



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU**

**CLAITON EDUARDO LUIZETE**

**AVALIAÇÃO DE FERRAMENTAS DE CORTE TEXTURIZADAS REVESTIDAS E  
PREENCHIDAS COM NANOTUBOS DE CARBONO**

**BAURU**

**2022**

CLAITON EDUARDO LUIZETE

**AVALIAÇÃO DE FERRAMENTAS DE CORTE TEXTURIZADAS REVESTIDAS E  
PREENCHIDAS COM NANOTUBOS DE CARBONO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Professor Titular Luiz Eduardo de Angelo Sanchez.

Coorientador: Professor Mestre Fernando Sabino Fontequê Ribeiro.

**BAURU**

**2022**

Luizete, Claiton Eduardo  
L953a      Avaliação de ferramentas de corte texturizadas  
revestidas e preenchidas com nanotubos de carbono /  
Claiton Eduardo Luizete. -- Bauru, 2022  
104 f.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual  
Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, Bauru  
Orientador: Luiz Eduardo de Angelo Sanchez  
Coorientador: Fernando Sabino Fontequê Ribeiro

1. Ferramenta de corte texturizada. 2. Nanotubos  
de carbono. 3. Torneamento. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp.  
Biblioteca da Faculdade de Engenharia, Bauru. Dados fornecidos pelo  
autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

**ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE CLAITON EDUARDO LUIZETE, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.**

Aos 16 dias do mês de dezembro do ano de 2022, às 09:00 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de CLAITON EDUARDO LUIZETE, intitulada **AValiação de Ferramentas de Corte Texturizadas Revestidas e Preenchidas com Nanotubos de Carbono**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. LUIZ EDUARDO DE ANGELO SANCHEZ (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru UNESP, Prof. Dr. ALESSANDRO ROGER RODRIGUES (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Universidade de São Paulo / USP - São Carlos, Prof. Dr. JOSÉ CLAUDIO LOPES (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Campus de Bauru. Após a exposição pelo mestrando e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, o discente recebeu o conceito final: \_\_ APROVADO \_\_ . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. LUIZ EDUARDO DE ANGELO SANCHEZ



Aos meus queridos e tão amados pais, Leosino e Cleonice, dedico este trabalho e agradeço pelo constante fortalecimento e apoio para realização desta etapa. Dedico também a todos os professores que me acompanharam nesta jornada e aos grandes amigos que fiz neste período.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder o dom da vida, uma segunda vida, força e fé durante este período de pesquisa que foi concomitante com tratamento do câncer, esteve dando amparo em todos os momentos de difíceis.

Essa dissertação é dedicada à minha família, aos meus pais Leosino e Cleonice que foram, desde sempre, a estrutura de minha força, perseverança e estabilidade para concluir este trabalho.

Agradeço em especial meu orientador, Professor Titular Luiz Eduardo de Angelo Sanchez, que foi quem me permitiu iniciar e concluir toda a jornada deste trabalho, por me conceder a oportunidade de ser seu orientado, aconselhando e direcionando em todos os momentos durante a realização do mestrado.

Ao meu coorientador Fernando Sabino Fontequê Ribeiro, agradeço pelos conselhos, incentivos, motivação, paciência e constante ajuda direcionando durante a realização deste trabalho, pela oportunidade em dar sequência ao seu trabalho inicial, e pelas inúmeras conversas.

Agradeço ao Hélio Aparecido de Souza, pela enorme ajuda em relação ao uso dos equipamentos do laboratório, pelo incessante apoio. Também ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da UNESP Bauru, por me propiciar as condições para a realização do meu trabalho.

Pelo convívio, ajuda em discussões sobre o trabalho, sobre dificuldades do mestrado, e pelas inúmeras conversas em momentos difíceis e de descontração, agradeço ao amigo José Claudio Lopes.

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP) especialmente ao campus Catanduva pela possibilidade do afastamento para capacitação, o qual facilitou para que este trabalho fosse realizado.

Com satisfação agradeço a todos os professores com que tive contato durante a realização das disciplinas, que muito me acrescentaram em minha formação profissional. Obrigado professores Dr. Cesar Renato Foschini, Dr. Paulo Roberto de Aguiar e principalmente ao professor Dr. Eduardo Carlos Bianchi pelos inúmeros conselhos e conversas na hora do café.

Por fim, ao Prof. Dr. Marcelo Ornaghi Orlandi e ao técnico de laboratório Diego Luiz Tita, pela disponibilização dos espaços do Instituto de Química (IQ-Unesp) e pela realização das imagens de microscopia eletrônica de varredura.

Agradeço ao professor Dr. Carlos Alberto Fortulan pelo acesso e a realização da prensagem isostática das ferramentas de corte na Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da USP.

Por fim, agradeço a todas as pessoas com quem tive contato nesses últimos três anos na UNESP. Todos vocês fazem parte da minha evolução pessoal. Obrigado.

*“Uma vida boa é aquela inspirada pelo amor  
e guiada pelo conhecimento.”*

*Bertrand Russell*

## RESUMO

Grande parte dos esforços para evolução dos processos de usinagem tem focado em novos materiais para ferramentas de corte e revestimentos, bem como técnicas eficientes para aplicação de fluido de corte. No entanto, a texturização de micro e nano-geometrias na superfície de saída das ferramentas tem-se mostrado uma importante alternativa para melhorar o desempenho da usinagem. Para o corte a seco, a redução da área de contato entre cavaco e ferramenta permite menor interação entre as partes, reduzindo as temperaturas e adesão, com consequente aumento da vida da ferramenta de corte. Ademais as geometrias texturizadas permitem maior alcance e retenção do fluido de corte, quando aplicado, aumentando a eficiência na troca térmica. Trabalhos recentes têm proposto a inserção de materiais com características lubrificante no interior das texturas e, mais recentemente, a introdução de materiais com alta condutividade térmica. Este trabalho tem como objetivo avançar no desenvolvimento de ferramentas de corte texturizadas preenchidas com nanotubos de carbono, porém aplicando revestimento de TiAlN antes do preenchimento das micro ranhuras com nanotubos de carbono. Foram empregadas ferramentas de corte de metal duro, texturizadas por meio de laser, e posteriormente revestidas de TiAlN pelo processo de PVD. O torneamento em aço em aço ABNT 1045 foi aplicado para avaliar condições de vida e desgaste da ferramenta de corte, força de usinagem, temperatura na ferramenta de corte, atrito na interface cavaco/ferramenta e adesão de material da peça na ferramenta de corte sob velocidade de corte de 150 m/min em condições a seco, com fluido de corte e a seco com nanotubos de carbono. Como principal resultado foi verificado que houve proximidade na vida da ferramenta, dada em volume de material removido, entre a condição com nanotubos de carbono e texturas sob fluido de corte.

**Palavras-chave:** Ferramenta de corte texturizada. Revestimento. Nanotubos de carbono. Torneamento.

## ABSTRACT

Much of the efforts to evolve machining processes have focused on new materials for cutting tools and coatings, as well as efficient techniques for applying cutting fluid. However, texturing micro and nano-geometries on the rake face of tools has been shown to be an important alternative to improve machining performance. For dry cutting, reducing the contact area between chip and tool allows for less interaction between the parts, reducing temperatures and adhesion, with a consequent increase in the life of the cutting tool. In addition, the textured geometries allow greater reach and retention of the cutting fluid, when applied, increasing the efficiency of the thermal exchange. Recent works have proposed the insertion of materials with lubricant characteristics inside the textures and, more recently, the introduction of materials with high thermal conductivity. This work aims to advance in the development of textured cutting tools filled with carbon nanotubes, but applying TiAlN coating before filling the micro grooves with carbon nanotubes. Carbide cutting tools were used, textured using a laser, and subsequently coated with TiAlN using the PVD process. ABNT 1045 steel turning in steel was applied to evaluate life and wear conditions of the cutting tool, machining force, temperature in the cutting tool, friction in the chip/tool interface and adhesion of the workpiece material in the cutting tool under speed cutting speed of 150 m/min in dry conditions, with cutting fluid and dry conditions with carbon nanotubes. As a main result, it was verified that there was proximity in tool life, given in volume of material removed, between the condition with carbon nanotubes and textures under cutting fluid

**Key-words:** Textured cutting tool. Coating. Carbon nanotubes. Turning.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1: Áreas de contato.....                                                                                                                                                    | 29 |
| Figura 2: Zona de aderência e deslizamento. ....                                                                                                                                   | 30 |
| Figura 3: Mudanças no coeficiente de atrito sob condições de deslizamento longo.....                                                                                               | 31 |
| Figura 4: Diagramas esquemáticos de efeito de microsulcos na captura de detritos e área de condução térmica.....                                                                   | 32 |
| Figura 5: Diagrama esquemático do comprimento de contato do cavaco e ferramenta.....                                                                                               | 33 |
| Figura 6: Fontes de geração de calor no processo de corte. ....                                                                                                                    | 34 |
| Figura 7: Representação da temperatura de usinagem de aço com médio teor de carbono. ....                                                                                          | 35 |
| Figura 8: Termografia infravermelha de ferramentas de corte WC-10Ni3Al em corte a seco.                                                                                            | 37 |
| Figura 9: Interação entre ferramenta com refrigerante e cavaco, e a formação de hidro cunhas na superfície de saída e flanco. ....                                                 | 38 |
| Figura 10: a) Ferramenta convencional com lubrificação convencional; b) Ferramenta convencional com lubrificação à 8MPa; c) ferramenta texturizadas com lubrificação de 8MPa. .... | 39 |
| Figura 11: Diagrama esquemático de texturas de superfície preenchidas com lubrificantes sólidos a) na superfície de saída b) flanco. ....                                          | 40 |
| Figura 12: a) micro canais perpendiculares ao fluxo de cavaco; b) micro canais paralelos ao fluxo de cavaco. ....                                                                  | 41 |
| Figura 13: Diagrama esquemático do corte derivado .....                                                                                                                            | 43 |
| Figura 14: Representação esquemática de uma camada de grafeno que origina um nanotubo                                                                                              | 48 |
| Figura 15: Representação esquemática do processo PVD.....                                                                                                                          | 49 |
| Figura 16: Microdureza dos revestimentos de Ti(C,N), (Ti,Al)N, TiN e Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> para diferentes temperaturas.....                                              | 51 |
| Figura 17: Ferramenta de corte com (a) micro ranhuras e (b) proposta com modificação (medidas em milímetros). ....                                                                 | 55 |
| Figura 18: Tensões na ferramenta de corte texturizada com micro ranhuras de 0,3 mm de largura nas profundidades de (a) 0,25 mm, (b) 0,50 mm, (c) 0,75 mm e (d) 1,0 mm. ....        | 56 |
| Figura 19: Simulação da temperatura na ferramenta de corte com micro ranhuras de 0,3 mm de largura nas profundidades de (a) 0,25mm, (b) 0,50 mm e (c) 0,75 mm. ....                | 56 |
| Figura 20: Temperatura na superfície das ferramentas de corte convencional e com micro ranhuras preenchidas com NTCs com diferentes profundidades (0,25, 0,50 e 0,75 mm). ....     | 57 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 21: Ferramenta de corte com micro ranhuras sem preenchimento com NTCs.....                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 58 |
| Figura 22: Gráfico de vida de ferramenta para condição a seco (50m/min). ....                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 60 |
| Figura 23: Imagem das ferramentas de corte texturizadas: (a) convencional; (b) micro furos;<br>(c) micro ranhuras; (d) micro ranhuras com 0,1 mm de profundidade; (d) micro ranhuras com<br>0,25 mm de profundidade; (e) micro ranhuras em ambas arestas com 0,25 mm de<br>profundidade; (g) com 0,50 mm de profundidade; e (h) com 0,75 mm de profundidade. .... | 62 |
| Figura 24: Imagens de MEV das ferramentas texturizadas. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 63 |
| Figura 25: Imagem de MEV da ferramenta e composição elementar por EDS do revestimento.<br>.....                                                                                                                                                                                                                                                                   | 64 |
| Figura 26: Imagem de MEV da espessura do revestimento de TiAlN.....                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 64 |
| Figura 27: Representação do processo de prensagem isostática aplicado.....                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 65 |
| Figura 28: Imagem da ferramenta com ranhuras preenchidas com nanotubos de carbono: a)<br>após prensagem isostática; b) após limpeza superficial. ....                                                                                                                                                                                                             | 66 |
| Figura 29: Ferramenta de corte texturizada com 0,75 mm de profundidade: Ampliação a)37x,<br>b)300x, c)1500x, d)5000x, e)20000x e f)50000x.....                                                                                                                                                                                                                    | 66 |
| Figura 30: Representação do porta ferramentas. a) canais para passagem dos termopares; b)<br>ferramenta sobre os termopares; c) canal de saída dos condutores. ....                                                                                                                                                                                               | 67 |
| Figura 31: Posição final dos termopares no suporte de ferramentas. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 68 |
| Figura 32: Disposição do conjunto no torno CNC. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 69 |
| Figura 33: Representação dos componentes para aquisição de dados.....                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 69 |
| Figura 34: Ângulo da aresta de corte lateral e ângulo de saída do porta ferramentas.....                                                                                                                                                                                                                                                                          | 71 |
| Figura 35: Temperatura obtida no ensaio preliminar. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 72 |
| Figura 36: Forças de usinagem obtidas no ensaio preliminar. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 72 |
| Figura 37: Ferramentas de corte (a) convencional, (b) com micro furos, (c) micro ranhuras,<br>(d) micro ranhuras com 0,1 mm de profundidade, (e) micro ranhuras com 0,25 mm de<br>profundidade, (f) micro ranhuras com 0,25 mm e NTCs, (g) micro ranhuras com 0,5 mm e<br>NTCs, (h) micro ranhuras com 0,75 mm e NTCs. ....                                       | 73 |
| Figura 38: Desgaste de flanco em função do volume de material removido em condições a<br>seco. ....                                                                                                                                                                                                                                                               | 75 |
| Figura 39: Desgaste de flanco em função do volume de material removido com aplicação de<br>fluido de corte.....                                                                                                                                                                                                                                                   | 76 |
| Figura 40: Gráfico de vida de ferramentas para condição com nanotubos de carbono.....                                                                                                                                                                                                                                                                             | 76 |
| Figura 41: Ferramenta de corte no início e final da vida na usinagem a seco.....                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 77 |
| Figura 42: Ferramenta de corte no início e final da vida na usinagem com fluido de corte. ...                                                                                                                                                                                                                                                                     | 77 |

