consumption, vibration, acoustic emission, and chip formation during the process. The results indicate that the  $\text{TiAlN+NbN}$  coating provided lower roughness, less wear, and reduced power consumption compared to the  $\text{Ti(C,N)+Al}_2\text{O}_3$  coating. Higher cutting speeds and feed rates resulted in increased vibrations and power consumption.

**Keywords:** Roughness; coatings; superalloy; cutting power; wear.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Processo de furação .....                                                                                                                                                                                                          | 29 |
| Figura 2 - Partes de uma broca helicoidal .....                                                                                                                                                                                               | 30 |
| Figura 3 - Ponta da broca helicoidal, ângulos da aresta de corte .....                                                                                                                                                                        | 31 |
| Figura 4 - Exemplo de Furação Helicoidal com Pastilhas Intercambiáveis .....                                                                                                                                                                  | 32 |
| Figura 5 - Broca Com Inserto Intercambiável .....                                                                                                                                                                                             | 33 |
| Figura 6 - Parâmetros de Corte .....                                                                                                                                                                                                          | 34 |
| Figura 7 - Variação da Velocidade de Corte .....                                                                                                                                                                                              | 36 |
| Figura 8 - Desgaste de flanco .....                                                                                                                                                                                                           | 38 |
| Figura 9 - Desgaste de Cratera .....                                                                                                                                                                                                          | 38 |
| Figura 10 - Desgaste tipo entalhe .....                                                                                                                                                                                                       | 39 |
| Figura 11 - Trinca a quente .....                                                                                                                                                                                                             | 39 |
| Figura 12 - Exemplo de lascamento .....                                                                                                                                                                                                       | 40 |
| Figura 13 - Exemplo de Aresta Postiça .....                                                                                                                                                                                                   | 40 |
| Figura 14 - Micrografia do Metal duro .....                                                                                                                                                                                                   | 41 |
| Figura 15 - Esquema das Propriedades do Material ferramenta de corte .....                                                                                                                                                                    | 44 |
| Figura 16 - Insertos de metal duro com diferentes recobrimentos .....                                                                                                                                                                         | 45 |
| Figura 17 - Linha Média .....                                                                                                                                                                                                                 | 55 |
| Figura 18 - Parâmetro de Rugosidade $R_a$ .....                                                                                                                                                                                               | 57 |
| Figura 19 - Fontes de EA durante a usinagem de metal .....                                                                                                                                                                                    | 61 |
| Figura 20 - Corpos de prova VAT32® .....                                                                                                                                                                                                      | 68 |
| Figura 21 - Centro de Usinagem DMG model DMU50ECO S. DMG Ecoline .....                                                                                                                                                                        | 69 |
| Figura 22 - Fixação dos corpos de prova através de placa com castanhas .....                                                                                                                                                                  | 70 |
| Figura 23 - Conjunto <i>spindle</i> , suporte e broca .....                                                                                                                                                                                   | 70 |
| Figura 24 - Broca mostrando insertos e suas características: a) interno de (Ti,Al)N+TiN; b) Broca mostrando inserto externo revestido com Ti(C,N)+Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ; c) Broca com inserto externo revestido com TiAlN+NbN ..... | 71 |
| Figura 25 - Broca mostrando arranjo do inserto interno e externo .....                                                                                                                                                                        | 72 |
| Figura 26 - Delineamento experimental .....                                                                                                                                                                                                   | 72 |
| Figura 27 - Montagem do sistema de ensaios ilustrando corpo de prova cilíndrico preso por placa com castanhas e sensores de vibração e emissão acústica .....                                                                                 | 74 |
| Figura 28 - Sistema de refrigeração atuando durante os ensaios e brocas fundidas durante e realização de ensaios preliminares .....                                                                                                           | 76 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                   |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 29 - Tela do aplicativo para controle dos ensaios desenv. em LABVIEW.....                                                                                                                                                                                  | 77  |
| Figura 30 - Arquivos salvos de potência, vibração e emissão de todo o ensaio .....                                                                                                                                                                                | 80  |
| Figura 31 - Sensor de corrente, marca LEM, modelo AT 100 B10 .....                                                                                                                                                                                                | 80  |
| Figura 32 - a) Sensor piezelétrico, marca <i>VibroControl</i> , modelo TV100; b) Sensor <i>piezo-elétrico</i> R15A e sistemas de captação e amplificação de emissão acústica; c) Disp. dos sensores de emissão acústica e de vibração na placa com castanhas .... | 83  |
| Figura 33 - Arquivo de potência (sinal de corrente) plotado na forma de gráfico para visualização de todo o ensaio .....                                                                                                                                          | 84  |
| Figura 34 - Arquivos de potência, vibração e emissão delimitados dentro da região propriamente dita do ensaio.....                                                                                                                                                | 85  |
| Figura 35 - Fluxo de tratamento dos dados coletados.....                                                                                                                                                                                                          | 86  |
| Figura 36 - Rugosímetro marca Mitutoyo Modelo: Surftest SJ-310 .....                                                                                                                                                                                              | 87  |
| Figura 37 - Microscópio óptico da marca Zeiss, modelo STEMI 2000 .....                                                                                                                                                                                            | 88  |
| Figura 38 - Microscópio marca Mitutoyo modelo QS-LBZ -Visual QUICK SCOPE série 359 e Microscópio eletrônico de varredura ambiental Zeiss EVO LS-15, com EDS..                                                                                                     | 89  |
| Figura 39 - Exemplos de cavacos obtidos nos ensaios realizados .....                                                                                                                                                                                              | 89  |
| Figura 40 - Ferramenta para medição da circularidade microscópio modelo QS-LBZ - Visual QUICK SCOPE série 359 da marca Mitutoyo.....                                                                                                                              | 90  |
| Figura 41 - Utilização do Minitab 2020 para análise de normalidade, análise de variância, teste de Tukey e geração de gráficos de efeitos principais, interações e superfícies .....                                                                              | 92  |
| Figura 42 - Efeitos Principais para Rugosidade.....                                                                                                                                                                                                               | 94  |
| Figura 43 - Interação para Rugosidade .....                                                                                                                                                                                                                       | 95  |
| Figura 44 - Efeitos Principais para Desvio de Circularidade .....                                                                                                                                                                                                 | 97  |
| Figura 45 - Interação para Circularidade .....                                                                                                                                                                                                                    | 98  |
| Figura 46 - Efeitos principais para o Desgaste de Flanco (Vb).....                                                                                                                                                                                                | 99  |
| Figura 47 - Interações para o Desgaste de Flanco (Vb) .....                                                                                                                                                                                                       | 100 |
| Figura 48 - Efeitos principais para a Potência Média Consumida (W) .....                                                                                                                                                                                          | 102 |
| Figura 49 - Interações para a potência média consumida (W) .....                                                                                                                                                                                                  | 103 |
| Figura 50 - Efeitos principais para a Potência Máxima Consumida (W) .....                                                                                                                                                                                         | 104 |
| Figura 51 - Interações para a potência máxima consumida (W).....                                                                                                                                                                                                  | 105 |
| Figura 52 - Efeitos principais para a vibração média gerada .....                                                                                                                                                                                                 | 107 |
| Figura 53 – Interações para a vibração média gerada .....                                                                                                                                                                                                         | 107 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                 |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 54 - Efeitos principais para a vibração máxima gerada .....                                                                                                                                                                                                              | 109 |
| Figura 55 - Interações para a vibração máxima gerada .....                                                                                                                                                                                                                      | 110 |
| Figura 56 - Efeitos principais para Emissão Acústica Média .....                                                                                                                                                                                                                | 111 |
| Figura 57 - Interações para Emissão Acústica Média Gerada.....                                                                                                                                                                                                                  | 112 |
| Figura 58 - Efeitos principais para Emissão Acústica Máxima.....                                                                                                                                                                                                                | 113 |
| Figura 59 - Interações para Emissão Acústica Máxima .....                                                                                                                                                                                                                       | 114 |
| Figura 60 - Figura 60 - Exemplo de formação de aresta postiça de corte (APC)<br>usando ferramenta Ti(C,N)+Al Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (ensaio 7) .....                                                                                                                    | 117 |
| Figura 61 - Exemplo de formação de desgaste de flanco e aresta postiça de corte<br>(APC) usando ferramenta Ti(C,N)+ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (ensaio 8).....                                                                                                              | 118 |
| Figura 62 - Exemplo de formação de desgaste de flanco e aresta postiça de corte<br>(APC) usando ferramenta Ti(C,N)+ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (ensaio 9).....                                                                                                              | 118 |
| Figura 63 - Exemplo de formação de desgaste de flanco usando ferramenta<br>TiAlN+NbN (ensaio 28) .....                                                                                                                                                                          | 119 |
| Figura 64 - Exemplo de formação de desgaste de flanco usando ferramenta<br>TiAlN+NbN (ensaio 29) .....                                                                                                                                                                          | 119 |
| Figura 65 - Exemplo de formação de desgaste de flanco usando ferramenta<br>TiAlN+NbN (ensaio 30) .....                                                                                                                                                                          | 120 |
| Figura 66 - Exemplo de Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Microanálise por<br>espectroscopia de energia (EDS) usando ferramenta de Ti(C,N)+ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> comprovando<br>formação de aresta postiça de corte neste tipo de ferramenta (ensaio 3)..... | 120 |
| Figura 67 - Exemplo de Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Microanálise por<br>espectroscopia de energia (EDS) usando ferramenta TiAlN+NbN (ensaio 14)<br>indicando apenas desgaste de flanco (ensaio 14).....                                                          | 121 |
| Figura 68 - Exemplo de cavacos em fita, emaranhado do tipo cisalhado (ensaio 1)<br>.....                                                                                                                                                                                        | 124 |
| Figura 69 - Exemplo de cavacos cônico, longo, do tipo cisalhado (ensaio 2) .....                                                                                                                                                                                                | 124 |
| Figura 70 - Exemplo de cavacos cônico, curto, do tipo cisalhado (ensaio 6).....                                                                                                                                                                                                 | 125 |
| Figura 71 - Exemplo de cavacos segmentado, do tipo cisalhado (ensaio 11) .....                                                                                                                                                                                                  | 125 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1 - Composição química VAT32® .....                     | 26  |
| Tabela 2 - Detalhamento dos ensaios realizados .....           | 73  |
| Tabela 3 - ANOVA para Rugosidade ( $R_a$ ) .....               | 95  |
| Tabela 4 - ANOVA para Circularidade .....                      | 98  |
| Tabela 5 - ANOVA para desgaste de flanco (VB).....             | 100 |
| Tabela 6 - ANOVA para Potência Média Consumida .....           | 103 |
| Tabela 7 - ANOVA para Potência Máxima Consumida .....          | 105 |
| Tabela 8 - ANOVA para vibração média gerada .....              | 108 |
| Tabela 9 - ANOVA para Vibração Máxima Gerada .....             | 110 |
| Tabela 10 - ANOVA para Emissão Acústica Média .....            | 112 |
| Tabela 11 - ANOVA para Emissão Acústica Máxima .....           | 114 |
| Tabela 12 - Tipos de Desgastes e Avarias .....                 | 116 |
| Tabela 13 - Tipos e Formas de Cavacos.....                     | 123 |
| Tabela 14 - Valores Médios e Resultados do Teste de Tukey..... | 127 |
| Tabela 15 - Melhores Condições de Usinagem.....                | 129 |

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANOVA: Análise de Variância

APC: Aresta Postiça de Corte

CBN: Nitreto Cúbico de Boro

CNC: Computer Numerical Control

CVD: Chemical Vapor Deposition (Deposição Química de Vapor)

DMG: Deckel Maho Gildemeister (Centro de Usinagem)

EA: Emissão Acústica

EDS: Espectroscopia por Dispersão de Energia

HSS: High-Speed Steel (Aço Rápido)

HV: Dureza Vickers

ISO: International Organization for Standardization

LABVIEW: Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench

PVD: Physical Vapor Deposition (Deposição Física de Vapor)

SEM: Microscopia Eletrônica de Varredura

Ti(C,N): Carbetos de Titânio

TiAlN: Nitreto de Titânio Alumínio

TiN: Nitreto de Titânio

VAT®: Villares Alta Temperatura

VCC: Voltagem de Corrente Contínua

WC: Carbetos de Tungstênio

ANP: Agência Nacional do Petróleo

CAD: Computer-Aided Design

CAE: Computer-Aided Engineering

CAM: Computer-Aided Manufacturing

FEM: Método dos Elementos Finitos (Finite Element Method)

MOF: Matriz de Observações de Fatores

DOE: Planejamento de Experimentos (Design of Experiments)

MATLAB: Matrix Laboratory

ANSYS: Software de Simulação Estrutural e Fluidodinâmica

ABAQUS: Software para Modelagem e Simulação

## LISTA DE SÍMBOLOS

Ø: Diâmetro

Ti(C,N): Carboneto de Titânio

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: Óxido de Alumínio

TiAlN: Nitreto de Titânio Alumínio

TiN: Nitreto de Titânio

NbN: Nitreto de Níbio

R<sub>a</sub>: Rugosidade média

R<sub>t</sub>: Rugosidade total

V<sub>c</sub>: Velocidade de corte

V<sub>f</sub>: Velocidade de avanço

F<sub>n</sub>: Avanço por rotação

DC: Diâmetro da broca

RPM: Rotações por minuto

ρ: Densidade

μ: Coeficiente de Atrito

HV: Dureza Vickers

σ: Tensão

E: Módulo de Elasticidade

K: Condutividade Térmica

C<sub>p</sub>: Capacidade Térmica Específica

β: Coeficiente de Expansão Térmica

T: Temperatura

P: Potência



F: Força

M: Momento

L: Comprimento

$\theta$ : Ângulo de inclinação

$\tau$ : Tensão de Cisalhamento

$\varepsilon$ : Deformação

$\eta$ : Eficiência

## SUMÁRIO

|              |                                                                             |           |
|--------------|-----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                                     | <b>19</b> |
| 1.1          | OBJETIVOS GERAIS .....                                                      | 21        |
| 1.2          | OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....                                                 | 21        |
| <b>2</b>     | <b>REVISÃO DE LITERATURA.....</b>                                           | <b>23</b> |
| 2.1          | USINAGEM DE SUPERLIGAS.....                                                 | 23        |
| 2.2          | SUPERLIGA VAT32® .....                                                      | 25        |
| 2.3          | PROCESSO DE FURAÇÃO .....                                                   | 28        |
| <b>2.3.1</b> | <b>Brocas Helicoidais .....</b>                                             | <b>30</b> |
| <b>2.3.2</b> | <b>Tipos de Furação.....</b>                                                | <b>32</b> |
| <b>2.3.3</b> | <b>Parâmetros de Corte na furação .....</b>                                 | <b>34</b> |
| <b>2.3.4</b> | <b>Desgastes e Avarias em Brocas.....</b>                                   | <b>37</b> |
| <b>2.3.5</b> | <b>Desgaste de Flanco.....</b>                                              | <b>38</b> |
| 2.4          | METAL DURO .....                                                            | 41        |
| <b>2.4.1</b> | <b>Processos de recobrimento de ferramentas CVD e PVD.....</b>              | <b>45</b> |
| <b>2.4.2</b> | <b>Revestimento de Nitreto de Titânio-Alumínio (TiAlN).....</b>             | <b>49</b> |
| <b>2.4.3</b> | <b>Revestimento de Nitreto de titânio (TiN).....</b>                        | <b>50</b> |
| <b>2.4.4</b> | <b>Revestimento de Nitreto de Nióbio (NbN).....</b>                         | <b>52</b> |
| <b>2.4.5</b> | <b>Revestimento de Carboneto de Titânio (Ti(C,N)).....</b>                  | <b>52</b> |
| <b>2.4.6</b> | <b>Revestimento de óxido de alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>).....</b> | <b>53</b> |
| 2.5          | RUGOSIDADE .....                                                            | 54        |
| <b>2.5.1</b> | <b>Rugosidade Média (R<sub>a</sub>).....</b>                                | <b>56</b> |
| 2.6          | MONITORAMENTO DO PROCESSO DE FURAÇÃO .....                                  | 57        |
| <b>2.6.1</b> | <b>Potência .....</b>                                                       | <b>58</b> |
| <b>2.6.2</b> | <b>Vibração .....</b>                                                       | <b>59</b> |
| <b>2.6.3</b> | <b>Emissão acústica .....</b>                                               | <b>60</b> |
| 2.7          | TIPOS E FORMAS DOS CAVACOS .....                                            | 61        |
| <b>2.7.1</b> | <b>Classificação dos Cavacos.....</b>                                       | <b>62</b> |
| 2.8          | PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS DO TIPO FAT. COMPLETO .....                    | 64        |

|              |                                                          |            |
|--------------|----------------------------------------------------------|------------|
| 2.9          | ANÁLISE DE VARIÂNCIA (ANOVA) E TESTE DE TUKEY .....      | 65         |
| <b>3</b>     | <b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>                         | <b>68</b>  |
| 3.1          | CORPO DE PROVA.....                                      | 68         |
| 3.2          | PROCESSO DE FURAÇÃO .....                                | 69         |
| <b>3.2.1</b> | <b>Sistema de aquisição de sinais .....</b>              | <b>76</b>  |
| <b>3.2.2</b> | <b>Potência consumida.....</b>                           | <b>80</b>  |
| <b>3.2.3</b> | <b>Vibração .....</b>                                    | <b>81</b>  |
| <b>3.2.4</b> | <b>Emissão Acústica.....</b>                             | <b>82</b>  |
| 3.3          | Sistema de tratamento de sinais.....                     | 83         |
| 3.4          | MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE .....                              | 87         |
| 3.5          | DESGASTE E AVARIAS DAS FERRAMENTA.....                   | 88         |
| 3.6          | TIPOS E FORMAS DOS CAVACOS .....                         | 89         |
| 3.7          | DESVIO DE CIRCULARIDADE .....                            | 90         |
| 3.8          | DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTO ESTATÍSTICO ..... | 90         |
| <b>4</b>     | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>                     | <b>93</b>  |
| 4.1          | ANÁLISE DA RUGOSIDADE MÉDIA ( $R_a$ ) .....              | 93         |
| 4.2          | ANÁLISE DO DESVIO DE CIRCULARIDADE .....                 | 97         |
| 4.3          | ANÁLISE DO DESGASTE DE FLANCO (VB) .....                 | 99         |
| 4.4          | ANÁLISE DA POTÊNCIA CONSUMIDA MÉDIA .....                | 101        |
| 4.5          | ANÁLISE DA POTÊNCIA CONSUMIDA MÁXIMA.....                | 104        |
| 4.6          | ANÁLISE DE VIBRAÇÃO MÉDIA.....                           | 106        |
| 4.7          | ANÁLISE DE VIBRAÇÃO MÁXIMA .....                         | 108        |
| 4.8          | ANÁLISE DE EMISSÃO ACÚSTICA MÉDIA .....                  | 110        |
| 4.9          | ANÁLISE DA EMISSÃO MÁXIMA .....                          | 113        |
| 4.10         | ANÁLISE QUALITATIVA DE DESGASTES E AVARIAS .....         | 115        |
| 4.11         | ANÁLISE QUALITATIVA DE CAVACOS .....                     | 122        |
| 4.12         | CONCLUSÕES SOBRE RESULTADOS .....                        | 126        |
| <b>5</b>     | <b>CONCLUSÕES .....</b>                                  | <b>130</b> |
|              | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                 | <b>132</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A usinagem de superligas representa um desafio significativo e um campo de estudo crucial na engenharia de manufatura moderna. As superligas, incluindo a VAT32®, são materiais conhecidos por suas propriedades excepcionais, como elevada resistência mecânica, inclusive em temperaturas elevadas, resistência à corrosão e estabilidade térmica (Kondo 2019).

Sousa (2011) cita que as características da VAT32® as tornam ideais para aplicações exigentes em indústrias como a aeroespacial, automotiva e de geração de energia. No entanto, essas mesmas propriedades que tornam as superligas tão valiosas, somado ao fato da presença de carbeto em sua estrutura, também apresentam dificuldades consideráveis no processo de usinagem, principalmente no que se refere à furação, que é uma das operações mais comuns, porém crítica.

Segundo Ezugwu (2003), as principais dificuldades na usinagem de superligas são: a) elevada resistência e dureza a quente, que causam danos à ferramenta de corte; b) endurecimento rápido do material devido à matriz austenítica, acelerando o desgaste da ferramenta; c) presença de carbeto duros e abrasivos na microestrutura, gerando desgaste excessivo e falhas prematuras da ferramenta; d) baixa condutividade térmica, resultando em alta concentração de calor (cerca de 1000°C) na aresta de corte, formando gradientes térmicos; e) afinidade química entre a superliga e a ferramenta, que pode levar à formação de aresta postiça, comprometendo a integridade da ferramenta e a qualidade da peça usinada.

No caso da superliga VAT32®, composta principalmente por 32% Ni, 44% Fe, 15% Cr e 0,25% de C, foi desenvolvida para ser equivalente ou superior à Inconel 751® em resistência a altas temperaturas e abrasão. Sua alta resistência ao desgaste elimina a necessidade de deposição de ligas fundidas em válvulas, proporcionando vantagens econômicas. Com dureza entre 350 HV10 e 375 HV10 para temperaturas de 700°C a 800°C, e elevada fração de carbeto de nióbio e titânio, a liga permite evitar até quatro etapas no processamento de válvulas: abertura do canal de deposição, deposição, usinagem e inspeção do cordão de Stellite (Bonhin, 2016). A elevada resistência à abrasão é conseguida pela presença de partículas duras (carbeto de nióbio e titânio) devido ao elevado teor de carbono.

De acordo com Diniz; Marcondes; Coppini (2014), o processo de furação envolve a remoção de material para criar furos com precisão e acabamento superficial adequados, uma tarefa que se torna mais complexa quando se trabalha com materiais de alta dureza e resistência. As brocas helicoidais são frequentemente utilizadas nesse processo, porém as próprias características do processo dificultam a lubri-refrigeração, presença de vibrações, não permitindo bons acabamentos na maioria das vezes. Contudo, a seleção adequada dos parâmetros de corte, como velocidade e taxa de penetração, é essencial para minimizar o desgaste da ferramenta e evitar avarias, garantindo a qualidade do furo e prolongando o desempenho da ferramenta.

A rugosidade é um critério importante para avaliar a qualidade do processo de furação. Um controle eficaz da rugosidade pode melhorar o desempenho funcional e a durabilidade dos componentes fabricados. Assim, sistemas de medição precisos são necessários para monitorar e controlar a rugosidade superficial. Além disso, o uso de fluidos de corte desempenha um papel crítico na redução do calor gerado durante a usinagem, melhorando a lubrificação e a refrigeração, o que contribui para a eficiência do processo e o desempenho da ferramenta. Na usinagem de superligas a utilização de sistemas de refrigeração é ainda mais importante devido à baixa condutividade térmica destes materiais (MACHADO *et al.*, 2011).

Outro aspecto fundamental do estudo é o monitoramento do processo de furação. A medição de parâmetros como potência, vibração e emissão acústica fornece informações valiosas sobre o desempenho do processo e o estado das ferramentas. Esses dados podem ser utilizados para ajustar e otimizar os parâmetros de corte em tempo real, evitando falhas e melhorando a eficiência global da usinagem.

A escolha de insertos adequados para a usinagem também é um fator determinante. Os insertos de metal duro revestidos, cerâmica, CBN possuem características distintas que os tornam mais ou menos adequados para diferentes condições de usinagem e materiais. A análise detalhada desses insertos pode proporcionar caminhos de como melhorar o desempenho e a eficiência da usinagem de superligas (Gobbi 2013).

Visando aprofundar o conhecimento sobre a usinagem de superligas, com foco especial na VAT32®, analisando os desafios e soluções associadas ao processo de furação com brocas com insertos intercambiáveis e analisando efeitos de diferentes

recobrimentos, parâmetros de corte, busca-se proporcionar diretrizes práticas que contribuam para o avanço da manufatura de componentes críticos em indústrias de alta tecnologia.

O presente estudo tem como objetivo a investigação do processo de furação em cheio da superliga VAT32®, utilizando insertos revestidos de  $\text{Ti(C,N)+Al}_2\text{O}_3$  e  $(\text{Ti,Al})\text{N+TiN}$ . Compreender como esses revestimentos interagem com a superliga VAT32® é essencial para a otimização do processo de usinagem, minimizando o desgaste das ferramentas e maximizando a eficiência na remoção de material. Para atingir esse objetivo, foram rigorosamente monitoradas diversas variáveis de saída do processo de furação como rugosidade, desgaste de flanco, potência de corte, emissão acústica e vibração. Essas variáveis críticas fornecem informações essenciais sobre o comportamento dos insertos sob desafiadoras condições de usinagem.

## 1.1 OBJETIVOS GERAIS

O objetivo deste trabalho foi investigar o processo de furação em cheio da superliga VAT32®, com broca de insertos intercambiáveis, utilizando ferramentas de metal duro com diferentes recobrimentos  $\text{Ti(C,N)+Al}_2\text{O}_3$  e  $(\text{Ti,Al})\text{N+NbN}$ .

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Analisar o processo de furação e a eficiência de diferentes recobrimentos em insertos de metal duro  $\text{Ti(C,N)+Al}_2\text{O}_3$  e  $(\text{Ti,Al})\text{N+NbN}$  analisando a rugosidade dos furos produzidos, circularidade, os desgastes e avarias das ferramentas, tipos e formas dos cavacos produzidos.

Investigar a influência da velocidade de corte e do avanço no processo de furação em cheio da superliga VAT32®;

Analisar, para as diferentes condições de furação, a potência consumida, emissão acústica e vibração através do monitoramento do processo;

Verificar a viabilidade de análise do processo de furação da superliga VAT32® pela potência consumida média e máxima, emissão acústica média e máxima e vibração média e máxima.

Contribuir, como um primeiro estudo científico envolvendo furação da superliga VAT32®, para novos trabalhos envolvendo furação de superligas.

Esses objetivos visam contribuir para o avanço no conhecimento e na prática da usinagem de superligas, principalmente furação, proporcionando diretrizes práticas para melhorar a eficiência e qualidade na fabricação de componentes críticos em indústrias de alta tecnologia.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

A revisão bibliográfica explora diversos fatores que influenciam a usinabilidade das superligas, destacando os desafios significativos associados à usinagem desses materiais devido às suas propriedades mecânicas complexas e alta resistência à abrasão. Dessa forma, a otimização dos parâmetros de corte, como velocidade, avanço e profundidade de corte, se torna fundamental, juntamente com a busca por ferramentas mais eficientes. O uso de ferramentas com revestimentos avançados, como  $\text{Ti(C,N)+Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{TiAlN+NbN}$ , pode contribuir para melhorar tanto a eficiência quanto a qualidade do processo de usinagem. A superliga VAT32® vem sendo estudada devido à sua notável resistência, evidenciando a necessidade de um monitoramento contínuo do processo para manter os padrões de qualidade estabelecidos.

### 2.1 USINAGEM DE SUPERLIGAS

No início do século 20, o projeto de turbinas estava limitado, pois não havia materiais disponíveis que pudessem satisfazer os requisitos extremos de resistência à corrosão e conservação de propriedades a altas temperaturas, essenciais para suportar as severas condições associadas a essas aplicações.

O desenvolvimento inicial de superligas à base de níquel, cobalto e ferro teve início nos Estados Unidos na década de 1930, culminando nas superligas de níquel como as mais amplamente utilizadas ao longo dos anos (Di Cunto, 2005); Serra *et al.*, 2015).

A criação do Inconel 718 no final da década de 1950, por Eiselstein, foi um marco para as superligas de níquel, tornando-se amplamente utilizada em turbinas a gás, motores aeronáuticos, indústrias nucleares e de petróleo devido à sua combinação de resistência mecânica, à fadiga e à corrosão em temperaturas elevadas (Farinia Group, 2024; Kopec *et al.*, 2024).

Pesquisas recentes destacam avanços significativos no uso do Inconel 718, especialmente em fabricação aditiva, como a impressão 3D, que tem ampliado sua aplicação em motores de foguete e ambientes criogênicos devido à sua alta



resistência a baixas temperaturas e propriedades mecânicas ajustáveis. Além disso, o desenvolvimento de revestimentos aluminizados e tratamentos térmicos têm melhorado sua resistência à oxidação e ao desgaste, permitindo sua utilização em condições extremas, como temperaturas de até 1000 °C (Farinia Group, 2024; Kopec *et al.*, 2024).

Antes, para atender a essas exigências, eram empregadas ligas de aço inoxidável compostas principalmente por ferro, carbono e cromo, operando dentro de uma faixa de temperatura entre 450°C e 850°C. No entanto, acima dessa faixa e em ambientes com gases corrosivos, até mesmo pressões moderadas em temperaturas mais baixas poderiam acelerar significativamente o processo de oxidação. Devido à necessidade de operar em temperaturas mais elevadas, o uso desses materiais revelou-se inadequado, impulsionando a busca por superligas que oferecessem melhor desempenho e resistência em condições extremas.

As superligas, compostas por ferro, cobalto e níquel, são amplamente utilizadas em diversas aplicações de engenharia. Bonhin (2016) destaca que essas ligas oferecem resistência superior à corrosão, alta estabilidade química e excepcional resistência ao desgaste em condições extremas de temperatura. Ramos (2018) enfatiza que a escolha das ligas adequadas para equipamentos deve considerar não apenas a resistência à corrosão e ao desgaste, mas também a capacidade de forjamento, fundição ou uma combinação de ambos, garantindo assim a eficiência e a durabilidade dos componentes em ambientes desafiadores.

Thellaputta *et al.* (2017) e Bushlya *et al.* (2024) discutem o desafio da usinagem de superligas, destacando o desgaste por difusão, abrasão e fricção como principais fatores limitantes para a durabilidade das ferramentas de corte. A aplicação de fluidos sob alta pressão pode reduzir o contato do cavaco com a ferramenta pois permite fragmentar o cavaco além de vencer a barreira de vapor, tornando a refrigeração mais eficiente.

Gobbi (2013) realizou uma análise detalhada da microestrutura da superliga VAT32®, destacando a presença de grãos equiaxiais heterogêneos, sugerindo que ferramentas modernas como cerâmicas híbridas, SiAlON, alumina reforçada com whiskers de SiC, além de ferramentas de metal duro com revestimento multicamadas

e pastilhas CBN, representam avanços significativos na usinagem de superligas, superando as limitações das ferramentas convencionais.

## 2.2 SUPERLIGA VAT32®

Com a necessidade de desenvolver novos materiais para acompanhar o avanço tecnológico do mercado, torna-se essencial o estudo de ligas que oferecem desempenho superior em altas temperaturas, uma exigência crescente nas novas aplicações industriais (Gobbi, 2013).

As superligas são conhecidas desde a década de 1930 e são amplamente utilizadas em setores como aeroespacial e automotivo. Com a implementação de regulamentações mais rigorosas para redução de emissões atmosféricas e melhoria da eficiência, surgiram projetos voltados para submeter componentes de motores a temperaturas e pressões mais elevadas (Gobbi, 2013).

De acordo com Bonhin (2016), a liga VAT32® (Villares Alta Temperatura) foi desenvolvida pela Villares Metals S.A. como uma alternativa ao Inconel 751® (VAT751), conhecido por suas excelentes propriedades mecânicas, porém com custo elevado.

Paspardelli (2011) descreve a liga VAT32® como uma liga de níquel endurecida por precipitação da fase  $Ni_3(Al,Ti,Nb)$ , destacando seu alto teor de carbono que proporciona resistência significativa ao desgaste devido à presença de partículas extremamente duras como carbeto de nióbio e carbeto de titânio na microestrutura. Essa composição torna a liga ideal para aplicações em válvulas de escape de motores de combustão interna, projetada para igualar ou superar o Inconel 751® em resistência a altas temperaturas e ao desgaste precoce comum em ligas atuais devido às condições severas de operação.

A alta resistência ao desgaste da VAT32® permite a eliminação de etapas no processo de usinagem das válvulas, como o tratamento de endurecimento de superfície, representando uma vantagem econômica significativa (Gobbi, 2013).

Segundo Farina, Liberto e Barbosa (2013), a VAT32® foi desenvolvida com o intuito de evitar a necessidade de depósito de ligas como o Stellite em certas

aplicações, melhorando assim a resistência ao desgaste em temperaturas entre 700°C e 800°C.

A dureza da VAT32® nessa faixa de temperatura varia entre 350 HV10 e 375 HV10, com uma elevada fração de carbeto, especialmente de NbC. A formação de carbeto de nióbio contribui significativamente para a resistência mecânica e ao desgaste da liga, porém, essa dureza elevada também resulta em desafios durante a usinagem, devido à dificuldade em trabalhar com o carbeto de nióbio (Farina, Liberto e Barbosa 2013).

A VAT32® foi projetada especificamente para enfrentar os desafios de operação em altas temperaturas e condições severas de desgaste, proporcionando uma alternativa viável e econômica às ligas convencionais como o Inconel 751®. Sua capacidade de resistir ao desgaste em temperaturas elevadas e a eliminação da necessidade de tratamentos adicionais durante a usinagem representam avanços significativos no campo da engenharia de materiais para aplicações críticas como válvulas de motores de combustão interna.

A liga VAT32® destaca-se não apenas por suas propriedades mecânicas superiores e resistência ao desgaste, mas também pela sua aplicação estratégica em ambientes industriais exigentes, onde a performance em altas temperaturas e durabilidade são requisitos essenciais para o desempenho eficaz de componentes críticos.

A composição química da liga VAT32® é mostrada na Tabela 1, destacando as proporções de elementos como níquel, cromo, titânio, alumínio, nióbio e carbono, que são essenciais para as propriedades mecânicas e de resistência ao calor dessas ligas.

Tabela 1 - Composição química nominal de VAT32®

| tabela 1.<br>Liga | C   | Si  | Mn  | Ni | Nb  | Al  | Ti | Cr   | Fe      |
|-------------------|-----|-----|-----|----|-----|-----|----|------|---------|
| VAT32®            | 0,3 | 0,2 | 0,3 | 32 | 3,9 | 1,8 | 2  | 15,5 | Balanço |

Fonte: Farina, Liberto e Barbosa (2013).

Uma das principais vantagens da VAT32® é sua microestrutura composta por grãos refinados, que oferecem maior tenacidade e resistência à fadiga. Avanços

recentes em técnicas de processamento térmico têm permitido a otimização de suas propriedades mecânicas, ampliando sua aplicação em condições extremas, como componentes de motores a jato e próteses médicas personalizadas (Sun *et al.*, 2018). Além disso, o material apresenta usinabilidade superior em comparação a outras ligas de titânio da mesma categoria, reduzindo custos operacionais e tempos de produção (Li *et al.*, 2020).

No campo da usinagem, a VAT32® demonstrou desempenho aprimorado em testes recentes. Estudos mostram que a combinação de ferramentas revestidas e parâmetros de corte otimizados reduz significativamente o desgaste das ferramentas, devido à sua alta resistência térmica e baixa propensão à formação de aresta postiça. Isso é particularmente relevante em operações de alta precisão, como na produção de peças aeronáuticas críticas (Li *et al.*, 2020).

De acordo com Bonhin (2016), no estudo sobre a usinabilidade da superliga à base de ferro-níquel VAT32® utilizando ferramenta cerâmica, foi possível concluir que o acabamento superficial da liga é diretamente influenciado pela combinação dos parâmetros de usinagem adotados. Apesar de proporcionar bons acabamentos superficiais, a usinagem com ferramentas cerâmicas mostrou-se complexa devido ao elevado desgaste das ferramentas. Esse desgaste implica na necessidade de utilizar uma grande quantidade de ferramentas em processos prolongados.

Bonhin, (2016) cita que as principais avarias observadas nas ferramentas foram quebras ou lascamento, problemas relacionados à alta dureza e à baixa tenacidade das ferramentas cerâmicas, além de serem intensificados pela presença de fases duras, como os carbeto, na microestrutura da liga. Quanto ao cavaco formado, verificou-se que este ocorre predominantemente por cisalhamento, indicando que o material apresenta baixa deformação plástica e elevada resistência mecânica durante a usinagem.

Bonhin (2016) destaca a importância da VAT32® no setor automotivo, onde os materiais devem suportar condições severas sem comprometer a eficiência e a confiabilidade operacional. A implementação de superligas como essa em componentes críticos não apenas melhora o desempenho dos motores, mas também

contribui para a redução de custos com manutenção e substituição de peças, tornando-se uma escolha estratégica para a indústria.

Kondo (2019) analisou o processo de torneamento da superliga VAT32® com ferramentas de corte experimentais e comerciais, contribuindo para a compreensão dos mecanismos de desgaste e eficiência das ferramentas durante o processo de usinagem.

Ribeiro (2020) avaliou a aplicação de ferramentas cerâmicas à base de óxido de alumínio no torneamento da superliga VAT32®, proporcionando uma análise detalhada sobre a aplicabilidade dessas ferramentas na usinagem de materiais de alta resistência.

Diante dessas perspectivas, a VAT32® reafirma sua posição como um material de ponta para indústrias que exigem inovação e desempenho superior. Pesquisas em andamento continuam a explorar métodos de processamento e aplicações emergentes, consolidando o papel dessa liga no futuro da engenharia avançada.

## 2.3 PROCESSO DE FURAÇÃO

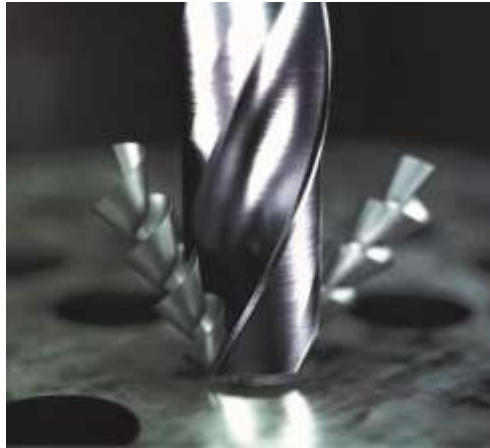
O processo de furação é uma operação fundamental na usinagem, sendo utilizada para criar furos em peças metálicas ou outros materiais. Esses furos são essenciais em muitas aplicações industriais, como na fabricação de máquinas, estruturas metálicas, entre outros. A maioria das peças industriais possui pelo menos um furo, e apenas uma pequena porcentagem desses furos é preparada durante o processo inicial de obtenção, como fundição ou forjamento (Diniz; Marcondes; Coppini, 2014).

De acordo com a AB Sandvik Coromant Academy (2024), o termo furação abrange todos os métodos de produção de furos cilíndricos em peças utilizando ferramentas de corte. Atualmente, esse processo é a operação de usinagem mais comum em indústrias como a aeroespacial e a automotiva, onde a grande maioria dos furos tem entre 10 e 20 mm de diâmetro, Figura 1.

Segundo Dino Ferraresi (2013), a furação é definida como um processo de usinagem cujo objetivo é obter furos cilíndricos em produtos, utilizando ferramentas

que, na maioria das vezes, possuem propriedades multicortantes. Para alcançar esse resultado, a ferramenta de corte ou a peça de trabalho é girada e movida ao longo de um caminho linear, coincidente ou paralelo ao eixo principal da máquina.

Figura 1 - Processo de furação



Fonte: Wolf furações, 2024

A furação é uma das técnicas de corte mais comuns, focada na produção de furos de pequeno diâmetro. Esta operação é fundamental na manufatura, já que a criação de furos desempenha um papel vital na fabricação de diversos componentes. A produtividade nesse contexto pode ser avaliada pela taxa de remoção de material em processos de usinagem. Assim, é crucial encontrar um equilíbrio que permita otimizar tanto a qualidade quanto a produtividade de forma simultânea (Gangadhar, G. *et al.* 2014).

Na indústria aeroespacial e automotiva, a furação representa aproximadamente 40% da remoção total de material. É responsável por um terço de todas as operações de usinagem em metais leves e compósitos (Sakhiya e Rola, 2014; Paktinat e Amini 2018). Zhu *et al.* (2018) mencionaram que turbinas podem conter até cem mil furos, com mais de um milhão utilizados na montagem de aeronaves comerciais. Em muitos casos, a furação inicial é essencial para operações subsequentes como alargamento e rosqueamento, facilitando a montagem entre componentes (Garg e Goyal, 2015).

O objetivo principal desse processo é criar furos cilíndricos. As brocas convencionais são ferramentas helicoidais, normalmente de duas arestas de corte, montadas em um suporte (pinça ou mandril). Durante a rotação, a broca avança

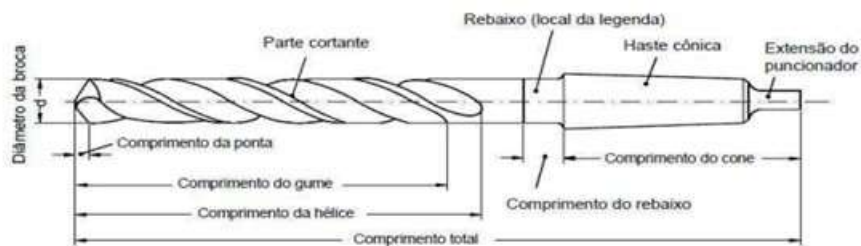
perpendicularmente à superfície do material, removendo cavacos que geralmente se formam em espiral do centro até a extremidade da aresta cortante. À medida que a broca avança, o comprimento do furo aumenta e as paredes do furo são formadas.

Na maioria dos processos de usinagem, a literatura nos apresenta a existência de uma grande influência dos parâmetros de corte sobre as variáveis de saída. Particularmente no processo de furação, além dos parâmetros de usinagem, a rigidez da máquina tem uma importância redobrada, pois as solicitações devido ao comprimento em balanço da ferramenta, bem como às condições críticas de usinagem, são fatores de perturbação do processo.

### 2.3.1 Brocas Helicoidais

Segundo Diniz; Marcondes; Coppini (2014) as várias partes da broca helicoidal são mostradas na Figura 2.

Figura 2 - Partes de uma broca helicoidal



Fonte: Castilho (2005)

a) Haste: Utilizada para fixar a broca no porta-ferramentas. Brocas com diâmetro de até 15 mm devem ser utilizadas com haste cilíndrica, conectada à máquina por meio de um mandril. Para diâmetros maiores, recomenda-se o uso de cone Morse para fixação.

b) Diâmetro da broca (d): é a medida entre as duas guias da broca.

c) Núcleo: é a parte interna da broca, com diâmetro igual a 0,16 vezes o diâmetro total (D). Sua função é proporcionar rigidez à broca.

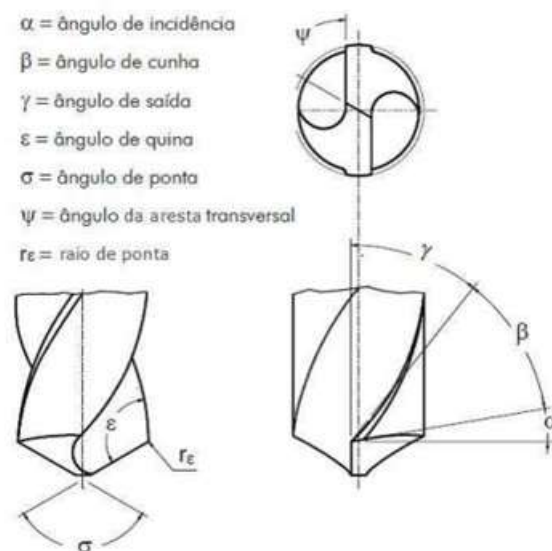
d) Guias: a superfície externa da broca helicoidal possui duas regiões, uma em cada aresta de corte, com diâmetro maior que o da parede do furo. Essas guias têm

a função de conduzir a broca no furo, evitando atrito entre toda a superfície externa da broca e a parede do furo, reduzindo assim a força necessária para a furação.

e) Ranhura espiral: é a superfície por onde os cavacos são expelidos. O ângulo da hélice em uma broca padrão pode variar:  $28^\circ$  para brocas de uso geral,  $15^\circ$  para brocas destinadas a materiais de cavacos curtos e  $40^\circ$  para brocas para materiais de cavacos longos. O comprimento do canal helicoidal também pode variar de acordo com o diâmetro da broca e o comprimento do furo.

f) Aresta de corte: as duas arestas de corte da broca helicoidal não se encontram em um ponto, mas são conectadas por uma terceira aresta chamada aresta de corte transversal. O ângulo formado pelas duas arestas de corte principais é chamado de ângulo de ponta, geralmente igual a  $118^\circ$ . De acordo com Diniz; Marcondes; Coppini (2014) as várias partes de uma broca helicoidal com haste cônica estão representadas na figura 3.

Figura 3 - Ponta da broca helicoidal, ângulos da aresta de corte



Fonte: Castilho, (2005)

Embora o processo de furação seja importante, melhorias significativas foram feitas nos últimos anos em relação ao torneamento e fresamento. Essas melhorias foram impulsionadas pela introdução de novos materiais na furação, como metal duro, materiais cerâmicos, nitreto cúbico de boro e revestimentos diamantados. No entanto,



brocas helicoidais comuns de aço rápido (HSS) são amplamente utilizadas (Diniz; Marcondes; Coppini, (2014).

A maioria dos furos é feita com brocas de metal duro sólido, pastilhas intercambiáveis, como mostrado na Figura 4, ou brocas de metal duro soldadas. Com o desenvolvimento desses processos de fabricação de ferramentas, a própria furação pode ser realizada em uma única operação, sem a necessidade de pré-furo ou furos piloto, com o auxílio de equipamentos de medição precisos (Sandvik Coromant Academy, 2024).

Figura 4 - Exemplo de Furação Helicoidal com Pastilhas Intercambiáveis



Fonte: Sandvik Coromant (2024)

### 2.3.2 Tipos de Furação

Nos últimos anos, o uso de centros de usinagem para furação aumentou, levando a vários desenvolvimentos, tais como:

Brocas HSS com revestimento de nitreto de titânio: Desde que a máquina possua capacidade adequada de rotação, rigidez e potência, a velocidade de corte pode ser aumentada. Além do carbono, essas brocas contêm vários elementos de liga, como tungstênio (W), cobalto (Co), cromo (Cr), vanádio (V), molibdênio (Mo) e boro (B), que determinam seu desempenho em termos de resistência ao cisalhamento e aquecimento até 550°C.

Brocas de metal duro: Com diâmetro de furação de até 20 mm, são fabricadas por metalurgia do pó e sinterizadas com partículas duras de metal duro refratário e um ou mais elementos de ferro (ferro, níquel ou cobalto), formando um corpo principal de alta dureza, compressão e resistência ao desgaste.

Furação com pastilhas intercambiáveis de metal duro: Como mostrado na Figura 5, esse método é ideal para brocas de diâmetro médio, grandes o suficiente para acomodar as pastilhas e a máquina que permite seu uso. O corpo da broca é feito de um material, enquanto a ponta é feita de outro material mais resistente ao desgaste. Esse conjunto oferece um ótimo custo-benefício, pois permite substituir apenas a pastilha quando a ferramenta chega ao fim de seu desempenho.

O metal duro é o material de ferramenta mais importante na indústria devido à sua combinação de dureza à temperatura ambiente, dureza a quente, resistência ao desgaste e boa tenacidade (Ferraresi, 1977). Há uma grande variedade de carbeto usados na indústria, cada um com propriedades específicas e elementos de liga que estão diretamente relacionados com a resistência à tração e as propriedades de dureza do material (Hyperion, 2024).

Conforme Diniz; Marcondes; Coppini (2014), as brocas com pastilhas intercambiáveis representam um dos avanços mais significativos na tecnologia de perfuração. A Figura 5 apresenta uma broca com pastilhas intercambiáveis. Essas brocas são excelentes substitutos para ferramentas tradicionais, pois aumentam a produtividade, reduzem custos e oferecem maior flexibilidade no manuseio.

Figura 5 - Broca Com Inserto Intercambiável



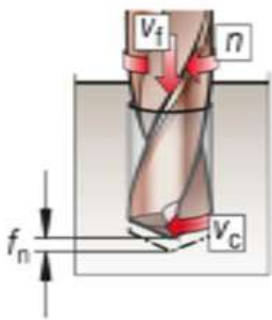
Fonte: Autoria própria

2.3.3 Fatores de Corte na furação

Conforme ilustrado na Figura 6, os fatores de corte relacionados ao processo de furação têm um impacto direto na qualidade, no desgaste da ferramenta, na potência requerida e na produtividade do processo de usinagem (Sandvik Coromant Academy, 2024).

Figura 6 - Parâmetros de Corte

| SIMBOLO | DESCRIÇÃO           | UNIDADE |
|---------|---------------------|---------|
| $N$     | Velocidade do fuso  | RPM     |
| $V_c$   | Velocidade de corte | m/min   |
| $F_n$   | Avanço por rotação  | Mm/rot  |
| $V_f$   | Avanço por minuto   | Mm/min  |
| $DC$    | Diâmetro da broca   | mm      |



Fonte: Sandvik Coromant (2024)

O movimento de corte ( $V_c$ ) refere-se ao movimento entre a peça e a ferramenta, excluindo o movimento de avanço. Ele representa a remoção única de cavacos e é calculado pela Equação 1 (Ferraresi, 2013).

$$V_c = \frac{\pi * \phi (DC) * n}{1000} \quad (1)$$

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

$DC$  = diâmetro da broca (mm)

$n$  = rotação da broca (RPM)

O movimento de avanço ( $V_f$ ) é o movimento combinado entre a peça e a ferramenta, que ocorre simultaneamente ao movimento de corte, removendo cavacos de forma contínua ao longo de várias revoluções. Ele é calculado pela Equação 2 (Ferraresi, 2013).

$$V_f = F_n * n \quad (2)$$

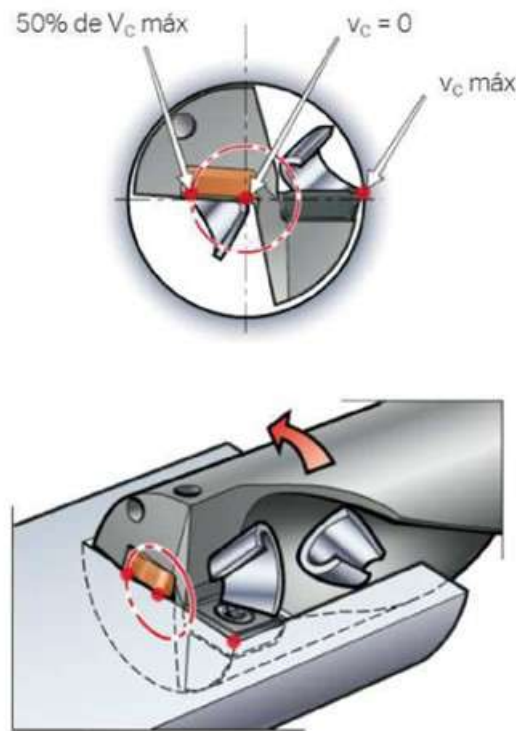
$V_f$  = velocidade de avanço (mm/min)

$F_n$  = avanço (mm/rot)

$n$  = rotação do fuso (RPM)

Também é importante notar que a velocidade de corte ( $V_c$ ) não é uniforme no processo de furação, como demonstrado na Figura 7 (Stemmer, 1992). Existe uma variação na velocidade máxima de corte, que é nula no centro do furo e aumenta em direção à periferia (Stemmer, 1992).

Figura 7 - Variação da Velocidade de Corte



Fonte: Stemmer (1992)

A velocidade de corte no centro da ferramenta é zero, indicando ausência de corte nesse ponto específico. Esse fenômeno resulta em atrito significativo e aumento de temperatura nesta área (AB Sandvik Coromant Academy, 2024).

A velocidade de corte ( $V_c$ ), de acordo com a AB Sandvik Coromant Academy (2024), influencia diretamente a potência e o torque necessários nas operações de furação, sendo um fator determinante para a durabilidade da ferramenta. Velocidades de corte elevadas resultam em desgaste rápido da ferramenta, deformação plástica e baixa qualidade do furo. Por outro lado, velocidades de corte baixas podem causar formação de aresta postiça (acúmulo de material na aresta de corte), escoamento ineficiente dos cavacos e aumento nos tempos de usinagem.

O avanço influencia diretamente a força de avanço, a potência e o torque durante as operações de furação, o que tem um impacto significativo no controle da formação de cavacos e no acabamento superficial das peças usinadas. Taxas altas de avanço tendem a aumentar a quebra de cavacos e reduzem o tempo de usinagem. Por outro lado, um avanço baixo produz cavacos mais longos e finos, melhorando a

qualidade do furo, mas aumentando o tempo de usinagem e o desgaste prematuro da ferramenta (AB Sandvik Coromant Academy, 2024).

#### 2.3.4 Desgastes e Avarias em Brocas

**Desgaste por abrasão:** Esse desgaste ocorre devido à interação entre as partículas do material usinado e a superfície da ferramenta. Esse tipo de desgaste é mais comum em materiais duros e pode ser agravado por altas velocidades de corte e temperaturas elevadas (Machado *et al.*, 2009).

**Desgaste por aderência:** O desgaste por aderência ocorre quando o material da peça usinada se adere à superfície de corte da broca, provocando o desgaste da ferramenta. Esse efeito é geralmente observado em materiais metálicos com alta resistência ao desgaste, especialmente em condições de corte de alta temperatura (Jain & Agarwal, 2008).

**Desgaste por fusão:** Este tipo de desgaste ocorre quando a temperatura de operação da ferramenta se eleva tanto que o material da broca começa a fundir. A falta de refrigeração adequada e a elevada taxa de corte podem contribuir para esse tipo de desgaste, resultando em uma perda de material da ferramenta (Machado *et al.*, 2009).

**Desgaste por impacto:** Durante a furação de materiais mais duros, a broca pode sofrer desgaste por impacto, onde a ferramenta é sujeita a choques mecânicos intensos, levando a fraturas ou microfissuras nas arestas de corte (Silva & Martins, 2014).

**Quebra da broca:** A quebra pode ocorrer devido a forças excessivas durante a operação de furação ou ao uso de uma broca inadequada para o material sendo usinado. Essa avaria é muitas vezes acompanhada por uma falha no material da broca, como microfissuras que se expandem com o tempo (Machado *et al.*, 2009).

### 2.3.5 Desgaste de Flanco

Segundo Diniz; Marcondes; Coppini (2014), o desgaste é um fenômeno inevitável no qual o material da ferramenta é gradualmente perdido devido à ação de corte. Esse processo pode ser controlado, mas não completamente evitado. Os diferentes tipos de desgaste incluem:

Desgaste de flanco: Causado pelo contato e fricção entre a ferramenta e a peça de trabalho, ocorrendo na superfície de folga (figura 8). Este é o tipo mais comum de desgaste e pode alterar completamente a forma da aresta de corte original, comprometendo o acabamento superficial da peça e afetando sua precisão dimensional.

Figura 8 - Desgaste de flanco



fonte: Sandvik Coromant (2024)

Desgaste de cratera: Surge na face de saída da ferramenta de corte devido principalmente à difusão e ao atrito com o cavaco, (figura 9). Se não controlado, pode levar ao crescimento do desgaste de flanco, danificando a ferramenta. Especialmente problemático ao usinar materiais duros, como aqueles em que a ferramenta é de metal duro ou revestida com cerâmica, ou quando a peça a ser usinada é frágil (Diniz; Marcondes; Coppini, 2014).

Figura 9 - Desgaste de Cratera



fonte: Sandvik Coromant (2024)

Desgaste tipo entalhe: Ocorre na superfície de saída ou lateral da ferramenta, muitas vezes devido à formação de óxidos nessas áreas expostas ao ar, (figura 10). Esses óxidos podem aderir à ferramenta, causando travamento das juntas devido ao desgaste (abrasão envolvendo adesão e arrasto do material). A deformação plástica também pode ocorrer na aresta de corte, causada pelo deslocamento do material sob altas tensões superficiais, sem necessariamente remoção de material (Machado *et al.*, 2009), (Diniz; Marcondes; Coppini, 2014).

Figura 10 - Desgaste tipo entalhe



fonte: Sandvik Coromant (2024)

No processo de usinagem, além de desgastes, podem ocorrer avarias nas ferramentas de corte, resultando em falhas repentinas como trincas (térmicas ou mecânicas), deformações plásticas, lançamentos, aresta postiça de corte (APC), fraturas e quebras. As trincas a quente (Figura 11) são causadas pelas variações de temperatura durante o corte, onde a alta temperatura na zona de contato com o cavaco gera expansão e deformação da ferramenta. Já as trincas mecânicas ocorrem devido a tensões mecânicas, paralelas à aresta de corte. Esses tipos de trincas são influenciados por fatores como irregularidades na entrada de fluido de corte, cortes intermitentes e variações na espessura do corte (Diniz; Marcondes; Coppini, 2014).

Figura 11 - Trinca a quente



fonte: Sandvik Coromant (2024)



Os lascamentos da ferramenta podem ocorrer devido a altas tensões térmicas ou mecânicas nas bordas de corte (figura 12), especialmente em situações de carga elevada da ferramenta, materiais extremamente duros ou cortes intermitentes (Diniz; Marcondes; Coppini, 2014). Stemmer (1993) sugere que a fragmentação pode ser mitigada através do uso de ângulos de saída negativos em pastilhas de cerâmica ou metal duro, especialmente em operações de usinagem desafiadoras.

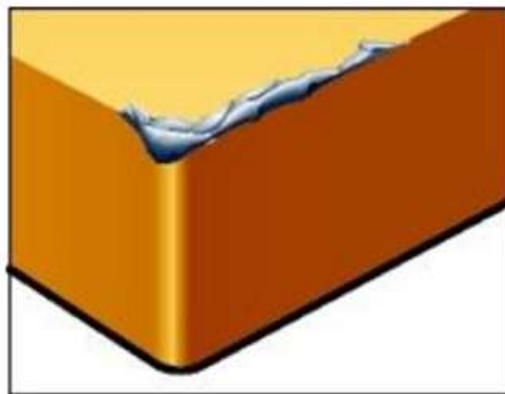
Figura 12 - Exemplo de lascamento.



Fonte: Sandvik Coromant (2024)

Outro problema crítico é a formação de aresta postiça (APC) na ferramenta (Figura 13). A APC consiste em uma camada de cavacos aderidos à aresta de corte, alterando o comportamento da ferramenta em relação ao acabamento da peça, desgaste da ferramenta e forças de corte (Diniz; Marcondes; Coppini, 2014). Este fenômeno pode prejudicar significativamente a qualidade da usinagem e deve ser controlado para garantir a eficiência e a precisão do processo.

Figura 13 - Exemplo de Aresta Postiça.



Fonte: Sandvik Coromant (2024)

## 2.4 METAL DURO

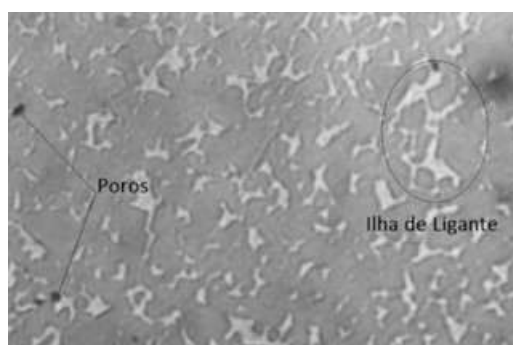
O metal duro, também conhecido como carbetto sinterizado, é um material compósito produzido a partir da combinação de partículas duras de carbetto de metais refratários, como o carbetto de tungstênio (WC), com uma matriz metálica de ligação, geralmente cobalto. Esse material é amplamente utilizado na fabricação de ferramentas de corte devido à sua elevada dureza, resistência ao desgaste e capacidade de suportar altas temperaturas (Kumar *et al.*, 2020; Upadhyaya, 2021).

O metal duro é um dos materiais de ferramenta mais essenciais na indústria moderna devido à sua combinação única de propriedades. Este material combina dureza à temperatura ambiente, resistência ao desgaste, dureza a quente e tenacidade, atributos que são alcançados através da variação de sua composição (Ferraresi, 2013). É produzido pela metalurgia do pó, sintetizando um ou mais metais do grupo do ferro (como ferro, níquel ou cobalto), resultando em alta dureza e resistência à compressão (Diniz; Marcondes; Coppini, 2014).

As partículas que constituem o metal duro geralmente variam de 1 a 10  $\mu\text{m}$  e podem representar de 60 a 95% do volume total do material. Partículas menores, encontradas até 0,1  $\mu\text{m}$ , têm sido identificadas por melhorar certas propriedades, graças ao seu maior coeficiente de empacotamento, que proporciona aumento na resistência ao desgaste, dureza e tenacidade do material (Diniz; Marcondes; Coppini, 2014).

Na Figura 14 apresenta uma micrografia representando a estrutura de um metal duro, destacando os precipitados de carbetto e os grãos finos em sua matriz metálica.

Figura 14 - Micrografia do Metal duro



Fonte: Freitas, J. S. (2023)

Para otimizar o desempenho na usinagem de materiais ferrosos, amplamente utilizados na indústria mecânica, as ferramentas de metal duro são frequentemente revestidas. Estes revestimentos podem ser compostos por uma única camada ou múltiplas camadas, sendo o revestimento de três camadas o mais comum (Machado *et al.*, 2011).

Os metais duros revestidos possuem um substrato resistente, sobre o qual são aplicadas camadas superficiais duras, abrasivas e de granulação fina. Isso resulta em uma significativa extensão do desempenho da ferramenta, pois a camada superficial, em contato com a peça de trabalho e os cavacos, apresenta alta resistência ao desgaste. Como resultado, as ferramentas são simultaneamente tenazes, resistentes ao desgaste e capazes de suportar altas temperaturas (Stemmer, 1993; Diniz; Marcondes; Coppini, 2014).

Como característica do metal duro destaca-se: a) Alta dureza e resistência ao desgaste; b) Boa tenacidade, permitindo operações em condições severas; c) Disponíveis em várias classes e revestimentos para otimizar a performance em diferentes materiais e condições de corte.

Entre as principais aplicações de metal duro tem-se: a) Usinagem geral de aços (aço carbono, aços ligados, aços inox e aços endurecidos), ferros fundidos, materiais não ferrosos, superligas. São adequados para operações de torneamento, fresamento, furação e rosqueamento, Quadro 1 representa suas classes.

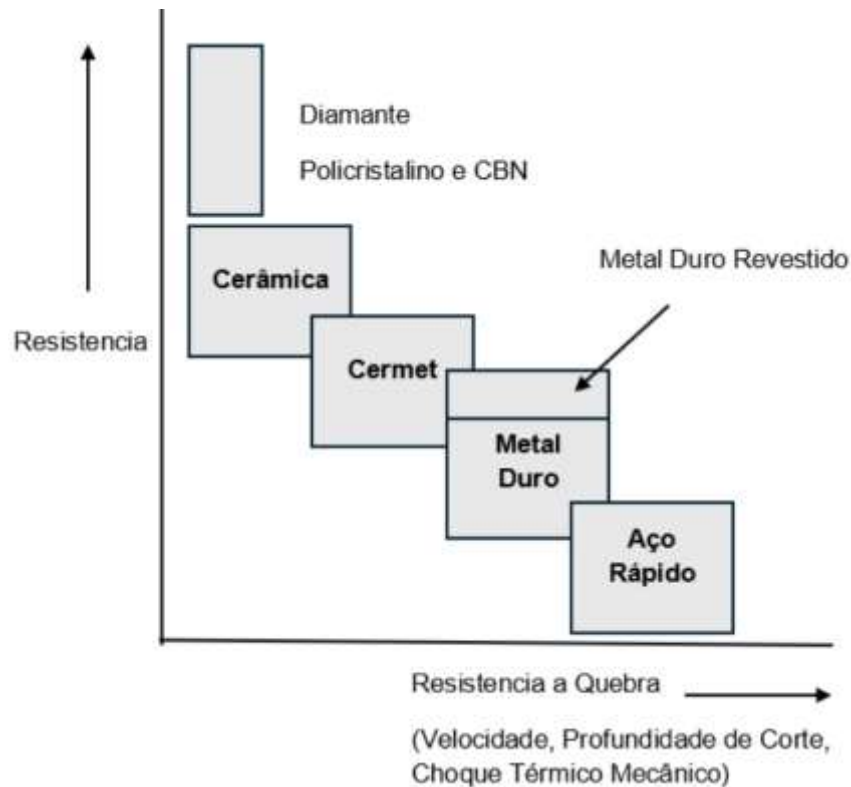
Quadro 1 - Classes de ferramentas de Metal Duro (ISO)

| Classes do Metal Duro para Usinagem (ISO) |                                                             |                                              |                                                        |
|-------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| Classe (ISO)                              | Composição                                                  | Aplicações típicas                           | Propriedades principais                                |
| P (Azul)                                  | WC + Co + TiC                                               | Aço, aço carbono e aços-liga.                | Alta resistência ao calor e deformação.                |
| M (Amarelo)                               | WC + Co + TiC + TaC                                         | Aços inoxidáveis e materiais intermediários. | Combinação de resistência ao calor e desgaste.         |
| K (Vermelho)                              | WC + Co                                                     | Ferro fundido e materiais abrasivos.         | Elevada dureza e resistência ao desgaste abrasivo.     |
| N (Verde)                                 | WC + Co + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (revestido ou não) | Ligas leves e metais não ferrosos.           | Alta dureza e resistência à adesão.                    |
| S (Roxo)                                  | WC + Co + reforços para altas temperaturas                  | Superligas, titânio e aços endurecidos.      | Estabilidade térmica elevada e resistência à oxidação. |
| H (Preto)                                 | WC + Co com menor teor de ligante                           | Materiais endurecidos (>45 HRC).             | Dureza máxima e resistência ao desgaste.               |

Fonte: Adaptado de SANDVIK COROMANT. Metal Cutting Technology – Technical Guide (2024).

No Figura 15 é possível comparar ferramentas de metal duro (com e sem revestimento) com outros materiais para ferramentas de corte como aço rápido, cermet, cerâmica, CBN e diamante em termos de velocidades de corte e resistência mecânica da peça.

Figura 15 - Esquema das Propriedades do Material ferramenta de corte



Fonte: Adaptado MEHROTRA (1998).

Em operações de usinagem de metais com baixa condutividade térmica, como superligas, o uso de fluido de corte pode ser essencial para reduzir a temperatura na região de corte. Nesses casos, é crucial garantir um fluxo contínuo de fluido para evitar choque térmico, desgaste térmico e falha prematura das ferramentas (Arora e Parbhakar, 2003).

Conforme descrito por Suski e Baher (2020), os insertos, ilustrados na Figura 16, são componentes de diversos formatos fabricados com diferentes materiais. Esses insertos são montados em suportes de aço de baixa liga usando grampos ou parafusos. Um fator crucial que afeta a produtividade na usinagem é o estado das ferramentas utilizadas, pois o desgaste delas pode comprometer a qualidade das peças, impactando negativamente a indústria. Durante o processo de usinagem, as ferramentas são expostas a forças mecânicas e térmicas, além do atrito com cavacos e superfícies da peça, o que contribui para o desgaste progressivo das ferramentas, eventualmente levando à sua inutilização.

Figura 16 - Insertos de metal duro com diferentes recobrimentos



Fonte: Autoria Própria

#### 2.4.1 Processos de recobrimento de ferramentas CVD e PVD

Várias técnicas são usadas para realizar a deposição de diferentes recobrimentos em ferramentas de corte. Estes recobrimentos são essenciais para melhorar a resistência ao desgaste, aumentar a vida da ferramenta e otimizar o desempenho durante o processo de usinagem.

Nesta pesquisa são usadas ferramentas revestidas por Deposição Física de Vapor (PVD - Physical Vapor Deposition) e por Deposição Química de Vapor (CVD - Chemical Vapor Deposition). No entanto, outras técnicas são possíveis como Método Híbrido (PACVD - Plasma-Assisted Chemical Vapor Deposition), Plasma, Sputtering, Eletrodeposição e Spray Térmico.

Enquanto o PVD utiliza baixas temperaturas de deposição (300–500 °C), resultando em recobrimentos com boa adesão, alta dureza e baixa espessura, o CVD utiliza altas temperaturas (700–1100 °C), criando recobrimentos mais espessos do que o PVD.

As superligas, especialmente aquelas baseadas em níquel, desempenham um papel crucial em setores industriais que demandam materiais com elevada resistência ao calor e à corrosão, como a indústria aeroespacial e automotiva. Entretanto, a usinagem dessas superligas apresenta desafios substanciais, principalmente devido à sua elevada dureza e resistência ao desgaste.

Nesse cenário, o uso de revestimentos CVD em ferramentas de corte tem se mostrado uma solução eficaz para aumentar a durabilidade das ferramentas e melhorar a eficiência dos processos de usinagem (LI *et al.*, 2020). Essa técnica continua a ser aprimorada para atender melhor às exigências específicas da usinagem de ligas complexas.

Superligas à base de níquel, como o Inconel 718, são amplamente aplicadas em componentes de motores a jato e turbinas, por sua capacidade de resistir a altas temperaturas e ambientes agressivos. Contudo, usar esses materiais requer ferramentas com propriedades excepcionais de resistência ao desgaste, oxidação e corrosão. Revestimentos CVD, como TiN, TiC e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , têm sido eficazmente utilizados para melhorar as características das ferramentas de corte utilizadas nessas operações (Faria, 2007).

De acordo com os estudos de Hassan *et al.* (2019), o revestimento CVD de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  aplicado a ferramentas de metal duro apresenta uma resistência superior ao desgaste, permitindo a utilização de maiores velocidades de corte sem comprometer a integridade das ferramentas. A análise de desgaste demonstrou que essas ferramentas revestidas podem ter um ganho de rendimento até 30% maior em comparação com aquelas não revestidas.

O Quadro 2 apresenta uma comparação entre ferramentas submetidas aos processos de revestimento CVD e PVD.

Quadro 2: Comparativo de ferramentas 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 reduzido até 12 um                                                                     | pode ser quina viva                                                                                                                                              |
| Espessura do Revestimento   | até 12 µm                                                                                             | Até 4 µm                                                                                                                                                         |
| Camadas                     | Multicamadas TiC - TiN, TiN - TiCN - TiN, TiC - Al <sub>2</sub> C <sub>3</sub>                        | TiN, TiCN, TiAl                                                                                                                                                  |
| Principais aplicações       | Torneamento e mandrilhamento                                                                          | Fresamento, rosqueamento e furação                                                                                                                               |
| Vantagens                   | Maior resistência ao desgaste<br>Maior resistência a craterização<br>Melhor performance da ferramenta | Substitui ferramentas sem revestimento: com a mesma tenacidade, mesma configuração de aresta e mesma precisão.<br>Reduz APC.<br>Melhor performance da ferramenta |
|                             | Maior resistência a craterização                                                                      |                                                                                                                                                                  |
|                             | Melhor performance da ferramenta                                                                      |                                                                                                                                                                  |

Fonte: Machado *et al.* (2011)

Uma das principais vantagens de utilizar revestimentos CVD em ferramentas de usinagem de superligas é sua elevada resistência ao desgaste, característica essencial ao se trabalhar com materiais extremamente duros. Conforme destacado por Russell *et al.* (2021), os revestimentos de TiN e TiC aplicados por CVD aumentam consideravelmente a resistência ao desgaste abrasivo, resultando em um rendimento das ferramentas maior. A camada de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, por sua vez, também age como uma barreira térmica eficiente, permitindo que as ferramentas resistam a temperaturas mais altas, como é frequentemente necessário na usinagem de superligas.

Outro benefício importante dos revestimentos CVD é o aumento da resistência à corrosão, um fator essencial para a usinagem de superligas de níquel, materiais



altamente reativos (Li *et al.*, 2020). O uso de CVD não só estende o tempo de utilização das ferramentas, mas também melhora a eficiência do processo de usinagem, o que é crucial em ambientes de produção de alta demanda.

Embora os revestimentos CVD ofereçam inúmeras vantagens, o processo de deposição apresenta desafios técnicos. O controle rigoroso das condições de deposição, como temperatura, pressão e composição dos gases, é fundamental para garantir que o revestimento tenha a aderência e uniformidade adequadas (Hassan *et al.*, 2019). Além disso, a escolha do revestimento deve ser feita com base nas condições específicas de usinagem e nas propriedades do material a ser usinado. A usinagem de superligas de níquel, por exemplo, exige revestimentos que não apenas resistem ao desgaste, mas também minimizem a formação de aresta postiça de corte, que podem prejudicar a qualidade da peça e reduzir a o tempo de uso da ferramenta (Li *et al.*, 2020).

O processo de PVD consiste na deposição de filmes finos utilizando vapor de materiais de revestimento, a altas temperaturas e em ambiente de vácuo. Os revestimentos mais comuns, como TiN, TiAlN e  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , têm se mostrado eficazes em melhorar a resistência ao desgaste, à oxidação e ao calor das ferramentas de corte. Pesquisas recentes apontam que ferramentas revestidas com TiAlN podem ter seu tempo de utilização aumentado em até 40%, quando comparadas às não revestidas, especialmente em processos de usinagem de superligas (Li *et al.*, 2021). Esses revestimentos são essenciais para preservar a integridade das ferramentas e garantir maior eficiência no processo de usinagem.

A tecnologia PVD oferece uma camada protetora eficiente contra o desgaste, aumentando a performance das ferramentas, especialmente na usinagem de superligas (Schmitt *et al.*, 2022).

Conforme a pesquisa de Xu *et al.* (2020), a camada de TiAlN, aplicada por PVD, proporciona alta resistência ao desgaste abrasivo e à oxidação, permitindo que as ferramentas operem em temperaturas mais elevadas, uma característica essencial na usinagem de superligas de níquel. Além disso, o TiN reduz o atrito entre a ferramenta e a peça, o que melhora o desempenho nas operações de corte e eleva a qualidade superficial das peças usinadas.