|                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 43: Ferramenta de corte com NTCs no início e final da vida. ....                                      | 78 |
| Figura 44: Vida de ferramenta nas melhores situações. ....                                                   | 78 |
| Figura 45: Rugosidade média aritmética (Ra) em diferentes condições. ....                                    | 79 |
| Figura 46: EDS na ferramenta convencional (condição 1.3).....                                                | 80 |
| Figura 47: EDS na ferramenta com micro furos (condição 3.3). ....                                            | 81 |
| Figura 48: EDS na ferramenta com micro ranhuras (condição 5.3).....                                          | 81 |
| Figura 49: EDS na ferramenta com micro ranhuras de 0,1 mm de profundidade (condição 7.3).....                | 81 |
| Figura 50: EDS na ferramenta com micro ranhuras de 0,25 mm de profundidade (condição 9.3).....               | 82 |
| Figura 51: EDS na ferramenta convencional com fluido de corte (condição 2.3). ....                           | 85 |
| Figura 52: EDS na ferramenta com micro furos com fluido de corte (condição 4.3) ....                         | 86 |
| Figura 53: EDS na ferramenta com micro ranhuras com fluido de corte (condição 6.3).....                      | 86 |
| Figura 54: EDS na ferramenta com micro ranhuras de 0,1 mm com fluido de corte.....                           | 86 |
| Figura 55: EDS na ferramenta com micro ranhuras de 0,25 mm com fluido de corte.....                          | 87 |
| Figura 56: EDS na ferramenta com micro ranhuras de 0,25 mm de profundidade com NTCs (condição 11.3). ....    | 88 |
| Figura 57: EDS na ferramenta com micro ranhuras de 0,5 mm NTCs ....                                          | 89 |
| Figura 58: EDS na ferramenta micro ranhuras de 0,75 mm com NTCs ....                                         | 89 |
| Figura 59: Coeficiente de atrito médio obtido ao longo dos testes em todas as condições de usinagem.....     | 90 |
| Figura 60: Temperaturas nos termopares para as condições a seco. ....                                        | 93 |
| Figura 61: Temperaturas nos termopares para as condições sob fluido de corte. ....                           | 93 |
| Figura 62: Componentes da força de usinagem média para todas condições de ensaio. ....                       | 94 |
| Figura 63: Comparação entre área de contato na condição 1.3 e posicionamento da superfície texturizada. .... | 96 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1: Faixas de distribuição de energia.....                                                                                                                  | 36 |
| Tabela 2: Modelos texturizados encontrados na bibliografia. ....                                                                                                  | 44 |
| Tabela 3: Temperatura máxima (°C) obtida por simulação em ferramentas de corte com microfuros de diâmetros e profundidades diferentes.....                        | 53 |
| Tabela 4: Temperatura máxima (°C) obtida por simulação em ferramentas de corte com micro ranhuras de larguras e profundidades diferentes. ....                    | 54 |
| Tabela 5: Temperatura máxima (°C) obtida por simulação em ferramentas de corte com micro ranhuras de 0,3 mm de largura e diferentes profundidades. ....           | 55 |
| Tabela 6: Temperatura máxima (°C) obtida por simulação em ferramentas de corte modificada com micro ranhuras de 0,3 mm de largura e diferentes profundidades..... | 56 |
| Tabela 7: Distribuição dos elementos químicos por EDS para usinagem a seco (%). ....                                                                              | 83 |
| Tabela 8: Distribuição dos elementos químicos por EDS para usinagem com fluido (%). ....                                                                          | 85 |
| Tabela 9: Distribuição dos elementos químicos por EDS para usinagem com NTCs (%). ....                                                                            | 88 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

|                 |                                               |
|-----------------|-----------------------------------------------|
| $A_a$           | Área de contato aparente                      |
| Al              | Alumínio                                      |
| ap              | Profundidade de corte                         |
| $A_r$           | Área real de contato                          |
| C               | Carbono                                       |
| $\text{CaF}_2$  | Difluoreto de cálcio                          |
| CNC             | Comando numérico computadorizado              |
| Co              | Cobalto                                       |
| $\text{CoO}$    | Óxido de cobalto                              |
| $\text{CoWO}_4$ | Tungstato de cobalto                          |
| EDS             | Espectroscopia dispersiva de raios x          |
| $f$             | Avanço                                        |
| $F_{at}$        | Força de atrito                               |
| Fe              | Ferro                                         |
| $F_N$           | Força normal à superfície de saída            |
| $F_x$           | Força de avanço                               |
| $F_y$           | Força passiva ou radial                       |
| $F_z$           | Força de corte                                |
| HPC             | <i>High pressure cooling</i>                  |
| HSM             | <i>High speed machining</i>                   |
| $l$             | Comprimento de contato da região de aderência |
| LAM             | <i>Laser assisted machining</i>               |
| $l_n$           | Comprimento de contato                        |
| MEV             | Microscopia eletrônica de varredura           |
| MQL             | Mínima quantidade de lubrificante             |
| $\mu$           | Coeficiente de atrito                         |
| $\text{MoS}_2$  | Dissulfeto de molibdênio                      |
| N               | Nitrogênio                                    |
| $N$             | Carga normal                                  |
| Na              | Sódio                                         |
| NTC             | Nanotubos de carbono                          |
| O               | Oxigênio                                      |

|                        |                                                                          |
|------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| P                      | Fósforo                                                                  |
| $P$                    | Pressão necessária para produzir deformação plástica das irregularidades |
| $Pm$                   | Taxa geral de calor gerado                                               |
| Ra                     | Rugosidade média aritmética                                              |
| Rz                     | Rugosidade média                                                         |
| S                      | Enxofre                                                                  |
| S                      | Resistência ao cisalhamento das irregularidades                          |
| SAE                    | <i>Society of Automotive Engineers</i>                                   |
| T1                     | Temperatura termopar 1                                                   |
| T2                     | Temperatura termopar 2                                                   |
| T3                     | Temperatura termopar 3                                                   |
| Ti                     | Titânio                                                                  |
| TiB <sub>2</sub>       | Dibrometo de titânio                                                     |
| TiAlN                  | Nitreto de Titânio Alumínio                                              |
| V                      | Vanádio                                                                  |
| VBB                    | Desgaste médio de flanco                                                 |
| Vc                     | Velocidade de corte                                                      |
| W                      | Tungstênio                                                               |
| WC-Co                  | Carbeto de tungstênio com cobalto                                        |
| WO <sub>3</sub>        | Trióxido de tungstênio                                                   |
| WS <sub>2</sub>        | Dissulfeto de tungstênio                                                 |
| $\alpha$               | Ângulo de saída                                                          |
| $\theta$               | Ângulo de posicionamento da ferramenta                                   |
| $\sigma_r$             | Tensão normal                                                            |
| $\tau_r$               | Tensão de atrito                                                         |
| $\tau_{r \text{ máx}}$ | Tensão de cisalhamento do material                                       |
| $\Phi_c$               | Taxa de calor transportado pelo cavaco                                   |
| $\Phi_t$               | Taxa de calor conduzido para a ferramenta                                |
| $\Phi_w$               | Taxa de calor conduzido para peça de trabalho                            |

## SUMÁRIO

|                                                                                            |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO .....</b>                                                                  | <b>24</b> |
| 1.1 OBJETIVOS .....                                                                        | 25        |
| 1.2 MOTIVAÇÃO .....                                                                        | 25        |
| <b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>                                                       | <b>27</b> |
| 2.1 ATRITO NA USINAGEM .....                                                               | 27        |
| 2.1.1 Atrito para ferramentas de corte texturizadas .....                                  | 30        |
| 2.2 GERAÇÃO DE ENERGIA DURANTE A USINAGEM .....                                            | 33        |
| 2.2.1 Temperatura na usinagem com ferramentas de corte texturizadas .....                  | 37        |
| 2.2.2 Relação entre forças de usinagem e ferramentas de corte texturizadas .....           | 40        |
| 2.3 TEXTURIZAÇÃO DE SUPERFÍCIE .....                                                       | 43        |
| 2.4 NANOTUBOS DE CARBONO .....                                                             | 47        |
| 2.5 REVESTIMENTO .....                                                                     | 48        |
| 2.5.1 Processo de revestimento PVD .....                                                   | 49        |
| 2.5.2 Revestimento TiAlN .....                                                             | 50        |
| <b>3 MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>                                                         | <b>52</b> |
| 3.1 GEOMETRIAS PARA A TEXTURIZAÇÃO .....                                                   | 52        |
| 3.1.1 Desenvolvimento das ferramentas de corte texturizadas com nanotubos de carbono ..... | 52        |
| 3.1.2 Definição das texturas e condições dos testes .....                                  | 57        |
| 3.1.3 Parâmetros de corte .....                                                            | 60        |
| 3.2 FABRICAÇÃO E AVALIAÇÃO DAS FERRAMENTAS DE CORTE TEXTURIZADAS .....                     | 61        |
| 3.2.1 Texturização e avaliação das ferramentas .....                                       | 61        |
| 3.2.2 Deposição do revestimento .....                                                      | 63        |
| 3.2.3 Deposição dos nanotubos de carbono nas ferramentas de corte texturizadas .....       | 64        |
| 3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....                                                        | 66        |
| 3.3.1 Porta ferramentas .....                                                              | 67        |
| 3.3.2 Montagem do conjunto para usinagem .....                                             | 68        |
| 3.3.3 Corpos de prova .....                                                                | 70        |
| 3.3.4 Análise de dados .....                                                               | 70        |
| 3.4 ENSAIOS PRELIMINARES .....                                                             | 73        |
| <b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>                                                      | <b>74</b> |
| 4.1 VIDA DE FERRAMENTA E VOLUME DE MATERIAL REMOVIDO .....                                 | 74        |
| 4.2 RUGOSIDADE .....                                                                       | 78        |

|                                                                  |           |
|------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.3 ANÁLISE EM MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA.....          | 80        |
| 4.3.1 Usinagem a seco.....                                       | 80        |
| 4.3.2 Usinagem com aplicação de fluido de corte.....             | 83        |
| 4.3.3 Ferramentas de corte com nanotubos de carbono (NTCs) ..... | 87        |
| 4.4 ATRITO.....                                                  | 89        |
| 4.5 TEMPERATURA.....                                             | 91        |
| 4.6 FORÇA DE USINAGEM.....                                       | 94        |
| <b>5. CONCLUSÕES.....</b>                                        | <b>97</b> |
| <b>6. REFERÊNCIAS .....</b>                                      | <b>98</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A produtividade tem sido um ponto importante e limitante do ponto de vista da competitividade industrial, isso se reflete na necessidade de maiores velocidades de corte e avanços na usinagem. Não obstante, materiais novos e mais resistentes têm sido necessários para atender as demandas de projetos. Com isso, geometrias e materiais de ferramentas de corte têm sido desenvolvidos para melhorar o desempenho da usinagem. Entretanto, as altíssimas taxas de deformação do cavaco continuam a gerar calor, independente do métodos de refrigeração/lubrificação, geometria e material aplicado na ferramenta de corte (TRENT; WRIGHT, 2000).