Os revestimentos PVD são amplamente reconhecidos por sua notável resistência ao desgaste, fator crucial na usinagem de superligas. A aplicação destes revestimentos em ferramentas de corte permite que operem a velocidades mais altas e com maiores avanços sem comprometer a qualidade do processo. Segundo Fernandes *et al.* (2023), ferramentas revestidas com TiAlN mostraram resistência ao desgaste até três vezes maior em comparação com ferramentas não revestidas, resultando em um aumento considerável na sua performance.

Além disso, a camada de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , quando aplicada via PVD, proporciona uma excelente resistência térmica, o que é uma grande vantagem em processos de usinagem a altas temperaturas, típicos na usinagem de superligas. A resistência ao calor das ferramentas revestidas com  $\text{Al}_2\text{O}_3$  melhora a estabilidade térmica e diminui a possibilidade de falhas prematuras devido ao aquecimento excessivo (LI *et al.*, 2020). A resistência à corrosão também é uma vantagem importante, pois as superligas de níquel são altamente sensíveis a reações químicas em condições severas de corte (Schmitt *et al.*, 2022).

Apesar dos benefícios, o processo de PVD apresenta desafios técnicos. O controle preciso das condições de deposição, como temperatura, pressão e composição dos gases, é fundamental para garantir a aderência adequada do revestimento e a uniformidade da camada. Além disso, a escolha do tipo de revestimento deve ser feita com base nas condições específicas de usinagem, considerando a composição da superliga e os parâmetros de corte utilizados (Hassan *et al.*, 2021).

#### **2.4.2 Revestimento de Nitreto de Titânio-Alumínio (TiAlN)**

Os revestimentos de TiAlN, compostos de titânio e alumínio, são amplamente utilizados no fresamento e torneamento de peças endurecidas, especialmente em processos a seco onde apenas retificação ou métodos não convencionais são viáveis.

Este revestimento oferece diversas vantagens, como baixa condutividade térmica, alta estabilidade química, alta dureza tanto a quente quanto a frio, e excelente resistência à oxidação (Diniz; Marcondes; Coppini, 2014). Essas propriedades permitem operações de corte em altas velocidades, contribuindo para uma

durabilidade estendida da ferramenta ao reduzir o aquecimento excessivo durante o processo (Davim, 2012).

A composição do TiAlN pode ser ajustada para diversas aplicações, como usinagem de superligas de níquel e ferro fundido, proporcionando flexibilidade no uso industrial (Machado *et al.*, 2011).

O revestimento TiAlN (nitrato de titânio e alumínio) é amplamente empregado na usinagem de superligas devido às suas características excepcionais, como elevada dureza (podendo alcançar até 3.300 HV), resistência ao desgaste e à oxidação em altas temperaturas. O TiAlN é resistente à oxidação até 925°C, o que favorece a formação de um filme protetor de  $Al_2O_3$  na superfície, altamente denso e aderente. Esse filme atua como uma barreira que impede a difusão do oxigênio nas camadas internas do revestimento (Wang *et al.*, 2015).

Pesquisas mostram que ferramentas de corte revestidas com TiAlN têm um tempo de operação consideravelmente maior em comparação com ferramentas sem revestimento. Em usinagem de superligas, por exemplo, o uso de TiAlN pode prolongar o período de uso das ferramentas em até 40% (Usinagem Pro, 2024).

A camada de óxido de alumínio formada pelo TiAlN também contribui para aumentar a durabilidade das ferramentas durante operações de usinagem em altas temperaturas. Essa camada ajuda a reduzir o desgaste térmico e a melhorar a estabilidade térmica das ferramentas, permitindo que as operações de corte sejam mais eficientes e duradouras (iks vacuum, 2024).

Outra vantagem importante do TiAlN é sua baixa condutividade térmica, o que permite a dissipação eficiente do calor para o cavaco, possibilitando a utilização de maiores velocidades de corte sem sobrecarregar o substrato com calor excessivo (Smith *et al.*, 2012).

#### **2.4.3 Revestimento de Nitreto de titânio (TiN)**

O TiN (nitrato de titânio) é um revestimento cerâmico amplamente utilizado na usinagem devido às suas características excepcionais, como alta dureza e resistência ao desgaste e à oxidação, principalmente em ambientes de alta temperatura. Quando

depositado por meio de Deposição Física de Vapor (PVD), o TiN forma uma camada protetora que contribui para a maior durabilidade das ferramentas de corte, resultando em processos de usinagem mais eficientes e com maior duração (Shimatools Ferramentas, 2024).

Este material apresenta uma dureza considerável, chegando a 2.400 HV (dureza Vickers), o que o torna ideal para o corte de materiais de difícil usinagem, como aços endurecidos e superligas, além de outros materiais com elevada resistência ao desgaste. O TiN também é notável por sua resistência à oxidação, o que permite que as ferramentas operem a temperaturas de até 600°C sem perda de suas propriedades, sendo essa resistência térmica vital para operações que geram altas temperaturas (Ceratizit, 2024).

Ferramentas de corte revestidas com TiN têm uma aplicação ampla em diversos setores, como a indústria automotiva, aeroespacial e metalúrgica, sendo altamente eficazes na usinagem de materiais como aços, ligas de alumínio e outros metais não ferrosos. Esse revestimento permite que as ferramentas realizem operações em altas velocidades sem prejudicar sua integridade (Ludufix, 2024).

Estudos indicam que ferramentas com revestimento TiN podem ter seu tempo de uso aumentado entre 30% e 50%, se comparadas com ferramentas sem revestimento, devido à sua alta resistência ao desgaste e à oxidação (Ceratizit, 2024).

A baixa aderência de materiais à superfície do TiN também contribui para a redução da formação de aresta postiça de corte (APC), melhorando a qualidade das peças usinadas (Shimatools Ferramentas, 2024).

O TiN continua sendo um revestimento essencial na indústria de usinagem, oferecendo notáveis propriedades de dureza, resistência ao desgaste, oxidação e corrosão. Ele contribui significativamente para a maior durabilidade das ferramentas e eficiência nos processos de usinagem, especialmente em condições severas. Seu uso permanece crucial em diversas indústrias, promovendo inovações e melhorias nos processos de fabricação (Ludufix, 2024; Ceratizit, 2024).

#### 2.4.4 Revestimento de Nitreto de Níóbio (NbN)

O nitreto de níóbio (NbN) é um material cerâmico valorizado devido às suas notáveis propriedades, como dureza elevada, resistência ao desgaste e à oxidação, além de uma excelente estabilidade térmica e ponto de fusão alto. Essas qualidades tornam o NbN uma opção ideal para aplicações em ambientes com altas temperaturas e condições extremas. Essas características o tornam perfeito para uso em condições adversas, enquanto a sua resistência à corrosão aumenta seu potencial de aplicação em diversas indústrias (Silva *et al.*, 2022).

Pesquisas mostram que o NbN possui uma dureza considerável e um módulo de elasticidade significativo, o que, aliado à sua resistência ao desgaste, o torna adequado para processos industriais que exigem desempenho superior em condições severas (Silva *et al.*, 2022). O nitreto de níóbio possui considerável visibilidade na área de revestimentos para aplicações industriais, devido à sua alta temperatura de fusão e excelentes propriedades físico-mecânicas e supercondutoras. Para melhorar as propriedades desses revestimentos, que apresentam baixa estabilidade térmica e resistência à oxidação, é possível adicionar impurezas à rede cristalina dos nitretos de metais de transição, formando nanoestruturas de NbN com propriedades mais vantajosas (Silva *et al.*, 2022).

#### 2.4.5 Revestimento de Carboneto de Titânio (Ti(C,N))

De acordo com CIMM, (2024) o carboneto de titânio (Ti(C,N)) é um revestimento cerâmico amplamente utilizado na indústria para melhorar as propriedades de ferramentas de corte e componentes mecânicos. Aplicado por técnicas como deposição física de vapor (PVD), o Ti(C,N) oferece vantagens significativas em relação a outros revestimentos, como o nitreto de titânio (TiN).

O Ti(C,N) apresenta uma dureza superior ao TiN, o que resulta em maior resistência ao desgaste e à abrasão. Além disso, possui um coeficiente de atrito reduzido, contribuindo para uma operação mais eficiente e prolongando a vida útil das ferramentas revestidas (CIMM, 2024).

Na indústria, ferramentas de corte revestidas com Ti(C,N) são amplamente utilizadas em processos de usinagem de metais, especialmente em operações que exigem alta resistência ao desgaste e à abrasão. Sua aplicação é comum em indústrias como a automotiva, aeroespacial e de moldes e matrizes, onde a durabilidade e o desempenho das ferramentas são cruciais (Sandvik Coromant, 2024).

#### **2.4.6 Revestimento de óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )**

O óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), também conhecido como alumina, é um material cerâmico amplamente utilizado no revestimento de superfícies devido às suas notáveis propriedades, incluindo alta dureza, resistência ao desgaste, resistência à corrosão e estabilidade térmica. Este material é aplicável em uma variedade de indústrias, desde a fabricação de componentes eletrônicos até a produção de ferramentas de corte, devido às suas propriedades excepcionais (Liu et al., 2014).

O óxido de alumínio é conhecido por sua extrema dureza e resistência ao desgaste, características que o tornam ideal para revestir superfícies expostas a condições abrasivas. A dureza do  $\text{Al}_2\text{O}_3$  proporciona uma excelente resistência ao desgaste, o que aumenta a vida de componentes industriais (Liu et al., 2014).

Além disso, o  $\text{Al}_2\text{O}_3$  é altamente estável a temperaturas elevadas, mantendo sua integridade estrutural mesmo em ambientes de alta temperatura, outra propriedade importante do  $\text{Al}_2\text{O}_3$  é sua resistência à corrosão, o que o torna adequado para ambientes químicos agressivos, como os encontrados na indústria de petróleo e gás. A camada de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  forma uma barreira protetora que impede a degradação dos materiais subjacentes (Liu et al., 2014).

O  $\text{Al}_2\text{O}_3$  é amplamente utilizado em várias indústrias devido às suas propriedades únicas. Na indústria de ferramentas de corte, o revestimento de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  é empregado para melhorar a resistência ao desgaste e à oxidação de ferramentas utilizadas em processos de usinagem de materiais duros (Liu et al., 2014). Além disso, na indústria aeroespacial, onde as peças precisam suportar altas temperaturas e pressões, o  $\text{Al}_2\text{O}_3$  é utilizado como revestimento protetor devido à sua excelente resistência térmica e estabilidade. O quadro 3 representa propriedades do revestimento utilizados em ferramentas de Metal Duro.

Quadro 3 - Propriedades dos Revestimentos Usados em Ferramentas de Metal Duro

| Revestimento                                       | Composição Principal | Dureza (HV) | Temperatura Máxima de Trabalho (°C) | Resistência ao Desgaste | Fricção     | Aplicações Principais                                                                  |
|----------------------------------------------------|----------------------|-------------|-------------------------------------|-------------------------|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------|
| TiN (Nitreto de Titânio)                           | Ti + N               | 2000–2500   | 600                                 | Boa                     | Moderada    | Aços, ligas metálicas; acabamento devido à baixa fricção.                              |
| TiC (Carboneto de Titânio)                         | Ti + C               | 3000–4000   | 400                                 | Excelente               | Alta        | Usado em desbaste de aços e ferro fundido; excelente resistência ao desgaste abrasivo. |
| TiAlN (Nitreto de Alumínio e Titânio)              | Ti + Al + N          | 2800–3200   | 800–900                             | Muito boa               | Baixa       | Materiais de alta dureza e temperaturas elevadas; superligas e aços inoxidáveis.       |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Óxido de Alumínio) | Alumínio oxigenado   | 1500–1800   | 1000+                               | Boa                     | Alta        | Operações de usinagem em alta temperatura; ferro fundido e ligas resistentes ao calor. |
| TiCN (Carbonitreto de Titânio)                     | Ti + C + N           | 3000–4000   | 400                                 | Excelente               | Moderada    | Desbaste e acabamento; melhora a resistência ao desgaste e reduz a fricção.            |
| ZrN (Nitreto de Zircônio)                          | Zr + N               | 1800–2000   | 600                                 | Boa                     | Muito baixa | Usado em materiais não ferrosos e aplicações estéticas (cor dourada).                  |
| CrN (Nitreto de Cromo)                             | Cr + N               | 1750–2000   | 700                                 | Boa                     | Baixa       | Resistente à corrosão; ideal para usinagem de materiais sensíveis e ligas especiais.   |

Fonte: Sandvik Coromant, 2024.

## 2.5 RUGOSIDADE

A rugosidade refere-se a pequenas irregularidades ou imperfeições geométricas resultantes do processo de usinagem deixadas na superfície (Diniz; Marcondes; Coppini, 2014). Essas irregularidades podem incluir marcas deixadas pela ferramenta de corte e resíduos de APC (Aresta Postiça de Corte) depositados na peça durante a formação do cavaco (Stemmer, 1993). A magnitude da rugosidade depende de vários parâmetros, como as propriedades do material usinado, a geometria da ferramenta, as configurações da máquina-ferramenta, entre outros (Diniz; Marcondes; Coppini, 2014).

Durante o processo de usinagem, certos fatores influenciam diretamente a rugosidade da superfície. Stemmer (1993) indica alguns fatores e seus impactos:

- O aumento da velocidade de corte geralmente resulta em um melhor acabamento superficial, pois diminui a formação de APC;

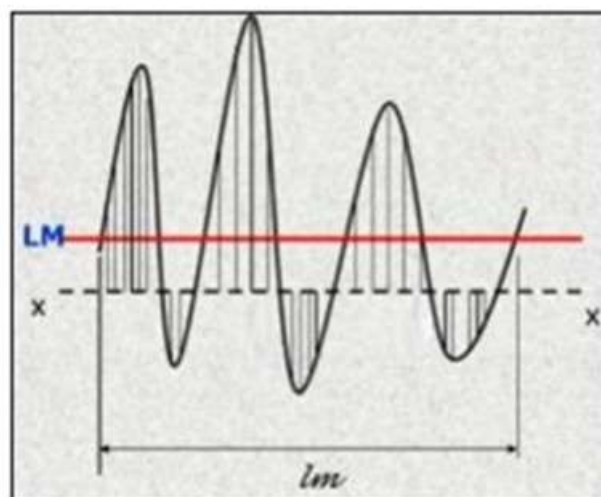
- Um avanço menor contribui para um acabamento mais suave devido à redução da altura das irregularidades;
- O ângulo de saída adequado pode dificultar a formação de APC, melhorando assim o acabamento superficial.

É crucial controlar a rugosidade através dos parâmetros de corte, pois ela não apenas afeta a qualidade estética da peça usinada, mas também pode influenciar propriedades mecânicas como a resistência à fadiga. Superfícies rugosas tendem a concentrar tensões, o que pode levar ao surgimento de trincas por fadiga (Smith e Hashemi, 2012).

Existem diversos métodos para quantificar a rugosidade das superfícies usinadas, sendo o parâmetro  $R_a$  (rugosidade média aritmética) o mais comumente utilizado na indústria (Machado *et al.*, 2009).

A avaliação da rugosidade por meio da técnica da linha média é realizada em relação a uma linha de referência conhecida como linha média. Esta linha divide o perfil da superfície ao longo do comprimento de medição "LM", garantindo que a área acima dela seja igual à área abaixo, conforme ilustrado na Figura 17 (Piratelli Filho, 2011). Além do comprimento de medição LM, o comprimento de amostragem "LR" é utilizado na direção das abscissas (eixo x) para identificar irregularidades características da superfície analisada. Recomenda-se que o comprimento de avaliação "LN" seja igual a 5 vezes o comprimento de amostragem LR, conforme normas como a ABNT NBR 4287:2002.

Figura 17 - Linha Média



Fonte: adaptado de Piratelli Filho (2011)



A escolha do parâmetro para a medição da rugosidade de perfis periódicos, como é o caso da furação, deve seguir a norma ABNT NBR ISO 4288:2008 (Quadro 4), que se aplica a tecnologias de processamento não periódico. Esses valores são essenciais para garantir a consistência e a precisão das medições de rugosidade superficial conforme os padrões internacionalmente reconhecidos.

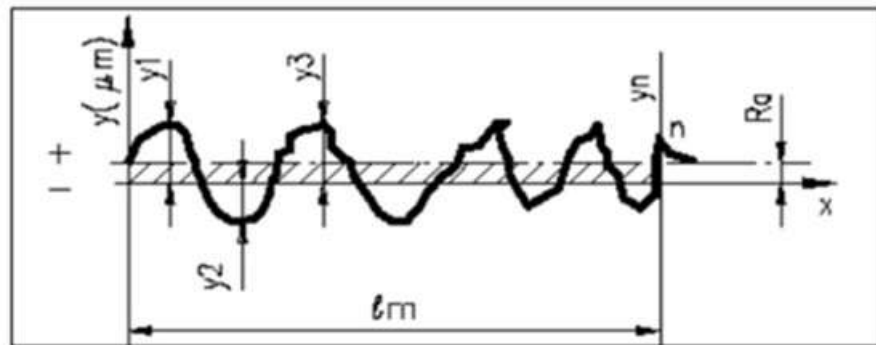
Quadro 4 - Comprimentos de amostragem de rugosidade para medições de parâmetros R de perfis periódicos e RSm de perfis periódicos e não-periódicos

| 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: adaptado da NBR 4288/2008.

### 2.5.1 Rugosidade Média ( $R_a$ )

A rugosidade média ( $R_a$ ), calculada ao longo de um comprimento de amostragem, representa a média dos valores absolutos das ordenadas da superfície (Figura 18). Este parâmetro é comumente disponível em instrumentos mais simples, porém não é sensível a variações pontuais que podem afetar a medição de características específicas da superfície (Machado *et al.*, 2011).

Figura 18 - Parâmetro de Rugosidade ( $R_a$ )

Fonte: Carpinetti et al. (1996).

A rugosidade  $R_a$ , ou altura média aritmética, é uma medida estatística usada para avaliar a textura superficial de uma peça usinada. A fórmula para calcular  $R_a$  é dada por:

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx \quad (3)$$

Onde:

$R_a$  é a rugosidade média aritmética.

$L$  é o comprimento da amostra (ou o comprimento de medição).

$y(x)$  é a altura da superfície em um ponto  $x$  ao longo do comprimento  $L$ .

Na prática, a fórmula pode ser interpretada como a média das distâncias verticais entre a linha média (referencial) da superfície e os picos e vales dentro do comprimento de medição. Ela é frequentemente medida utilizando um rugosímetro, que realiza a leitura ao longo de uma linha reta sobre a superfície da peça.

## 2.6 MONITORAMENTO DO PROCESSO DE FURAÇÃO

Ao estabelecer critérios para monitorar o desgaste de ferramentas, é possível ajustar ou afiar a ferramenta conforme necessário durante o processo. Segundo Silva (2010), existem dois métodos principais de monitoramento: direto e indireto. No

método direto, as variáveis são medidas diretamente através da exposição à ferramenta. Já no método indireto, as variáveis afetadas pelo desgaste, como emissão acústica ou potência de corte, são monitoradas.

Silva (2010) argumenta que os métodos diretos são mais confiáveis, pois fornecem medições precisas do desgaste da ferramenta. No entanto, eles têm a desvantagem de exigir interrupções no processo para medição, o que pode reduzir a produtividade. Por outro lado, os métodos indiretos são mais utilizados devido à sua capacidade de monitorar o desgaste de forma contínua sem interromper a operação.

Souto (2007) identifica algumas características desejáveis em sistemas de monitoramento, como confiabilidade, baixo custo, simplicidade e capacidade de operação em ambientes industriais ruidosos. Ele sugere que parâmetros elétricos do motor podem ser alterados pela corrente ou potência, proporcionando uma abordagem que atende a muitos desses requisitos.

Além disso, Souto (2007) lista as vantagens e desvantagens do monitoramento baseado em parâmetros elétricos do motor. Entre as principais vantagens, o baixo custo e a facilidade de instalação. No entanto, a técnica pode apresentar menor sensibilidade ao desgaste das ferramentas e perda de precisão devido à conversão incompleta de energia elétrica em energia mecânica.

Essas abordagens revelam importantes para o desenvolvimento de sistemas eficientes de monitoramento de desgaste de ferramentas, garantindo maior controle sobre os processos de usinagem e prolongando o desempenho das ferramentas utilizadas.

### **2.6.1 Potência**

A energia utilizada por uma máquina é derivada do movimento de suas engrenagens e eixos. Conforme destacado por Diniz, Marcondes e Coppini (2014), essa energia sustenta o funcionamento da máquina durante o processamento. A norma ABNT NBR 12545:1991 também salienta que a potência é uma função da velocidade e do torque das engrenagens de uma máquina. Esta potência pode ser categorizada em diferentes tipos:

Potência efetiva: é o resultado do produto entre a força efetiva ( $F_e$ ) e a velocidade efetiva ( $V_e$ ), ou a soma da potência de corte ( $P_c$ ) e potência de avanço ( $P_f$ ).

Força de corte: calculada como o produto da força de corte ( $F_c$ ) pela velocidade de corte ( $V_c$ ).

Potência de avanço: resultado do produto entre a força de avanço ( $P_f$ ) e a velocidade de avanço ( $V_f$ ).

Como a velocidade de avanço ( $V_f$ ) é significativamente menor que a velocidade de corte ( $V_c$ ), a potência de avanço direto é praticamente insignificante (Seco Tools, 2016). Conforme observado por Diniz, Marcondes e Coppini (2014), a potência de corte pode alcançar até 140 vezes a potência de avanço em casos extremos, evidenciando que a potência de usinagem está intimamente ligada à potência de corte, diretamente proporcional à força de corte.

A Seco Tools AB (2016) define a força de corte específica como a força necessária para remover 1 mm<sup>2</sup> de cavaco de um material específico, sendo grandemente influenciada pela geometria da ferramenta, material da peça, rigidez da ferramenta, velocidade de corte e ângulo da aresta de corte. Segundo Kant e Sangwan (2014), este processo contribui significativamente para a redução do consumo de eletricidade, promovendo práticas industriais mais sustentáveis.

### **2.6.2 Vibração**

A vibração é um fator essencial na avaliação do acabamento superficial e das condições de processamento, sendo um dos principais desafios para atingir alta eficiência e uma qualidade superficial satisfatória (Vikram; Ratnam; Narayana, 2016).

Durante a usinagem, ocorrem duas formas fundamentais de vibração: a vibração forçada, provocada por forças intermitentes na máquina-ferramenta devido a problemas como desequilíbrio e desalinhamento dos componentes; e a vibração induzida pelo processo, gerada pelo próprio processo de remoção de cavacos interagindo com a estrutura da máquina (Vikram; Ratnam; Narayana, 2016).

Entre esses tipos de vibração, a induzida é particularmente significativa devido ao seu impacto negativo no processo de usinagem, resultando em desgaste acelerado da ferramenta, baixa qualidade superficial e restrições na produtividade (Moradi *et al.*, 2015).

Portanto, é essencial controlar essas oscilações para aumentar a eficiência e reduzir custos. Isso requer uma compreensão detalhada da interação entre ferramenta e peça para prever o comportamento vibratório e selecionar parâmetros de usinagem adequados (Deshpande, Fofana, 2001).

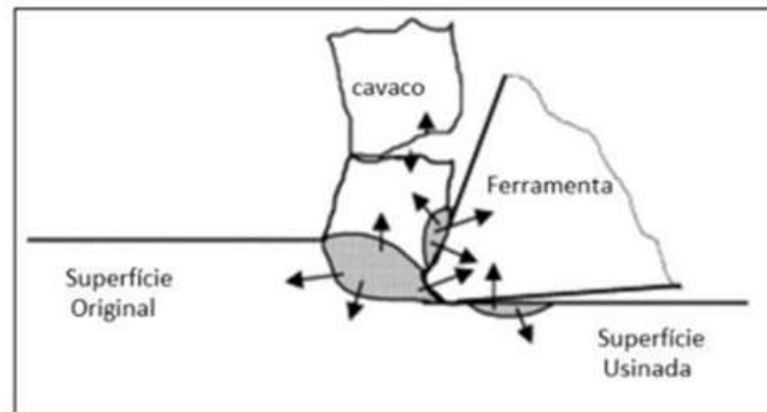
Segundo Kalpakjian e Schmid (2009), a vibração está diretamente ligada à força de corte, à largura e à profundidade do corte, assim como à dureza do material. A natureza do cavaco também desempenha um papel crucial nessas vibrações: cavacos contínuos geralmente não causam vibrações significativas, enquanto cavacos descontínuos ou irregulares podem gerar oscilações devido às variações na força durante sua formação. Além disso, a ausência de fluido lubrificante durante a usinagem pode intensificar as vibrações.

### **2.6.3 Emissão acústica**

As emissões acústicas (AE) são um conjunto de ondas elásticas transitórias formadas devido à rápida liberação de energia de uma fonte (local ou não) quando esta é estressada (Guo; Ammala, 2005). Em outras palavras, EA é uma onda de tensão gerada pela liberação repentina de energia de deformação, que se propaga no material (Li, 2002). Porque, quando ocorrem certas mudanças no corpo, ele emite sons (Maia *et al.*, 2015). Conforme Figura 19 são:

- Deformações e fraturas que ocorrem na ferramenta devido ao contato entre a ferramenta e a peça de trabalho e entre a ferramenta e os cavacos,
- Emaranhamento, colisão e quebra dos cavacos gerados;
- Deformação e fratura em zonas de cisalhamento primárias, secundárias e terciárias de peças usinadas.

Figura 19 - Fontes de EA durante a usinagem de metal



Fonte: Adaptado de Li (2002).

Deve-se compreender que as ferramentas estão sujeitas ao desgaste, o qual pode impactar diretamente na qualidade das peças usinadas. Métodos indiretos de monitoramento de desgaste, como a emissão acústica, são mais eficazes que os métodos diretos para prevenir o desgaste das ferramentas. Ferramentas que utilizam emissão acústica conseguem reduzir a vibração e o ruído durante sua operação. Esse sistema aumenta significativamente a eficácia ao monitorar o desgaste da ferramenta (Li, 2002).

## 2.7 TIPOS E FORMAS DOS CAVACOS

Segundo Machado *et al.* (2011), os cavacos podem ser classificados em diversos tipos e formas, dependendo das características do material usinado, como sua ductilidade ou fragilidade, bem como das condições de usinagem empregadas. Materiais dúcteis geram cavacos contínuos, enquanto materiais frágeis resultam em cavacos descontínuos.

Cavacos contínuos são frequentemente observados em materiais dúcteis, como aços de baixa liga, cobre e alumínio. Conforme Machado *et al.* (2011), a formação desses cavacos ocorre quando o material sofre fratura na zona de cisalhamento primária, passando por grandes deformações, mas mantendo sua estrutura homogênea, sem fragmentação.

### 2.7.1 Classificação dos Cavacos

Os cavacos podem ser classificados conforme seus tipos e formas. Segundo Diniz, Coppini e Marcondes (2014), os principais tipos de cavacos incluem:

- **Cavaco contínuo:** caracteriza-se por lamelas justapostas de forma contínua, sem uma separação nítida entre elas. Esse tipo de cavaco é formado na usinagem de materiais dúcteis, como o aço, e está associado a ângulos de saída elevados.
- **Cavaco de cisalhamento:** é composto por lamelas bem definidas e claramente separadas.
- **Cavaco de ruptura:** formado por fragmentos arrancados do material usinado, com uma área de contato reduzida entre o cavaco e a face de saída da ferramenta. Neste caso, devido à influência do atrito, o ângulo de saída geralmente é baixo, nulo ou até negativo.

Ferraresi (1997) destaca a importância de controlar a forma dos cavacos gerados durante a furação, pois isso facilita sua remoção do furo. Cavacos com formato de fita são difíceis de evacuar devido ao comprimento e ao risco de enrolamento, enquanto cavacos helicoidais ou fragmentados são mais facilmente removidos, o que melhora a eficiência do processo. A evacuação pode ser otimizada por ciclos de furação que retiram periodicamente a broca do furo, o que, embora aumente os tempos passivos, favorece a remoção dos cavacos. Outra estratégia eficiente é o uso de fluido de corte pressurizado, direcionado ao fundo do furo através de canais especializados na broca, facilitando a evacuação do material.

Allegrini (2014) analisou a furação com brocas de aço rápido sinterizado e observou que a continuidade dos cavacos aumenta à medida que o processo avança, embora com marcas ao longo de sua extensão, indicando desgaste progressivo da ferramenta. Esse desgaste é mais acentuado na ausência de refrigeração, o que resulta no aumento da força de corte, uma vez que as arestas de corte se desgastam, tornando o processo mais exigente.

Kruzhhanov (2001) descreve o comportamento do cavaco durante a furação, enfatizando o contato contínuo entre a ferramenta e a peça até que o cavaco seja expulso do furo pelos canais helicoidais da broca. Esse contato prolongado pode

prejudicar o desempenho do processo e acelerar o desgaste da ferramenta, caso as condições de corte não sejam adequadamente ajustadas.

Pimentel (2014), em sua pesquisa sobre a furação de superligas à base de níquel, explica que a formação dos cavacos é influenciada por fatores como os parâmetros de corte, a geometria da ferramenta e as propriedades do material. Ele descreve os principais tipos de cavacos gerados nesse processo:

- **Cavacos Longos e Contínuos:** Formados quando as condições de corte são favoráveis, estes cavacos são evacuados com eficiência, mas sua remoção pode ser dificultada pelo comprimento e pelo risco de enrolamento.
- **Cavacos Helicoidais ou Espirais:** Comuns em furação, esses cavacos facilitam a evacuação devido à geometria espiralada, mas podem ser difíceis de controlar em usinagens de alta velocidade, especialmente quando a evacuação não é otimizada.
- **Cavacos Fragmentados ou em Lascas:** Devido ao elevado esforço de corte, o cavaco pode se fragmentar, especialmente quando a geometria da ferramenta não é ideal ou a velocidade de corte é alta. Esse tipo de cavaco, com aparência de lascas ou dentes de serra, é resultado das altas temperaturas e tensões mecânicas, gerando cavacos mais curtos e fragmentados.
- **Cavacos Segmentados:** O desgaste progressivo da ferramenta e as altas temperaturas podem gerar cavacos segmentados, com quebras em pontos específicos e formas irregulares, devido à perda de resistência do material de corte ou instabilidade térmica no processo de furação.

As formas de cavacos geradas durante a furação de superligas, como longos e contínuos, helicoidais, fragmentados e segmentados, apresentam desafios relacionados à evacuação e ao controle térmico. Cavacos longos e contínuos dificultam a remoção, enquanto cavacos fragmentados ou segmentados, embora mais fáceis de evacuar, resultam de condições de corte mais agressivas. O controle preciso dos parâmetros de corte, como velocidade, avanço e geometria da ferramenta, é essencial para otimizar a formação dos cavacos e garantir a eficiência do processo. Estratégias como o uso de fluido de corte pressurizado e ciclos de furação otimizados são fundamentais para melhorar a evacuação dos cavacos, aumentar a durabilidade das ferramentas e manter a qualidade da peça usinada (Pimmentel, 2014).



## 2.8 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS DO TIPO FATORIAL COMPLETO

Um experimento pode ser descrito como um teste ou um conjunto de testes nos quais alterações intencionais são realizadas nas variáveis de entrada de um processo ou sistema. O objetivo é observar e entender as razões pelas quais ocorrem mudanças nas variáveis de saída ou respostas (Montgomery, 2012).

Wosniak, Polli e Beltrão (2009) afirmam que a metodologia de Projeto de Experimentos (DOE, abreviação de *Design Of Experiments*) desempenha um papel crucial na solução de problemas de processo, pois permite analisar a influência das variáveis e suas interações em processos industriais com um número adequado e confiável de experimentos. Quando aplicada junto a uma estratégia de experimentação, o DOE contribui de forma significativa para um melhor entendimento do processo.

O planejamento de experimentos do tipo fatorial completo é uma técnica estatística que permite avaliar simultaneamente os efeitos de múltiplos fatores e suas interações em um processo ou sistema. Nesse tipo de planejamento, todos os níveis de cada fator são combinados entre si, possibilitando uma análise abrangente das variáveis envolvidas. O planejamento fatorial completo é uma técnica amplamente utilizada para investigar como diferentes variáveis afetam um processo, permitindo uma análise abrangente das variáveis envolvidas, identificando tanto os efeitos principais quanto as interações entre os fatores (Montgomery, 2017).

No estudo de Buso (2024), foi comparado o planejamento Fatorial Completo com o método de Taguchi no torneamento do aço AISI 4340 temperado e revenido, avaliando os efeitos da velocidade de corte, avanço e profundidade de corte sobre a potência consumida, rugosidade, vibração e emissão acústica. O Fatorial Completo forneceu dados mais detalhados, enquanto o Taguchi se mostrou mais eficiente para otimizações rápidas.

Como vantagens o planejamento fatorial completo para experimentos tem-se:

- Identificação de interações entre fatores: Diferentemente de planejamentos que avaliam fatores isoladamente, o planejamento fatorial completo

possibilita a análise das interações entre os fatores, permitindo uma visão mais detalhada do sistema em estudo (Silva; Oliveira, 2022);

- Eficiência no uso de recursos: Embora o número de experimentos aumenta com o número de fatores e níveis, essa abordagem é mais eficiente do que realizar experimentos separados para cada fator, considerando todas as combinações de maneira integrada (Barros; Costa, 2021);

- Aplicabilidade em diferentes áreas: Pode ser utilizado em diferentes setores (engenharia, química, biologia etc.) auxiliando na otimização de processos, desenvolvimento de novos produtos e análise de fenômenos complexos (Pereira *et al.*, 2023);

- Flexibilidade na análise estatística: O planejamento fatorial completo permite a utilização de técnicas avançadas de análise de variância (ANOVA), proporcionando maior robustez nas conclusões (Montgomery, 2017).

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

A Análise de variância (ANOVA) é uma ferramenta muito importante para verificação estatística dos resultados de um pesquisador, mas é uma ferramenta que não pode ser aplicada indiscriminadamente em qualquer conjunto de dados. Para cada tipo de análise estatística existem diferentes regras para garantir a confiabilidade dos resultados (Rocha; Bacelar Júnior, 2018). A ANOVA é essencial quando se deseja comparar as médias de três ou mais grupos, sendo amplamente utilizada em experimentos científicos para identificar se existe uma diferença significativa entre as variáveis analisadas. No entanto, para que os resultados sejam válidos, é necessário que algumas premissas sejam atendidas, como a normalidade dos dados, a homogeneidade das variâncias e a independência das observações.

De acordo com Montgomery e Runger (2012), a análise de variância, também conhecida como ANOVA, é uma abordagem utilizada para se comparar vários grupos de interesse. Busca avaliar se há diferenças consideráveis entre os grupos investigados. Esse método é particularmente útil em experimentos onde múltiplas condições ou tratamentos são aplicados.

Walpole, Myers e Myers (2009) salientam que a ANOVA é um procedimento muito comum usado para lidar com testes de médias populacionais. Este

procedimento é preferido em muitos estudos porque permite testar várias hipóteses simultaneamente. Além disso, a ANOVA pode ser adaptada para analisar diferentes desenhos experimentais, como experimentos de medidas repetidas, onde as mesmas unidades experimentais são medidas várias vezes sob diferentes condições.

Paese, Caten e Ribeiro (2001) apresentaram uma aplicação da ANOVA demonstrando que esse tipo de análise é crucial na indústria, onde a compreensão das fontes de variabilidade pode levar a melhorias significativas na qualidade e consistência dos produtos.

A análise de variância é um método que avalia a hipótese de que as médias de duas ou mais populações sejam iguais; ou seja, testa a influência de um ou mais fatores (parâmetros de corte) comparando as médias de variáveis de resposta (resultados de qualidade) nos diferentes níveis de cada fator. A hipótese nula ( $H_0$ ) afirma que todas as médias de população (médias de nível de fator) são iguais - logo, os parâmetros de corte não influenciam diretamente em quaisquer resultados; enquanto a hipótese alternativa afirma que pelo menos uma média é diferente: algum dos parâmetros de corte influencia significativamente os resultados de qualidade.

O procedimento de análise de variância funciona através da comparação da variância (erro) entre as médias de grupos *versus* a variância dentro dos grupos como uma maneira de determinar se os grupos são todos parte de uma população maior, de forma que suas características particulares não os distinguem suficientemente, ou são populações distintas com características diferentes (MINITAB, 2020).

Segundo Sousa, Lira Junior e Ferreira (2012), diversas áreas do conhecimento utilizam ferramentas de análise estatística para investigar hipóteses propostas. Uma das maneiras de se realizar esta análise se dá através de técnicas de comparação múltipla entre as médias de tratamentos experimentais. Esta técnica é realizada posteriormente à ANOVA. Uma das técnicas mais comuns é o teste de Tukey, que permite identificar quais grupos são significativamente diferentes entre si após a determinação de que existe uma diferença significativa geral. Outro método frequentemente utilizado é o teste de Bonferroni, que ajusta os níveis de significância para múltiplas comparações, reduzindo a probabilidade de resultados falsos positivos.