Para arrefecimento da zona de corte, destacam-se variadas técnicas de aplicação de fluido de corte, como mínima quantidade de lubrificante (MQL), jato de alta pressão, refrigeração criogênica, entre outras. Os fluidos de corte são amplamente utilizados na indústria metalmeccânica para reduzir o impacto negativo da temperatura, no entanto sua aplicação passa por intensa análise devido às preocupações com os potenciais riscos à saúde, aos efeitos nocivos ao meio ambiente, ao custo associado à reciclagem e descarte adequado, em virtude das normas ambientais impostas pelas agências reguladoras que estão cada vez mais severas (KISHAWY et al., 2021). Soma-se, ainda, os efeitos adversos para usinagem de produtos com aplicações biomédicas (FASASI et al., 2009). Uma gama de fluidos de corte vem sendo desenvolvidos, como fluidos de corte de base vegetal, refrigerantes gasos e nanofluidos, oferecendo fluidos de corte alternativos e ambientalmente corretos. No entanto, esses refrigerantes alternativos ainda são caros e seu desempenho são controversos (DUAN et al., 2019).

Esses fatores têm motivado a redução do uso do fluido de corte e promovido a usinagem em seco como uma alternativa promissora, dessa forma motivando as pesquisas voltadas ao desenvolvimento de novas características para ferramentas de corte, como a texturização.

A fabricação de geometrias texturizadas permite a funcionalização das superfícies através da fabricação e do controle de micro ou nano características. A texturização expande-se em aplicações físicas (energia superficial, ótica e térmica), biológicas (adsorção) e tecnológicas (mecânicas, hidrodinâmicas e tribológicas) (BRUZZONE et al., 2008). A texturização de ferramentas de corte tem sido investigada em inúmeros trabalhos, possibilitando melhorias na aplicação de lubrificantes ou mesmo no corte a seco, indicando assim a versatilidade desta técnica se comparada a condições convencionais (ARSLAN et al., 2016; SHARMA; PANDEY, 2016). As ferramentas de corte texturizadas têm mostrado melhorias significativas nos aspectos tribológicos, assim os avanços na texturização

de ferramentas revelaram sua eficácia na redução do atrito e desgaste no processo de usinagem de torneamento (SIJU; WAIGAONKAR, 2021). Ainda as superfícies texturizadas cumprem bem o papel de reter o fluido de corte, quando empregado, e reduzir o contato real entre a ferramenta e o cavaco, minimizando a região aderente na interface cavaco/ferramenta (SUGIHARA; ENOMOTO, 2009).

Além do exposto, o emprego de materiais de alta condutividade nos sulcos das texturas na superfície de saída da ferramenta pode propiciar novas vertentes para a aplicação de ferramentas de corte texturizadas (RIBEIRO, 2019), auxiliando no transporte de calor para além dos locais de altas temperaturas, na zona de corte, minimizando os mecanismos de desgaste e aumentando o desempenho do processo de usinagem. Dentre esses materiais, o nanotubo de carbono destaca-se por sua altíssima condutividade térmica, entre 2000 e 6000 W/m.K para um único nanotubo. Clique ou toque aqui para inserir o texto. (YAZID; SIDIK; YAHYA, 2017).

## 1.1 OBJETIVOS

Desta forma, o trabalho tem como objetivo geral o uso de nanotubos de carbono compactados no interior das texturas para auxiliar na remoção do calor da zona de corte, avaliando seu desempenho frente às ferramentas convencionais e texturizadas, comumente encontradas na literatura, ambas na condição a seco e com fluido de corte. Em relação ao trabalho desenvolvido por Ribeiro (2019), agora as ferramentas são revestidas pelo processo PVD com TiAlN, sendo comparadas às ferramentas com diversas geometrias de texturas, com e sem nanotubos de carbono, em condições a seco e com fluido de corte.

Quanto aos testes para avaliação do desempenho das ferramentas, as seguintes tarefas são desenvolvidas: confecção das texturas nas ferramentas de corte; ensaios de torneamento em corpos de prova ABNT 1045; medição de força e temperatura; medição da rugosidade; cálculo do coeficiente de atrito; medição do desgaste de flanco das ferramentas de corte; e microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia por energia dispersiva de raios x para determinação dos elementos químicos residuais nas ferramentas de corte.

## 1.2 MOTIVAÇÃO

Na busca bibliográfica realizada nas plataformas de pesquisa, notou-se a ausência de literatura relacionada às técnicas de otimização de ferramentas de corte texturizadas revestidas com aplicação de nanotubos de carbono. Deste modo, pretende-se melhorar o conceito da

técnica de texturização com a aplicação de revestimento e nanotubos de carbono a fim de reduzir os custos envolvidos com o fluido de corte e se alinhar às leis, regulamentações e pressões sociais que obrigam as empresas a buscarem maneiras de tornarem os seus processos ambientalmente sustentáveis.

Neste contexto, a motivação para o presente trabalho se dá na direção do avanço na eficiência da técnica da texturização de ferramentas de corte por meio da aplicação de nanotubos de carbono no interior das micro ranhuras, confeccionadas com geometria apropriada para a maximização do efeito de transferência de calor, contribuindo para a eliminação da utilização de fluido de corte.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este parágrafo apresenta uma contextualização da ação do atrito, da temperatura e dos esforços de corte nos processos de usinagem utilizando de ferramentas de corte revestidas e texturizadas, bem como, serão apresentados os principais aspectos da texturização e o grande potencial da aplicação dos nanotubos de carbono para aumento da vida útil das ferramentas de corte.

### 2.1 ATRITO NA USINAGEM

De acordo com Bacci da Silva e Wallbank (1999), quase todo o trabalho realizado na operação de corte é transformado em calor. Isto ocorre devido a existência de forças de atrito a serem vencidas. O trabalho realizado na operação de corte pode ser dividido em três partes: (i) trabalho para cisalhar o material a fim de formar o cavaco e a nova superfície; (ii) trabalho para mover o cavaco pela superfície de saída da ferramenta; e (iii) trabalho necessário para mover a nova superfície usinada pelas superfícies de folga da ferramenta. O trabalho realizado para cortar o material e formar o cavaco envolve a dissipação de calor proveniente do cisalhamento interno, enquanto que para as outras duas parcelas esse trabalho é resultado do atrito entre ferramenta/cavaco e ferramenta/peça, de tal modo que, nesses casos, também pode ocorrer o cisalhamento interno em decorrência da adesão entre as superfícies.

Durante a usinagem, o cavaco flui sobre a superfície de saída da ferramenta com alta velocidade levando ao contato entre o cavaco e a ferramenta, que resulta em alta pressão e temperatura na região de contato (MELKOTE et al., 2017). O processo de corte é frequentemente acompanhado por grande tensão e deformação, bem como do acúmulo evidente de calor, o que leva ao desgaste rápido da ferramenta de corte (DENG et al., 2020). A definição da área real de contato ( $A_r$ ) entre superfícies deslizantes pode ser dada por (Equação 1):

$$A_r = \frac{N}{p} \quad (1)$$

sendo  $N$  a carga normal aplicada ao longo das superfícies e  $p$  é a pressão para provocar deformação plástica das irregularidades. Segundo Shaw (2005), conforme a carga é aplicada, aos poucos, os pontos que fazem contato são deformados plasticamente e a  $A_r$  aumenta. Assim, a área real de contato será independente da área aparente de contato, logo será determinada pela carga aplicada e pela tensão de fluxo ou dureza das irregularidades. O movimento relativo entre

as duas superfícies de contato causa cisalhamento das irregularidades em contato. A força de atrito  $F_{at}$  necessária para deformar essas irregularidades é dada pela Equação 2:

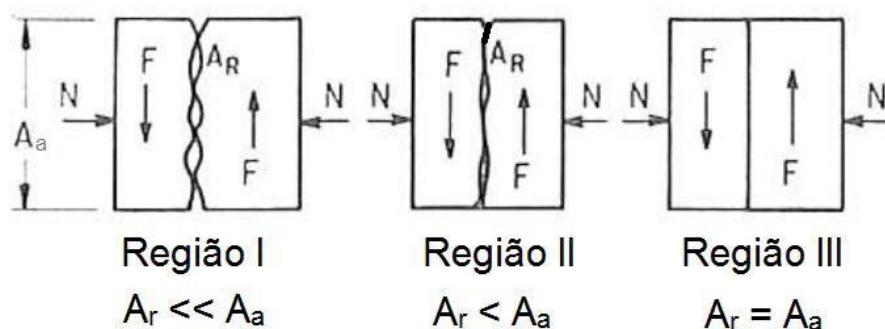
$$F_{at} = A_r s \quad (2)$$

onde  $s$  é a resistência ao cisalhamento das irregularidades. Coulomb afirma que a relação sobre atrito entre dois componentes pode ser compreendida pela Equação 3

$$\mu = \frac{F_{at}}{N} = \frac{s}{p} \quad (3)$$

onde  $\mu$  é o coeficiente de atrito. No corte de metais, o atrito acontece devido à severa deformação plástica do metal e das condições tribológicas extremas presentes nas interfaces da peça e ferramenta (SHAW, 2005). Os esforços de modelagem e simulação de corte de metal têm se baseado em dados de tensão-deformação derivados de testes de materiais quase estáticos e/ou dinâmicos para calibrar modelos constitutivos (HAMANN; MESLIN; SARTKULVANICH, 2002), onde os dados são críticos para modelagem e simulação de processos de usinagem, pois devem incluir propriedades das termofisuras, dependentes da temperatura e dados de microestrutura da peça de trabalho, que muitas vezes são difíceis de encontrar ou medir, para os materiais e condições de deformação de interesse (MELKOTE et al., 2017). Nota-se que as grandes taxas de tensão deformação são frequentemente estimadas usando modelos analíticos baseados em plano de corte simplificados, que não foram validados usando técnicas experimentais adequadas capazes de medir tais valores em condições práticas de corte, afirma Melkote (2017). Observa-se na Figura 1 (Região I) a variação do atrito para cargas normais. A força de atrito é dada pela Equação 2, mas não está mais linearmente relacionado à força normal (BAILEY, 1975). Essas condições são mostradas na Figura 1 (Região II). Em cargas normais muito altas, a área real de contato pode se aproximar, ou tornar-se igual à área aparente de contato ( $A_a$ ), sendo essas as condições para a existência do *sticking friction* (Figura 1– Região II), que é a adesão de material na superfície da ferramenta em vez de deslizar sobre ela. Isso ocorre quando a tensão normal na superfície de corte é maior que a tensão de cisalhamento do metal (BAILEY, 1975).

Figura 1: Áreas de contato.

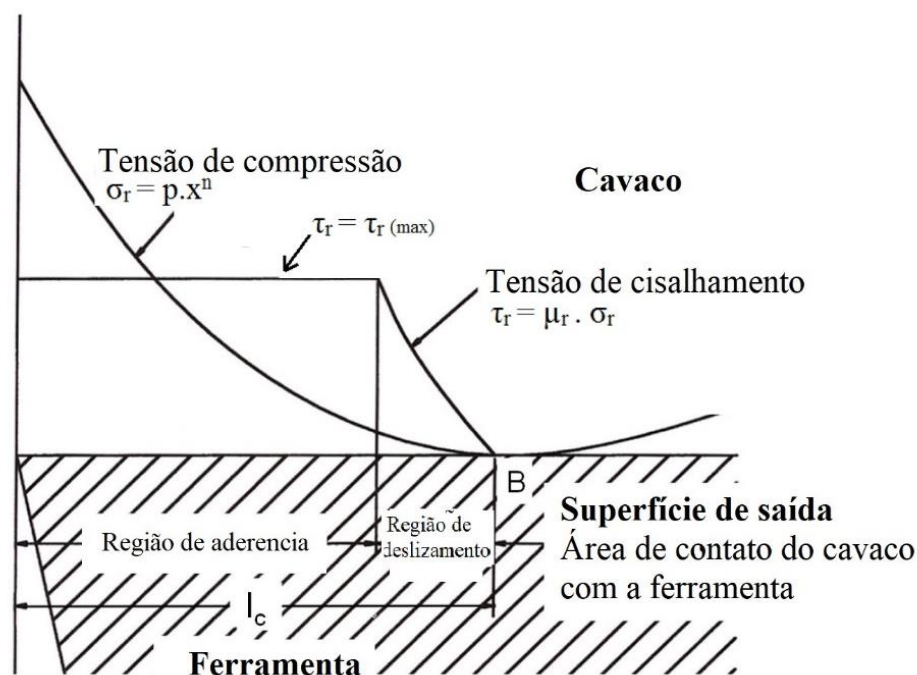


Fonte: Adaptado de Bailey (1975).

Bailey, (1975), mostrou que diversos autores estudaram a determinação das condições de atrito no flanco da ferramenta de corte. Também foram apresentados estudos com flanco desgastado artificialmente (THOMSEN; MACDONALD; KOBAYASHI, 1962), onde foram inseridas com o objetivo de modelar a interferência do aumento da área de contato no flanco da ferramenta de corte nas resultantes das forças de corte, mostrando que o aumento do contato na área estudada tem como resultante o aumento na força de corte e um elevado aumento na força de avanço. Diferentes autores (OKOSHI; SATA, 1958) validam que a condição de atrito no flanco da ferramenta de corte é do tipo adesivo (*sticking friction*), visto que para determinadas velocidades de corte a grande adesão de material mostra que a área real de contato foi similar às regiões II e III da Figura 1.