Além das aplicações práticas, a ANOVA também tem uma base teórica sólida que se apoia na distribuição F, desenvolvida por Ronald Fisher. A distribuição F é utilizada para comparar a variabilidade entre grupos com a variabilidade dentro dos grupos. Se a variabilidade entre os grupos foi significativamente maior do que a variabilidade dentro dos grupos, rejeita-se a hipótese nula de que todas as médias são iguais. Isso fornece uma maneira rigorosa e estatisticamente robusta de testar hipóteses sobre diferenças entre grupos.

A ANOVA é uma ferramenta estatística poderosa e versátil que permite aos pesquisadores avaliarem diferenças entre grupos e identificar as fontes de variação nos dados. Sua aplicação correta, no entanto, requer atenção às premissas subjacentes e a escolha adequada das técnicas de comparação múltipla. Compreender e aplicar essas técnicas corretamente é fundamental para garantir a validade e a confiabilidade dos resultados de um estudo (Sousa, Lira Junior e Ferreira 2012).

Com a utilização da ANOVA e do Teste de Tukey foi possível compreender melhor as variáveis envolvidas no processo de usinagem, os respectivos níveis de cada uma delas e os seus impactos na qualidade medida do processo de produção e do produto, neste caso avaliada em termos da Temperatura e Rugosidade (Reis; Pinto; Soares, 2016).

Pouca aplicação do Testes de Tukey foi encontrada na área industrial, mas este tipo de teste mostrou-se uma ferramenta eficaz na comparação entre as médias das variáveis resposta Temperatura e Rugosidade para os níveis dos três fatores analisados. Desta forma, uma racionalização do uso dos recursos disponíveis envolvidos pode significar ganhos em termos de produtividade, redução de custos, eficiência e competitividade deste setor (Reis; Pinto; Soares, 2016).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais, equipamentos e as etapas de desenvolvimento da pesquisa, os sistemas de aquisição de dados, o planejamento de experimentos adotado e a forma de análise dos resultados adotada.

#### 3.1 CORPO DE PROVA

Os corpos de prova utilizados foram elaborados da superliga VAT32®, fornecidos pela Villares Metals, com diâmetro de 89 mm e espessura de 25mm (Figura 20). Em cada corpo de prova foram realizados furos em suas faces. Segundo Kondo (2019), utilizando o teste de dureza Vickers, o valor médio de dureza para a superliga VAT32® foi de  $375,34 \pm 36,22$  HV, a mesma utilizada nesta pesquisa e estando em concordância com os dados de Farina *et al.* (2013).

De acordo com Farina *et al.* (2013), na superliga VAT32®, a adição de nióbio e carbono visa precipitar carbeto de nióbio, causando um aumento na resistência mecânica e ao desgaste da superliga. A adição de nióbio também promove o aumento da resistência mecânica por meio da precipitação de fases.

Figura 20 - Corpos de prova VAT32®.



Fonte: Autoria própria.

### 3.2 PROCESSO DE FABRICAÇÃO

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Estudo da Usinagem no Departamento de Materiais e Tecnologia na Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, utilizando um Centro de Usinagem da marca DMG modelo DMU50ECO série DMG Ecoline, com 17 [kW] de potência e rotação máxima do fuso de 8.500 [rpm] (Figura 21).

Figura 21 - Centro de Usinagem da marca DMG modelo DMU50ECO série DMG Ecoline



Fonte: Autoria própria

Os corpos de prova foram fixados através de placa com castanhas conforme Figura 22.

Figura 22 - Fixação dos corpos de prova através de placa com castanhas



Fonte: Autoria própria

O processo de usinagem realizado nesta pesquisa foi de furação em cheio com o uso de uma broca de insertos intercambiáveis com diâmetro de 15mm (SD522-15-30-50R2, marca Seco Tools), com ângulo de posição de 87,5°.

Este tipo de broca é usado para a realização de furos sem a necessidade da realização de pré-furos.

Para a realização dos ensaios utilizou-se um suporte para insertos (broca) com diâmetro de 15 mm que utiliza um inserto interno e um inserto externo. Na Figura 23 é possível observar o *spindle*, suporte e broca.

Figura 23 - Conjunto *spindle*, suporte e broca

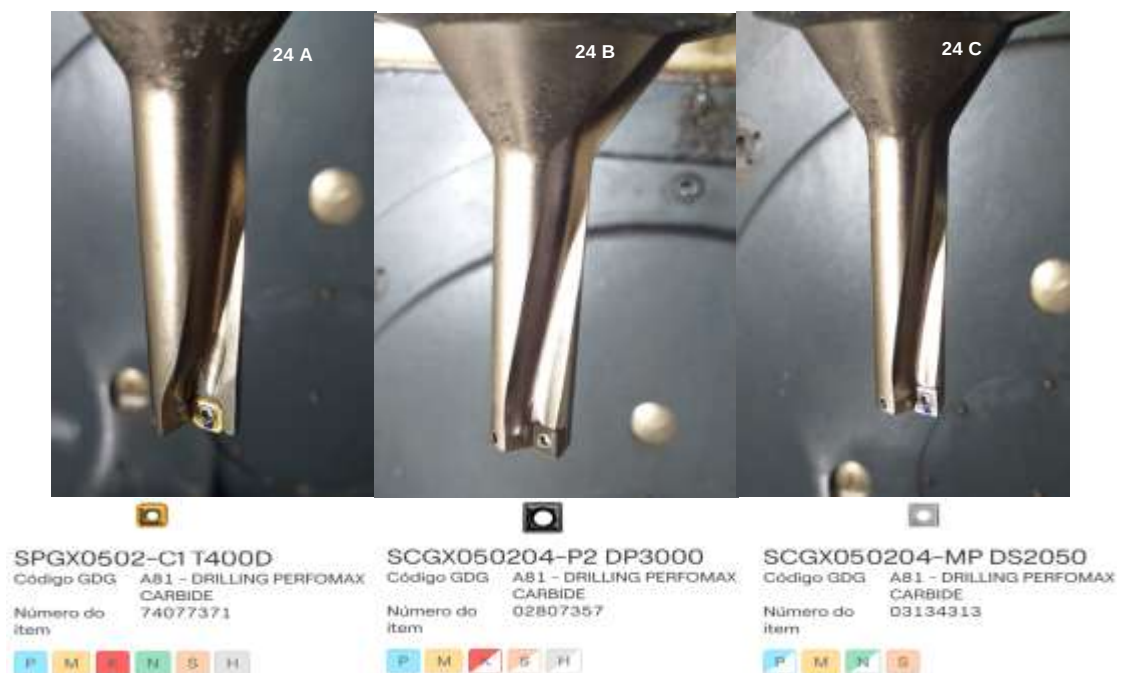


Fonte: Autoria própria.

As condições de usinagem foram variadas da seguinte forma: utilizou-se dois conjuntos de ferramentas de metal duro sendo o denominado Conjunto A, formado com inserto interno revestidos com (Ti,Al)N+TiN (SPGX0502-C1,T400D, CVD, marca Seco Tools, com espessura 2,38mm, com ângulo de folga de 11°,raio de ponta 0,4mm) (Figura 24a) e inserto externo revestido com Ti(C,N)+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Figura 24b) (SCGX050204-MP, classe DP3000, CVD, marca Seco Tools, espessura 2,38mm, com ângulo de folga de 7°, raio de ponta 0,4mm). O Conjunto B formado com inserto interno revestidos com (Ti,Al)N+TiN (Figura 24a) e inserto externo revestido com TiAlN+NbN (Figura 23c) (SCGX050204-MP, classe DS2050, PVD, marca Seco Tools, espessura 2,38mm, com ângulo de folga de 7°, raio de ponta 0,4mm) (Figura 24c). Foram utilizadas três velocidades de corte (20; 40; 60 m/min.) e três avanços (0.04, 0.06 e 0.08 mm/rot). Foram realizadas 2 repetições para cada condição de usinagem, totalizando 36 ensaios utilizando um planejamento fatorial completo, mostrado na Tabela 2.

Utilizou-se um comprimento de corte de 7,1m para todas as condições testadas.

Figura 24 - Broca mostrando insertos e suas características: a) interno de (Ti,Al)N+TiN; b) Broca mostrando inserto externo revestido com Ti(C,N)+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; c) Broca com inserto externo revestido com TiAlN+NbN



Fonte: Autoria Própria



A Figura 25 ilustra o arranjo dos insertos internos e externos em uma ferramenta intercambiável de metal duro.

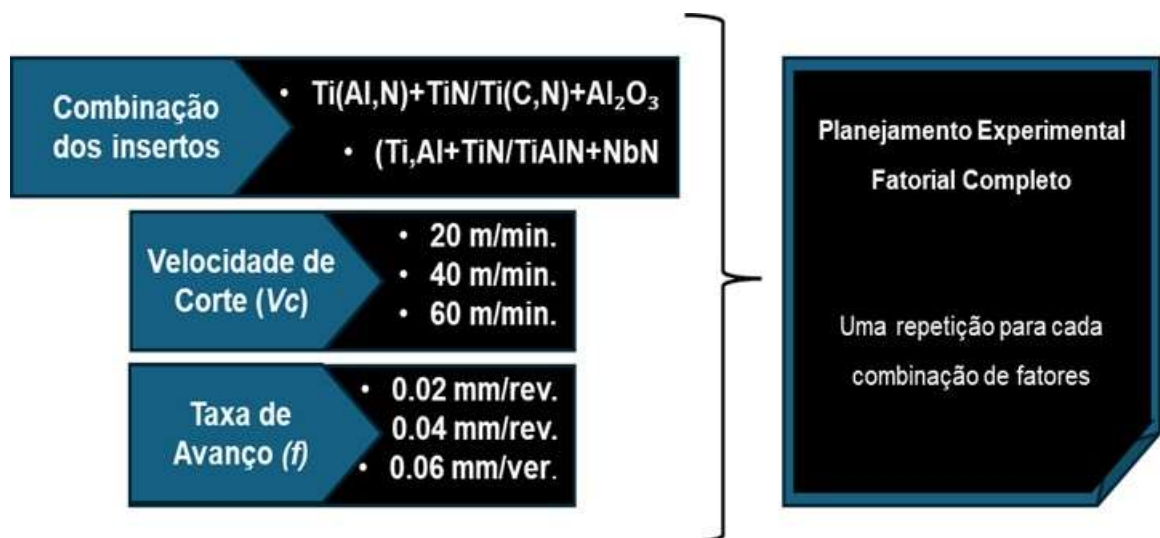
Figura 25 - Broca mostrando arranjo do inserto interno e externo



Fonte: Seco tools (2016)

Foi realizado um delineamento experimental para a combinação dos insertos, velocidade de corte e taxa de avanço, resultando em um planejamento fatorial completo, com uma repetição para cada combinação de fatores conforme Figura 26.

Figura 26 - Delineamento experimental



Fonte: Autoria Própria

Tabela 2 - Detalhamento dos ensaios realizados

| Ensaio | Fer. | Características Ferramentas<br>(interna /externa)    | Vc<br>(m/min) | f (mm/rot) | diâmetro<br>broca | lc (m) | Prof. Furo<br>(mm) |
|--------|------|------------------------------------------------------|---------------|------------|-------------------|--------|--------------------|
| 1      | A    | (Ti,Al)N+TiN/Ti(C,N)+ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 20            | 0,04       | 15                | 7,100  | 6,0                |
| 2      | A    | (Ti,Al)N+TiN/Ti(C,N)+ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 20            | 0,06       | 15                | 7,100  | 9,0                |
| 3      | A    | (Ti,Al)N+TiN/Ti(C,N)+ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 20            | 0,08       | 15                | 7,100  | 12,1               |
| 4      | A    | (Ti,Al)N+TiN/Ti(C,N)+ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 40            | 0,04       | 15                | 7,100  | 6,0                |
| 5      | A    | (Ti,Al)N+TiN/Ti(C,N)+ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 40            | 0,06       | 15                | 7,100  | 9,0                |
| 6      | A    | (Ti,Al)N+TiN/Ti(C,N)+ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 40            | 0,08       | 15                | 7,100  | 12,1               |
| 7      | A    | (Ti,Al)N+TiN/Ti(C,N)+ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 60            | 0,04       | 15                | 7,100  | 6,0                |
| 8      | A    | (Ti,Al)N+TiN/Ti(C,N)+ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 60            | 0,06       | 15                | 7,100  | 9,0                |
| 9      | A    | (Ti,Al)N+TiN/Ti(C,N)+ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 60            | 0,08       | 15                | 7,100  | 12,1               |
| 10     | B    | (Ti,Al)N+TiN/TiAlN+NbN                               | 20            | 0,04       | 15                | 7,100  | 6,0                |
| 11     | B    | (Ti,Al)N+TiN/TiAlN+NbN                               | 20            | 0,06       | 15                | 7,100  | 9,0                |
| 12     | B    | (Ti,Al)N+TiN/TiAlN+NbN                               | 20            | 0,08       | 15                | 7,100  | 12,1               |
| 13     | B    | (Ti,Al)N+TiN/TiAlN+NbN                               | 40            | 0,04       | 15                | 7,100  | 6,0                |
| 14     | B    | (Ti,Al)N+TiN/TiAlN+NbN                               | 40            | 0,06       | 15                | 7,100  | 9,0                |
| 15     | B    | (Ti,Al)N+TiN/TiAlN+NbN                               | 40            | 0,08       | 15                | 7,100  | 12,1               |
| 16     | B    | (Ti,Al)N+TiN/TiAlN+NbN                               | 60            | 0,04       | 15                | 7,100  | 6,0                |
| 17     | B    | (Ti,Al)N+TiN/TiAlN+NbN                               | 60            | 0,06       | 15                | 7,100  | 9,0                |
| 18     | B    | (Ti,Al)N+TiN/TiAlN+NbN                               | 60            | 0,08       | 15                | 7,100  | 12,1               |
| 19     | A    | (Ti,Al)N+TiN/Ti(C,N)+ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 20            | 0,04       | 15                | 7,100  | 6,0                |
| 20     | A    | (Ti,Al)N+TiN/Ti(C,N)+ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 20            | 0,06       | 15                | 7,100  | 9,0                |
| 21     | A    | (Ti,Al)N+TiN/Ti(C,N)+ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 20            | 0,08       | 15                | 7,100  | 12,1               |
| 22     | A    | (Ti,Al)N+TiN/Ti(C,N)+ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 40            | 0,04       | 15                | 7,100  | 6,0                |
| 23     | A    | (Ti,Al)N+TiN/Ti(C,N)+ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 40            | 0,06       | 15                | 7,100  | 9,0                |
| 24     | A    | (Ti,Al)N+TiN/Ti(C,N)+ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 40            | 0,08       | 15                | 7,100  | 12,1               |
| 25     | A    | (Ti,Al)N+TiN/Ti(C,N)+ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 60            | 0,04       | 15                | 7,100  | 6,0                |
| 26     | A    | (Ti,Al)N+TiN/Ti(C,N)+ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 60            | 0,06       | 15                | 7,100  | 9,0                |
| 27     | A    | (Ti,Al)N+TiN/Ti(C,N)+ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 60            | 0,08       | 15                | 7,100  | 12,1               |
| 28     | B    | (Ti,Al)N+TiN/TiAlN+NbN                               | 20            | 0,04       | 15                | 7,100  | 6,0                |
| 29     | B    | (Ti,Al)N+TiN/TiAlN+NbN                               | 20            | 0,06       | 15                | 7,100  | 9,0                |
| 30     | B    | (Ti,Al)N+TiN/TiAlN+NbN                               | 20            | 0,08       | 15                | 7,100  | 12,1               |
| 31     | B    | (Ti,Al)N+TiN/TiAlN+NbN                               | 40            | 0,04       | 15                | 7,100  | 6,0                |
| 32     | B    | (Ti,Al)N+TiN/TiAlN+NbN                               | 40            | 0,06       | 15                | 7,100  | 9,0                |
| 33     | B    | (Ti,Al)N+TiN/TiAlN+NbN                               | 40            | 0,08       | 15                | 7,100  | 12,1               |
| 34     | B    | (Ti,Al)N+TiN/TiAlN+NbN                               | 60            | 0,04       | 15                | 7,100  | 6,0                |
| 35     | B    | (Ti,Al)N+TiN/TiAlN+NbN                               | 60            | 0,06       | 15                | 7,100  | 9,0                |
| 36     | B    | (Ti,Al)N+TiN/TiAlN+NbN                               | 60            | 0,08       | 15                | 7,100  | 12,1               |

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 27 é possível observar a montagem do experimento mostrando a fixação dos corpos de prova. É possível observar também os corpos de prova após a furação.

Figura 27 - Montagem do sistema de ensaios ilustrando corpo de prova cilíndrico preso por placa com castanhas e sensores de vibração e emissão acústica.



Fonte: Autoria própria.

Todos os ensaios foram realizados utilizando fluido sintético Vasco 7000 da marca Blaser, na concentração de 12% aferido com refratômetro (0-32%), com refrigeração do tipo abundante com vazão de 23l/min (40bar) (Figura 28). Este fluido de corte apresenta é miscível em água e apresenta alto desempenho sendo de base vegetal, vegetal (canola e girassol) e foi desenvolvido para ser aplicado na usinagem de alumínio, titânio, ligas de níquel, cobalto, cromo, e ligas de difícil usinabilidade, como Inconel e aços superduplex.

Para as escolhas dos insertos e parâmetros de corte usou-se como informações iniciais as recomendações do fabricante que aponta o recobrimento TiAlN+NbN (SCGX050204-MP, classe DS2050) como primeira escolha para furação de superligas à base de níquel e recomenda velocidade de corte de 41m/min e avanço máximo de 0,085mm/rot.

As ferramentas com recobrimento de (Ti,Al)N+TiN (SPGX0502-C1,T400D), e com Ti(C,N)+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (SCGX050204-MP, classe DP3000) são indicadas para usinagem de superligas apesar de não ser a primeira escolha.

A escolha dos arranjos dos insertos nas posições internas e externas da broca (Conjunto A: (Ti,Al)N+TiN e Ti(C,N)+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; Conjunto B: (Ti,Al)N+TiN e TiAlN+NbN) baseou-se em suas aplicações, indicação e disponibilidade de fornecimento pelo fabricante.

Somado a isso, foram realizados ensaios preliminares com as diferentes ferramentas, de forma a adequar velocidades de corte, avanços e concentração do fluido de corte. Com estes ensaios preliminares notou-se que uma lubri-refrigeração inadequada não seria possível a usinagem, levando o corpo da broca a fundir-se (Figura 28).

Após estabelecidas as condições máximas possíveis, estabeleceu-se os parâmetros de corte ( $v_c = 20; 40; 60$  m/min;  $f = 0.04, 0.06, 0.08$  mm/rot) e fluido sintético na concentração de 12%, pressão de 40 bar e vazão de 23l/min (recomendado pelo fabricante mínimo emulsão com 10% de concentração com vazão de 20l/min e pressão de 20 bar).

Dessa forma estabeleceu-se velocidades de corte abaixo e acima da recomendada para a ferramenta mais indicada pelo fabricante e em condições mais conservadoras em termos de avanço e fluido de corte, de forma a não permitir que novas brocas viessem a se fundir. Assim também, por estar muito perto do limite da broca, optou-se por usar um arranjo fatorial ao invés de superfície de resposta ou outro tipo de arranjo.

Figura 28 - Sistema de refrigeração atuando durante os ensaios e brocas fundidas durante e realização de ensaios preliminares.



Fonte: Autoria própria.

Realizou-se uma repetição para cada conjunto de parâmetros de entrada. Em cada conjunto variou-se a velocidade de corte e o avanço em um arranjo fatorial. Desta forma, realizou-se o total de 36 ensaios.

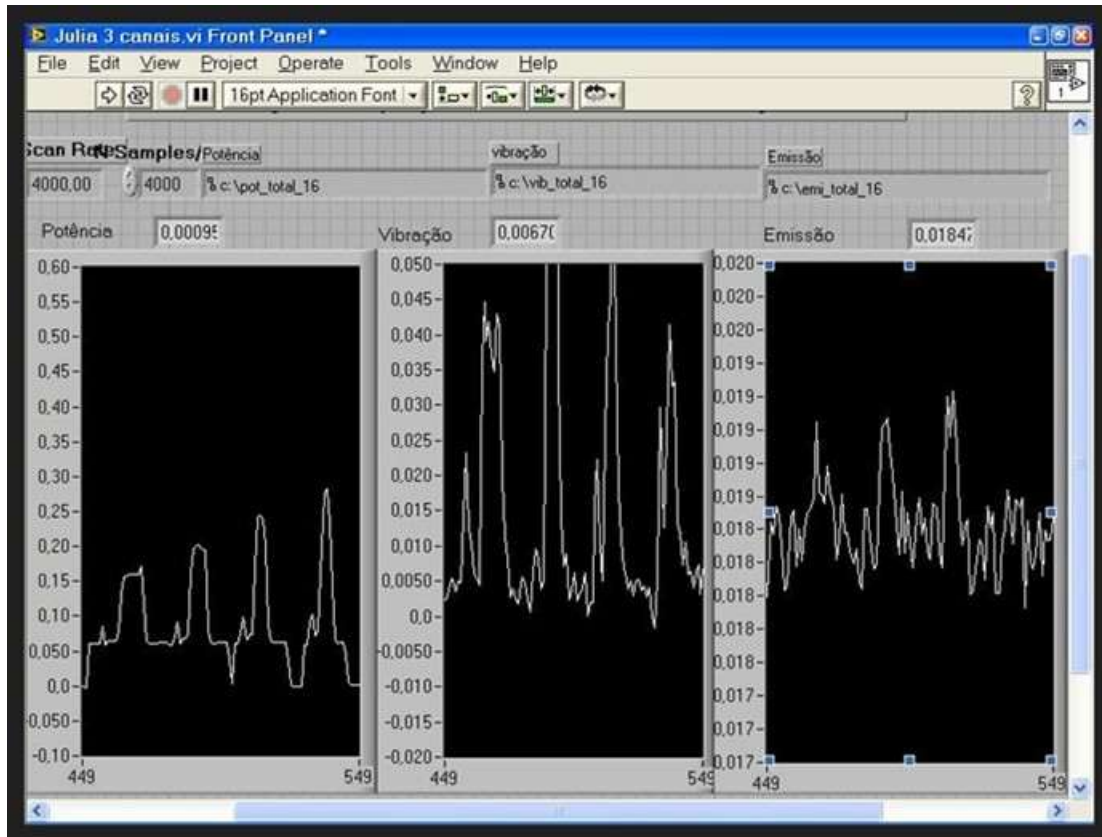
Após cada ciclo mediu-se a rugosidade da peça e coletou-se os cavacos para análise posterior.

### **3.2.1 Sistema de aquisição de sinais**

Durante os ensaios foram adquiridas em tempo real variáveis de processo como potência consumida, emissão acústica e vibração. Essas variáveis foram coletadas por um sistema que permite a obtenção de variáveis físicas e, através de sensores e transdutores apropriados, os converte em sinais elétricos proporcionais.

Utilizando uma placa de aquisição de dados, os sinais analógicos dos sensores são transformados em sinais digitais. Utilizou-se uma placa da marca National Instruments, modelo NI PCI 6220. O controle, frequência e registro dos sinais é realizado por um aplicativo desenvolvido no LabView® 7.1 da National Instruments (Figura 29).

Figura 29 - Tela do aplicativo para controle dos ensaios desenvolvido em LABVIEW.



Fonte: Autoria própria.

O aplicativo é responsável por fazer a comunicação da placa de aquisição como os sensores, além de definir a taxa de aquisição de dados além de permitir armazenar os sinais enviados pelos sensores.

Nesta pesquisa utilizando sensores de corrente, de emissão acústica e de vibração, optou-se por registrar sinais puros dos sensores, sem nenhuma transformação inicial, permitindo a máxima eficiência do sistema de computação em cálculos adicionais como conversão de valores.

Optou-se ainda por uma taxa de aquisição de 4800 pontos por segundo para cada sensor. Os sinais obtidos foram armazenados em arquivos de texto identificados conforme o número do ensaio (Exemplo: pot\_1; vib\_1; emi\_1).

Como os ensaios tinham duração diferentes, em função das velocidades de corte e avanço, mantendo o comprimento de corte, o tamanho dos arquivos variou.

Estes arquivos foram salvos em forma de matriz de maneira que possuíam 4800 colunas (4800 dados por segundo), onde cada linha da matriz representa um segundo de usinagem na furação. Dessa forma, todo o ensaio fica rastreável em relação ao tempo e ao percurso de corte.

Adotou-se também para todos os ensaios a seguintes etapas para realização dos ensaios:

Fase 1: Montagem do Banco de ensaios

- Inicialmente todo o centro de usinagem foi limpo e o reservatório de fluido de corte foi esvaziado e lavado;

- Após essa ação o fluido de corte foi preparado nas condições desejadas usando fluido novo e na concentração desejada;

- Logo após foi realizada a fixação de placa de 3 três castanhas sobre a mesa do centro de usinagem utilizando grampos, parafusos prisioneiros, arruelas e porcas de cabeça quadradas;

- Fixação do sensor de vibração sobre a mesa do centro de usinagem usando grampos;

- Fixação do sensor de emissão acústica sobre a placa de castanhas usando grampos;

- Fixação do sensor de corrente nas fases de entrada do motor, no painel elétrico do centro de usinagem;

- Acionamento do computador do sistema de aquisição de dados além de acionamento da fonte alimentadora dos sensores de emissão acústica e vibração. Neste computador estava presente o aplicativo gerenciador dos ensaios previamente desenvolvido;

- Realização de testes em vazio do sistema de aquisição de dados verificando toda a conectividade e o salvamento adequado dos sinais.

Fase 2: Preparação da ferramenta e dos ensaios:

- O suporte para brocas foi montado ao *spindle* do centro de Usinagem. Esse suporte apresenta fixação do tipo cone morse;

- Após a montagem do *spindle*, foi realizada a determinação do Zero-peça, utilizando para isso um apalpador com ponta de rubi. Dessa forma era possível fixar o corpo de prova cilíndrico e determinar seu centro. Este centro foi adotado como zero peça para a programação CNC para os ensaios de furação;

- Determinado a zero peça, a broca foi fixada ao suporte e foi realizada sua pressetagem;

- Neste instante o programa elaborado para a os ensaios era trazido à tela do centro de usinagem. Programa este previamente desenvolvido em código G.

- A cada ensaio as ferramentas e arestas eram substituídas de forma a sempre ter arestas novas no início de cada ensaio. Nesta pesquisa foram usadas ferramentas de corte com diferentes revestimentos; O acionamento do Fluido de corte era realizado no próprio Programa CNC (Função M08).

Fase 3: Realização de ensaios preliminares e ensaios definitivos:

- Esta pesquisa contou a realização de ensaios preliminares e definitivos. Adotou-se que para a realização dos ensaios a captação dos resultados partiria sempre com o centro de usinagem desligado;

- Para a realização dos ensaios inicialmente os parâmetros de corte eram adicionados aos programas CNC conforme planejamento experimental adotado (ensaio de 1 a 36);

- Ferramentas e arestas eram posicionadas na broca e está colocada no suporte preso ao *spindle*;

- Corpo de prova era fixado à placa com castanhas (isso quando estava iniciando um corpo de prova novo);

- Testes em vazio era realizado (sem tocar a peça) de forma a garantir que não haveria falhas na programação;

- Após todas essas etapas, para início dos ensaios primeiramente era acionado o aplicativo gerenciador de ensaios, desenvolvido em *labview 7.1*, que iniciava a captação dos resultados ainda com o spindle parado;

- Logo após o programa CNC era acionado e o ensaio iniciava, primeiramente o spindle era posto em rotação, conforme velocidade de corte desejada. Após isso, o spindle se posicionava na coordenada indicada para a realização do furo. Neste momento o fluido de corte era acionado e a broca começava a se movimentar verticalmente. Após descer 5mm a furação propriamente dita era realizada. A profundidade do furo era ajustada em função do avanço utilizado e em função do percurso de corte adotado fixo (7,1m) para os ensaios.

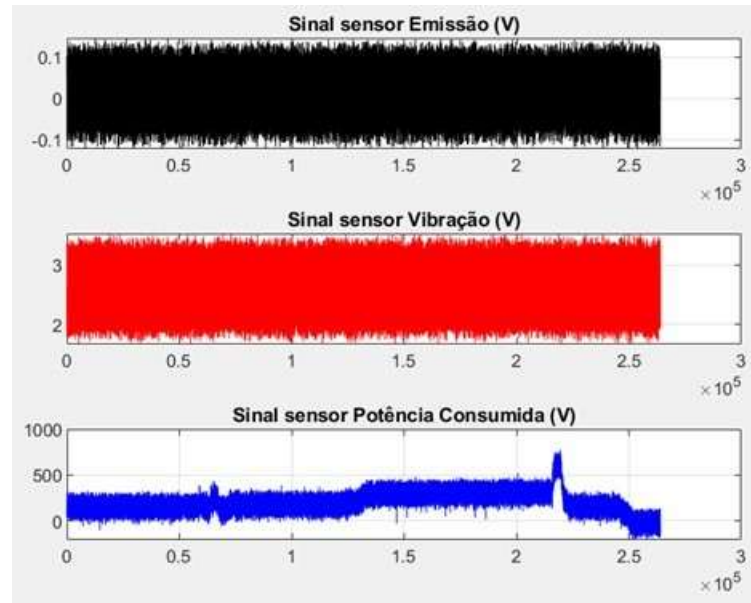
- Após a realização do furo, a broca era colocada na posição inicial do programa;

- Spindle era desligado;

- Aplicativo gerenciador do ensaio era desligado e os ensaios ficavam registrados em arquivos conforme já descritos (Figura 30);



Figura 30 - Arquivos salvos de potência, vibração e emissão de todo o ensaio.



Fonte: Autoria própria.

### 3.2.2 Potência consumida

A aquisição da potência consumida pelo motor do centro de usinagem foi feita através de um sensor transdutor de corrente, marca LEM, modelo AT 100 B10. (Figura 31).

O sensor, em função da corrente elétrica utilizada no motor, gera um sinal proporcional, em Volts, que é captado pela placa de aquisição de dados e armazenado durante a execução dos ensaios. O software faz as conversões necessárias e fornece os valores correspondentes de potência consumida, em Watts.

Figura 31 - Sensor de corrente, marca LEM, modelo AT 100 B10



Fonte: Autoria própria

O sensor em função da corrente elétrica de uma das fases do motor gera uma saída proporcional de 0 a 10 Volts de Corrente Contínua (VCC), que é armazenada pelo computador. Como o sinal adquirido pelo sistema tem uma saída proporcional em volts é necessário converter o valor para ampères. O fabricante do sensor fornece a Equação x para a transformação do dado adquirido em volts para amperes.

$$I = U_{cc} * 10 \quad (4)$$

$I$  = corrente de uma das fases em ampères;

$U_{cc}$  = tensão de corrente contínua em volts.

Substituindo o valor da corrente, o valor da tensão de fase do motor do centro de usinagem (220 V) e o fator de potência (0,92) do motor, na Equação x que foi utilizada para transformar o sinal adquirido em volts para potência consumida em watts e, multiplicado toda a equação por  $\sqrt{3}$ , visto que o motor utilizado é trifásico, obtêm-se a Equação x.

$$P_c = I \times U_f \times F_p \times \sqrt{3} \quad (5)$$

$P_c$  = potência consumida, em watts;

$I$  = corrente alternada de uma das fases, em ampères;

$U_f$  = tensão de uma das fases, em volts;

$F_p$  = fator de potência.

$$P_c = U_{cc} * 10 * 0,92 * 220 * \sqrt{3} \quad (6)$$

### 3.2.3 Vibração

Para a aquisição dos valores de vibração foram utilizados um sensor piezoelétrico (acelerômetro) e um amplificador de sinal com saída retificada em RMS (valor quadrático médio), marca *Vibro Control*, modelo TV100 (Figura 32).

Os valores obtidos em VCC foram convertidos depois para valores de velocidade em mm/s através da Equação 7, fornecida pelo fabricante.

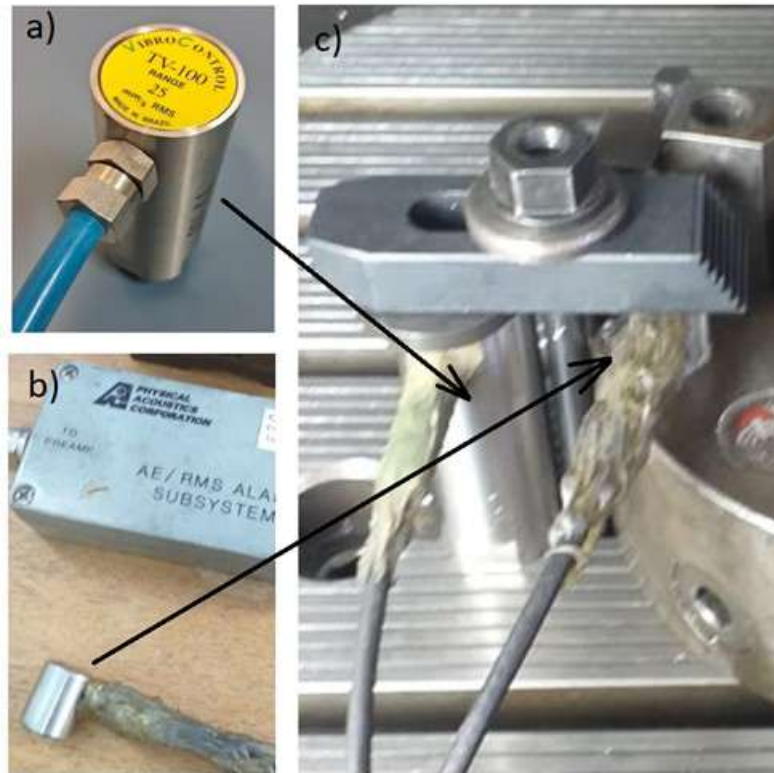
$$V = \frac{25 \cdot VC}{8} \quad (7)$$

#### 3.2.4 Emissão Acústica

Para a aquisição da emissão acústica foi usado um módulo de emissão acústica composto por um sensor (piezoelétrico) é um amplificador de sinal elétrico, marca PHYSICAL ACOUSTICS CORPORATION, modelo do sensor R15a, modelo do amplificador de sinal 1272-1000 (Figura 32), com faixa de operação de 50-400 kHz. Segundo Marinescu e Axinte (2008), o fenômeno de usinagem abrange a faixa de frequência de EA 70 a 115 kHz (fenômeno de cisalhamento). Segundo Ferrer *et al.* (2010), o fenômeno de aderência e arrastamento abrange a faixa de 25 a 110 KHZ e segundo Hase *et al.* (2006), o desgaste abrasivo abrange a faixa de 200 a 1000kHz.

O sinal elétrico proveniente do sensor corresponde à unidade VCC e é amplamente empregado nessa grandeza para expressar a emissão acústica, não havendo transformações para outras unidades.

Figura 32 - a) Sensor piezelétrico, marca *VibroControl*, modelo TV100; b) Sensor *piezo-elétrico* R15A e sistemas de captação e amplificação de emissão acústica; c) Disposição dos sensores de emissão acústica e de vibração na placa com castanhas.



Fonte: Autoria própria.

### 3.3 SISTEMA DE TRATAMENTO DE SINAIS

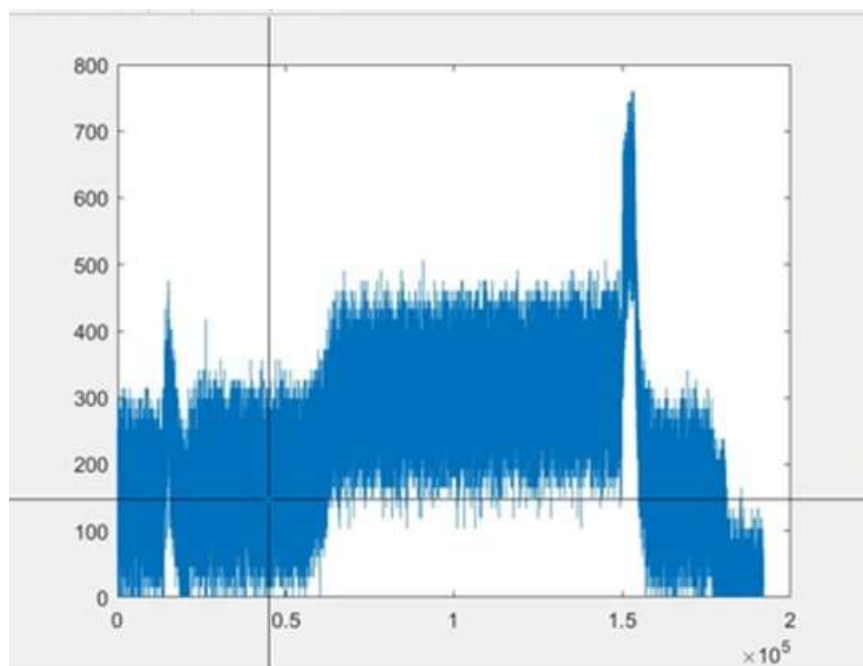
Os arquivos gerados e armazenados dos sinais dos sensores de potência, vibração e emissão acústica, gerados com 4800 valores para cada segundo de usinagem, foram tratados e filtrados usando um programa desenvolvido em *Matlab* 2023 e cujo objetivo foi pegar as informações mais importantes e desejadas desse banco de dados.

Abaixo são descritas as etapas utilizadas para o tratamento dos dados:

- inicialmente foi desenvolvido um programa em *Matlab* 2023 com características de abrir os arquivos dos ensaios, visualizar suas características através de gráficos, selecionar as regiões dos gráficos que representavam o momento dos ensaios, particionar os dados gerados e filtrá-los;

- Os arquivos armazenados continham os dados desde o acionamento do *Spindle* do centro e usinagem, passando pela usinagem propriamente dita e terminando no momento da parada da rotação da ferramenta;
- Para início do tratamento e filtragem dos dados primeiramente o programa desenvolvido era iniciado dentro da plataforma *MATLAB 2023*;
- Inicialmente o Programa solicitava o número do ensaio para que os arquivos referentes a esse ensaio fossem trabalhados (Potência, vibração e emissão acústica). Neste instante o número do ensaio era digitado (1 a 36);
- Como os dados dos ensaios estavam armazenados na forma de matriz (sendo que cada linha dessa matriz representa 1 (um) segundo de usinagem e possuindo 4800 colunas representando os 4800 pontos armazenados por segundo de usinagem), os arquivos referentes aos ensaios em estudo eram ordenados em um vetor de uma única coluna. Estes arquivos também passavam por uma substituição do “.” (ponto) gerado no LABVIEW por “,” (vírgula) de maneira a ser possível o tratamento através de *Matlab e minitab*;
- Após este tratamento inicial o arquivo de potência (sinal de corrente) era plotado na tela na forma de gráfico para visualização de todo o ensaio, (figura 33).

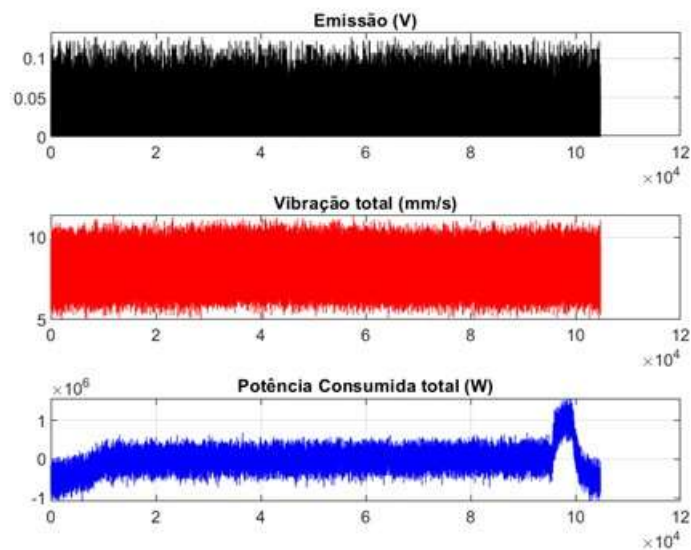
Figura 33 - Arquivo de potência (sinal de corrente) plotado na forma de gráfico para visualização de todo o ensaio.



Fonte: Autoria própria.

- Após plotagem do arquivo de potência na tela, a região do ensaio era delimitada, de forma que o arquivo era reduzido pegando apenas a região do ensaio;
- Neste instante também era indicado o consumo de potência em vazio, ou seja, a energia consumida pelo centro de usinagem antes da realização do ensaio. Assim, os dados de potência consumida foram calculados pela potência total menos a potência em vazio;
- Após delimitada a região dos ensaios propriamente dita, através do arquivo de potência, os arquivos de vibração e emissão acústicas do respectivo ensaio também eram delimitados e cortados pegando apenas a região do ensaio, (figura 34).

Figura 34 - Arquivos de potência, vibração e emissão delimitados dentro da região propriamente dita do ensaio.

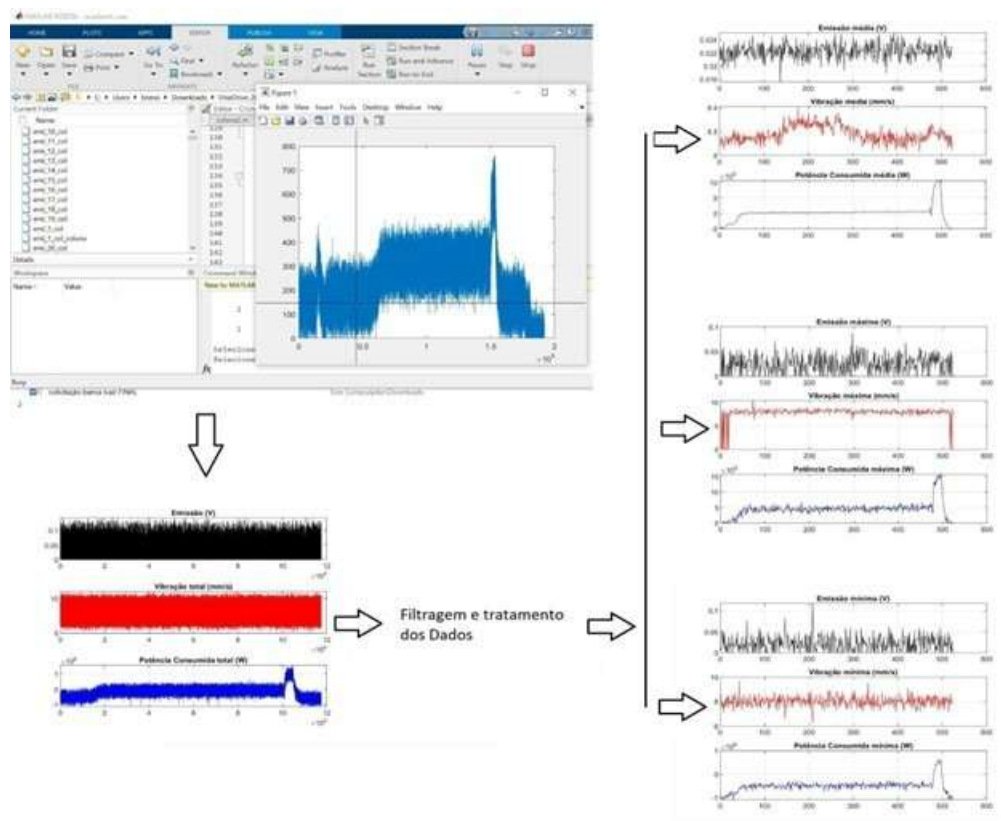


Fonte: Autoria própria.

- A partir deste instante, para o ensaio em questão, os dados originais, que eram dados dos sinais dos sensores, passaram por conversão usando equações de calibração e equações fornecidas pelos fabricantes. Assim, três novos arquivos foram criados com apenas a região do ensaio propriamente dito. Estes arquivos já continham resultados de potência, vibração e emissão acústica, sendo que o de potência é o de potência consumida (já descontado o valor em vazio);
- Após, foi aplicado um filtro senoidal de forma a eliminar ruídos eletroeletrônicos. Este filtro consistiu em fazer a média de cada 1000 valores consecutivos, eliminando oscilações senoidais presentes.

- Nesta pesquisa o interesse foi levantar valores médios, máximos e mínimos durante o ensaio; assim os arquivos anteriormente gerados foram processados, de forma a obter os resultados médios, máximos e mínimos de cada ensaio. Para obter valores médios dos ensaios calculou-se a média de cada 100 valores. Para obter valores máximos e mínimos, verificou-se qual o valor máximo e mínimo respectivamente, a cada 100 pontos.
- Após gerados os valores máximos, médios e mínimos, estes dados foram salvos em novos arquivos. Assim. Os arquivos finais representam um arquivo com tamanho 200 vezes menor que o arquivo original;
- Estes arquivos foram plotados em tela e salvos na forma de figura (TIF);
- Com os resultados de valores médios, valores máximos e valores mínimos para todo o ensaio, foram calculados o valor médio, máximo e mínimo de cada ensaio. Ou seja, para cada ensaio, tinha um valor médio de potência consumida, vibração e emissão acústica. Valores estes que foram usados nas análises de variância e testes de *tukey* em uma análise quantitativa.

Figura 35 - Fluxo de tratamento dos dados coletados



Fonte: Autoria própria.

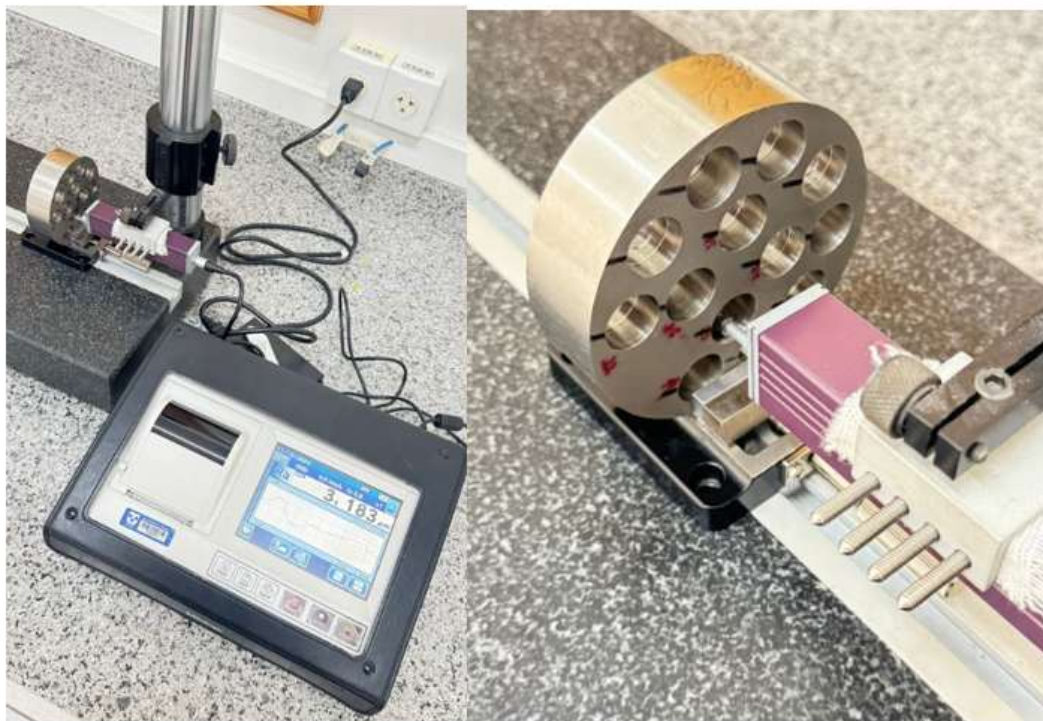


### 3.4 MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE

A rugosidade foi analisada através dos parâmetros  $R_a$  (rugosidade média) e  $R_t$  (rugosidade total). O comprimento de amostragem (*cut-off*) adotado foi de 0,25 [mm] e o percurso de medição ( $l_m$ ), de 1,75 [mm], conforme recomendações da norma ABNT NBR ISO 4288 (2008).

Estes parâmetros foram obtidos utilizando-se um rugosímetro da marca Mitutoyo, modelo *Surftest* Sj-310, com ponta apalpadora de diamante na haste de medição em formato de cone esférico e raio de ponta de 2 [ $\mu\text{m}$ ] (Figura 36). Cada furo foi medido três vezes, após corte da peça através de eletroerosão.

Figura 36 - Rugosímetro marca Mitutoyo Modelo: Surftest SJ-310.



Fonte: Autoria própria.

Foram realizadas no total 3 medidas de rugosidade em cada ensaio de usinagem, sendo levantados valores de  $R_a$  (Rugosidade média).



### 3.5 DESGASTE E AVARIAS DAS FERRAMENTA

O desgaste das arestas de corte utilizadas nos ensaios fora avaliado por um microscópio modelo QS-LBZ -Visual QUICK SCOPE série 359 da marca Mitutoyo apresentado na Figura 38 que possui um sistema de captura de imagens através de software do equipamento onde foi possível capturar imagens e registrar o aspecto do desgaste e avarias. Neste mesmo equipamento foram coletadas imagens dos cavacos, para identificação das formas dos cavacos. Também foi utilizado o Microscópio eletrônico de varredura ambiental Zeiss EVO LS-15, com EDS para análises de desgastes e formação de aresta postiça de corte.

Figura 37 - Microscópio óptico da marca Zeiss, modelo STEMI 2000.



Fonte: Autoria própria.

O desgaste das arestas de corte utilizadas nos ensaios fora avaliado por um microscópio modelo QS-LBZ -Visual QUICK SCOPE série 359 da marca Mitutoyo apresentado na Figura 38 que possui um sistema de captura de imagens através de software do equipamento onde foi possível capturar imagens e registrar o aspecto do desgaste e avarias. Neste mesmo equipamento foram coletadas imagens dos cavacos, para identificação das formas dos cavacos.

Figura 38 - Microscópio marca Mitutoyo modelo QS-LBZ -Visual QUICK SCOPE série 359 e Microscópio eletrônico de varredura ambiental Zeiss EVO LS-15, com EDS



Fonte: Autoria Própria

### 3.6 TIPOS E FORMAS DOS CAVACOS

Os cavacos gerados em cada ciclo de usinagem foram coletados e armazenados para análise macro e microscópica. Na Figura 39 são apresentados alguns cavacos obtidos.

Por meio de um microscópio modelo QS-LBZ -Visual QUICK SCOPE série 359 da marca Mitutoyo (Figura 38) foram coletadas imagens dos cavacos, para identificação das formas dos cavacos.

Eles foram classificados segundo sua morfologia (contínuos, descontínuos ou segmentados) e formato (fita, helicoidal, espiral ou lascas), conforme recomendações da norma (ABNT, 2017).

Figura 39 - Exemplos de cavacos obtidos nos ensaios realizados.

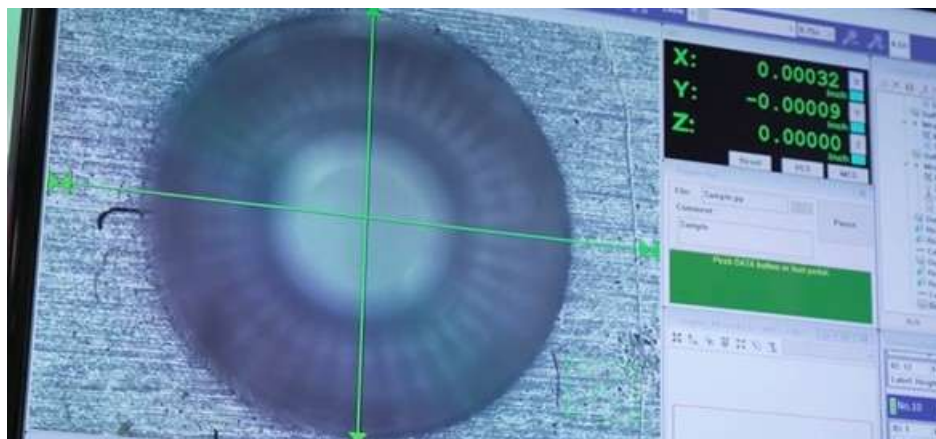


Fonte: Autoria própria.

### 3.7 DESVIO DE CIRCULARIDADE

Para a medição do desvio de circularidade utilizou-se o microscópio modelo QS-LBZ -Visual QUICK SCOPE série 359 da marca Mitutoyo usando ferramenta óptica para medição de circularidade com resolução de 1  $\mu\text{m}$ , Figura 40. O desvio de circularidade foi medido no círculo tangente à face da peça.

Figura 40 - Ferramenta para medição da circularidade microscópio modelo QS-LBZ - Visual QUICK SCOPE série 359 da marca Mitutoyo



Fonte: Autoria própria.

### 3.8 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTO ESTATÍSTICO

O delineamento experimental utilizado foi do tipo arranjo fatorial, com 3 fatores de entrada (recobrimento, velocidade de corte e avanço) sendo uma com dois níveis, e duas com 3 níveis, respectivamente, usando 2 repetições.

Após os ensaios, os dados coletados (rugosidade média, potência de corte, emissão acústica, vibração, desgaste de flanco, circularidade) foram filtrados e tratados utilizando o *Software Matlab 2020*.

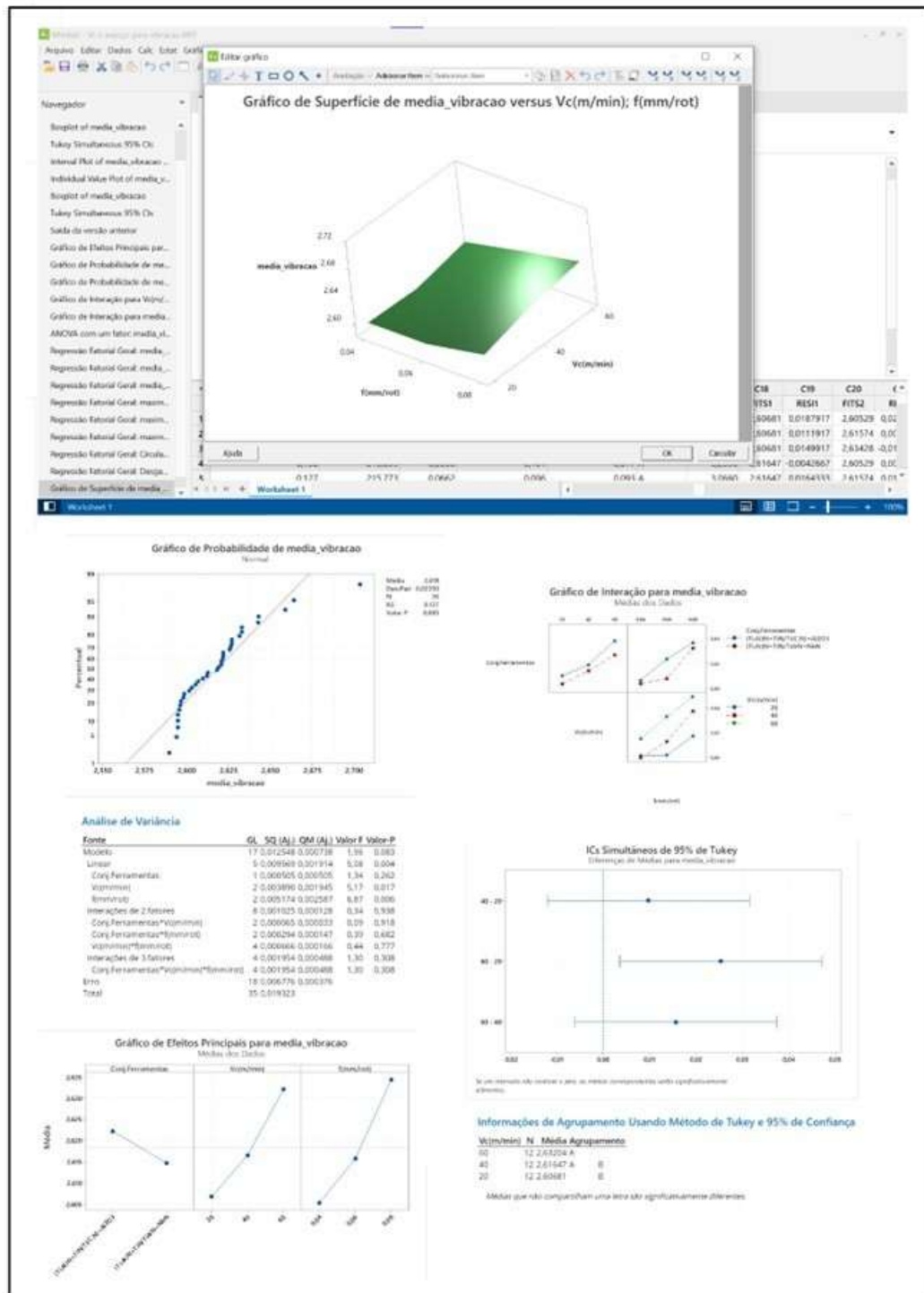
Após tratados, os dados foram organizados e analisados utilizando software Minitab 2020. A seguir são apresentadas as etapas de análises realizadas:

- Inicialmente realizou-se o teste de Normalidade. A aplicação desse teste permite verificar se os dados seguem a distribuição normal, crucial para a aplicação de testes paramétricos.

- Aplicou-se o teste Shapiro-Wilk, sendo o teste mais poderoso para todos os tipos de distribuição e tamanhos de amostra conforme (Razali e Bee, 2011).
- Posteriormente aplicou-se análise de variância (ANOVA) com o objetivo de comparar médias das diferentes variáveis de saída em relação às variáveis de entrada (fatores);
- Em seguida foi realizado o Teste de *Tukey* adotando-se um nível de confiança de 95%. Este teste permite avaliar em quais grupos dos fatores analisados há diferença significativa, enquanto a análise de variância apenas evidencia que a distribuição de pelo menos um dos grupos do fator analisado se difere das demais, mas não indica entre quais grupos a diferença é significativa.
- Com essas análises foi possível verificar a influência dos fatores de entrada nas variáveis de saída. Para ajudar na interpretação dos resultados foram gerados também os gráficos de efeitos principais, de interação e as superfícies contento o comportamento das variáveis de saída

Na Figura 41 é apresentada a sequência de análises realizadas neste trabalho.

Figura 41 - Utilização do Minitab 2020 para análise de normalidade, análise de variância, teste de *Tukey* e geração de gráficos de efeitos principais, interações e superfícies.



Fonte: Autoria Própria

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

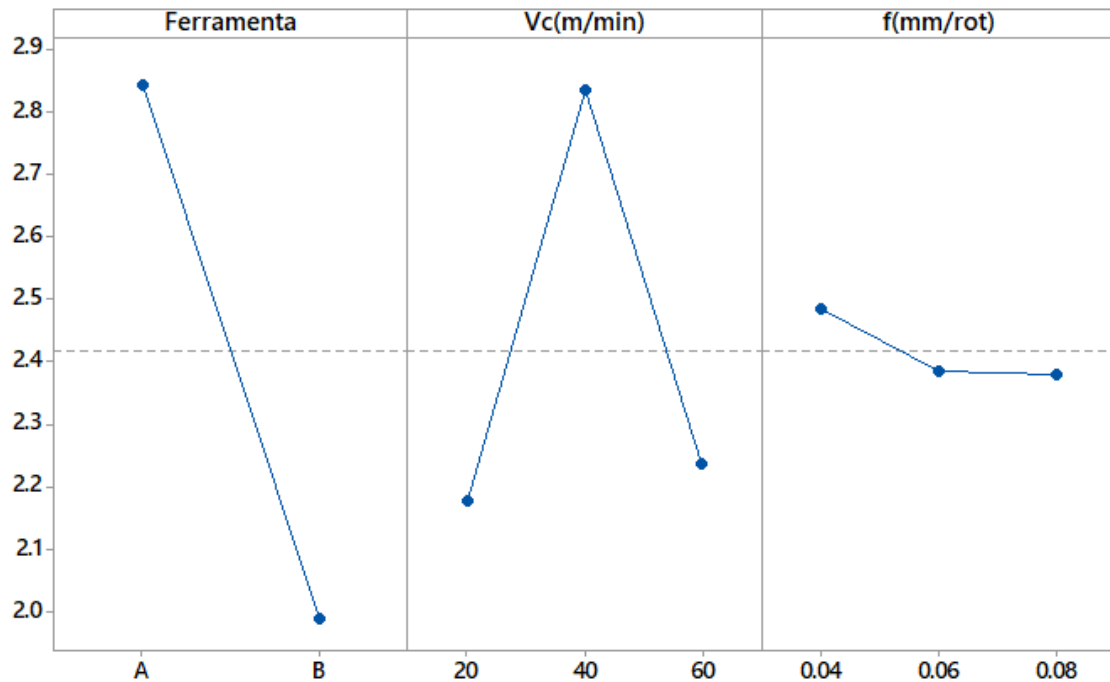
A pesquisa concentra-se principalmente na avaliação do processo de furação da superliga VAT32® com diferentes conjuntos de ferramentas de metal duro com diferentes revestimentos (conjunto A: inserto interno de (Ti,Al)N+TiN e inserto externo com Ti(C,N)+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; conjunto B: inserto interno de (Ti,Al)N+TiN e inserto externo revestido com TiAlN+NbN). A seguir, são apresentados os resultados para as variáveis de saída: rugosidade média ( $R_a$ ), desgaste de flanco ( $V_b$ ), circularidade, potência consumida (média e máxima), emissão acústica (média e máxima), vibração (média e máxima), tipos e formas de cavacos, análise qualitativa de desgastes e avarias, juntamente com as análises estatísticas realizadas utilizando a análise de variância (ANOVA) e o teste de Tukey.

### 4.1 ANÁLISE DA RUGOSIDADE MÉDIA ( $R_a$ )

Os efeitos principais na rugosidade média são apresentados na Figura 42. Nota-se que o conjunto de ferramentas com inserto interno revestido com (Ti,Al)N+TiN e inserto externo revestido com TiAlN+NbN proporcionou a menor rugosidade média (2,0  $\mu\text{m}$ ).

A velocidade de corte de 40 m/min resultou no pior acabamento (2,7  $\mu\text{m}$ ), enquanto as velocidades de 20 e 60 m/min produziram acabamentos similares (2,1  $\mu\text{m}$ ). A variação no avanço não causou alterações na rugosidade média dos furos.

Figura 42 - Efeitos Principais para Rugosidade

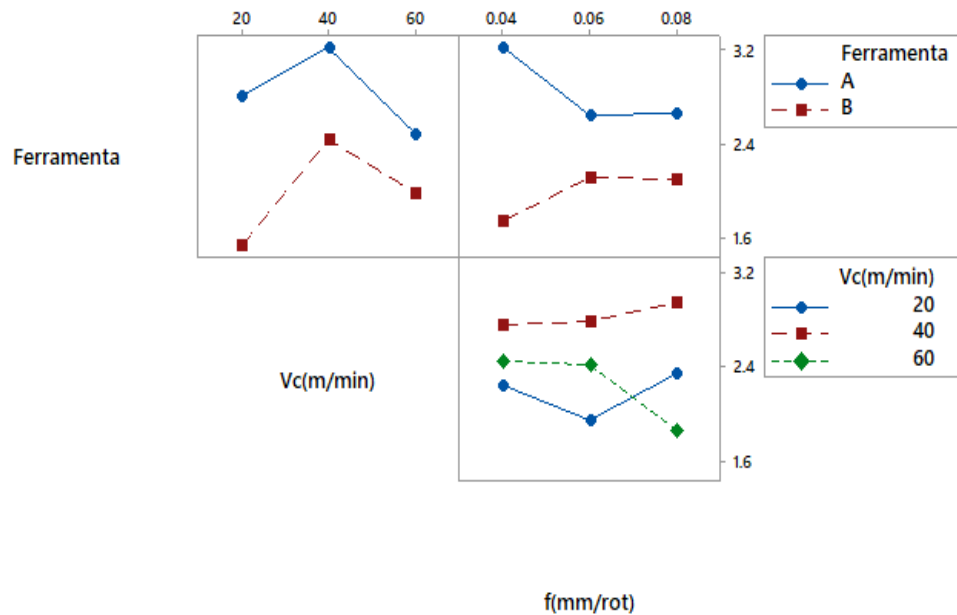


Fonte: Autoria Própria

As interações entre os conjuntos de ferramentas, velocidade de corte e taxas de avanço testadas podem ser vistas na Figura 43. A combinação de ferramentas revestidas com TiAlN+NbN com velocidade de corte de 20 m/min e com um avanço de 0,04 mm/rot, proporcionou menor rugosidade (1,6 μm).

Observando os efeitos principais e as interações nota-se que a velocidade de corte de 40m/min prejudicou muito o acabamento superficial em grande parte, pois nas velocidades de 20 e 40 m/min houve o favorecimento da formação de aresta, principalmente quando usando recobrimento de Ti(C,N)+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (ver item 4.10). O conjunto de ferramentas revestido com TiAlN+NbN mostrou-se mais apropriado para melhores acabamentos.

Figura 43 - Interação para Rugosidade



Fonte: Autoria Própria

Utilizando a análise de variância (ANOVA) (Tabela 3), observou-se que os diferentes conjuntos de ferramentas utilizados (P-Valor = 0,002) foram relevantes para a rugosidade média. A variação na velocidade de corte (P-Valor = 0,034) também influenciou significativamente na rugosidade.

A variação no avanço (P-Valor = 0,997) não influenciou significativamente a qualidade superficial do furo. Não foram encontradas interações de segunda ordem que influenciassem o acabamento superficial.

Tabela 3 - Anova para Rugosidade ( $R_a$ )

| Fonte                                  | DF  | Adj SS  | Adj MS | F     | P            | Contrib. |
|----------------------------------------|-----|---------|--------|-------|--------------|----------|
| Ferramentas                            | 1   | 11.213  | 11.213 | 10.41 | <b>0.002</b> | 0.088    |
| Velocidade de corte                    | 2   | 7.574   | 3.787  | 3.52  | <b>0.034</b> | 0.060    |
| Avanço                                 | 2   | 0.006   | 0.003  | 0.000 | 0.997        | 0.000    |
| Ferramentas*Velocidade de corte        | 2   | 2.798   | 1.399  | 1.3   | 0.278        | 0.022    |
| Ferramentas*Avanço                     | 2   | 3.814   | 1.906  | 1.77  | 0.176        | 0.030    |
| Velocidade de corte*Avanço             | 4   | 2.832   | 0.708  | 0.66  | 0.623        | 0.022    |
| Ferramentas*Velocidade de corte*Avanço | 4   | 1.827   | 0.4567 | 0.42  | 0.791        | 0.014    |
| Erro                                   | 90  | 96.964  | 1.076  |       |              |          |
| Total                                  | 107 | 126.964 |        |       |              |          |

Fonte: Autoria Própria



Os resultados indicam ainda, observando a contribuição de cada fator, que a ferramenta foi o fator que afeta a rugosidade em 8.8% enquanto a velocidade de corte afetou apenas 6%. Não foram percebidas interações entre os fatores de entrada, muito devido a alta influência da ferramenta frente aos outros fatores.

Por fim, o teste de Tukey realizado para os resultados de rugosidade comprovaram haver diferença significativa nos resultados quando usando os diferentes conjuntos de ferramentas. Não houve diferenças estatisticamente significativas quando usando diferentes velocidades de corte e diferentes avanços, nas faixas adotadas neste trabalho (Ver quadro resumo no final deste capítulo).

O nitreto de nióbio é considerado um material promissor para aplicações técnicas e industriais, devido às suas propriedades físicas e químicas atrativas, como alta temperatura de transição supercondutora ( $T_c$ ), resistência ao desgaste, estabilidade térmica e química, e alta dureza, que tornam o material útil para diversas aplicações (Choi; Kumta, 2011; Farha *et al.*, 2017).

Para efeito de comparação dos resultados obtidos, segue três trabalhos que analisaram a usinagem da VAT32®:

- Kondo (2019), em sua pesquisa, usinou a VAT32® com ferramenta com recobrimento de  $Ti(C,N)+Al_2O_3$  utilizando velocidades de corte de 120 a 150m/min, com avanços de 0,3 a 0,5mm/rot e obteve rugosidades médias entre 2 e 4  $\mu m$ .

- Ribeiro (2020), usinando a VAT32® (torneamento) com ferramentas cerâmicas ( $Al_2O_3 + MgO$  e  $Al_2O_3 + Cr_2O_3$ ), com avanço de 0,10mm/rot obteve rugosidades médias de, aproximadamente, 1 a 3  $\mu m$ .

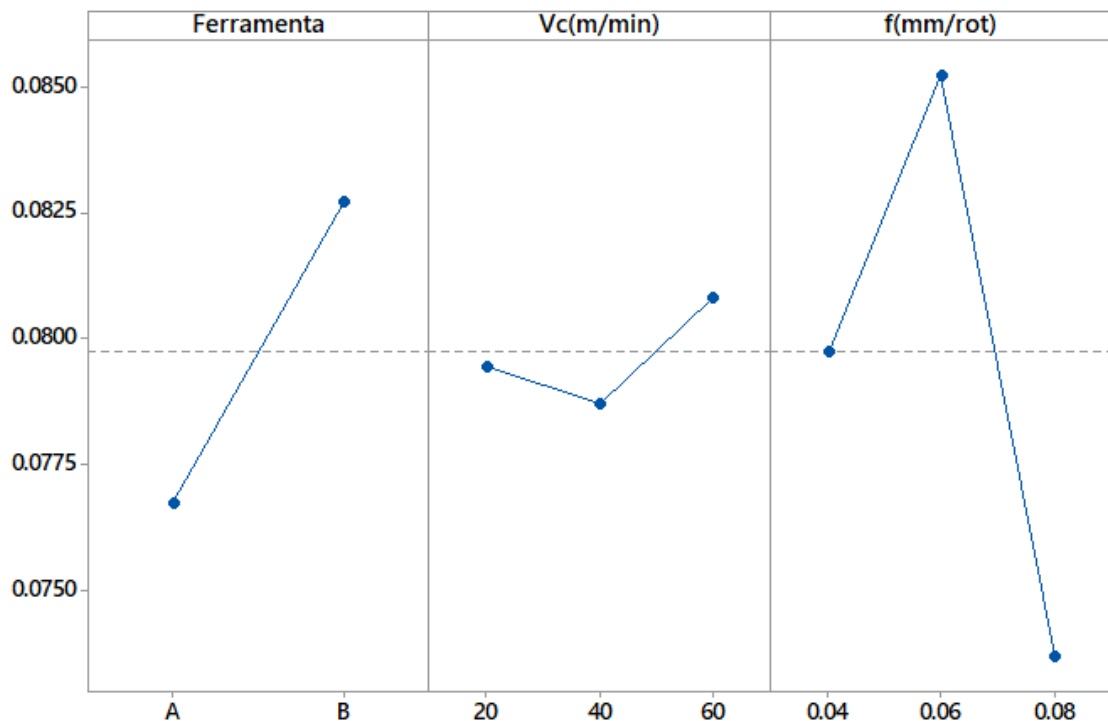
- Bonhin (2016) avaliou a eficiência da ferramenta de corte de alumina na usinagem da superliga VAT32®, utilizando velocidades de corte de 270, 280 e 300 m/min, velocidades de avanço de 0,10 e 0,18 mm/rotação e profundidade de corte de 0,50 mm, obtendo rugosidades médias entre 1 e 5  $\mu m$ .

Ainda segundo Farina, Liberto e Barbosa (2013), a dureza da VAT32® (~38HRC) com a elevada fração de carbeto, especialmente de NbC, contribui significativamente para a resistência mecânica e para a resistência ao desgaste da liga, dificultando a usinagem, devido à dificuldade em trabalhar com o carbeto de nióbio.

## 4.2 ANÁLISE DO DESVIO DE CIRCULARIDADE

Os resultados de desvio de circularidade indicam uma tendência de menores desvios para o conjunto de ferramentas A (recobrimento de  $\text{Ti(C,N)+Al}_2\text{O}_3$ ), utilizando velocidade de 40m/min e avanço de 0,08mm/rot (Figura 44).