Referente à superfície de saída da ferramenta de corte, existe uma condição variada para o atrito na interface cavaco-ferramenta. Zorev (1963) propõe, conforme mostrado na Figura 2, que na região onde acaba o contato entre o cavaco e a ferramenta de corte, a tensão de atrito e a tensão normal tendem a zero e que de acordo com o ponto  $x$ , quando se aproxima da aresta de corte, ocorre um acréscimo exponencial na tensão normal ( $\sigma_r$ ). Na região  $0 < x < (\ln-l)$ , a tensão de atrito ( $\tau_r$ ) aumenta conforme a tensão normal chegar mais perto da aresta de corte. No ponto em que  $x$  é igual a  $(\ln-l)$ , a tensão normal chega a um ponto alto, causando uma área de contato real igual a área de contato aparente, e a tensão de atrito então se torna equivalente a tensão de cisalhamento do material ( $\tau_{r \text{ máx}}$ ). Assim a área de contato pode ser apontada como duas regiões distintas, sendo a região de aderência (*sticking region*) e a região de deslizamento (*sliding region*), das quais, a área de deslizamento, o coeficiente de atrito é constante e para a área de aderência a tensão de atrito é máxima e igual a tensão de máxima de cisalhamento do material da peça (ZOREV, 1963).

Figura 2: Zona de aderência e deslizamento.



Fonte: Adaptado de Zorev (1963).

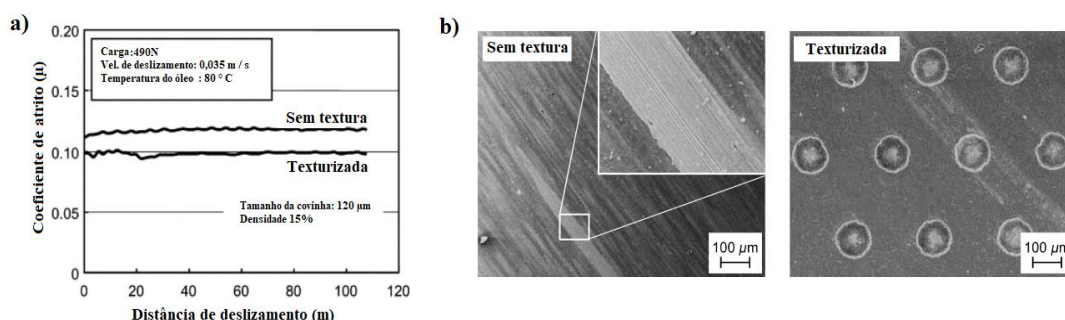
A utilização de lubrirrefrigerantes durante a usinagem mostra a formação de uma área de deslizamento maior ao se comparar com a usinagem a seco, contudo o fluxo do cavaco impede que o fluido de corte alcance toda a extensão de contato, tornando-se impossível a eliminação da área de aderência por completo (BAILEY, 1975). A aplicação de lubrirrefrigerantes pode apresentar efeitos negativos referentes ao atrito, bem como proporcionar o rápido resfriamento e imediatamente o endurecimento do cavaco em altas temperaturas e usinagem, gerando maior desgaste abrasivo (TRENT; WRIGHT, 2000).

### 2.1.1 Atrito para ferramentas de corte texturizadas

Segundo Moore, (1969), é seguro supor que a textura seja a variável única ou mais importante a qual expressa a magnitude do atrito deslizante, que pode existir entre superfícies em movimento relativo. Espera-se que poros rasos distribuídos artificialmente em uma superfície em atrito atuem como reservatórios de fluido e ajudem a promover a retenção de uma película fina lubrificante entre os componentes conjugados (WAKUDA et al., 2003). A texturização das superfícies como forma de melhorar a lubrificação e reduzir o atrito e o desgaste entre as partes móveis tem sido amplamente abordadas e passou a ser sistematicamente investigada em inúmeros trabalhos (BRUZZONE et al., 2008). O atrito, ainda segundo

Bruzzone et al. (2008), depende tanto dos materiais em contato quanto do sistema tribológico, portanto não é uma propriedade intrínseca do par de contatos, nos quais em muitas situações o atrito e o desgaste entre duas superfícies deslizantes podem ser reduzidos por texturização superficial. Como mostrado pelo estudo de Wakuda et al. (2003), o coeficiente de atrito de uma amostra sem texturização, comparada com uma amostra texturizada (Figura 3.a) foi aproximadamente 20% inferior ao da amostra sem textura como mostrado na Figura 3.b.

Figura 3: Mudanças no coeficiente de atrito sob condições de deslizamento longo.



Fonte: Adaptado de Wakuda et al. (2003).

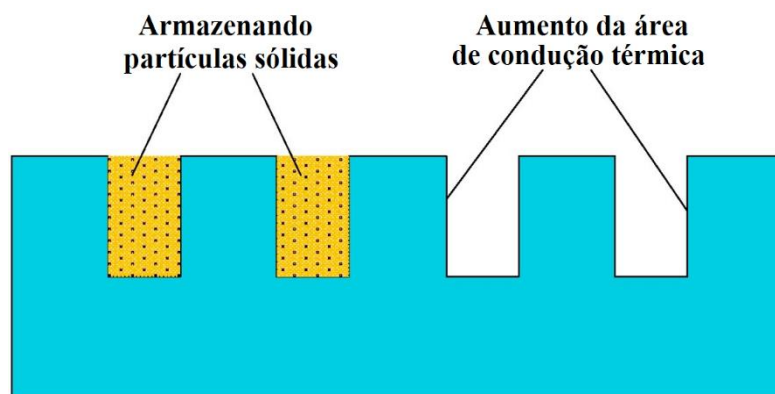
Muitos trabalhos relacionam a redução do atrito em ferramentas de corte texturizadas em função da presença de micro depósitos de resíduos juntamente à redução da área de contato para micro canais (KIM et al., 2016) e da mesma forma por micro furos (SUGIHARA; ENOMOTO, 2017), sendo a sua capacidade de acúmulo de detritos fortemente afetada pela profundidade das micro ranhuras ou texturas (XING et al., 2014). As micro ranhuras na superfície de saída das ferramentas de corte podem contribuir para aprisionar pequenas partículas e evitar que os detritos piorem o atrito (WAKUDA et al., 2003).

Durante a operação de corte, os detritos são gerados devido à vários mecanismos de desgaste de ferramentas, como desgastes abrasivo, adesivo e difuso. Uma das principais funções dessas texturas superficiais são aprisionar essas partículas devido aos mecanismos de desgaste mencionados. Assim, a eliminação de detritos de desgaste das interfaces do cavaco e ferramenta minimiza a ação de arrastamento pelos detritos evitando maior desgaste (RANJAN; HIREMATH, 2019).

Além disso, o atrito severo da interface cavaco/ferramenta pode causar maior temperatura de atrito e resultar na redução da vida da ferramenta. O conjunto de micro ranhuras na superfície das ferramentas pode aumentar a área de condução térmica e reduzir a temperatura de corte, o que pode ter um efeito positivo na melhora do desempenho da ferramenta (SU et

al., 2018). A Figura 4 mostra esquematicamente o efeito de microsulcos na captura de detritos e o aumento da área de condução térmica.

Figura 4: Diagramas esquemáticos de efeito de microsulcos na captura de detritos e área de condução térmica.



Fonte: Adaptado de Su et al. (2018).

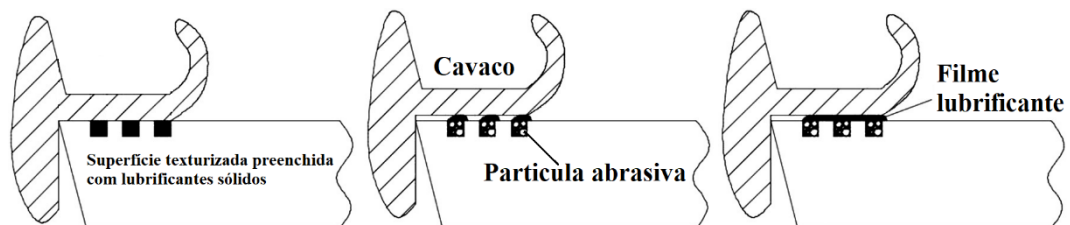
As condições tribológicas na usinagem a seco, nas quais o ar atmosférico pode desempenhar o papel de arrefecimento, são fortemente influenciadas não apenas pelas magnitudes dos parâmetros de textura da superfície da ferramenta de corte, mas também pela direção deste padrão de textura (DHAGE; JAYAL; SARKAR, 2019). A textura da superfície da ferramenta de corte fornece uma rede de micro capilaridades para o ar atmosférico acessar porções da interface cavaco-ferramenta. Quando a textura é orientada paralelamente à aresta de corte, ou seja, perpendicular ao fluxo de cavacos, ela permite um melhor acesso de ar e permite que esta rede micro capilar permaneça aberta em uma extensão maior durante a usinagem (DHAGE; JAYAL; SARKAR, 2019). Tal fenômeno é semelhante para a aplicação de fluidos de corte, a lubrificação por micro reservatórios ou micro poças é observada, sendo esta caracterizada pela entrada e retenção do lubrificante através de micro cavidades, formando um fino filme de lubrificante quando há interação entre peça e ferramenta (KIM et al., 2016; SUGIHARA; ENOMOTO, 2017; XING et al., 2014).

Outra linha estudada é a aplicação das ferramentas texturizadas em sua superfície de saída preenchidas com lubrificantes sólidos no interior das texturas, com o objetivo de formar um filme autolubrificante na interface de contato cavaco-ferramenta que podem reduzir o coeficiente de atrito, as forças de corte e temperaturas de corte quando comparadas com ferramentas convencionais (ZE et al., 2012). Segundo Klocke e Eisenblatter, (1997), a capacidade de redução de atrito por meio da utilização de revestimento com baixo coeficiente

de atrito já é indicada como uma alternativa que possa viabilizar o corte a seco. Alguns dos lubrificantes sólidos aplicados são o dissulfeto de tungstênio ( $WS_2$ ), difluoreto de cálcio ( $CaF_2$ ), dibrometo de titânio ( $TiB_2$ ) e grafite (ARSLAN et al., 2016). Diversos autores tem aplicado lubrificantes sólidos em ferramentas de corte texturizadas visando melhorias no processo de usinagem a seco, em especial o  $MoS_2$  (ARULKIRUBAKARAN; SENTHILKUMAR, 2017; ARULKIRUBAKARAN; SENTHILKUMAR; KUMAWAT, 2016a; ORRA; CHOUDHURY, 2018; WENLONG et al., 2011a; XING et al., 2014; ZE et al., 2012).

A aplicação de  $MoS_2$  em ferramentas de corte texturizadas, tem a capacidade de armazenamento do lubrificante sólido e faz com que ocorra a formação de um micro filme lubrificante entre a ferramenta e o cavaco, que suporta grande parte dos esforços, transmitindo o atrito para o filme lubrificante (JIANXIN; WENLONG; HUI, 2009). Primeiro, as partículas abrasivas do cavaco são comprimidas na microtextura, e o lubrificante sólido tem baixa resistência ao cisalhamento, de modo que transborda da textura e cobre a face de saída para formar uma camada de filme lubrificante. Em segundo lugar, a presença da microtextura reduz a área de contato do cavaco com a ferramenta, reduzindo assim o atrito (JIANXIN et al., 2012; FENG et al., 2017) como mostrado na Figura 5.

Figura 5: Diagrama esquemático do comprimento de contato do cavaco e ferramenta.



Fonte: Adaptado de Feng (2017).

O modelo analisado por Jianxin, Wenlong e Feng, foi aprofundado em diversos trabalhos, apresentando bons resultados para a aplicação de lubrificantes sólidos em ferramentas de corte texturizada na redução do atrito na interface de contato.