. Figura 44 - Efeitos Principais para Desvio de Circularidade



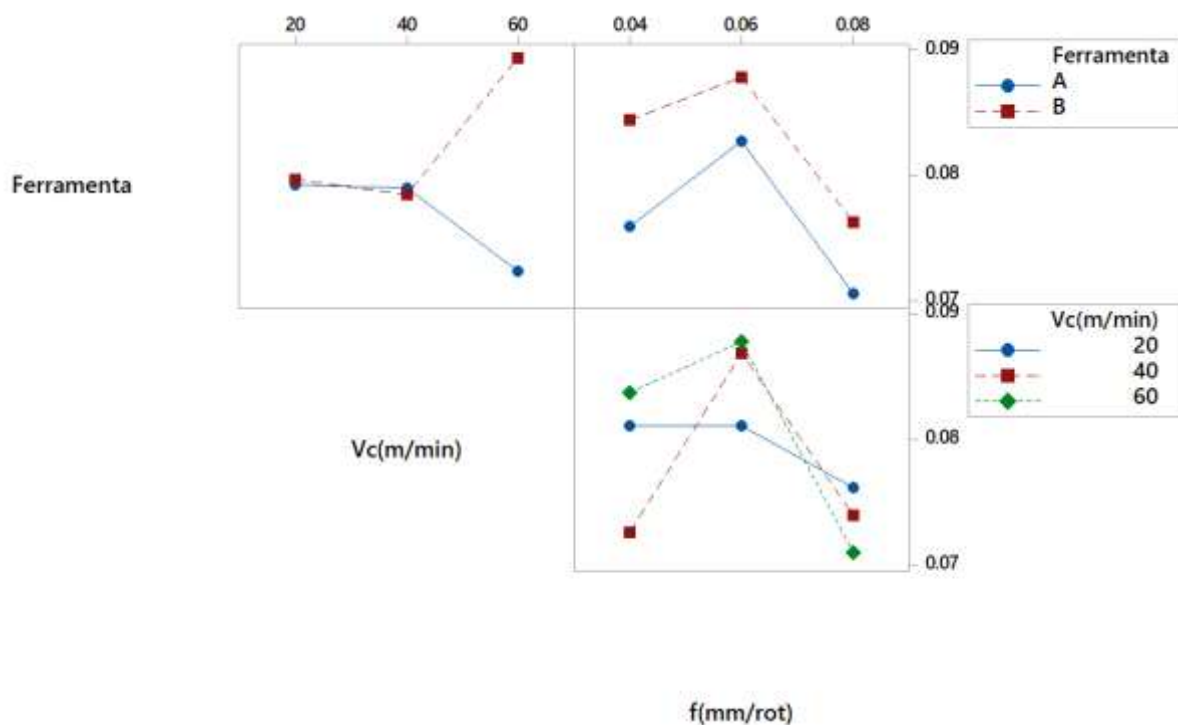
Fonte: Autoria Própria

Analisando as interações (Figura 45) observa-se a variação do desvio de circularidade entre os recobrimentos utilizados e velocidades de corte, só ocorreu na velocidade de 60m/min, com melhores resultados para  $\text{Ti(C,N)+Al}_2\text{O}_3$ .

Entre ferramentas utilizadas e avanços nota-se que a ferramenta  $\text{Ti(C,N)+Al}_2\text{O}_3$  sempre apresentou menores desvios e o avanço de 0,08mm/rot proporcionou menor desvio para os dois conjuntos de ferramentas utilizados.

Observando a interação de velocidade de corte e avanço só é possível observar a tendência de menores valores para avanço de 0,08mm/rot. em qualquer das velocidades utilizadas.

Figura 45 - Interação para Desvio de Circularidade



Fonte: Autoria Própria

Apesar das tendências observadas e já comentadas, a análise de variância não mostrou haver diferenças significativas nos resultados do desvio de circularidade para os diferentes recobrimentos utilizados foi observado para as velocidades de corte e avanços utilizados. (Tabela 4).

Tabela 4 - Anova para Desvio de Circularidade

| Fonte                                  | DF | Adj SS | Adj MS | F     | P     | Contrib. |
|----------------------------------------|----|--------|--------|-------|-------|----------|
| Ferramentas                            | 1  | 0.000  | 0.000  | 0.300 | 0.588 | 0.012    |
| Velocidade de corte                    | 2  | 0.000  | 0.000  | 0.110 | 0.893 | 0.009    |
| Avanço                                 | 2  | 0.000  | 0.000  | 0.300 | 0.744 | 0.023    |
| Ferramentas*Velocidade de corte        | 2  | 0.001  | 0.000  | 0.650 | 0.532 | 0.051    |
| Ferramentas*Avanço                     | 2  | 0.000  | 0.000  | 0.250 | 0.780 | 0.019    |
| Velocidade de corte*Avanço             | 4  | 0.000  | 0.000  | 0.210 | 0.929 | 0.033    |
| Ferramentas*Velocidade de corte*Avanço | 4  | 0.002  | 0.001  | 1.020 | 0.426 | 0.157    |
| Erro                                   | 18 | 0.010  | 0.001  |       |       |          |
| Total                                  | 35 | 0.015  |        |       |       |          |

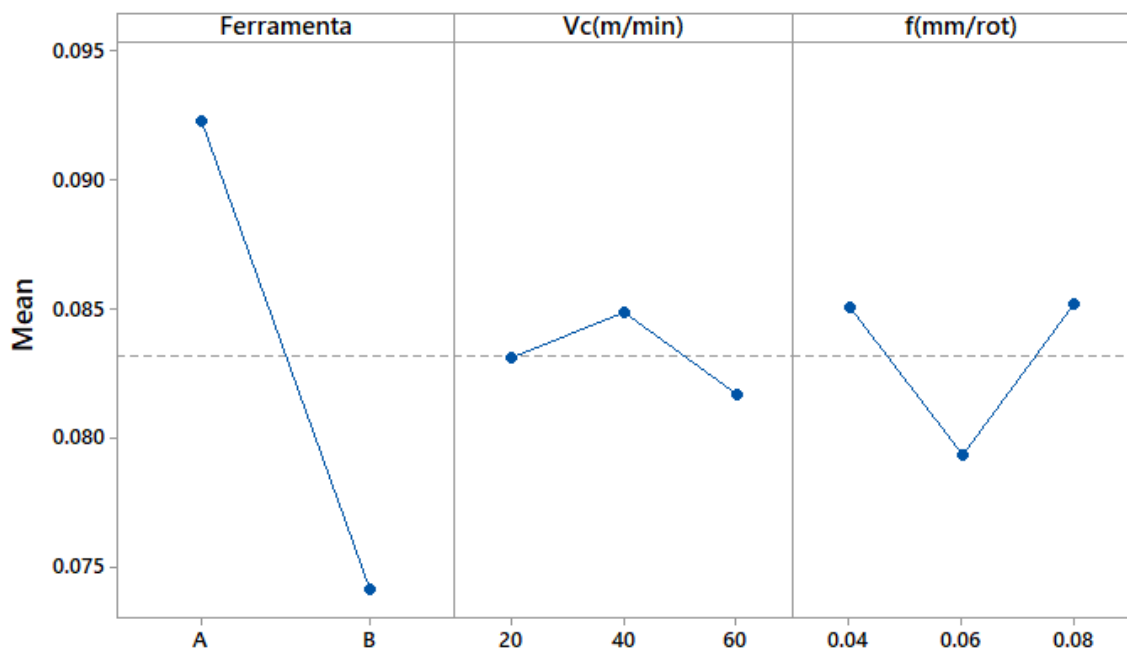
Fonte: Autoria Própria

### 4.3 ANÁLISE DO DESGASTE DE FLANCO (VB)

Os efeitos principais sobre o desgaste das ferramentas testadas estão presentes na Figura 46. Da mesma forma que o conjunto de ferramentas com inserto interno revestido com (Ti,Al)N+TiN e inserto externo revestido com TiAlN+NbN proporcionou menor rugosidade média, também apresentou menor desgaste de flanco. As características geométricas das ferramentas com TiAlN+NbN foram melhor preservadas proporcionando melhores resultados também de rugosidade.

A velocidade de corte de 60 m/min apresentou o menor desgaste, juntamente com o avanço de 0,06 mm/rot.

Figura 46 - Efeitos principais para o Desgaste de Flanco (Vb)



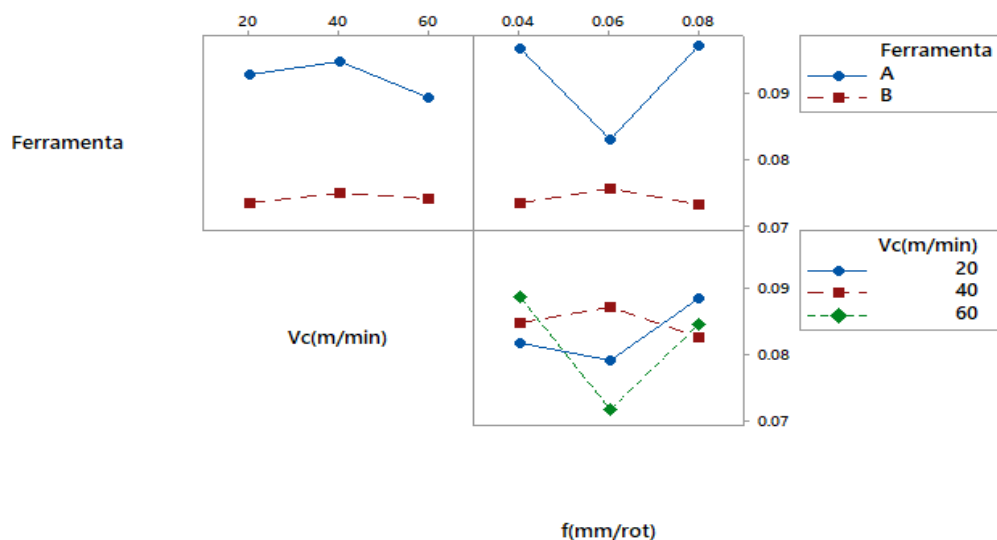
Fonte: Autoria Própria

Pode-se notar, analisando a Figura 47, que o conjunto de ferramentas com inserto interno revestido com (Ti,Al)N+TiN e inserto externo revestido com TiAlN+NbN apresenta menor desgaste em qualquer condição de velocidade de corte e avanço. Observa-se também que a variação na velocidade de corte passou a ter maior influência no desgaste em avanços mais elevados.

Outra observação importante está novamente na condição de 40m/min que os desgastes foram ampliados em todas as condições, corroborando com a pior

rugosidade observada nesta condição. Observa-se ainda que o revestimento TiAlN+NbN foi menos sensível ao desgaste.

Figura 47 - Interações para o Desgaste de Flanco ( $V_b$ )



Fonte: Autoria Própria

Para o desgaste de flanco, por meio da ANOVA foi possível observar que os diferentes conjuntos de revestimentos utilizados influenciaram significativamente o desgaste da ferramenta (P-Valor = 0,013) com uma contribuição de 25% nestes resultados. Observou-se também que a variação da velocidade não influenciou significativamente o desgaste de flanco (P-Valor = 0,926). A variação na taxa de avanço não influenciou significativamente o desgaste (P-Valor = 0,715). Não foram encontradas interações de segunda ordem que influenciassem o desgaste. Esse resultado corrobora os resultados encontrados, (Tabela 5).

Tabela 5 - ANOVA para efeitos principais sobre desgaste de flanco VB

| Fonte                                  | DF | Adj SS | Adj MS | F     | P            | Contrib. |
|----------------------------------------|----|--------|--------|-------|--------------|----------|
| Ferramentas                            | 1  | 0.003  | 0.003  | 7.560 | <b>0.013</b> | 0.254    |
| Velocidade de corte                    | 2  | 0.000  | 0.000  | 0.080 | 0.926        | 0.005    |
| Avanço                                 | 2  | 0.000  | 0.000  | 0.340 | 0.715        | 0.023    |
| Ferramentas*Velocidade de corte        | 2  | 0.000  | 0.000  | 0.050 | 0.955        | 0.003    |
| Ferramentas*Avanço                     | 2  | 0.001  | 0.000  | 0.670 | 0.522        | 0.045    |
| Velocidade de corte*Avanço             | 4  | 0.001  | 0.001  | 0.380 | 0.821        | 0.051    |
| Ferramentas*Velocidade de corte*Avanço | 4  | 0.000  | 0.000  | 0.110 | 0.977        | 0.015    |
| Erro                                   | 18 | 0.007  | 0.000  |       |              |          |

Fonte: Autoria Própria

Da mesma forma observada para os resultados de rugosidade, O teste de Tukey realizado para os resultados de desgaste mostraram diferenças entre os revestimentos usados, porém a variação de velocidade e avanço não apresentaram mudanças estatisticamente significativas no desgaste (Ver quadro resumo no final deste capítulo).

Observa-se que as características térmicas, mecânicas e metalúrgicas das superligas dificultam demasiadamente a furação, proporcionando elevado nível de desgaste para apenas um furo realizado (VB entre 0,07 e 0,10  $\mu\text{m}$ ).

De uma maneira geral, o tipo de desgaste dominante foi o de flanco e os mecanismos foram abrasão. Entre as avarias presentes observou-se APC e lançamentos.

Segundo Farina, Liberto e Barbosa (2013), a dificuldade em usinar o VAT32 deve-se à sua dureza ( $\sim 38\text{HRC}$ ) e a presença de carbetos, especialmente de NbC.

Durante a furação, as ferramentas estão submetidas a elevadas tensões térmicas e mecânicas, o que pode resultar em desgaste acelerado da aresta de corte. A incorporação de carbetos, especialmente em materiais como o aço ferramenta e o metal duro, pode desempenhar um papel crucial na manutenção da integridade da ferramenta, promovendo uma maior durabilidade e prolongando sua vida (Schneider *et al.*, 2005).

A presença de carbetos nas ferramentas pode contribuir para melhorar sua resistência à oxidação, fator particularmente relevante em processos de usinagem que envolvem temperaturas elevadas, como a furação de superligas à base de níquel. De acordo com Göltekin *et al.* (2010), a furação de superligas impõe desafios adicionais devido à combinação de altas forças de corte e temperaturas extremas, que podem acelerar o desgaste da ferramenta.

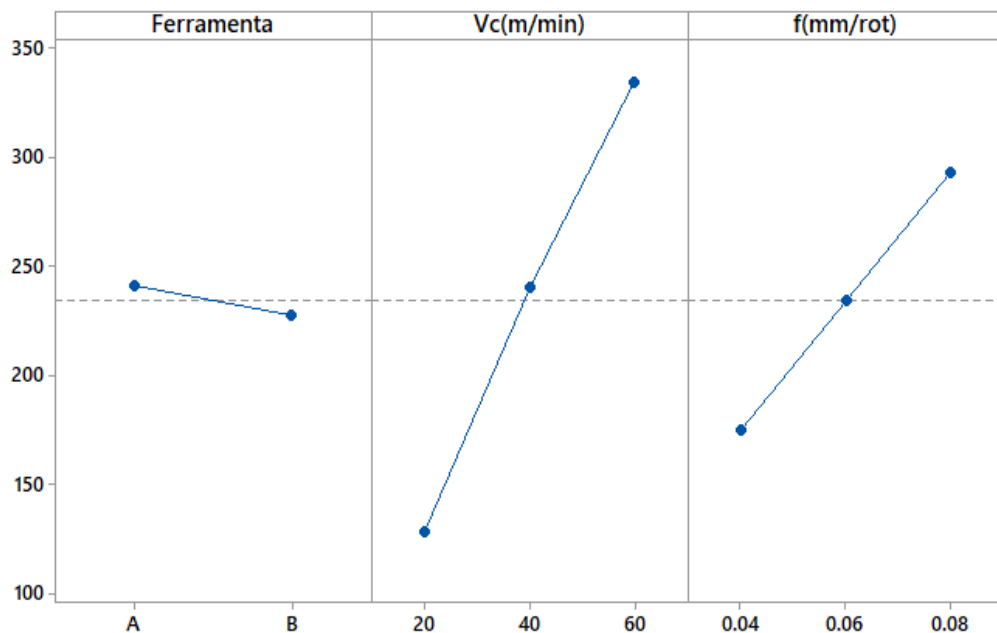
#### 4.4 ANÁLISE DA POTÊNCIA CONSUMIDA MÉDIA

Analisando os efeitos principais para a Potência consumida (Figura 48), observa-se que os menores valores foram obtidos com ferramentas revestidas com

TiAlN+NbN, para menor velocidade de corte (20 m/min) e para menor taxa de avanço (0,04 mm/rot).

Conforme já esperado, a energia consumida depende da área da seção de corte (que é dependente do avanço e da profundidade de corte) e da velocidade de corte que influencia na taxa de remoção.

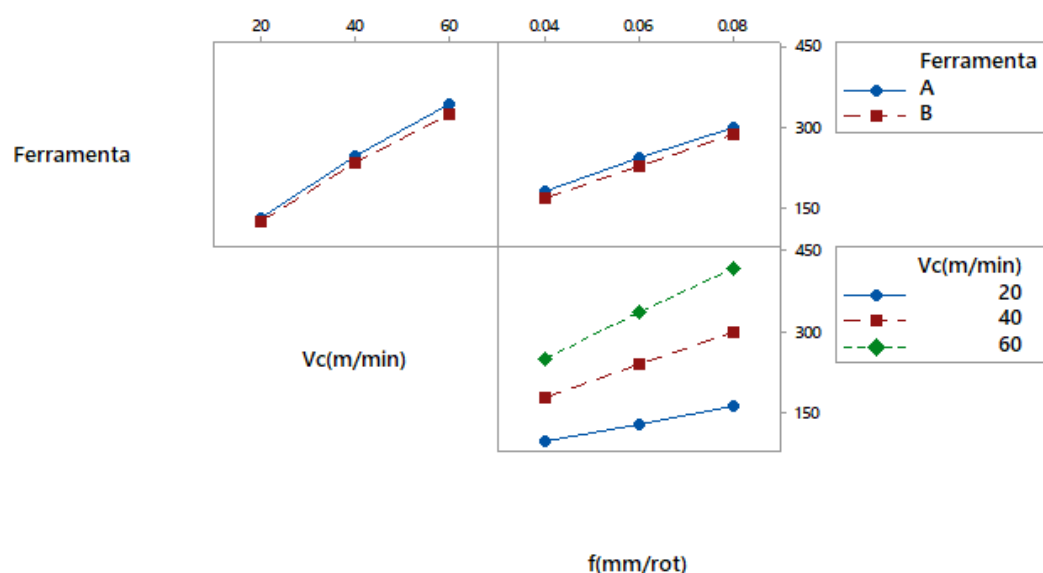
Figura 48 - Efeitos principais para a Potência Média Consumida (W)



Fonte: Autoria Própria

Analisando as interações para a energia consumida (Figura 49), observa-se que há um efeito combinado da velocidade de corte e da taxa de avanço, mostrando que, ao aumentar o avanço e a velocidade de corte, o consumo de energia aumenta de forma acentuada e não proporcional, indicando que há uma sinergia entre essas variáveis.

Figura 49 - Interações para a potência média consumida (W)



Fonte: Autoria Própria

A potência média consumida, (tabela 6) foi significativamente influenciada pelos tipos de revestimentos das ferramentas (P-valor  $<0,05$ ), velocidade de corte (P-valor  $<0,05$ ) e taxa de avanço (P-valor  $<0,05$ ), com uma contribuição atribuída ao revestimento da ferramenta de 0,40%, para a velocidade de corte de 72,30% e para o avanço de 23,80%. Em qualquer cenário, o revestimento TiAlN+NbN proporcionou menor consumo de energia, além de oferecer menor desgaste e menor rugosidade.

Tabela 6 - Anova para potência média consumida

| Fonte                                  | DF | Adj SS | Adj MS | F       | P            | Contrib. |
|----------------------------------------|----|--------|--------|---------|--------------|----------|
| Ferramentas                            | 1  | 1520   | 1520   | 32.47   | <b>0.000</b> | 0.004    |
| Velocidade de corte                    | 2  | 255744 | 127872 | 2732.06 | <b>0.000</b> | 0.723    |
| Avanço                                 | 2  | 84272  | 42136  | 900.26  | <b>0.000</b> | 0.238    |
| Ferramentas*Velocidade de corte        | 2  | 196    | 98     | 2.09    | 0.153        | 0.001    |
| Ferramentas*Avanço                     | 2  | 28     | 14     | 0.3     | 0.744        | 0.000    |
| Velocidade de corte*Avanço             | 4  | 10981  | 2745   | 58.65   | <b>0.000</b> | 0.031    |
| Ferramentas*Velocidade de corte*Avanço | 4  | 110    | 28     | 0.59    | 0.676        | 0.000    |
| Erro                                   | 18 | 842    | 47     |         |              |          |
| Total                                  | 35 | 353693 |        |         |              |          |

Fonte: Próprio autor



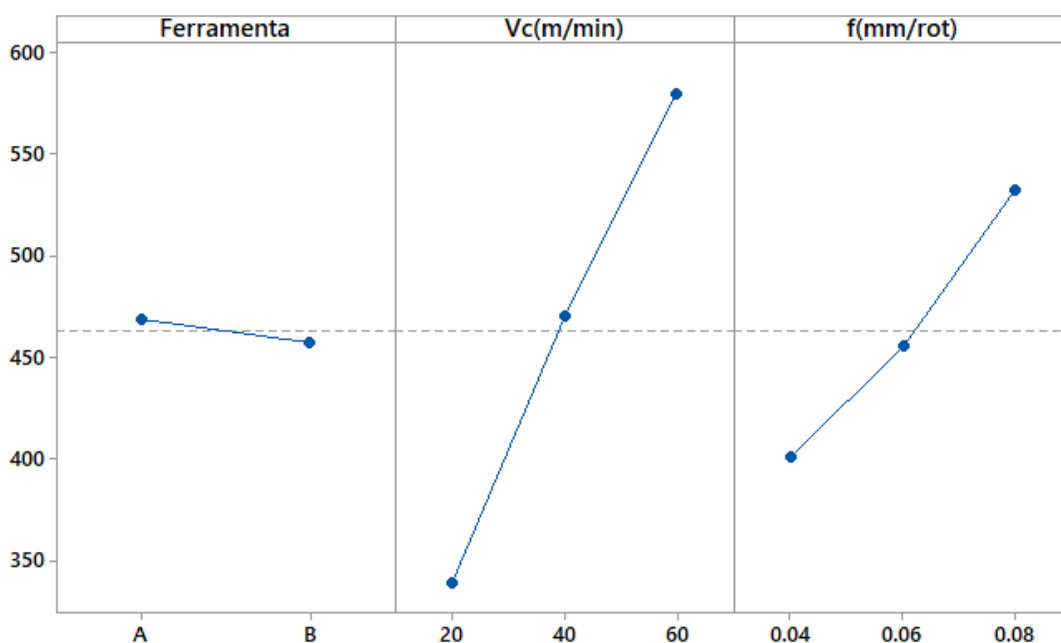
Para resultados de potência média, o teste de Tukey indica que o aumento de velocidade de corte e o aumento de avanço contribuem para potências consumidas maiores (Ver quadro resumo no final deste capítulo).

#### 4.5 ANÁLISE DA POTÊNCIA CONSUMIDA MÁXIMA

Para a Potência máxima, analisando a (Figura 50), observa-se também que os menores valores foram obtidos com ferramentas revestidas com TiAlN+NbN, para menor velocidade de corte (20 m/min) e para menor taxa de avanço (0,04 mm/rot).

Conforme já mencionado, os resultados estão conforme esperados, uma vez que a energia consumida depende da área da seção de corte e da velocidade de corte que influencia na taxa de remoção.

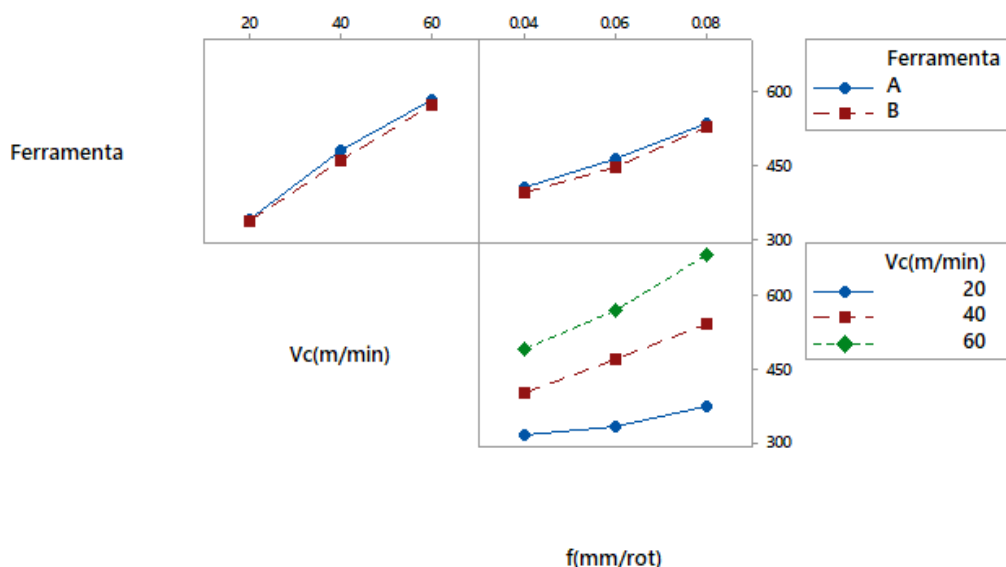
Figura 50 - Efeitos principais para a Potência Máxima Consumida (W)



Fonte: Autoria Própria

Analisando as interações para a energia consumida máxima (Figura 51), observa-se que há um efeito combinado da velocidade de corte e da taxa de avanço.

Figura 51 - Interações para a potência máxima consumida (W)



Fonte: Autoria Própria

A análise de variância (Tabela 7) demonstrou que velocidade de corte e avanço influenciaram significativamente nos resultados de potência consumida Máxima (P-value <0,05). No entanto, para os recobrimentos, a análise de variância não apresentou diferença significativa para os resultados.

Importante ressaltar que na análise de potência máxima, o maior valor de potência obtido durante a usinagem é avaliado e este valor é influenciado por inclusões, como é o caso de carbeto presentes na VAT32®.

Tabela 7 - Anova para potência máxima consumida

| Fonte                                  | DF | Adj SS | Adj MS | F      | P            | Contrib. |
|----------------------------------------|----|--------|--------|--------|--------------|----------|
| Ferramentas                            | 1  | 1224   | 1224   | 2.38   | 0.141        | 0.003    |
| Velocidade de corte                    | 2  | 350228 | 175114 | 339.92 | <b>0.000</b> | 0.718    |
| Avanço                                 | 2  | 104676 | 52338  | 101.59 | <b>0.000</b> | 0.215    |
| Ferramentas*Velocidade de corte        | 2  | 704    | 352    | 0.68   | 0.518        | 0.001    |
| Ferramentas*Avanço                     | 2  | 176    | 88     | 0.17   | 0.844        | 0.000    |
| Velocidade de corte*Avanço             | 4  | 19256  | 4814   | 9,34   | <b>0</b>     | 0.040    |
| Ferramentas*Velocidade de corte*Avanço | 4  | 1941   | 485    | 0.94   | 0.462        | 0.004    |
| Erro                                   | 18 | 9273   | 515    |        |              |          |
| Total                                  | 35 | 487479 |        |        |              |          |

Fonte: Autoria Própria

Para resultados de potência máxima, o teste de Tukey indica que o aumento de velocidade de corte e o aumento de avanço contribuem para potências consumidas maiores (Ver quadro resumo no final deste capítulo).

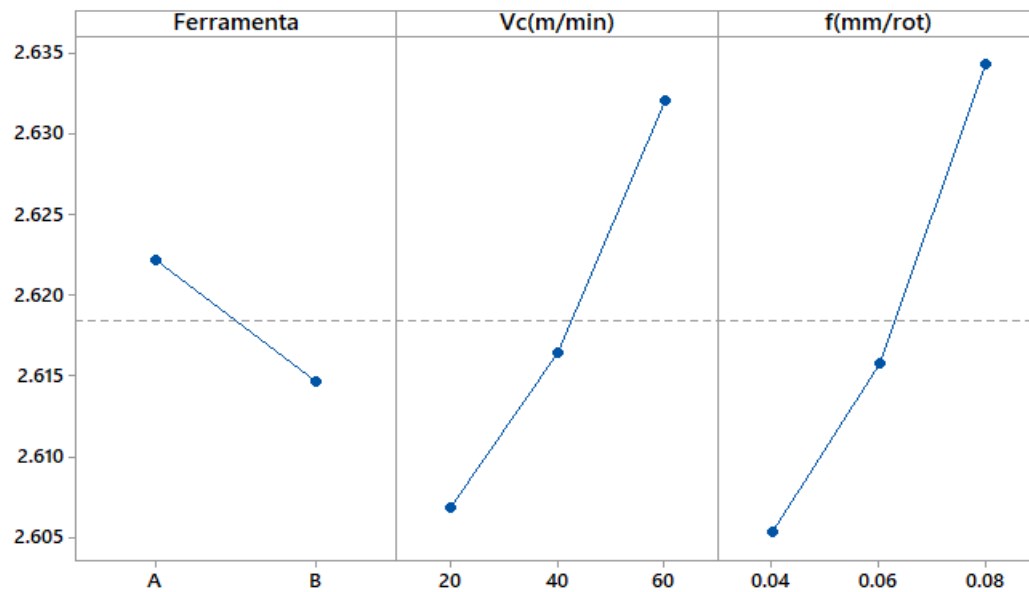
#### 4.6 ANÁLISE DE VIBRAÇÃO MÉDIA

Pode-se observar, na Figura 52, que o aumento da velocidade de corte e o aumento da velocidade de avanço contribuem para maiores vibrações. Velocidades de corte mais altas estão diretamente relacionadas a taxas de remoção maiores e, conseqüentemente, a maior consumo de energia, como já demonstrado. Avanços maiores estão diretamente relacionados a uma maior área da seção de corte durante a usinagem e, conseqüentemente, a maiores esforços, causando maior vibração.

Embora não tenha sido estatisticamente confirmado que o revestimento influenciasse a vibração, o revestimento TiAlN+NbN também produziu menores vibrações. Este mesmo revestimento proporcionou menor, menor desgaste e menor consumo de energia.

Os altos valores de vibração obtidos para todas as condições testadas mostram que a perfuração completa, realizada com uma broca de 20 mm de diâmetro com insertos intercambiáveis, sem pré-furação, foi uma operação muito agressiva, com grandes cargas sobre a ferramenta, causando vibrações excessivas e danificando o acabamento.

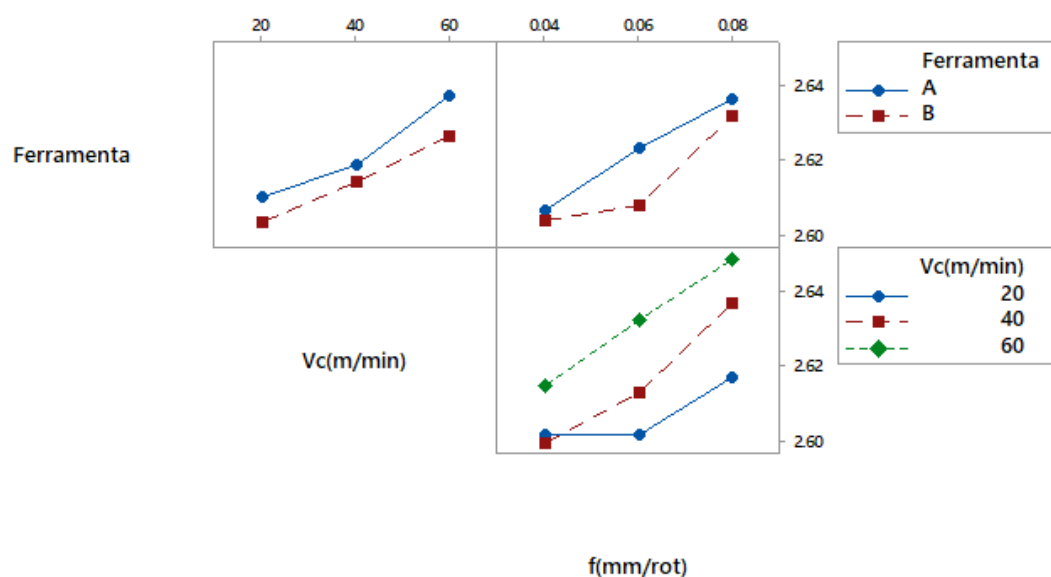
Figura 52 - Efeitos principais para a vibração média gerada



Fonte: Autoria Própria

Analisando as interações para a vibração gerada (Figura 53), observa-se que velocidades mais baixas e avanços menores produziram menores vibrações e que as diferentes ferramentas testadas não tiveram praticamente nenhuma influência. Ao contrário do que ocorreu para a potência, não se percebe um efeito combinado da velocidade de corte e da taxa de avanço.

Figura 53 – Interações para a vibração média gerada



Fonte: Autoria Própria

Para a vibração média, (Tabela 8), o tipo de revestimento da ferramenta não influenciou estatisticamente os resultados (P-valor = 0,262). No entanto, a velocidade de corte (P-valor = 0,017) e o avanço (P-valor = 0,00) contribuíram para a vibração gerada, com a maior contribuição sendo atribuída ao avanço, seguido pela velocidade de corte.

Tabela 8 – Anova para vibração Média gerada

| Fonte                                  | DF | Adj SS | Adj MS | F     | P            | Contrib. |
|----------------------------------------|----|--------|--------|-------|--------------|----------|
| Ferramentas                            | 1  | 0.001  | 0.001  | 1.340 | 0.262        | 0.026    |
| Velocidade de corte                    | 2  | 0.004  | 0.002  | 5.170 | <b>0.017</b> | 0.201    |
| Avanço                                 | 2  | 0.005  | 0.003  | 6.870 | <b>0.006</b> | 0.268    |
| Ferramentas*Velocidade de corte        | 2  | 0.000  | 0.000  | 0.090 | 0.918        | 0.003    |
| Ferramentas*Avanço                     | 2  | 0.000  | 0.000  | 0.390 | 0.682        | 0.015    |
| Velocidade de corte*Avanço             | 4  | 0.001  | 0.000  | 0.440 | 0.777        | 0.034    |
| Ferramentas*Velocidade de corte*Avanço | 4  | 0.002  | 0.000  | 1.300 | 0.308        | 0.101    |
| Erro                                   | 18 | 0.007  | 0.000  |       |              |          |
| Total                                  | 35 | 0.019  |        |       |              |          |

Fonte: Autoria Própria

O teste de Tukey para resultados de vibração média demonstraram que os recobrimentos não influenciaram significativamente. O teste demonstrou ainda haver diferenças para os resultados de vibração média se utilizar 20 m/min ou 60m/min, da mesma forma que os resultados são influenciados se utilizar avanços de 0,04 ou 0,08 mm/rot (Ver quadro resumo no final deste capítulo).

#### 4.7 ANÁLISE DE VIBRAÇÃO MÁXIMA

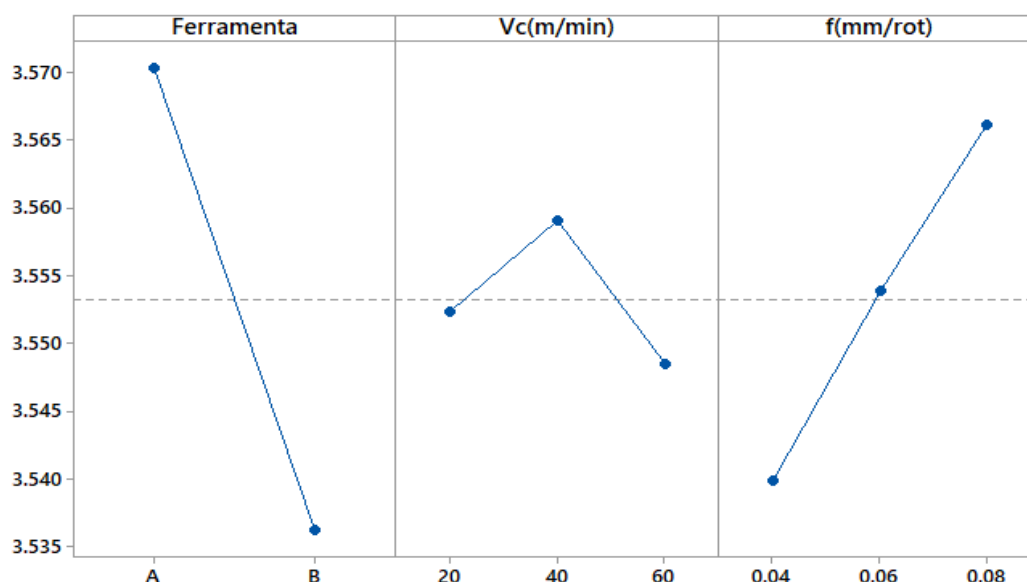
Os resultados de Vibração Máxima apresentam uma tendência de menores vibrações quando utilizando recobrimento de TiAlN+NbN e para menores avanços, no entanto estatisticamente essa tendência não é observada. A superliga VAT32® possui carbeto extremamente duros que quando em contato com a ferramenta de corte pode elevar muito o nível de vibração, independente das condições de usinagem adotadas, (Figura 54).

Somando-se a isso deve-se observar que em muitas condições ensaiadas houve formação de arestas postiça de corte e lascamentos. Fatos estes sentidos na captação de vibração máxima. Também deve-se considerar a presença de carbeto

no material que causam variação nos esforços e consequentemente na vibração, mas que neste caso é mais difícil de rastrear sua presença durante a usinagem.

Nota-se com isso que a análise de vibração máxima não é adequada para compreender a vibração durante o ensaio. Os níveis de vibração máxima (3,55m/s) estão bem superiores às da vibração média (2,62m/s).