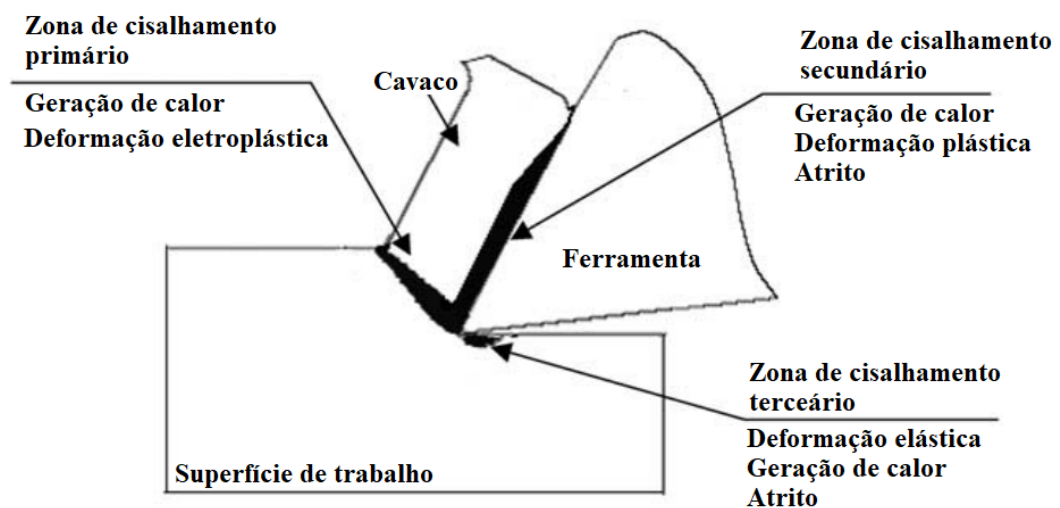
## 2.2 GERAÇÃO DE ENERGIA DURANTE A USINAGEM

No processo de usinagem, altas temperaturas observadas nas regiões de contato entre cavaco e ferramenta, onde as mesmas tem influência direta nas condições de usinagem e no desgaste da ferramenta de corte (BOOTHROYD; KNIGHT, 1989). A ferramenta realiza a

operação de corte ao superar a tensão de cisalhamento do material usinado. Esta ação, sob altas velocidades de deformação na zona de cisalhamento primária, gera uma grande quantidade de calor. As temperaturas afetam consideravelmente a relação tensão-deformação, a fratura e o escoamento do material usinado (ABUKHSHIM; MATIVENGA; SHEIKH, 2006).

De acordo com Abukhshim, Mativenga e Sheikh, (2006), as principais regiões onde o calor é gerado durante o corte ortogonal no processo de usinagem são apresentadas na Figura 6. O calor é gerado na zona de cisalhamento primário em razão da deformação plástica que acontece no plano de cisalhamento. O aquecimento local resulta em elevadas temperaturas que tornam o material mais dúctil e permitem uma maior deformação. Também há geração de calor na zona secundária de cisalhamento devido às altas taxas de deformação na interface com a superfície de saída da ferramenta de corte. Por fim, calor também é gerado na zona de cisalhamento terciário, na interface peça-ferramenta, devido ao trabalho realizado para superar o atrito que ocorre entre a superfície de folga com a superfície recém usinada da peça. A geração de calor e as temperaturas nas zonas de cisalhamento primária e secundária são extremamente dependentes das condições de usinagem, enquanto que a geração de calor na zona terciária é influenciada pelo desgaste de flanco da ferramenta. Na zona terciária, o raio de arredondamento da aresta, ângulo de folga e revestimento pode exercer influência.

Figura 6: Fontes de geração de calor no processo de corte.



Fonte: Adaptado de Abukhshim (2006).

Boothroyd, (1963) apresenta estudos realizados durante a usinagem de aços de médio carbono, nos quais revelam como a temperatura se comporta durante a formação do cavaco, por meio de imagens termográficas mostradas, na Figura 7. Em síntese, Boothroyd (1963) define que a taxa total de calor gerado ( $P_m$ ) tem parte do seu valor conduzido para a peça de trabalho ( $\Phi_w$ ) indicado pelo ponto Z, os pontos X e Y encontram-se na porção removida da peça no qual o ponto Y ultrapassa as zonas de deformação primárias e secundárias, sendo essa região responsável pela maior parte do calor conduzido à ferramenta ( $\Phi_t$ ). O restante da energia produzida na deformação e atrito acompanha o cavaco ( $\Phi_c$ ).

Assim, determina-se a Equação 4:

$$P_m = \Phi_c + \Phi_w + \Phi_t \quad (4)$$

Onde:

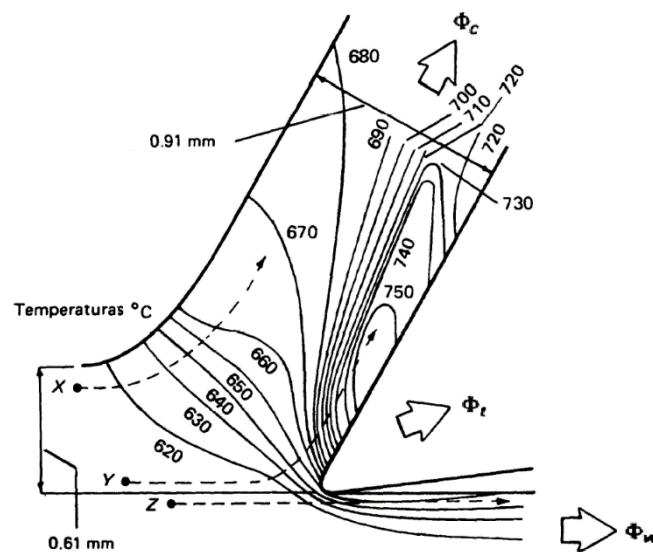
$P_m$  = taxa de calor gerado

$\Phi_c$  = taxa de calor transportado pelo cavaco

$\Phi_w$  = taxa de calor conduzido para a peça

$\Phi_t$  = taxa de calor conduzido para a ferramenta

Figura 7: Representação da temperatura de usinagem de aço com médio teor de carbono.



Fonte: Adaptado de Boothroyd; Knight (1989).

De acordo com Fleischer et al. (2007), em sua extensa pesquisa literária, não é possível definir uma quantidade de energia exata que se distribui entre peça, cavaco e ferramenta durante o processo de usinagem. Essas quantidades variam muito e dependem do processo de usinagem e dos parâmetros adotados. São apresentadas na Tabela 1 as faixas de distribuição encontradas pelos autores.

Tabela 1: Faixas de distribuição de energia.

|                   | Retificação (%) | Torneamento (%) | Fresamento (%) |
|-------------------|-----------------|-----------------|----------------|
| <b>Ferramenta</b> | 5 - 15          | 2,1 - 18        | 5,3 - 10       |
| <b>Peça</b>       | 10 - 35         | 1,1 - 20        | 1,3 - 25       |
| <b>Cavaco</b>     | 55 - 75         | 74,6 - 96,3     | 65 - 74,6      |

Fonte: Adaptado de Fleischer; Pabst; Kelemen (2007).

O controle da temperatura é necessário devido aos danos à peça e a ferramenta de corte. Os danos térmicos referentes às ferramentas de corte apresentam-se como deformação plástica, difusão térmica e reações químicas (COSTA; SILVA; MACHADO, 2009). As deteriorações térmicas em ferramentas de corte podem causar deformações plásticas, ocorridas em processos de usinagem com altas taxas de geração de calor, nos quais as ferramentas de corte perdem parte de sua dureza e acarretam em deformações na aresta de corte (CHILDS et al., 2000). Desgastes associados com a difusão térmica acontecem em altas temperaturas de usinagem, onde a ferramenta de corte e o material de trabalho possuem afinidade química (CHILDS et al., 2000). No decorrer do corte, a ferramenta está em contato contínuo com a superfície da peça recém gerada, resultando em altas temperaturas e pressões, possibilitando que os átomos do material da ferramenta difundam-se na peça e/ou no cavaco, o que acarreta a perda direta de material da ferramenta (TRENT; WRIGHT, 2000).

O desgaste por reação química acontece quando compostos químicos são formados pela reação da ferramenta com o material da peça, como consequência do oxigênio do ar ou enxofre e cloro presentes no fluido de corte (CHILDS et al., 2000). As técnicas de medição de temperatura empregadas nos trabalhos experimentais têm algumas limitações, o que impossibilita resultados precisos. Em resumo, o consumo de energia e a geração de calor nos processos de usinagem de metais dependem de uma combinação das propriedades físicas e químicas do material da peça de trabalho e do material da ferramenta de corte, condições de corte e geometria da ferramenta de corte (ABUKHSHIM; MATIVENGA; SHEIKH, 2006).

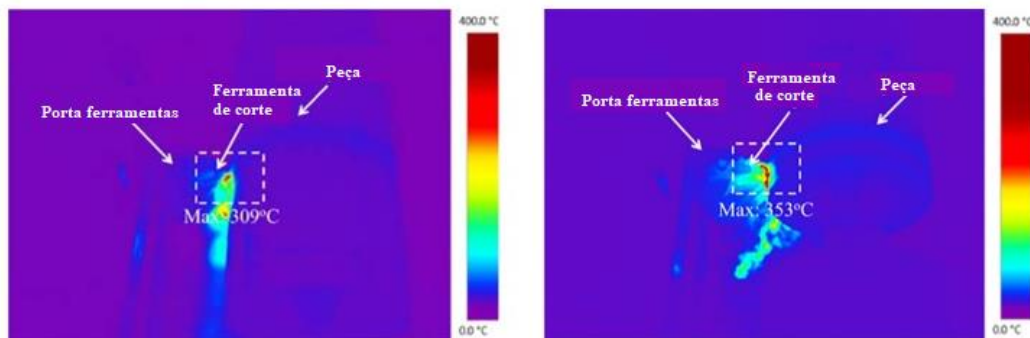
### 2.2.1 Temperatura na usinagem com ferramentas de corte texturizadas

A temperatura é um dos principais fatores que afetam o desempenho de qualquer processo de corte de metal, pois um maior aumento da temperatura pode levar ao desgaste da ferramenta que afetará o acabamento da peça a ser usinada (WENLONG et al., 2011a).

Em trabalhos nos quais são feitas comparações entre ferramentas texturizadas e ferramentas de corte sem alterações de superfícies, diversos autores apresentaram resultados com reduções nas temperaturas mensuradas para o uso de ferramentas de corte texturizadas (ARULKIRUBAKARAN; SENTHILKUMAR; KUMAWAT, 2016a; FENG et al., 2017; RAJBONGSHI; SARMA, 2019).

Em ensaios realizados por Liu et al. (2019), foi observado que microtexturas na superfície de saída da ferramenta podem diminuir a temperatura de corte e, conseqüentemente, diminuir o desgaste da ferramenta. Imagens térmicas por infravermelho para ferramentas de corte WC-10Ni3Al com e sem microtexturas na face de saída, são mostradas na Figura 8. Embora a temperatura mais alta, não tenha sido a temperatura exata dentro da área de corte, ela ainda pode nortear a temperatura real da região de corte. Claramente, a temperatura de corte capturada é muito menor para ferramenta de corte texturizada do que para a ferramenta de corte sem micro texturas (LIU et al., 2019).

Figura 8: Termografia infravermelha de ferramentas de corte WC-10Ni3Al em corte a seco.



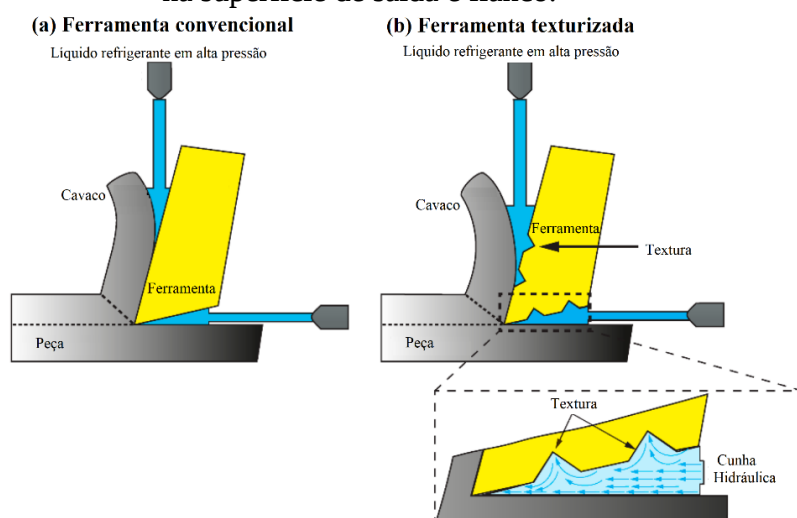
Fonte: Adaptado de Liu et al. (2019).

Devido às severas condições mecânicas e térmicas, os fluidos de corte convencionais não podem penetrar na interface cavaco/ferramenta e atingir a zona de temperatura mais alta, especialmente em condições de usinagem de alta velocidade (ÖZEL et al., 2021). Quando a temperatura da ferramenta de corte aumenta acima do ponto de ebulição do refrigerante, o chamado ponto Leidenfrost, uma película de vapor pode ser formada, impedindo a penetração

do fluido de corte. O fluido de corte aplicado em forma de jato, cuja pressão é maior do que a pressão de vapor, pode eliminar ou retardar a formação da barreira (ALAGAN et al., 2018).

Segundo Alagan et. al. (2018), o objetivo da texturização na aplicação do fluido de corte é melhorar o acesso do refrigerante à proximidade da ponta da ferramenta por meio da textura, conforme mostrado na Figura 9, no qual é possível observar que em uma ferramenta convencional o fluido refrigerante fica mais distante da ponta.

Figura 9: Interação entre ferramenta com refrigerante e cavaco, e a formação de hidro cunhas na superfície de saída e flanco.