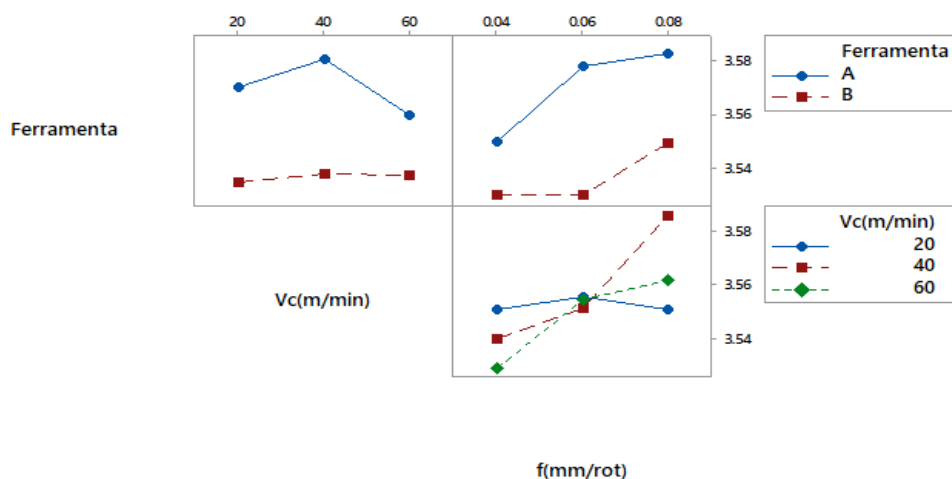
Figura 54 - Efeitos principais para a vibração máxima gerada



Fonte: Autoria Própria

Observando o gráfico de interações entre os fatores de entrada novamente percebe-se que a variação dos resultados foi muito pequena e consequentemente a análise estatística não permite afirmar haver diferenças significativas para qualquer recobrimento, velocidade de corte ou avanço utilizado. Percebe-se apenas, como já citado, uma tendência de menores vibrações quando utilizando recobrimento de TiAlN+NbN e menores avanços, (Figura 55).

Figura 55 - Interações para a vibração máxima gerada



Fonte: Próprio autor

Para a vibração máxima conforme Tabela 9, nenhum fator de entrada causou mudanças estatisticamente significativas nos resultados sendo que para os recobrimentos, velocidade de corte e avanço a análise de variância apresentou P-value de 0,288; 0,949 e 0,737 respectivamente.

Tabela 9 - Anova para vibração máxima gerada

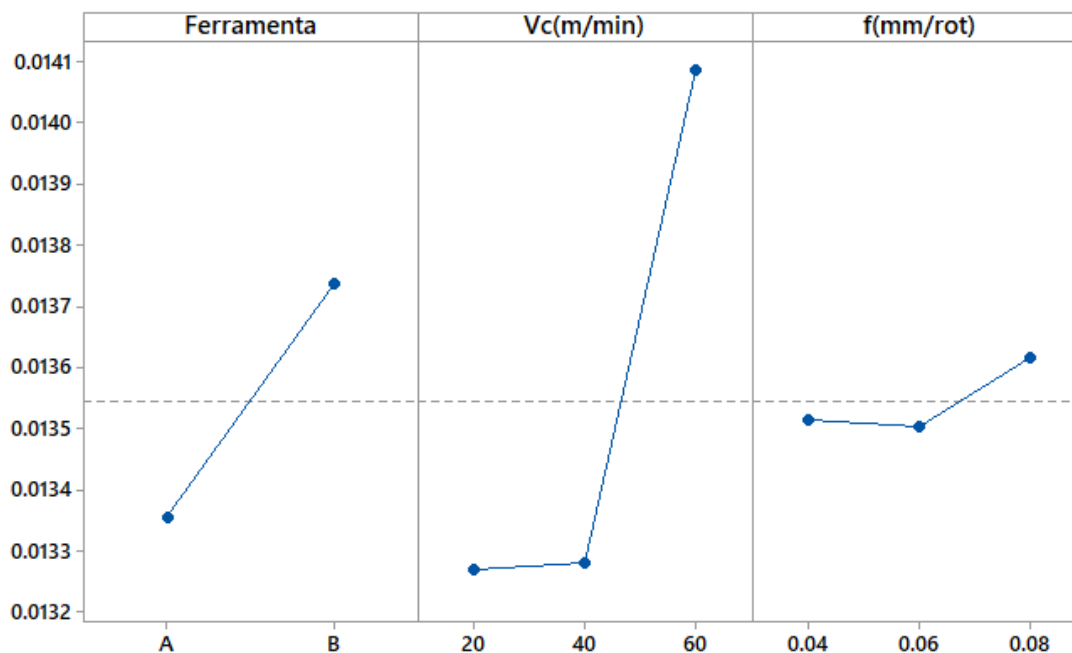
| Fonte                                  | DF | Adj SS | Adj MS | F     | P     | Contrib. |
|----------------------------------------|----|--------|--------|-------|-------|----------|
| Ferramentas                            | 1  | 0.010  | 0.010  | 1.560 | 0.228 | 0.072    |
| Velocidade de corte                    | 2  | 0.001  | 0.000  | 0.050 | 0.949 | 0.005    |
| Avanço                                 | 2  | 0.004  | 0.002  | 0.310 | 0.737 | 0.029    |
| Ferramentas*Velocidade de corte        | 2  | 0.001  | 0.000  | 0.050 | 0.954 | 0.004    |
| Ferramentas*Avanço                     | 2  | 0.001  | 0.001  | 0.090 | 0.916 | 0.008    |
| Velocidade de corte*Avanço             | 4  | 0.003  | 0.003  | 0.110 | 0.978 | 0.020    |
| Ferramentas*Velocidade de corte*Avanço | 4  | 0.004  | 0.001  | 0.150 | 0.958 | 0.029    |
| Erro                                   | 18 | 0.121  | 0.007  |       |       |          |
| Total                                  | 35 | 0.145  |        |       |       |          |

Fonte: Próprio autor

#### 4.8 ANÁLISE DE EMISSÃO ACÚSTICA MÉDIA

Os resultados de emissão acústica média apresentaram uma tendência de maiores valores para maiores velocidades de corte, maiores avanços e para o recobrimento de TiAlN+NbN (Figura 56).

Figura 56 - Efeitos principais para Emissão Acústica Média



Fonte: Próprio autor

Na Figura 57 estão apresentados os resultados de interação para a emissão acústica e com eles é possível perceber que a velocidade de corte de 60m/s causou um efeito significativo nos resultados de emissão acústica média. Fato não observado para avanço e recobrimentos.

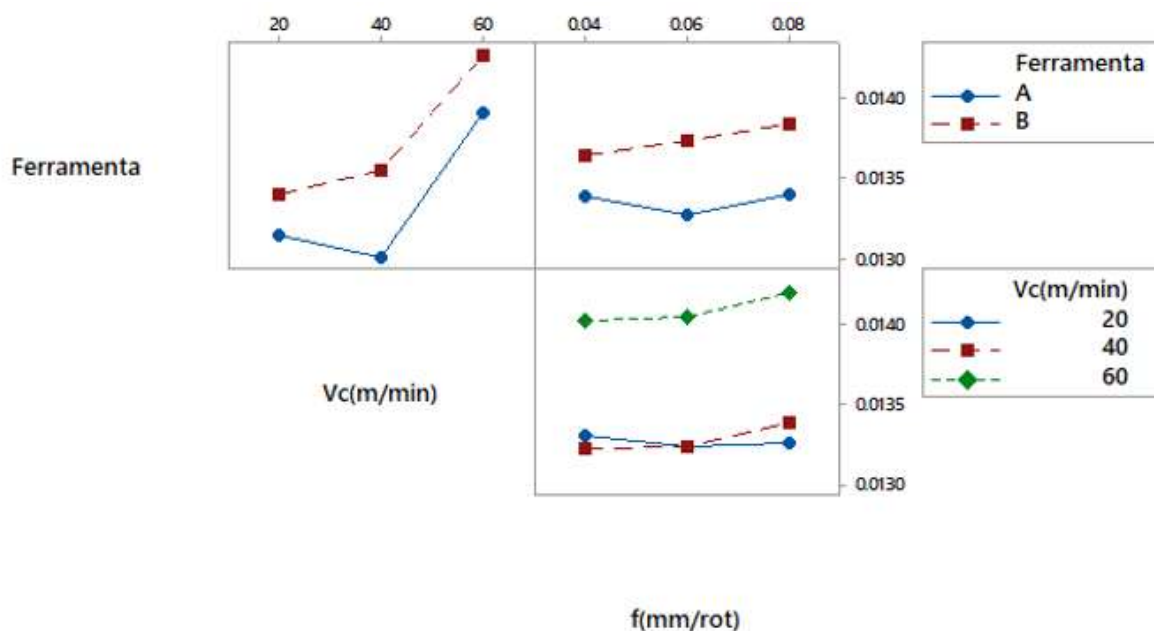
Analizando a interação entre ferramentas e velocidade de corte nota-se que os insertos com revestimento de  $Ti(C,N)+Al_2O_3$  produziram menores emissões médias com tendência de maiores valores para maiores velocidades de corte.

No caso da interação entre ferramenta e avanço nota-se haver uma tendência de maiores emissões médias para maiores avanços e com os insertos com revestimento de  $Ti(C,N)+Al_2O_3$  produzindo menores emissões.

Analizando a interação entre velocidade de corte e avanço observa-se que a velocidade de 60m/min produziu maiores emissões médias, principalmente no avanço de 0,08mm/rot.



Figura 57 - Interações para Emissão Acústica Média Gerada



Fonte: Próprio autor

Com a Análise de Variância conforme Tabela 10, observa-se que estatisticamente somente a velocidade de corte ( $P\text{-value}=0,099$ ) impactou na emissão acústica sendo que o teste de Tukey demonstrou haver diferença entre as médias para 60m/min em relação às outras velocidades testadas (20 e 40 m/mim).

Tabela 10 - Emissão Acústica Média

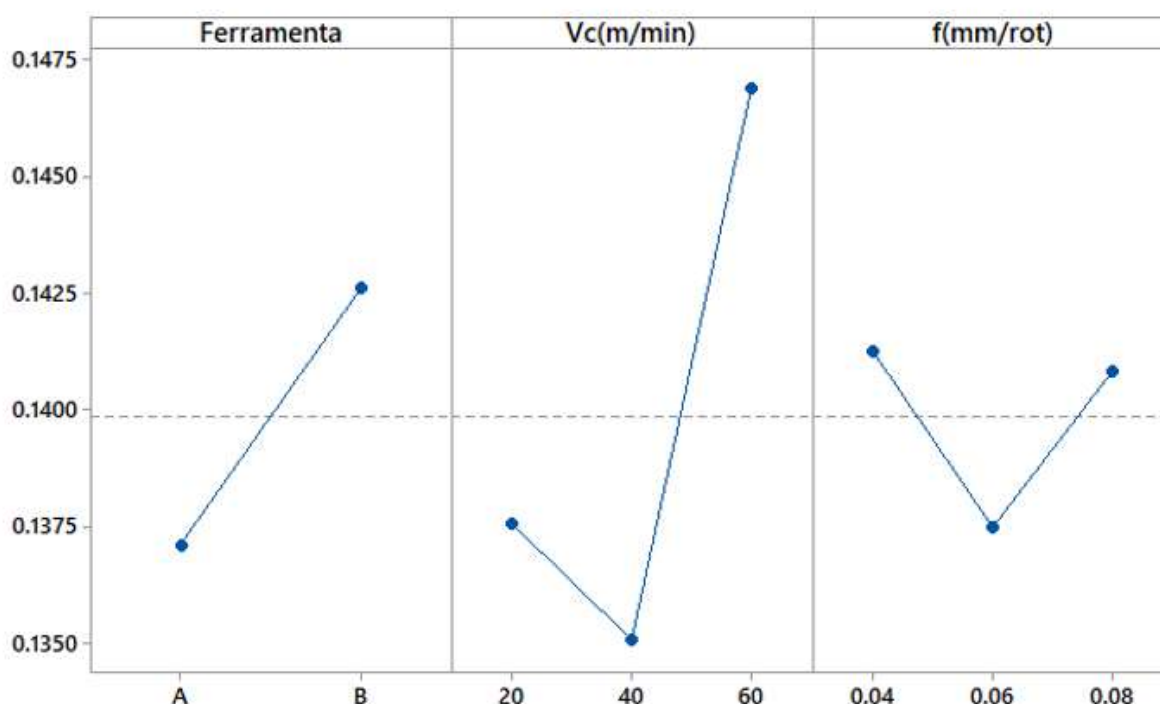
| Fonte                                  | DF | Adj SS | Adj MS | F    | P     | Contrib. |
|----------------------------------------|----|--------|--------|------|-------|----------|
| Ferramentas                            | 1  | 0.000  | 0.000  | 1.32 | 0.266 | 0.040    |
| Velocidade de corte                    | 2  | 0.000  | 0.000  | 2.63 | 0.099 | 0.200    |
| Avanço                                 | 2  | 0.000  | 0.000  | 0.05 | 0.954 | 0.000    |
| Ferramentas*Velocidade de corte        | 2  | 0.000  | 0.000  | 0.07 | 0.94  | 0.000    |
| Ferramentas*Avanço                     | 2  | 0.000  | 0.000  | 0.04 | 0.96  | 0.000    |
| Velocidade de corte*Avanço             | 4  | 0.000  | 0.000  | 0.02 | 0.999 | 0.000    |
| Ferramentas*Velocidade de corte*Avanço | 4  | 0.000  | 0.000  | 0.01 | 1.000 | 0.000    |
| Erro                                   | 18 | 0.000  | 0.000  |      |       |          |
| Total                                  | 35 | 0.000  |        |      |       |          |

Fonte: Próprio autor

#### 4.9 ANÁLISE DA EMISSÃO MÁXIMA

Para os resultados de emissão acústica máxima observa-se também uma tendência de maiores valores para o revestimento de TiAlN+NbN (Figura 58). A velocidade de corte de 60m/min causou, aparentemente, maior emissão acústica máxima.

Figura 58 - Efeitos principais para Emissão Acústica Máxima



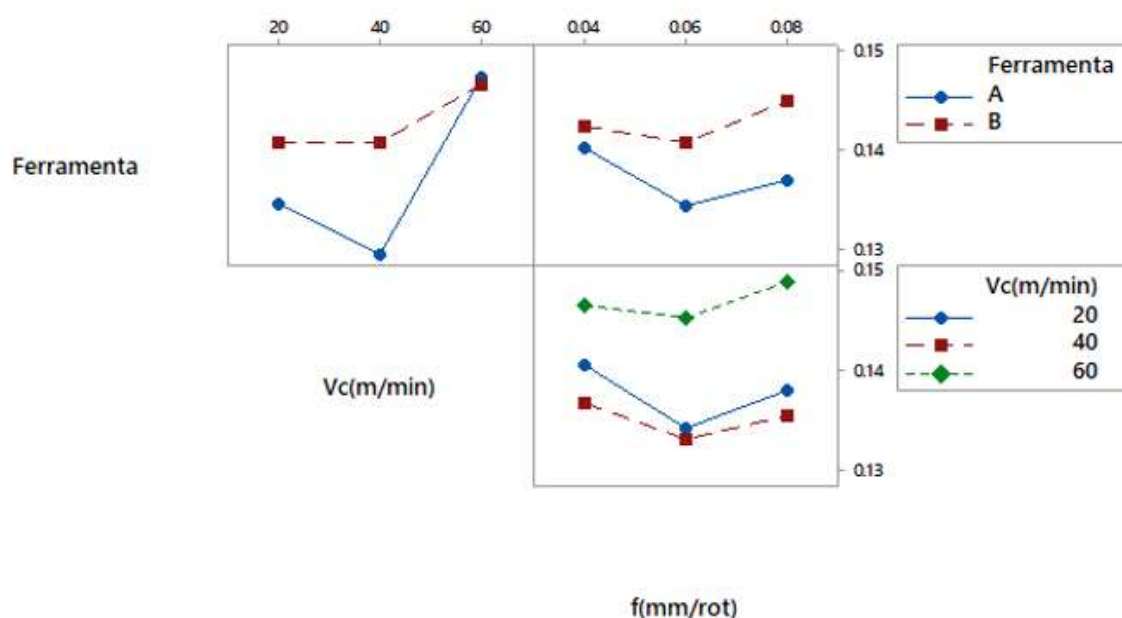
Fonte: Próprio autor

Observando o gráfico de interações (Figura 59) para emissão acústica máxima observa-se comportamentos similares aos observados para emissão média. Analisando a interação entre ferramentas e velocidade de corte nota-se que os insertos com revestimento de Ti(C,N)+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> produziram menores emissões máximas. Na velocidade de 60m/min não é observado diferença entre os revestimentos.

No caso da interação entre ferramenta e avanço nota-se novamente que os insertos com revestimento de Ti(C,N)+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> produziram menores emissões e não são percebidos grandes efeitos da variação dos avanços utilizados, sendo que avanço de 0,06mm/rot indica ter produzido menores emissões acústicas máximas.

Já para interação entre velocidade de corte e avanço observa-se que a velocidade de 60m/min se destacou produzindo, aparentemente, maiores emissões máximas. Novamente o avanço parece não ter impactado tanto e o avanço de 0,06mm/rot produziu menores emissões acústicas máximas.

Figura 59 - Interações para Emissão Acústica Máxima



Fonte: Próprio autor

Com a Análise de Variância (Tabela 11), apesar das tendências apontadas, observa-se que estatisticamente a utilização de diferentes recobrimentos, velocidades de corte e avanço não causaram mudanças nos valores de emissão acústica máxima.

Tabela 11 - Emissão Acústica Máxima

| Fonte                                  | DF | Adj SS | Adj MS | F     | P     | Contrib. |
|----------------------------------------|----|--------|--------|-------|-------|----------|
| Ferramentas                            | 1  | 0.000  | 0.000  | 0.820 | 0.377 | 0.036    |
| Velocidade de corte                    | 2  | 0.001  | 0.000  | 1.400 | 0.271 | 0.122    |
| Avanço                                 | 2  | 0.000  | 0.000  | 0.150 | 0.860 | 0.013    |
| Ferramentas*Velocidade de corte        | 2  | 0.000  | 0.000  | 0.330 | 0.725 | 0.029    |
| Ferramentas*Avanço                     | 2  | 0.000  | 0.000  | 0.080 | 0.922 | 0.007    |
| Velocidade de corte*Avanço             | 4  | 0.000  | 0.000  | 0.030 | 0.998 | 0.005    |
| Ferramentas*Velocidade de corte*Avanço | 4  | 0.000  | 0.000  | 0.030 | 0.990 | 0.004    |
| Erro                                   | 18 | 0.006  | 0.000  |       |       |          |
| Total                                  | 35 | 0.008  |        |       |       |          |

Fonte: Próprio autor

Destaca-se novamente que em muitas condições ensaiadas houve formação de arestas postiça de corte e lascamentos. somando-se a isso deve-se considerar a presença de carbeto no material que prejudicando a análise de emissão acústica máxima.

Kondo (2019) destacou que a matriz austenítica do VAT 32® apresenta dureza inferior à dos carbeto de nióbio presentes na liga. Durante o processo de torneamento, as ferramentas não encontravam dificuldades ao cortar a matriz austenítica. No entanto, ao entrar em contato com os carbeto de nióbio, ocorria um choque mecânico devido à diferença significativa de dureza entre as fases da microestrutura, o que resultava em lascamento e eventual fratura da ferramenta. Esses fatores possivelmente contribuíram para as altas variações nos na rugosidade, emissão acústica e vibração observados durante o processo de furação.

#### 4.10 ANÁLISE QUALITATIVA DE DESGASTES E AVARIAS

Na Tabela 12 é possível observar a análise qualitativa dos desgastes e avarias que ocorreram nas diferentes condições de ensaios, caracterizando tipo de desgaste, avarias presentes e a característica final da aresta de corte após realização dos ensaios.

Em todas as condições ensaiadas o desgaste predominante foi o desgaste de flanco e em alguns casos este desgaste era um pouco mais acentuado na extremidade lembrando um desgaste de entalhe.

Nota-se que os insertos com revestimento de  $Ti(C,N)+Al_2O_3$  foram mais susceptíveis à formação de Aresta Postiça de corte e a lascamentos. Além disso, a aresta de corte para essas ferramentas ficou muito mais danificadas, perdendo sua forma original e ficando mais danificadas. Esse deve-se muito provavelmente à maior fragilidade da camada de  $Ti(C,N)$  juntamente com  $Al_2O_3$ , que apesar de possuir alta dureza e alta resistência ao desgaste, se mostrou mais sensível à presença dos carbeto da superliga VAT32®.

Ainda foi possível notar claramente uma maior adesão do cavaco à ferramenta nos  $Ti(C,N)+Al_2O_3$ , muito possivelmente, a um maior coeficiente de atrito.

Observou-se também claramente que as ferramentas com recobrimento TiAlN+NbN foram muito menos susceptíveis à formação de arestas postiças/adesão e a aresta de corte permaneceu mais preservada ao final dos ensaios. Notou-se que os desgastes de flancos encontrados eram mais homogêneos e constantes e as ferramentas ficaram mais “limpas”.

O melhor desempenho das ferramentas de TiAlN+NbN deve-se muito às características do TiAlN, que se destaca pela sua baixa absorção térmica, alta dureza a altas temperaturas e baixo coeficiente de atrito (Miranda, 2003) e ao NbN que possui uma dureza considerável e um módulo de elasticidade significativo, o que, aliado à sua resistência ao desgaste, confirmando ser adequado para condições severas conforme observado por SILVA *et al.*, 2022. A menor formação de arestas postiças nestas ferramentas deve-se muito provavelmente ao menor coeficiente de atrito destes revestimentos.

Nas Figuras 60, 61, 62, 63, 64 e 65 é possível ver alguns exemplos dos tipos de desgastes e avarias obtidos durante os ensaios de furação.

Tabela 12 - Tipos de desgastes e avarias encontrados nas condições testadas

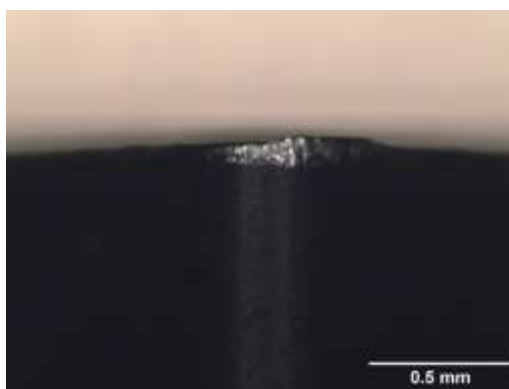
(continua)

| Ensaio | Conjunto Ferramentas | Vc(m/min) | f(mm/rot) | Tipo de Desgaste | Avaria         | Característica |
|--------|----------------------|-----------|-----------|------------------|----------------|----------------|
| 1      | A                    | 20        | 0,04      | Flanco           | APC            | irregular      |
| 2      | A                    | 20        | 0,06      | Flanco           | Quebra         | -              |
| 3      | A                    | 20        | 0,08      | Flanco           | APC            | irregular      |
| 4      | A                    | 40        | 0,04      | Flanco           | APC            | irregular      |
| 5      | A                    | 40        | 0,06      | Flanco           | APC            | irregular      |
| 6      | A                    | 40        | 0,08      | Flanco           | Lascamento     | irregular      |
| 7      | A                    | 60        | 0,04      | Flanco           | Lascamento/APC | irregular      |
| 8      | A                    | 60        | 0,06      | Flanco           | APC            | irregular      |
| 9      | A                    | 60        | 0,08      | Flanco           | APC            | irregular      |
| 10     | B                    | 20        | 0,04      | Flanco           | -              | regular        |
| 11     | B                    | 20        | 0,06      | Flanco           | APC            | irregular      |
| 12     | B                    | 20        | 0,08      | Flanco           | -              | regular        |
| 13     | B                    | 40        | 0,04      | Flanco           | -              | regular        |
| 14     | B                    | 40        | 0,06      | Flanco           | -              | regular        |
| 15     | B                    | 40        | 0,08      | Flanco           | -              | regular        |
| 16     | B                    | 60        | 0,04      | Flanco           | -              | regular        |
| 17     | B                    | 60        | 0,06      | Flanco           | -              | regular        |
| 18     | B                    | 60        | 0,08      | Flanco           | -              | regular        |

|    |   |    |      |        |                |           |
|----|---|----|------|--------|----------------|-----------|
| 19 | A | 20 | 0,04 | Flanco | Lascamento/APC | irregular |
| 20 | A | 20 | 0,06 | Flanco | APC            | irregular |
| 21 | A | 20 | 0,08 | Flanco | APC            | irregular |
| 22 | A | 40 | 0,04 | Flanco | APC            | irregular |
| 23 | A | 40 | 0,06 | Flanco | APC            | irregular |
| 24 | A | 40 | 0,08 | Flanco | Quebra         | -         |
| 25 | A | 60 | 0,04 | Flanco | APC            | irregular |
| 26 | A | 60 | 0,06 | Flanco | -              | regular   |
| 27 | A | 60 | 0,08 | Flanco | APC            | irregular |
| 28 | B | 20 | 0,04 | Flanco | -              | regular   |
| 29 | B | 20 | 0,06 | Flanco | -              | regular   |
| 30 | B | 20 | 0,08 | Flanco | -              | regular   |
| 31 | B | 40 | 0,04 | Flanco | Lascamento     | -         |
| 32 | B | 40 | 0,06 | Flanco | Lascamento     | -         |
| 33 | B | 40 | 0,08 | Flanco | -              | regular   |
| 34 | B | 60 | 0,04 | Flanco | -              | regular   |
| 35 | B | 60 | 0,06 | Flanco | -              | irregular |
| 36 | B | 60 | 0,08 | Flanco | -              | irregular |

Fonte: Autoria própria.

Figura 60 - Exemplo de formação de aresta postiça de corte (APC) usando ferramenta Ti(C,N)+ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (ensaio 7)



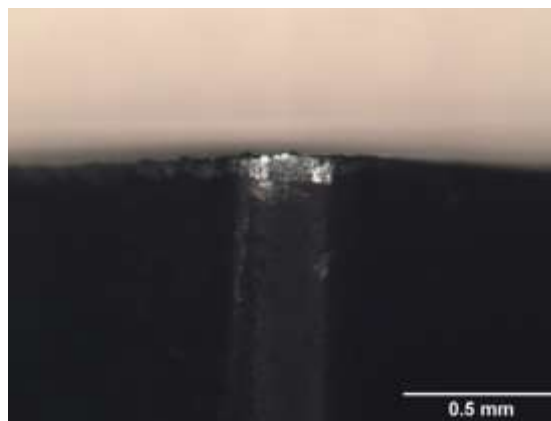
Fonte: Autoria própria.

Figura 61 - Exemplo de formação de desgaste de flanco e aresta postiça de corte (APC) usando ferramenta  $\text{Ti(C,N)} + \text{Al}_2\text{O}_3$  (ensaio 8)



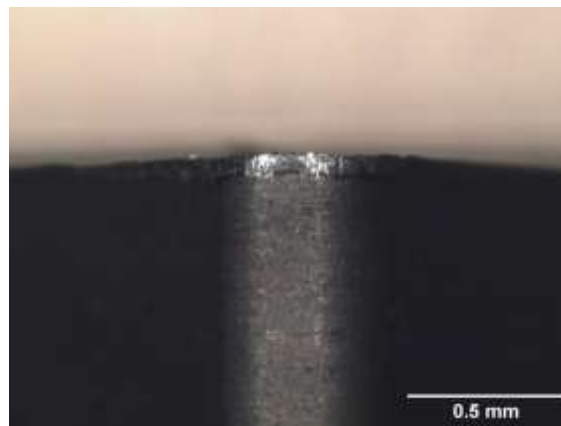
Fonte: Autoria própria.

Figura 62 - Exemplo de formação de desgaste de flanco e aresta postiça de corte (APC) usando ferramenta  $\text{Ti(C,N)} + \text{Al}_2\text{O}_3$  (ensaio 9)



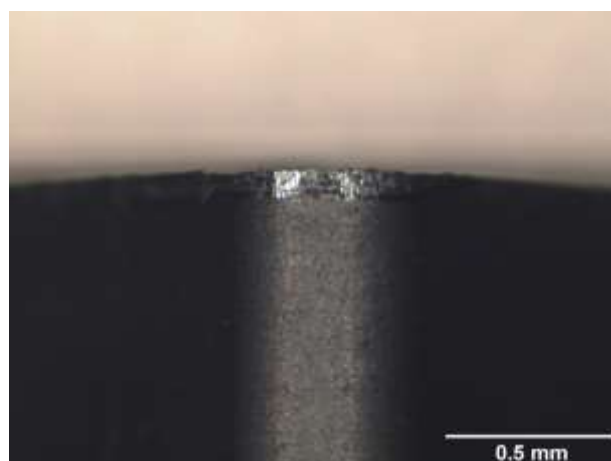
Fonte: Autoria própria.

Figura 63 - Exemplo de formação de desgaste de flanco usando ferramenta TiAlN+NbN (ensaio 28)



Fonte: Autoria própria.

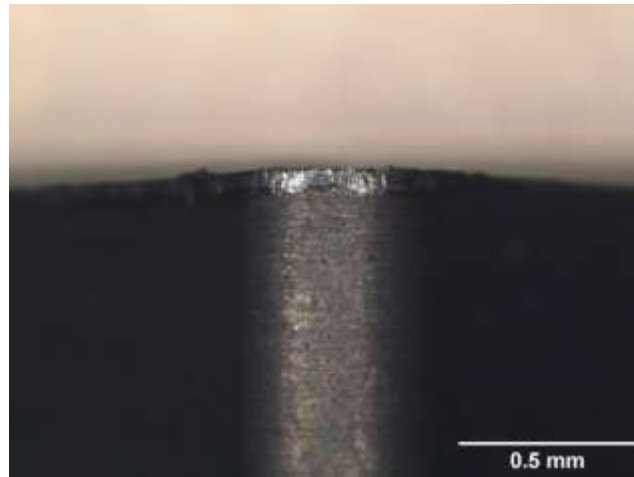
Figura 64 - Exemplo de formação de desgaste de flanco usando ferramenta TiAlN+NbN (ensaio 29)



Fonte: Autoria própria.

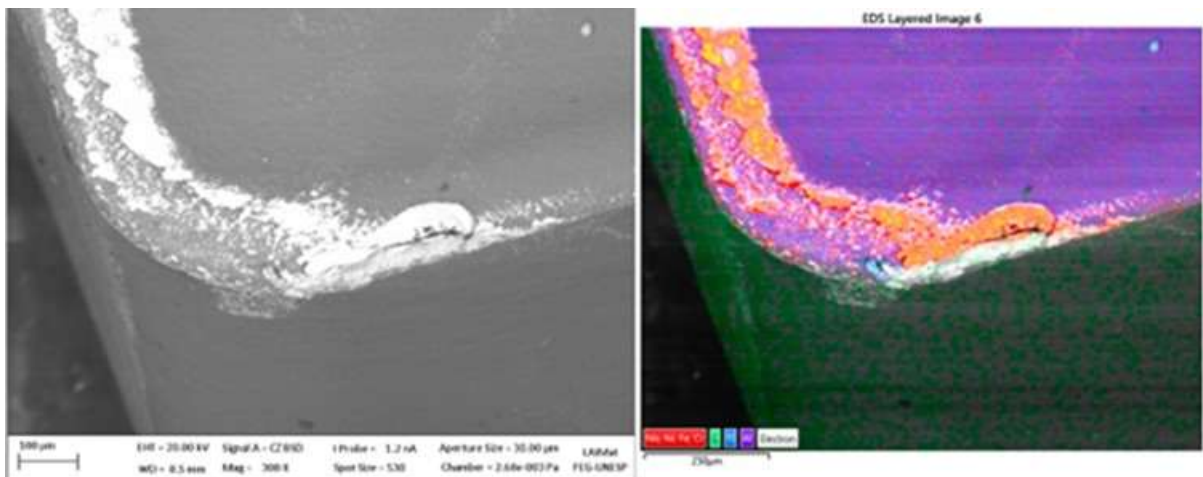


Figura 65 - Exemplo de formação de desgaste de flanco usando ferramenta TiAlN+NbN (ensaio 30)



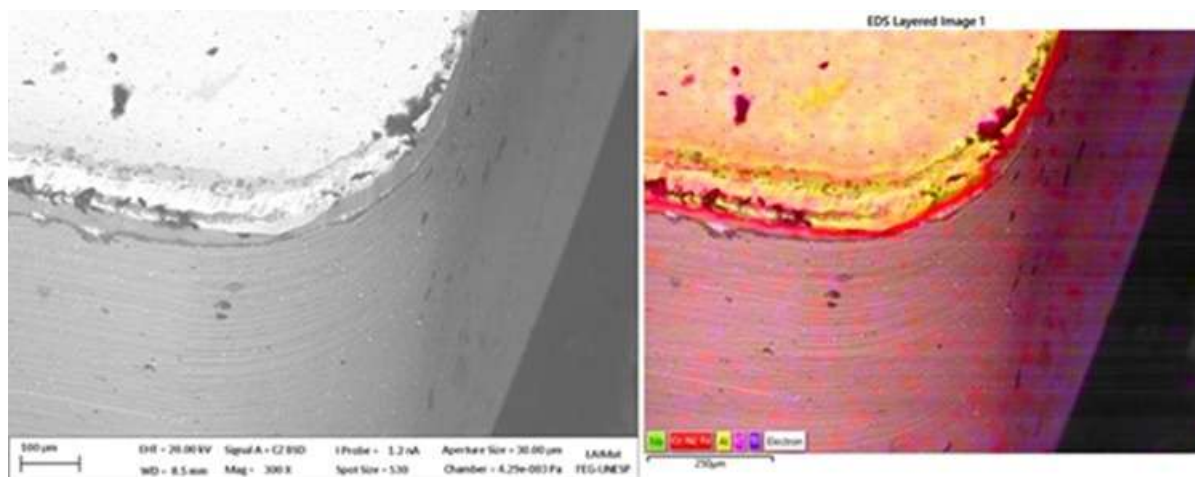
Fonte: Autoria própria.

Figura 66 - Exemplo de Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Microanálise por espectroscopia de energia (EDS) usando ferramenta de Ti(C,N)+ Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> comprovando formação de aresta postiça de corte neste tipo de ferramenta (ensaio 3).



Fonte: Autoria própria.

Figura 67 – Exemplo de Microscopia eletrônica de varredura (MEV) e Microanálise por espectroscopia de energia (EDS) usando ferramenta TiAlN+NbN indicando apenas desgaste de flanco (ensaio 14).



Fonte: Autoria própria.

Kondo (2019), avaliou o desgaste de ferramenta com recobrimento de  $\text{Ti(C,N)+Al}_2\text{O}_3$  no torneamento da VAT32® utilizando velocidades de corte de 120 a 150m/min, com avanços de 0,3 a 0,5mm/rot e verificou a presença de desgaste de flanco e desgaste de entalhe.

Santos (2021) analisou como a presença de carbetos no VAT 32® influencia o desgaste abrasivo das ferramentas cerâmicas experimentais de  $\text{Al}_2\text{O}_3+\text{MgO}$ . O estudo destaca que a elevada dureza desses carbetos contribui para o desgaste acelerado da aresta de corte.

Segundo Arrazola *et al.* (2011), a adição de carbetos nas ferramentas de corte tem um impacto significativo na resistência ao desgaste, dado que esses compostos apresentam alta dureza e excelente estabilidade térmica. No entanto, a eficácia dos carbetos não depende apenas da sua quantidade, mas também da sua distribuição na matriz metálica da ferramenta. Uma distribuição homogênea de carbetos é determinante para garantir que a ferramenta se comporte de maneira mais eficaz à abrasão e ao impacto, o que resulta em um desempenho mais estável durante a furação de materiais de alta resistência, como as superligas.

#### 4.11 ANÁLISE QUALITATIVA DE CAVACOS

No processo de furação é esperado cavacos no formato cônico uma vez que a velocidade de saída do cavaco varia do centro da broca (0m/min) até a velocidade máxima na extremidade, causando com isso a formação do cavaco cônico. Nos ensaios realizados essa característica foi notada em quase sua totalidade (Tabela 13).

Notou-se ainda que formação de cavacos longos e cavacos cônicos curtos, muito em função dos avanços utilizados, com predominância de cavacos curtos para maiores avanços.

Em apenas duas condições foi observado um cavaco em forma de fita e com características de cavaco contínuo. Estas duas condições foram usando avanço de 0,04mm/rot com ferramenta  $Ti(C,N)+Al_2O_3$ .

Na quase totalidade dos ensaios o tipo de cavaco formado é do tipo cisalhado, com lamelas bem distintas e bem separadas. Observando a montagem dos insertos na broca nota-se um ângulo de saída muito pequeno, favorecendo esse tipo de cavaco.

Ribeiro (2020) verificou que o cavaco formado na usinagem da VAT32® em sua pesquisa (torneamento) foi do tipo cisalhamento, indicando que o material usinado apresenta pouca deformação plástica e alta resistência mecânica.

Observou-se também cavacos segmentados, principalmente nos avanços de 0,08mm/rot e em alguns poucos casos no avanço de 0,06 mm/rot. O tipo de recobrimento não influenciou na quebra do cavaco.