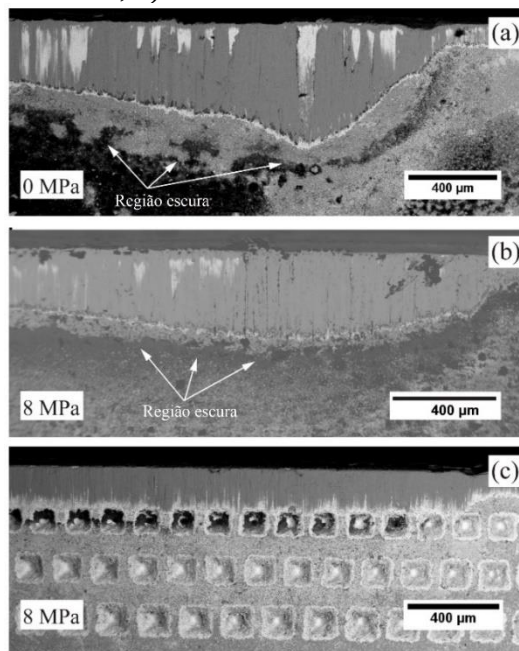


Fonte: Adaptado de Alagan et al. (2018).

Fang e Obikawa, (2017), tentaram promover o resfriamento da ferramenta de corte por transferência de calor fabricando microtexturas na superfície de flanco. Observaram que a diferença na velocidade do fluxo dentro e fora da estrutura da textura gera redemoinhos no local ou fluxo turbulento. Isso aumenta a transferência de calor da ferramenta através da superfície de flanco, resultando no aumento do coeficiente de transferência de calor. (FANG; OBIKAWA, 2017).

No estudo de Alagan et. al. (2018), foi observada na ferramenta de corte convencional uma região escurecida no flanco da ferramenta, sendo resquício da evaporação do fluido de corte, como mostrado na Figura 10a. É possível perceber que o depósito de resíduos da evaporação está muito mais próximo da aresta de corte para a ferramenta de corte texturizada, indicado na Figura 10.c. Os autores alegam que a maior dissipação de calor pode ser constatada pela redução da área de depósito de resíduos da evaporação, pelo qual diminuiu-se as barreiras de vapor, de modo que houve um menor desgaste de flanco na ferramenta de corte.

Figura 10: a) Ferramenta convencional com lubrificação convencional; b) Ferramenta convencional com lubrificação à 8MPa; c) ferramenta texturizadas com lubrificação de 8MPa.

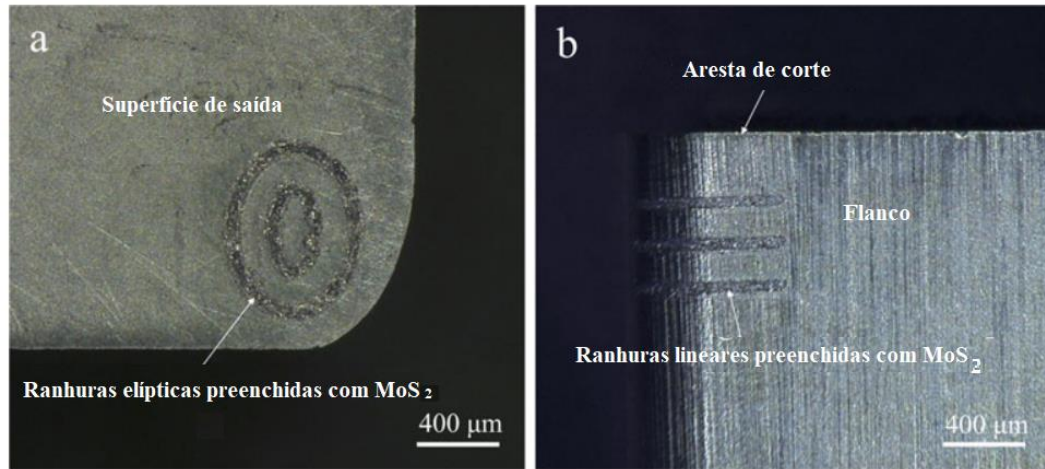


Fonte: Adaptado de Alagan et al. (2018).

O desenvolvimento de novos materiais de ferramentas de corte e a aplicação de revestimentos com lubrificantes sólidos são algumas das metodologias sustentáveis para desenvolvimento de novas ferramentas (SHARMA; PANDEY, 2016).

Ze et al. (2012) utilizaram lubrificantes sólidos, como o dissulfeto de molibdênio, para preencher as ranhuras texturizadas para formar ferramentas texturizadas autolubrificantes. Realizaram comparações entre a texturização na superfície de saída e no flanco da ferramenta de corte durante a usinagem de titânio Ti-6Al-4V, conforme mostrado na Figura 11. Os resultados mostram que a temperatura das ferramentas texturizadas autolubrificantes foi reduzidas em comparação com a da ferramenta convencional em testes de torneamento a seco.

Figura 11: Diagrama esquemático de texturas de superfície preenchidas com lubrificantes sólidos a) na superfície de saída b) flanco.



Fonte: Adaptado de Ze et al. (2012).

Pode-se deduzir que a textura e o uso de lubrificante sólido na texturização reduzem a resistência ao cisalhamento da interface cavaco/ferramenta (SHARMA; PANDEY, 2016). A redução da área de contato cavaco/ferramenta também é apontada por Arulkirubakaran et al. (2016) como um dos pontos causadores da redução das temperaturas de usinagem que variaram de 17 à 23%. Lian et al. (2013) constataram que a presença do WS<sub>2</sub> foi capaz de reduzir a temperatura em até 20% em relação à ferramenta de corte sem texturização.

### 2.2.2 Relação entre forças de usinagem e ferramentas de corte texturizadas

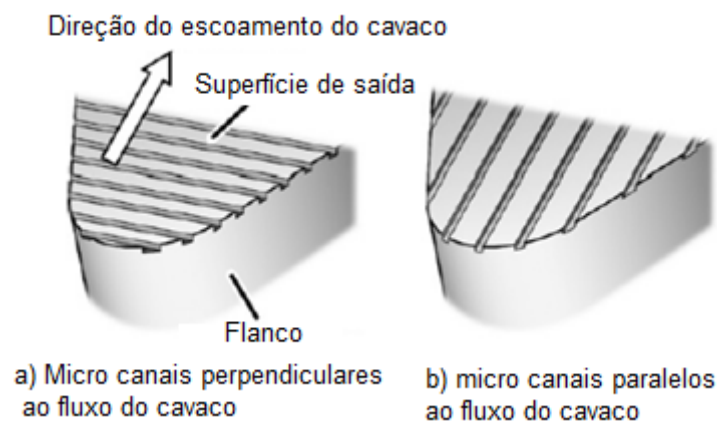
De acordo com Sharma e Pandey (2016), a eficiência do processo de usinagem está relacionada às forças de usinagem, mostrando que qualquer mecanismo que possa melhorar as condições de escoamento do cavaco nas interfaces de contato pode promover maior vida de ferramenta e melhor acabamento. Relativo ao corte a seco, a redução de atrito pode ser caracterizada principalmente por meio da diminuição da área de contato (XIE et al., 2013).

A redução de forças pode ser obtida com a utilização de ferramentas de corte texturizadas, variando profundidade da micro textura e o tipo de geometria, que por sua vez resultam também na maior capacidade de armazenamento de detritos ( OBIKAWA et al., 2011).

Arslan et al. (2016) sugerem que a utilização de micro e nano ranhuras estão sujeitas a resultados variados em função do material da peça, das condições de usinagem e da geometria texturizada. Chang et al. (2011) sugerem que a posição das micro ranhuras interferem diretamente nas regiões de contato, onde micro canais paralelos ao fluxo do cavaco geram

menores áreas de contato e menores esforços quando comparados a micro ranhuras perpendiculares ao fluxo de escoamento de cavaco. Já Kawasegi et al. (2009) apontam que para os micro canais posicionados paralelamente ao fluxo do cavaco (Figura 12.b), há grande deformação plástica do cavaco no interior da textura, o que acaba causando aumento na força de usinagem devido ao aumento da área de contato, de maneira oposta, se posicionadas de forma perpendicular ao fluxo de cavaco (Figura 12.a), a área de contato e as forças são reduzidas (KAWASEGI et al., 2009). Logo outros estudos apontam que a aplicação de micro texturas com maior profundidade para a usinagem de ligas de titânio foi eficaz para a redução das forças de corte (XIE et al., 2012).

Figura 12: a) micro canais perpendiculares ao fluxo de cavaco; b) micro canais paralelos ao fluxo de cavaco.



Fonte: Adaptado de Kawasegi et al. (2009).

A aplicação de lubrificantes sólidos é apontada como possibilidade para a redução das forças durante a usinagem a seco (ARSLAN et al., 2016). Wenlong et al. (2011) estudaram os efeitos da ferramenta texturizada na redução das forças e do atrito entre a ferramenta e cavaco usando diferentes lubrificantes sólidos,  $\text{MoS}_2$ ,  $\text{CaF}_2$  e grafite. Os autores observaram que a ferramenta texturizada com grafite apresentou coeficiente de atrito e forças inferiores em comparação com ferramentas texturizadas com outros lubrificantes sólidos. Neste sentido Jianxin, Wenlong e Hui (2009) afirmam que a força de atrito surgida com o fluxo do cavaco varia em função da tensão de cisalhamento do cavaco, e quando há um filme lubrificante que apresenta uma tensão de cisalhamento menor do que o cavaco e a ferramenta, a deformação ocorre preferencialmente neste filme, o que promove a redução nas forças de corte.

A redução das forças de corte, diante das altas temperaturas de usinagem, também é

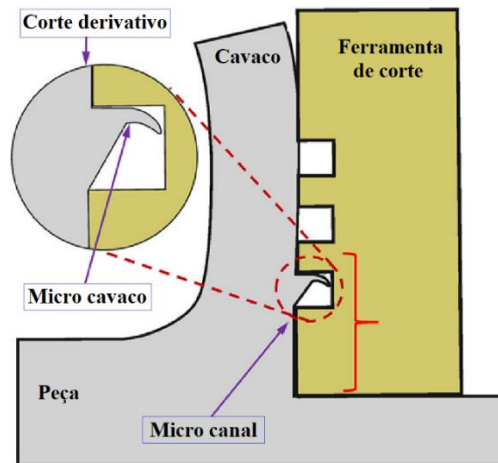
decorrente da ação das ferramentas texturizadas (ARSLAN et al., 2016; SHARMA; PANDEY, 2016). O aquecimento proporcionado por altas velocidades de corte, promove o amolecimento do cavaco, que pode reduzir os esforços de corte e melhorar o escoamento do cavaco (TRENT; WRIGHT, 2000) e a presença de superfícies texturizadas pode intensificar tal melhoria, fazendo com que o cavaco entre facilmente nas micro ranhuras, que por sua vez, fazem papel de micro quebra cavacos, diminuindo os esforços da usinagem (ORRA; CHOUDHURY, 2018).

Uma melhor lubrificação durante a aplicação de fluidos de corte em superfícies texturizadas gera reduções de esforços e também é ponto amplamente abordado (KOSHY; TOVEY, 2011). A formação de uma película lubrificante em razão da velocidade de corte é fator fundamental para a redução da área de contato, comprovada experimentalmente (LIAN et al., 2013; ZE et al., 2012). O maior fluxo do fluido de corte no interior das ranhuras pode ainda facilitar a limpeza dos micro resíduos, evitando que o entupimento aumente a área de contato e consequentemente acarrete aumentos nos esforços de corte (ARULKIRUBAKARAN; SENTHILKUMAR; KUMAWAT, 2016a).

### 2.2.3 Corte derivativo

As micro texturas diminuem a área de contato entre a ferramenta e o cavaco, assim reduzem o atrito e a temperatura de corte conforme estabelecido por diversos autores, no entanto, o micro corte do lado inferior do cavaco (Figura 13), conhecido como corte de derivado, tem sido estudado na utilização de ferramentas de corte micro texturizadas. O corte derivado, ou seja, o corte adicional do lado inferior do cavaco, causado pelas arestas das micro texturas da superfície da ferramenta, preenchem gradualmente seus canais com micro cavacos (DUAN et al., 2017), esse fenômeno eleva as forças de corte, temperaturas e taxas de desgaste, as quais comprometem os benefícios das ferramentas texturizadas (KISHAWY et al., 2021). O posicionamento da textura mais distante da aresta de corte principal tem influência significativa na atuação do corte derivado como aresta de corte, bem como o desgaste ou arredondamento desta aresta, resulta em um maior ângulo de saída negativo, o que também pode ser benéfico para aliviar o corte derivado (DUAN et al., 2017).

Figura 13: Diagrama esquemático do corte derivado



Fonte: Adaptado de Kishawy et al. (2021).