Nas Figuras 68, 69, 70 e 71 é possível ver alguns exemplos dos tipos de e formas dos cavacos obtidos durante os ensaios de furação.

Tabela 13 - Tipos e formas dos cavacos produzidos

| Ensaio | Conjunto Ferramentas | Vc(m/min) | f(mm/rot) | Tipo e cavaco | Forma      | Característica |
|--------|----------------------|-----------|-----------|---------------|------------|----------------|
| 1      | A                    | 20        | 0,04      | Contínuo      | Fita       | Emaranhado     |
| 2      | A                    | 20        | 0,06      | Cisalhado     | Cônico     | Longo          |
| 3      | A                    | 20        | 0,08      | Cisalhado     | Cônico     | Curto          |
| 4      | A                    | 40        | 0,04      | Cisalhado     | Cônico     | Longo          |
| 5      | A                    | 40        | 0,06      | Cisalhado     | Cônico     | Longo          |
| 6      | A                    | 40        | 0,08      | Cisalhado     | Cônico     | Curto          |
| 7      | A                    | 60        | 0,04      | Cisalhado     | Fita       | Emaranhado     |
| 8      | A                    | 60        | 0,06      | Cisalhado     | Cônico     | Curto          |
| 9      | A                    | 60        | 0,08      | Cisalhado     | Segmentado | Curto          |
| 10     | B                    | 20        | 0,04      | Cisalhado     | Cônico     | Longo          |
| 11     | B                    | 20        | 0,06      | Cisalhado     | Segmentado | Curto          |
| 12     | B                    | 20        | 0,08      | Cisalhado     | Segmentado | Curto          |
| 13     | B                    | 40        | 0,04      | Cisalhado     | Cônico     | Longo          |
| 14     | B                    | 40        | 0,06      | Cisalhado     | Cônico     | Curto          |
| 15     | B                    | 40        | 0,08      | Cisalhado     | Segmentado | Curto          |
| 16     | B                    | 60        | 0,04      | Cisalhado     | Cônico     | Longo          |
| 17     | B                    | 60        | 0,06      | Cisalhado     | Cônico     | Longo          |
| 18     | B                    | 60        | 0,08      | Cisalhado     | Cônico     | Curto          |
| 19     | A                    | 20        | 0,04      | Cisalhado     | Cônico     | Longo          |
| 20     | A                    | 20        | 0,06      | Cisalhado     | Segmentado | Curto          |
| 21     | A                    | 20        | 0,08      | Cisalhado     | Segmentado | Curto          |
| 22     | A                    | 40        | 0,04      | Cisalhado     | Cônico     | Longo*         |
| 23     | A                    | 40        | 0,06      | Cisalhado     | Segmentado | Curto          |
| 24     | A                    | 40        | 0,08      | Cisalhado     | Segmentado | Curto          |
| 25     | A                    | 60        | 0,04      | Cisalhado     | Cônico     | Longo          |
| 26     | A                    | 60        | 0,06      | Cisalhado     | Cônico     | Longo          |
| 27     | A                    | 60        | 0,08      | Cisalhado     | Cônico     | Curto          |
| 28     | B                    | 20        | 0,04      | Cisalhado     | Cônico     | Longo          |
| 29     | B                    | 20        | 0,06      | Cisalhado     | Segmentado | Curto          |
| 30     | B                    | 20        | 0,08      | Cisalhado     | Segmentado | Curto          |
| 31     | B                    | 40        | 0,04      | Cisalhado     | Cônico     | Longo          |
| 32     | B                    | 40        | 0,06      | Cisalhado     | Cônico     | Longo          |
| 33     | B                    | 40        | 0,08      | Cisalhado     | Cônico     | Curto          |
| 34     | B                    | 60        | 0,04      | Cisalhado     | Cônico     | Curto          |
| 35     | B                    | 60        | 0,06      | Cisalhado     | Segmentado | Curto          |
| 36     | B                    | 60        | 0,08      | Cisalhado     | Segmentado | Curto          |

Fonte: Autoria própria.

Figura 68 - Exemplo de cavacos em fita, emaranhado do tipo cisalhado (ensaio 1)



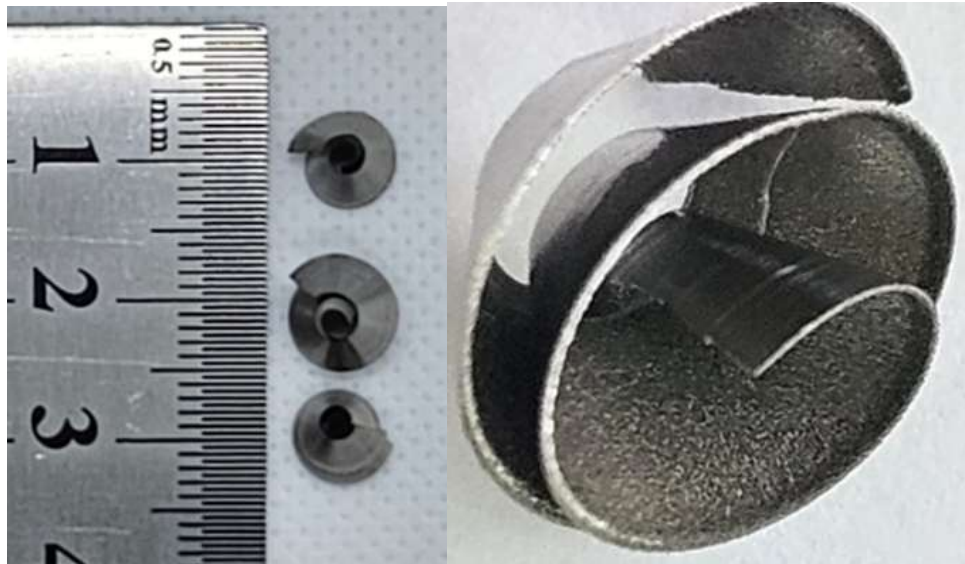
Fonte: Autoria Própria

Figura 69 - Exemplo de cavacos cônico, longo, do tipo cisalhado (ensaio 2)



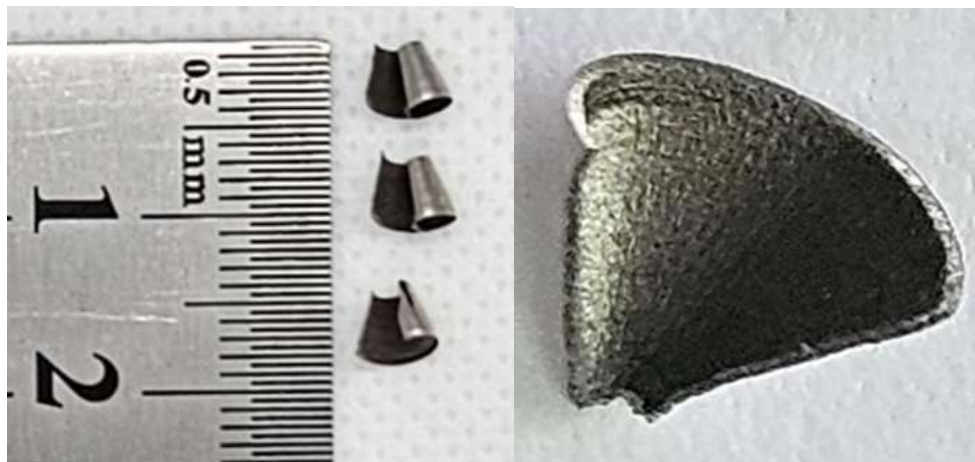
Fonte: Autoria Própria

Figura 70 - Exemplo de cavacos cônico, curto, do tipo cisalhado (ensaio 6)



Fonte: Autoria Própria

Figura 71 - Exemplo de cavacos segmentado, do tipo cisalhado (ensaio 11)



Fonte: Autoria Própria

Bonhin (2016) enfatiza que os carbeto de nióbio presentes na microestrutura do VAT 32® têm papel fundamental na formação de cavacos e no desgaste das ferramentas. Esses carbeto dificultam o processo de corte e aumentam a abrasividade durante a usinagem.

#### 4.12 CONCLUSÕES SOBRE RESULTADOS

Na Tabela 14 são apresentados os valores médios obtidos e os resultados do teste de Tukey. Este teste indica entre os níveis aqueles que diferem entre si. Assim, letras iguais para os níveis indicam que não há diferença estatisticamente significativa entre as médias. Letras diferentes indicam que há diferença estatisticamente significativa entre as médias.

Analisando os resultados na Tabela 14, pode-se concluir que os diferentes tipos de recobrimentos influenciaram significativamente os resultados de rugosidade  $R_a$  e desgaste de flanco  $V_b$ , com o conjunto com inserto interno revestido com (Ti,Al)N+TiN e inserto externo revestido com TiAlN+NbN proporcionando os melhores resultados.

A variação da velocidade de corte influenciou significativamente na rugosidade, no consumo de potência média, potência máxima, vibração média e emissão acústica média, sendo que a velocidade de 20m/min a melhor escolha em razão dos resultados obtidos.

A variação da velocidade de corte e a variação no avanço influenciaram significativamente apenas a energia consumida e a vibração.



Tabela 14 - Tabela resumo com os valores médios de Potência consumida, rugosidade  $R_a$ , desgaste de flanco e vibração para as diferentes ferramentas, velocidades de corte e taxas de avanço testadas.

| FERRAMENTAS                 | Conjunto A $Ti(C,N)+Al_2O_3$ |  | Conjunto B $TiAlN+NbN$ |
|-----------------------------|------------------------------|--|------------------------|
| POTÊNCIA MÉDIA (W)          | 240.7 A                      |  | 227.7 A                |
| POTÊNCIA MÁXIMA (W)         | 469.1 A                      |  | 457.4 A                |
| DESGASTE FLANCO (mm)        | 0.092 A                      |  | 0.074 B                |
| VIBRAÇÃO MÉDIA (m/s)        | 2.62 A                       |  | 2.61 A                 |
| VIBRAÇÃO MÁXIMA (m/s)       | 3.57 A                       |  | 3.53 A                 |
| RUGOSIDADE MÉDIA $R_a$ (um) | 2.63 A                       |  | 1.99 B                 |
| EMIÇÃO ACÚSTICA MÉDIA (V)   | 0.013354 A                   |  | 0.013736 A             |
| EMIÇÃO ACÚSTICA MÁXIMA (V)  | 0.13711 A                    |  | 0.14261 A              |
| CIRCULARIDADE               | 0.07924 A                    |  | 0.08363 A              |

| VELOCIDADE DE CORTE (m/min) | 20         | 40         | 60         |
|-----------------------------|------------|------------|------------|
| POTÊNCIA MÉDIA (W)          | 128.21 C   | 240.0 B    | 334.4 A    |
| POTÊNCIA MÁXIMA (W)         | 338.79 C   | 470.9 B    | 580.0 A    |
| DESGASTE FLANCO (mm)        | 0.083 A    | 0.084 A    | 0.081 A    |
| VIBRAÇÃO MÉDIA (m/s)        | 2.60 B     | 2.61 AB    | 2.63 A     |
| VIBRAÇÃO MÁXIMA (m/s)       | 3.55 A     | 3.55 A     | 3.54 A     |
| RUGOSIDADE MÉDIA $R_a$ (um) | 2.138 A    | 2.687 A    | 2.113 A    |
| EMIÇÃO ACÚSTICA MÉDIA (V)   | 0.013269 A | 0.013281 B | 0.014085 B |
| EMIÇÃO ACÚSTICA MÁXIMA (V)  | 0.13758 A  | 0.13508 A  | 0.14692 A  |
| CIRCULARIDADE               | 0.07947 A  | 0.08399 A  | 0.08084 A  |



| AVANÇO (mm/rot)             | 0.04       | 0.06       | 0.08       |
|-----------------------------|------------|------------|------------|
| POTÊNCIA MÉDIA (W)          | 174.7 B    | 234.6 AB   | 293.2 A    |
| POTÊNCIA MÁXIMA (W)         | 401.1 B    | 456 AB     | 532.6 A    |
| DESGASTE FLANCO (mm)        | 0.085 A    | 0.079 A    | 0.085 A    |
| VIBRAÇÃO MÉDIA (m/s)        | 2.60 B     | 2.61 AB    | 2.63 A     |
| VIBRAÇÃO MÁXIMA (m/s)       | 3.53 A     | 3.55 A     | 3.56 A     |
| RUGOSIDADE MÉDIA Ra (um)    | 2.484 A    | 2.385 A    | 2.381 A    |
| EMISSÃO ACÚSTICA MÉDIA(V)   | 0.013514 A | 0.013504 A | 0.013617 A |
| EMISSÃO ACÚSTICA MÁXIMA (V) | 0.14125 A  | 0.13750 A  | 0.14083 A  |
| CIRCULARIDADE               | 0.08135 A  | 0.08525 A  | 0.07770 A  |

Nota: As letras indicadas nas tabelas referem-se ao teste de Tukey, e letras iguais entre os níveis indicam que não houve diferença significativa entre esses níveis.

Fonte: Autoria Própria

Na Tabela 15 é possível observar as melhores condições de usinagem em função das variáveis de saída pretendidas.

Tabela 15 - Tabela resumo com as melhores condições de usinagem em função das variáveis de saída pretendidas.

| VARIÁVEL DE SAÍDA                  | CONJ. FERRAMENTA | $V_c$ (m/min) | f (mm/rot) |
|------------------------------------|------------------|---------------|------------|
| RUGOSIDADE MÉDIA $R_a$ ( $\mu m$ ) | B                | 20            | 0,08       |
| POTÊNCIA MÉDIA (W)                 | B                | 20            | 0,04       |
| POTÊNCIA MÁXIMA (W)                | B                | 20            | 0,04       |
| DESGASTE FLANCO (mm)               | B                | 60            | 0,04       |
| VIBRAÇÃO MÉDIA (m/s)               | B                | 20            | 0,02       |
| VIBRAÇÃO MÁXIMA (m/s)              | B                | 20            | 0,02       |
| EMIÇÃO ACÚSTICA MÉDIA (V)          | A                | 20            | 0,04       |
| EMIÇÃO ACÚSTICA MÁXIMA (V)         | A                | 40            | 0,04       |
| DESVIO DE CIRCULARIDADE            | A                | 40            | 0,08       |
| MENOS AVARIAS                      | B                | -             | -          |
| CAVACOS FRAGMENTADOS               | B                | -             | 0,08       |

Fonte: Autoria Própria

## 5 CONCLUSÕES

Foi investigado o processo de furação da superliga VAT32®, com broca de insertos intercambiáveis, utilizando ferramentas de metal duro com diferentes recobrimentos ( $\text{Ti(C,N)+Al}_2\text{O}_3$  e  $\text{TiAlN+NbN}$ ). Os resultados permitiram concluir que:

- Os insertos recobertos por  $\text{TiAlN+NbN}$  foram mais eficientes proporcionando menores rugosidades e menores desgastes de flanco que as ferramentas cobertas por  $\text{Ti(C,N)+Al}_2\text{O}_3$ .
- Ainda foi observado uma tendência de menor consumo de potência (média e máxima), menor vibração (média e máxima) quando usando insertos recobertos por  $\text{TiAlN+NbN}$ .
- As características térmicas, mecânicas e metalúrgicas da VAT32® dificultou a furação, proporcionando elevado nível de desgaste. O tipo de desgaste dominante foi o de flanco.
- A análise qualitativa dos desgastes e avarias permitem afirmar que os insertos recobertos por  $\text{TiAlN+NbN}$  tiveram desgastes mais homogêneos, sem formação de aresta postiça de corte e sem lascamentos. refletindo em melhores resultados gerais.
- Os insertos recobertos por  $\text{Ti(C,N)+Al}_2\text{O}_3$  tiveram desgastes de flanco irregulares, com aresta de corte bem danificada, presença de aresta postiça de corte e apresentou lascamentos em algumas condições.
- A formação dos cavacos foi majoritariamente do tipo cisalhado, na forma cônica, variando de comprimentos longos (menores avanços) para comprimentos curtos (maiores avanços).
- Maiores avanços proporcionaram maiores consumos de potência (média e máxima) e geraram maiores vibrações (média e máxima). Ainda causaram uma maior fragmentação dos cavacos gerando cavacos cônicos curtos ou segmentados (fragmentos curtos).
- O estudo da vibração máxima e da emissão acústica máxima gerada não foi suficiente para entender o processo de furação da superliga VAT32® nas condições utilizadas, uma vez que esses resultados são influenciados pelas características da superliga, como a presença de carbeto, e pelas avarias ocorridas nas ferramentas, como APC e lascamentos.

- A rugosidade foi influenciada significativamente pelo tipo de recobrimento utilizado com menores valores para TiAlN+NbN. Além disso, também foi influenciado significativamente pela velocidade de corte com melhores resultados para 20m e 60m/min.

- A velocidade de 40m/min produziu as piores rugosidades. Justamente nesta velocidade obteve-se os maiores desgastes de flanco e maior vibração máxima.

- O desgaste de flanco foi influenciado pelo revestimento utilizado.

- A potência consumida (média e máxima) sofreu mudanças significativas em função das velocidades de corte e avanços aplicados com menores valores para níveis mais baixos. Ainda há uma tendência de menores potências quando usando recobrimento de TiAlN+NbN.

- A vibração média sofreu alteração significativa em função das velocidades de corte e avanços aplicados com menores valores para níveis mais baixos com tendência de menores vibrações para o recobrimento de TiAlN+NbN.

- A vibração máxima apresentou tendência de menores valores para menores avanços e para o recobrimento de TiAlN+NbN.

- A emissão acústica média foi influenciada significativamente pela velocidade de corte, com menores valores para menores velocidades de corte. Apresentou tendência de menores valores para menores avanços e para o recobrimento de Ti(C,N)+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

- A emissão acústica máxima apresentou tendência de menores valores para o recobrimento de Ti(C,N)+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

Por fim, conclui-se que mesmo usando um processo de furação com broca de inserto intercambiável com mínimo balanço (relação 2D), com recobrimentos indicados para superligas à base de níquel, a usinagem da superliga VAT32 foi prejudicada pelas suas características como a presença de carbeto, alta dureza (~38HRC) e elevada temperatura durante a usinagem, afetando significativamente o desgaste das ferramentas e comprometendo as variáveis de saída analisadas.

## REFERÊNCIAS

ARORA A.; PARBHAKAR S. R. Ceramic cutting tools: Challenges and prospects. **Materials Technology: Advanced Performance Materials**, [S.l.], v.18, n.3, 2003.

ALLEGRIINI, A. **Aspectos da furação do titânio 6Al4V com broca de aço rápido sinterizado e broca de metal duro**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

ARRAZOLA, P. J.; FERRER, C.; IRENA, O.; MUÑOZ, A.; CORDOBA, A. Tool wear mechanisms in dry and wet drilling of nickel-based superalloys. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdam, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 3685: 2017**: Usinagem: teste de vida de ferramentas de corte com ferramentas de torneamento de ponta única. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 4288: 2008**: Controle de rugosidade superficial: Método de medição do perfil de superfície. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 4287: 2002** - *Medição da rugosidade superficial: Perfilômetro de contato: Método de medição do perfil de superfície*. Rio de Janeiro: ABNT, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12545: 1991** - Ferramentas de corte: Definição dos parâmetros para o controle dimensional das ferramentas de corte para torneamento e fresamento. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

BARROS, A. F.; COSTA, R. P. **Planejamento de experimentos e suas aplicações práticas**. São Paulo: Editora Científica, 2021.

BONHIN, E. P. **Estudo da usinabilidade da superliga à base de ferro-níquel VAT32® com ferramenta cerâmica**. 2016. 80 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado: Engenharia de Materiais) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016.

BUSO, J. P. S. **Análise comparativa entre planejamentos do tipo Fatorial Completo e Taguchi no processo de torneamento do aço AISI 4340 temperado e revenido**. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, 2022.

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**, Netherlands, v.3, p. 370-375, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2012.07.064>. Acesso em: 29 jul. 2024.

CASTILHO, W. J. G. **Furação profunda de ferro fundido cinzento GG25 com brocas de metal-duro com canais retos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

CERATIZIT. **Ferramentas de corte**: Qual é a cobertura certa? Ceratizit Group, Campinas, [S.d.]. Disponível em: [https://cuttingtools.ceratizit.com/br/pt/conte\\_uacute\\_do/torneamento/informa\\_ccedil\\_otildees-uacuteteis/ferramentas-de-corte-coberturas.html](https://cuttingtools.ceratizit.com/br/pt/conte_uacute_do/torneamento/informa_ccedil_otildees-uacuteteis/ferramentas-de-corte-coberturas.html). Acesso em: 15 dez. 2024.

CIMM. **Revestimentos superficiais para aços ferramenta**. CIMM, [S.l.], [S.d.]. Disponível em: [https://www.cimm.com.br/portal/material\\_didatico/6398-revestimentos-superficiais-para-acos-ferramenta](https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6398-revestimentos-superficiais-para-acos-ferramenta). Acesso em: 15 dez. 2024.

CHOI, J.; KUMTA, P. N. Design and characterization of ceramic-matrix composites for high-temperature applications. **Journal of Materials Science**, Dordrecht, 2011.

DAVIM, J. P. (Ed). **Tribology in manufacturing technology**. Aveiro: Springer, 2012.

DESHPANDE, N.; FOFANA, M. S. Nonlinear regenerative chatter in turning. **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, v. 17, n. 1-2, p. 107–112, 2001.

DI CUNTO, C. **Superligas à base de níquel**: desenvolvimento e propriedades. São Paulo: Editora Técnica, 2005.

DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N.L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 9.ed. São Paulo, 2014.

EZUGWU, O.; BONNEY, J.; YAMANE, Y. An overview of the machinability of aeroengine alloys. **Journal of Materials and Manufacturing Processes**, Philadelphia, v. 18, n. 2, p. 233–253, 2003.

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**, São Paulo, v.10, n.4, p.329-335, 2013.

FARINIA GROUP. **Why Choosing Inconel 718 for Aerospace Additive Manufacturing**. Farinia Group, Paris, 2014. Disponível em: <https://www.farinia.com>. Acesso em: 10 dez. 2024.

FARIA, J. C. **Estudo da usinagem em torneamento da superliga à base de níquel NIMONIC 80A**. 2007. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2007. Disponível em: [https://repositorio.unesp.br/bitstream/11449/94418/1/faria\\_jc\\_me\\_guara.pdf](https://repositorio.unesp.br/bitstream/11449/94418/1/faria_jc_me_guara.pdf). Acesso em: 15 dez. 2024.

FARHA, M. O. *et al.* A review on the machinability of high-strength steel and its tool wear mechanisms. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdã, 2017.

FERNANDES, P. *et al.* Wear behavior of PVD-coated cutting tools in machining of Inconel 718 superalloy. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdã, v. 278, p. 116451, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013623000116>. Acesso em: 15 dez. 2024.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. 16. reimp. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2013.

FERRER, C.; SALAS, F.; PASCUAL, M.; OROZCO, J. Discrete acoustic emission waves during stick-slip friction between steel samples. **Tribology International**, England, v. 43, N.1–2, p. 1–6, 2010.

FREITAS, J. S. Micrografia do metal duro com 90% WC (2,5 µm) + 10% fase ligante (94,1% Ni). In: **Pesquisa sobre metal duro e suas propriedades**. 2023. Disponível em: <https://www.researchgate.net/>. Acesso em: 13 dez. 2024.

GANGADHAR, G.; VENKATESWARLU, S.; RAJESH, C. Experimental approach of CNC drilling operation for mild steel using Taguchi design. **International Journal of Modern Engineering Research (IJMER)**, [s.l.], v.4, n.10, 2014.

GARG, S.; GOYAL, R. K. A study of surface roughness in drilling of AISI H11 die steel using face centered design. **International Journal for Innovative Research in Science and Technology**, [s.l.], v.1, n.12, p.464-474, 2015.

GOBBI, V. J. **Comportamento em fluência e caracterização microestrutural das Superligas VAT 36, VAT 32 e NIMONIC 80A**. 2013. 194 f. Tese (Doutorado em Ciências Mecânicas) - Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

GUO, Y. B.; AMMULA, S. C. Real-time acoustic emission monitoring for surface damage in hard machining. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Oxford, v. 45, n. 14, p. 1622–1627, 2005.

GUO, K. *et al.* Evaluation of novel tool geometries in dry drilling aluminium 2024-T351/titanium Ti6Al4V stack. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdã, v. 259, 2018.

HASE, A.; WADA, M.; MISHINA, H. Correlation of abrasive wear phenomenon and AE signals. **Japanese Journal of Tribology**, Tóquio, v. 51, n. 10, p. 752–759, 2006.

HASSAN, H. *et al.* Wear behavior of coated carbide tools in machining of Inconel 718 superalloy. **Journal of Materials Processing Technology**, Amsterdã, v. 273, p. 116255, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013619300610>. Acesso em: 15 dez. 2024.

HASSAN, H. *et al.* Tool wear and performance in the high-speed machining of Inconel 718 with PVD coatings. **International Journal of Advanced Manufacturing**

**Technology**, Londres, v. 112, p. 143–153, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-020-06044-5>. Acesso em: 15 dez. 2024.

HYPERION, **Materials Technologies**. Hyperion Materials and Technologies, Ohio, [S.d.]. Disponível em <https://www.hyperionmt.com/en/>. Acesso em 09 jul. 2024.

JAIN, V. K.; AGARWAL, B. L. Desgaste de ferramentas de corte e suas implicações no desempenho da usinagem. **Journal of Manufacturing Science and Technology**, [s.l.], 2008.

IKS VACUUM. **The classification of tool coating**. IKS, Shenyang, 2018. Disponível em: <https://pt.iksvacuum.com/news/the-classification-of-tool-coating-12595351.html>. Acesso em: 15 dez. 2024.

KANT, G.; SANGWAN, K. S. Prediction and optimization of machining parameters for minimizing power consumption and surface roughness in machining. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdã, v. 83, p. 151–164, 2014.

KALPAKJIAN, S; SCHMID, S. **Manufacturing, engineering and technology**. Chennai, 2009.

KONDO, M. Y. *et al.* Cutting parameters influence investigations on cutting consumed power, surface roughness and tool wear during turning of superalloy VAT32® with PVD coated carbide tools using Taguchi method. **Materials Research**, [S.l.], v. 6, 2019. DOI: 10.1088/2053-1591/ab0da8.

KONDO, M. Y. **Análise do processo de torneamento da superliga VAT 32® com ferramentas de corte experimentais e comerciais**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2019.

KOPEC, M. *et al.* Recent advances in the deposition of aluminide coatings on nickel based superalloys. **Coatings**, Basel, v. 14, n. 5, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/coatings14050630>. Acesso em: 10 dez. 2024.

KUMAR, A. *et al.* Advances in tungsten carbide-based composites: Properties, applications, and challenges. **Journal of Materials Research and Technology**, São Paulo, v. 9, n. 4, p. 7748–7772, 2020.

KRUZHANOV, V.; ZEITZ, V. Investigation of chip formation during high-speed drilling. In: **SCIENTIFIC fundamentals of HSX**, Munich, 2001.

LI, X. A brief review: Acoustic emission method for tool wear monitoring during turning. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Oxford, v. 42, n. 2, p. 157–165, 2002.

LI, X. *et al.* Wear performance of PVD coatings on cemented carbide tools during machining of Inconel 718 superalloy. **Processes**, [S.l.], v. 10, n. 11, p. 2380, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-9717/10/11/2380>. Acesso em: 15 dez. 2024.



LIU, Z. *et al.* Subdivision of chatter-free regions and optimal cutting parameters based on vibration frequencies for peripheral milling process. **International Journal of Mechanical Sciences**, Oxford, v. 83, p. 172–183, 2014.

LUDUFIX, **Broca de aço rápido com TiN: aplicações, benefícios e onde encontrar**. Ludufix, São Paulo, 2024. Disponível em: <https://www.ludufix.com.br/noticias/broca-de-aco-rapido-com-tin-aplicacoes-beneficios-e-onde-encontrar/>. Acesso em: 15 dez. 2024.

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

MAIA, L. H. A. *et al.* A new approach for detection of wear mechanisms and determination of tool life in turning using acoustic emission. **Tribology International**, [S.l.], v. 92, p. 519–532, 2015.

MARINESCU, I.; AXINTE, D. A. A critical analysis of effectiveness of acoustic emission signals to detect tool and workpiece malfunctions in milling operations. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Oxford, v. 48, p. 1148–1160, 2008.

MEHROTRA, P. K. Applications of ceramic cutting tools. **Key Engineering Materials**, Zurich, v. 138-140, p. 1-24, 1998.

MINITAB. **Minitab Statistical Software**. Minitab, State College, 2020. Disponível em: <https://www.minitab.com>. Acesso em: 26 dez. 2024.

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

MONTGOMERY, D. C. **Design and analysis of experiments**. 10th ed. Hoboken: Wiley, 2017.

MORADI, H. *et al.* Vibration absorber design to suppress regenerative chatter in nonlinear milling process: Application for machining of cantilever plates. **Applied Mathematical Modelling**, Parkville, v. 39, n. 2, p. 600–620, 2015.

PAESE, C.; CATEN, C. T.; RIBEIRO, J. L. Aplicação da análise de variância na implantação do CEP. **Revista Produção**, São Carlos, v. 11, n. 1, p. 17–26, 2001.

PAKTINAT, H.; AMINI, S. Numerical and experimental studies of longitudinal and longitudinal-torsional vibrations in drilling of AISI 1045. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, United Kingdom, v.94, p.2577-2592, 2017.

PASPARDELLI, C. **Remoção de Pb e Bi em ligas de níquel por refino a vácuo**. 2011. 136p. Dissertação (Mestrado em engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo 2011.

PEREIRA, M. T.; SANTOS, L. R.; MELO, C. S. Planejamento fatorial completo: Uma abordagem aplicada na indústria farmacêutica. **Revista de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico**, [s.l.], v. 10, n. 2, p. 25–38, 2023.

PIRATELLI FILHO, A. **Rugosidade superficial**, In: SEMINÁRIO DE METROLOGIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, 3., 2011, Uberlândia. **Anais [...]** [S.l.]: [S.n.], [S.d.].

PIMENTEL, R. **Estudo da usinagem de superligas de níquel e a influência da geometria da ferramenta e parâmetros de corte na formação dos cavacos**. 2014. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

RAMOS, F. L. **Seleção de materiais para aplicações industriais avançadas**. Florianópolis: UFSC, 2018.

RAZALI, N. M.; WAH, Y. B. Power comparisons of Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov, Lilliefors and Anderson-Darling tests. **Journal of Statistical Modeling and Analytics**, [s.l.], v. 2, n. 1, p. 21–33, 2011.

REIS, B. *et al.* Aplicação da análise estatística via Teste de Tukey e análise de variância para a avaliação dos parâmetros de qualidade de corte em um processo de fabricação. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 36., 2016, João Pessoa. **Anais [...]**. Natal: UFRN, 2016.

RIBEIRO, L. A. **Aplicação de ferramentas cerâmicas à base de óxido de alumínio no torneamento da superliga VAT 32®**. 2020. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de Guaratinguetá, 2020.

ROCHA, K. R.; BACELAR, J.; ARILTON, J. ANOVA medidas repetidas e seus pressupostos: análise passo a passo de um experimento. **Perspectivas da Ciência e Tecnologia**, Nilópolis, v.10, p.29-51, 2018. Disponível em: <https://revistascientificas.ifrrj.edu.br/index.php/revistapct/article/view/955>. Acesso em 02 dez. 2024.

RUSSELL, T. *et al.* The effect of coatings on tool wear during high-speed machining of Inconel 718. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Londres, v. 113, p. 1257–1269, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00170-020-06080-z>. Acesso em: 15 dez. 2024.

SANDVIK COROMANT. **Materiais de ferramentas de corte**. Jundiaí, [S.d.]. Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/materials/cutting-tool-materials>. Acesso em: 15 dez. 2024.

SANDVIK COROMANT DO BRASIL. **Sandvik Coromant Academy**. Sandvik Coromant, Jundiaí, [S.d.]. Disponível em: <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/services/sandvik-coromant-academy> Acesso em: 09 jul. 2024.

SANTOS, R. A. O. **Estudo da aplicabilidade de ferramentas cerâmicas experimentais na usinagem por torneamento da superliga VAT 80A®**. Orientador Prof. Dr Marcos Valério Ribeiro, 2007. Dissertação (Engenharia Mecânica na área de Materiais) – Faculdade de Medicina, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

SAKHIYA J. K.; ROLA L. M. **A Review on cutting parameters of drilling operation**, Engineering, Materials Science 2014.

SERRA, J. Avanços na tecnologia de superligas para turbinas. **Revista de Materiais Avançados**, [S.l.], v. 10, n. 2, p. 150–165, 2015.

SECO TOOLS AB. **Tecnologia de fresamento**. Sorocaba, 2016.

SILVA, R. H. L. **Monitoramento do desgaste de ferramentas no fresamento de topo através dos sinais de potência e emissão acústica e redes neurais**. 2010. Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14840/1/Rodrigo.pdf>. Acesso em: 04 ago. 2024.

SILVA, G. R.; OLIVEIRA, J. P. Métodos avançados de planejamento de experimentos: Teoria e prática. **Revista Brasileira de Estatística e Pesquisa Operacional**, [S.l.], v. 34, n. 1, p. 50–67, 2022.

SILVA, A. M. E.; MARTINS, L. M. S. Influência da lubrificação e temperatura nas avarias de ferramentas de corte. **Journal of Materials Science**, [S.l.], 2014.

SOUSA, C. A.; LIRA, J. M. A.; FERREIRA, R. L. C. Avaliação de testes estatísticos de comparações múltiplas de médias. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 59, n. 3, p. 350–354, 2012.

SOUTO, U. B. **Monitoramento do desgaste de ferramentas no processo de fresamento via emissão acústica**. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/14788/1/UBSoutoTES01PRT.pdf>. Acesso em: 06 jun. 2024.

SUN, G. et al. A new multi-objective discrete robust optimization algorithm for engineering design. **Applied Mathematical Modelling**, Oxford, v. 53, p. 602–621, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2017.08.016>. Acesso em: 09 jun. 2024.

SUSKI, C. A.; BAHAR, E. A. Insertos e suas aplicações na usinagem. **Revista de Engenharia Mecânica**, [S.l.], v. 12, n. 3, p. 45–53, 2020.

STEMMER, C.E. **Ferramentas de corte I e II**. 3. ed. Florianópolis: Editora UFSC, 1993.

SMITH, W. F.; HASHEMI, J. **Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2012.

SCHMITT, R. et al. PVD coatings for machining of nickel-based superalloys: A review. **Journal of Materials Science**, Dordrecht, v. 57, n. 15, p. 9890–9911, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10853-022-06909-4>. Acesso em: 15 dez. 2024.

SCHNEIDER, P.; WEGMANN, H.; MÖLLER, M. The role of carbide particles in the wear of cutting tools. **Wear**, Amsterdam, v. 258, n. 1-4, p. 45-55, 2005.

SHIMATOOLS. **Ferramentas cobertura**. Santo André, [2013]. Disponível em: <https://www.shimatools.com.br/informa%C3%A7%C3%B5es/cobertura/>. Acesso em: 15 dez. 2024.

THELLAPUTTA, S. *et al.* Tool wear and machinability of nickel-based superalloys: A comprehensive review. **Journal of Manufacturing Processes**, Oxford, v. 29, p. 398–421, 2017.

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

UPADHYAYA, G. S. **Materials science of carbides, nitrides, and borides**. [S.l.]: Springer, 2021.

USINAGEM PRO. **Revestimento PVD**: Tipos, aplicações e vantagens. Caxias do Sul, [S.d.]. Disponível em: <https://usinagempro.com.br/revestimento-pvd-tipos-aplicacoes-e-vantagens/>. Acesso em: 15 dez. 2024.

XU, X. *et al.* High-performance PVD coatings for machining difficult-to-cut materials. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, Seoul, v. 21, p. 1639–1646, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12541-020-00336-w>. Acesso em: 15 dez. 2024.

VIKRAM, K. A.; RATNAM, C.; NARAYANA, K. S. Vibration diagnosis and prognostics of turn-milling operations using HSS and carbide end mill cutters. **Procedia Technology**, Oxford, v. 23, p. 217–224, 2016.

WALPOLE, R.; M. R. **Probabilidade e estatística para engenharia e ciências**. 9. ed. São Paulo, 2009. 490 p. ISBN 8576051990.

WOSNIAK, F. A. *et al.* **Influência dos parâmetros de corte na furação profunda do aço SAE 4144**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 5., 2009, Belo Horizonte. **Anais [...]** Rio de Janeiro: ABCM, 2009.

WANG, D. *et al.* Propriedades nanomecânicas de revestimentos compostos de alumina reforçada com whiskers de carbeto de silício preparados pelo processo híbrido de revestimento rápido por indução a laser. **Journal of Materials Processing Technology**, Oxford, v. 222, p. 78–87, 2015.