Segundo os autores Kishawy et al. (2021), o seu estudo revelou que a posição e largura das micro ranhuras foram os parâmetros que mais influenciaram na atuação do corte derivativo. Ferramentas com texturas posicionadas mais distantes da aresta de corte e largura de canal mais estreito ofereceram o melhor desempenho quanto à redução das forças de corte, enquanto posições mais próximas da aresta de corte e ranhura mais larga mostrou o pior resultado. A validação experimental indicou que o melhor projeto reduziu as forças de corte e de avanço em 12% e 24%, respectivamente, em comparação com o pior resultado.

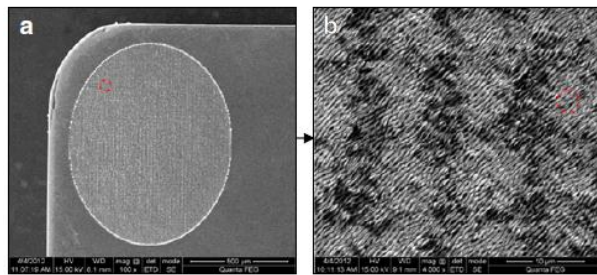
### 2.3 TEXTURIZAÇÃO DE SUPERFÍCIE

De acordo com Arslan et al. (2016), as técnicas de texturização de superfícies amplamente utilizadas podem ser classificadas como técnicas de fusão e vaporização (eletroerosão), ablação (laser), remoção forçada de material (micro retificação), abrasão (jatos abrasivos), dissolução (usinagem eletroquímica), solidificação (micro fundição) e deposição de camadas (deposição por vapor químico), em que cada uma dessas técnicas apresenta características específicas de aplicação, envolvendo custos e parâmetros característicos. Especialmente, a técnica de texturização à laser é largamente utilizada nos processos de texturização de ferramentas de corte, conhecida como laser femtosegundo, a qual apresenta boa precisão dimensional e flexibilidade para texturização de diversas geometrias (ARSLAN et al., 2016). No entanto, a técnica de texturização com laser causa um aquecimento muito rápido do material, levando a um gradiente de temperatura expressivo, e isso pode provocar tensões térmicas que podem acarretar a formação de micro fissuras (TYURIN et al., 2014).

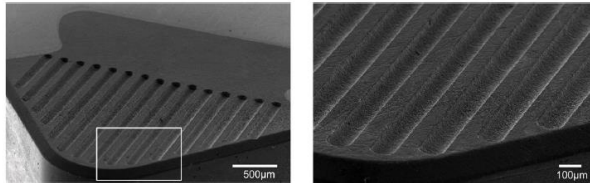
Na Tabela 2 estão apresentados os principais modelos de texturização encontrados na literatura sobre ferramentas de corte. As diferenças estão na forma, profundidade, largura, distância e posicionamento entre si e em relação à aresta de corte.

Tabela 2: Modelos texturizados encontrados na literatura científica.

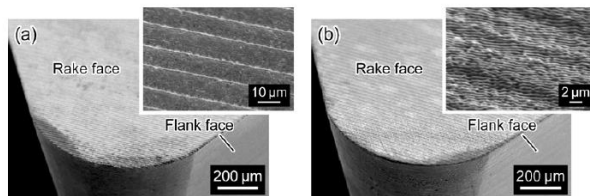
|  |  |                                                                                                                    |
|--|--|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  | <p>Micro furos preenchidos com MoS<sub>2</sub> (WENLONG et al., 2011b)</p>                                         |
|  |  | <p>Micro furos (OBIKAWA et al., 2011)</p>                                                                          |
|  |  | <p>Micro ranhuras (ZHANG et al., 2015)</p>                                                                         |
|  |  | <p>Micro ranhuras elípticas na superfície de saída e lineares no flanco, com MoS<sub>2</sub> (WU et al., 2014)</p> |
|  |  | <p>Micro ranhuras do tipo alternadas (XING et al., 2013)</p>                                                       |



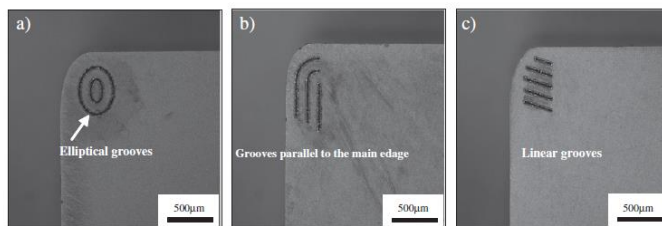
Nano ranhuras (LIAN et al., 2013)



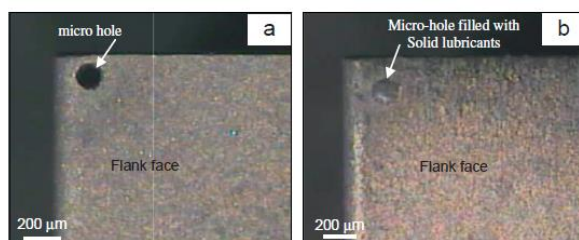
Micro ranhuras abauladas (KIM et al., 2016)



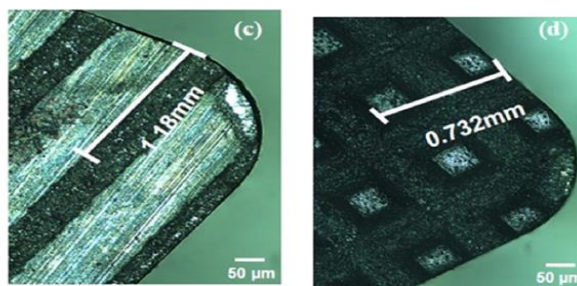
Comparação entre micro ranhuras e nano ranhuras (KAWASEGI et al., 2009)



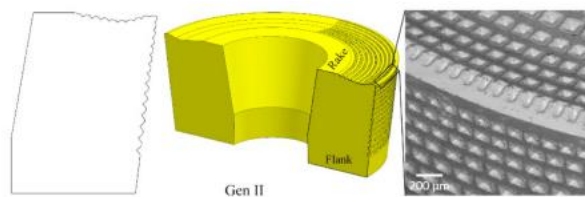
Comparação entre micro ranhuras elípticas, curva e lineares (JIANXIN et al., 2012)



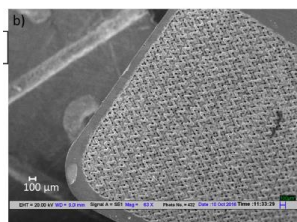
Micro furo com lubrificante no flanco da ferramenta (JIANXIN; WENLONG; HUI, 2009)



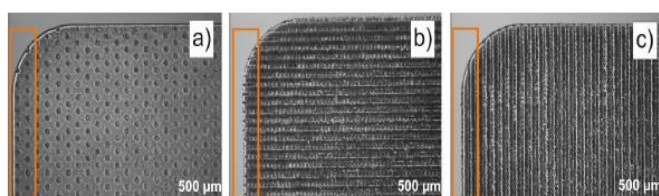
Micro ranhuras lineares e cruzadas (ARULKIRUBAKARAN; SENTHILKUMAR; KUMAWAT, 2016b)



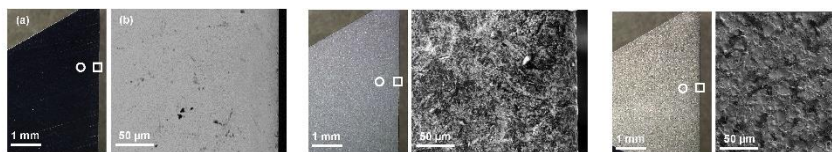
Micro furos no flanco e na superfície de saída (ALAGAN et al., 2018)



Micro e nano ranhuras alternadas (MISHRA; GHOSH; ARAVINDAN, 2018)



Micro furos e micro ranhuras em diferentes posições (KÜMMEL et al., 2015)



Texturas por *shot peening*, EDM(QI et al., 2020)

Fonte: Elaborada pelo autor.

Acerca da bibliografia estudada, os autores Tatsuya Sugihara e Toshiyuki Enomoto citam vários trabalhos sobre a texturização de ferramentas de corte, nos quais se empregam texturas com fluido de corte, ou não, na usinagem de alumínio, aço carbono e inconel 718 (ENOMOTO et al., 2007; ENOMOTO; SUGIHARA, 2010; SUGIHARA; ENOMOTO, 2009, 2012; SUGIHARA; SINGH; ENOMOTO, 2017; ENOMOTO et al., 2012; SUGIHARA; ENOMOTO, 2013, 2017; SUGIHARA; NISHIMOTO; ENOMOTO, 2017; SUGIHARA; TANAKA; ENOMOTO, 2017). De maneira geral, os resultados apontam que texturas em forma de micro furos apresentam melhor desempenho na usinagem se comparadas às ferramentas convencionais, com melhor resultado para maior área texturizada. Em adição, os autores apontam que as geometrias abertas, como as micro ranhuras, tendem à melhores resultados em condições com aplicação de fluido de corte, uma vez que as mesmas comportam-se como canais irrigando a zona de corte, de difícil acesso do fluido. O caso das geometrias

fechadas, como os micro furos, são mais eficientes em condições com lubrificantes sólidos ou no corte a seco.

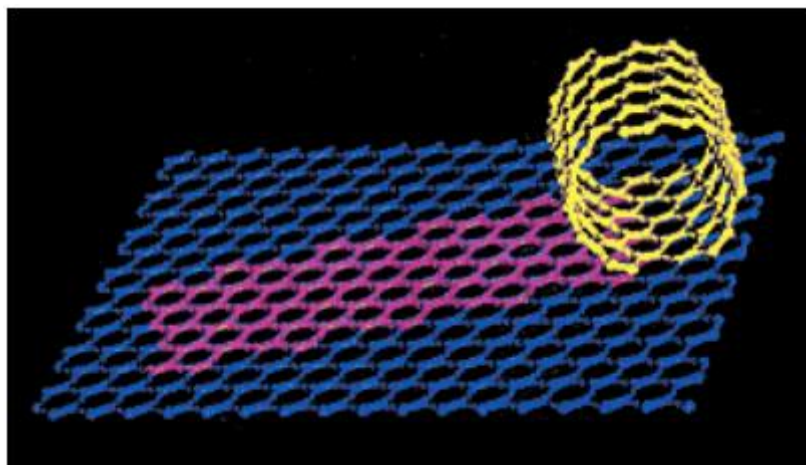
## 2.4 NANOTUBOS DE CARBONO

A condutividade térmica muito alta torna o nanotubo de carbono um candidato promissor para compósitos termicamente condutivos. Em função disso este material tem sido o foco de consideráveis esforços de pesquisa, avaliando suas notáveis propriedades físicas e mecânicas, dentre as quais a condutividade térmica recebeu considerável atenção (HAN; FINA, 2011). O valor da condutividade térmica do nanotubo de carbono ao longo da direção longitudinal situa-se entre 2800 e 6000 W/mK para um único nanotubo à temperatura ambiente (PAK et al., 2012). Em razão das dificuldades tecnológicas para medições experimentais em nanoescala, a medição da condutividade térmica de nanotubos de carbono é baseada essencialmente nas simulações teóricas e cálculos de experimentos indiretos, atribuindo resultados na faixa entre 2000 e 6000W/mK para um único nanotubo, variando de acordo com sua deposição (HAN; FINA, 2011).

A aplicação de revestimentos com nanotubos de carbono é observada, apresentando também excelentes propriedades tribológicas, atuando como aditivos em lubrificantes para obter redução de atrito e desgaste (ZHAI et al., 2017).

Os nanotubos de carbono são formados a partir de uma camada de grafeno, que se enrola, produzindo cilindros perfeitos (Figura 14). A força motriz para a formação de nanoestruturas fechadas de carbono tem sido atribuída à instabilidade do grafite em dimensões de poucos nanômetros, provocada pela alta energia das ligações erráticas (*dangling bonds*) em átomos periféricos, esta maneira, a eliminação de tais ligações seria alcançada com o fechamento da estrutura (AJAYAN, 1999).

Figura 14: Representação esquemática de uma camada de grafeno que origina um nanotubo



Fonte: (FERREIRA, 2006).

Estes pequenos tubos são conhecidos principalmente por sua resistência à torção e flexibilidade, pela maior razão de comprimento por diâmetro dentre qualquer outro material e dureza (152 GPa), maior que a dos diamantes, popularmente tidos como os materiais mais duros encontrados na natureza. Além da ótima condutividade térmica e elétrica, atribuídas a estrutura do grafeno, há o aparecimento do comportamento metálico ou semicondutor dos nanotubos dependendo de sua síntese, algo incomum ao lembrar que estes são formados por átomos de ametais (RAO et al., 2001)

## 2.5 REVESTIMENTO

A grande maioria das ferramentas de corte de metal duro em uso, empregam revestimentos rígidos, pois oferecem benefícios comprovados em termos de vida de ferramenta e desempenho de usinagem (PRENGEL; PFOUTS; SANTHANAM, 1998). A barreira de revestimento limitou a interação entre o cavaco/ferramenta e, mais importante, aumentou a dureza, estabilidade térmica e inércia química da aresta de corte (INSPEKTOR; SALVADOR, 2014). Os processos mais conhecidos para o revestimento de ferramentas de corte são o *Chemical Vapor Deposition* (CVD) e o *Physical Vapor Deposition* (PVD).

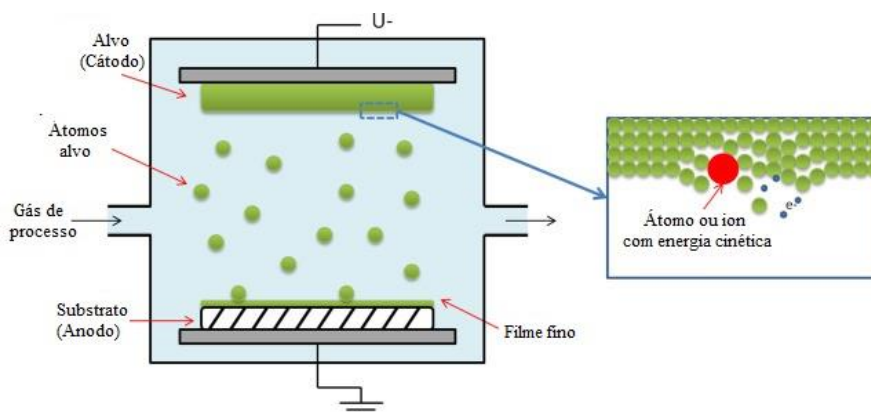
O *Chemical Vapor Deposition* (CVD) é definido como a deposição de um sólido em uma superfície aquecida a partir de uma reação química na fase de vapor. As reações químicas ocorrem nas superfícies quentes, resultando na deposição de um filme fino. Após o processo, a reação do gás residual tem certa toxicidade, causando poluição ambiental (DENG et al., 2020).

### 2.5.1 Processo de revestimento PVD

A utilização de um arco no vácuo para geração de revestimentos foi sugerida pela primeira vez por Thomas Edison, que recebeu uma patente em deposição de plasma de arco em 1892 (EDISON, 1982). Atualmente, 85% de todas as ferramentas de metal duro são revestidas, especialmente os revestimentos PVD nanoestruturados, conseguiram se estabelecer no mercado de forma surpreendentemente rápida (BOBZIN, 2017). A deposição de vapor é caracterizada por um processo no qual os elementos que constituem o revestimento evaporam em átomos, moléculas ou íons no vácuo, sendo depois condensados na superfície do substrato para formar o revestimento desejado (DENG et al., 2020). As técnicas mais comuns de PVD são classificadas da seguinte forma: (i) deposição por pulverização catódica; (ii) deposição por arco catódico; (iii) deposição de vapor físico do feixe de elétrons (EB-PVD); (iv) deposição a laser pulsada (PLD); e (v) deposição assistida do feixe de íons (IBAD) (SANTECCHIA et al., 2015). Um exemplo desta aplicação é indicado na Figura 15.

As vantagens do PVD incluem uma temperatura de deposição mais baixa, excelente adesão, um bom acabamento superficial, que é aproximadamente igual ao do substrato, a eliminação da usinagem de acabamento, sem efluentes ou poluentes como resultado do processo, estequiometria controlável e repetível (ZHANG; ZHU, 1993). Zhang (1993), ainda observa que uma limitação do processo PVD é a necessidade de girar o substrato para obter uniformidade.

Figura 15: Representação esquemática do processo PVD.



Fonte: Adaptado de Santecchia (2015).

O revestimento de nitreto de titânio (TiN) foi o primeiro revestimento comercial depositado pelo processo PVD em ferramenta de metal duro (INSPEKTOR; SALVADOR,

2014). O processo é descrito por Zhang (1993): o substrato a ser revestido é inserido em uma câmara de vácuo e é aquecido a uma temperatura entre 400°C e 600°C; o material de revestimento, o Titânio, é vaporizado e o gás reativo, N<sub>2</sub>, é introduzido e ionizado; os átomos de titânio vaporizados, reagem com o nitrogênio ionizado para formar o composto TiN, que por sua vez deposita-se no substrato para formar o revestimento. Em relação ao coeficiente de atrito, a cobertura de TiN apresenta um baixo coeficiente (0,66) em relação aos revestimentos mais comuns, como AlTiN(0,77), CrAlN(0,73) e TiAlN (0,70) (LIU et al., 2012).

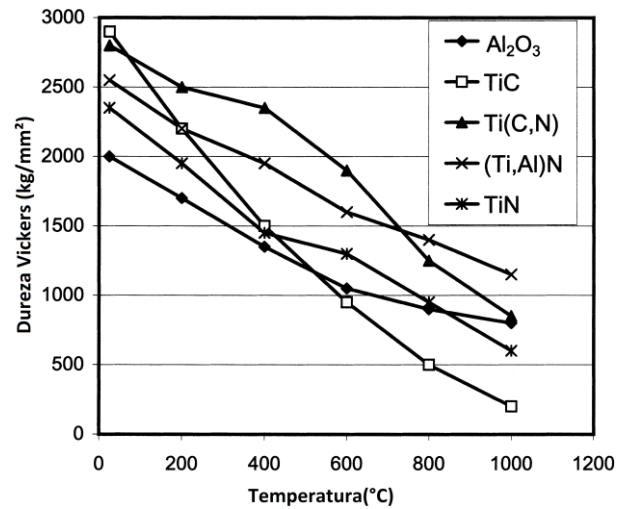
Segundo os autores Quinto, Santhanam e Jindal (1988), o processo PVD assegura a mesma tenacidade do substrato, ao passo que o processo CVD reduz esta propriedade. Isto traz problemas para a aplicação de ferramentas revestidas pelo processo CVD em cortes interrompidos. A causa desta atenuação de tenacidade está na tensão residual de tração causada pelo método CVD. Em contrapartida, no método PVD a tensão residual é de compressão, semelhante à conseguida no substrato, depois da retificação. Isto posto, significa que o processo PVD reduz a resistência ao lascamento da aresta de corte devido à tensão residual de tração.

### 2.5.2 Revestimento TiAlN

O revestimento de TiAlN se destaca no processo de usinagem a seco, em especial no torneamento com corte contínuo de peças endurecidas. Outras propriedades relevantes desse revestimento é a elevada estabilidade química, baixa condutividade térmica, maior resistência à oxidação e a alta dureza a quente (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2013).

De acordo com Paldey e Deevi (2003), filmes de TiAlN são amplamente empregados na usinagem à altas velocidades, pois apresentam propriedades desejáveis nas operações, como alta dureza (~28 – 32 GPa), baixa tensão residual (~5 GPa), resistência à oxidação, baixa condutividade térmica e alta dureza a quente, conforme mostrado na Figura 16. Espera-se que os revestimentos TiAlN e seus revestimentos quaternários e multicamadas proporcionem melhor desempenho em relação ao nitreto simples. A inclusão de alumínio no filme de TiN melhora o comportamento oxidativo e a estabilidade térmica do revestimento, entre os quais a variação da quantidade relativa dos elementos titânio e alumínio, na composição do filme, pode influenciar na dureza.

Figura 16: Microdureza dos revestimentos de Ti(C,N), (Ti,Al)N, TiN e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> para diferentes temperaturas.



Fonte: Adaptado de Paldey e Deevi (2003).

Liu et al. (2012), compararam o comportamento do atrito e do desgaste dos revestimentos nitretados de TiN, TiAlN, AlTiN e CrAlN depositados sobre metal duro deslizando contra carboneto de silício em alta velocidade (120 m/min). O revestimento de TiAlN foi o que apresentou menores coeficiente de atrito e taxa de desgaste. Ainda que tenham sido observadas microranhas, o TiAlN possui propriedades tribológicas excelentes em comparação com os outros revestimentos. No entanto, o alto teor de Al aumentou a reatividade química e provocou desgaste adesivo do revestimento AlTiN.

Ainda segundo Paldey e Deevi (2003), o TiAlN tem maior resistência à oxidação em comparação com TiN, que oxida a temperaturas superiores a 600°C, enquanto o TiAlN apresenta resistência à oxidação até uma temperatura de 800°C. O início da oxidação do filme de TiAlN depende do seu teor de Al, logo a resistência à oxidação pode ser melhorada significativamente aumentando o teor de Al do filme. As propriedades essenciais para os revestimentos variam muito de aplicação para aplicação, no entanto os revestimentos à base de TiAlN têm sido superiores para usinagem de alta velocidade e usinagem a seco.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste item é apresentada a metodologia adotada para a definição das geometrias das texturas aplicadas nas ferramentas de corte, as quais envolveram verificações preliminares de simulação computacional, determinando ou não sua aplicação.

#### 3.1 GEOMETRIAS PARA A TEXTURIZAÇÃO

Considerando a literatura sobre ferramentas de corte texturizadas, em geral, as geometrias compostas por microfuros e microranuras são os tipos mais difundidos. Dentre os trabalhos mais relevantes que tratam especificamente dessas geometrias estão Sugihara & Enomoto (ENOMOTO et al., 2012; SUGIHARA; ENOMOTO, 2009, 2013, 2017; SUGIHARA; NISHIMOTO; ENOMOTO, 2017; SUGIHARA; SINGH; ENOMOTO, 2017; SUGIHARA; TANAKA; ENOMOTO, 2017). Desta forma, são avaliados os tipos de texturas tratados nestes trabalhos, os quais são tomados como ponto de partida para serem preenchidas com nanotubos de carbono (NTCs). A partir de avaliações, conduzidas primeiro por simulação e depois experimentalmente, são desenvolvidas e escolhidas as texturas candidatas que podem proporcionar os melhores resultados.

##### 3.1.1 Desenvolvimento das ferramentas de corte texturizadas com nanotubos de carbono

A proposta central deste trabalho é avançar no trabalho desenvolvido por Ribeiro (2019), em que ferramentas de corte texturizadas foram preenchidas com nanotubos de carbono (NTCs), mas agora aplicando revestimento de TiAlN nas ferramentas de corte antes do preenchimento com NTCs. Inicialmente, estimou-se a temperatura máxima nas ferramentas com micro ranhuras e micro furos de Sugihara & Enomoto considerando o preenchimento delas com NTCs.

O primeiro passo dado foi em direção à estimativa do fluxo térmico no comprimento de contato cavaco-ferramenta, considerando uma ferramenta convencional (sem textura) sob uma temperatura típica de usinagem de aproximadamente 1000°C na zona de aderência e 80°C na interface ferramenta de corte/porta ferramentas, cujo valor foi obtido por meio de medição com termopar. As demais condições de contorno dizem respeito à ferramenta de corte empregada nos testes, ou seja, metal duro com 6% de cobalto, sem revestimento e sem quebra cavacos com as seguintes propriedades: condutividade térmica da ferramenta de corte 50 W/mK; coeficiente

de convecção natural com o ar 20 W/mK; densidade 14600 kg/m<sup>3</sup>; módulo de elasticidade 580 GPa; e coeficiente de Poisson 0,22 (FAHAD; MATIVENGA; SHEIKH, 2013; FERREIRA, 2017; LI et al., 2017). A geometria da ferramenta escolhida, de designação TPUN 160308 IC20 da Iscar, é a mais simples possível, a fim de facilitar a visualização da textura antes e após a usinagem, bem como a análise do desgaste e o modelamento por FEM. Por meio da técnica de resolução de problemas inversos e sob as condições de contorno citadas introduzidas no ambiente de simulação do COMSOL Multiphysics® chegou-se aos fluxos térmicos na região de aderência de  $1,02 \times 10^8$  W/m<sup>2</sup> e de  $1,02 \times 10^7$  W/m<sup>2</sup> na região de deslizamento necessários para que a temperatura máxima de 1003,19 °C na interface cavaco/ferramenta fosse atingida. Adotando-se 3000W/mK para a condutividade térmica dos NTCs, e considerando o completo preenchimento dos micro furos e micro ranhuras das texturas de Sugihara & Enomoto, obteve-se por meio de simulação as temperaturas máximas de 920°C e 930°C, respectivamente. O valor da condutividade térmica foi tomado com base em estudos que apontam que apenas um NTC pode variar entre 2000 a 6000 W/mK (HAN; FINA, 2011b). No entanto, as pequenas dimensões da textura, as quais refletem em pequeno volume de NTCs, minimizaram o efeito térmico, uma vez que os micro furos apresentam profundidade de 0,005 mm e diâmetro de 0,05 mm, enquanto as micro ranhuras têm profundidade de 0,005 mm e largura de 0,02 mm. Como resultado, partiu-se para propostas de adaptação destas geometrias com o objetivo de aumentar suas dimensões e minimizar a temperatura. Desta forma, foram consideradas quatro profundidades e dois diâmetros diferentes para os micro furos, enquanto que para as micro ranhuras foram adotadas estas mesmas profundidades e duas larguras de ranhuras diferentes, conforme é mostrado nas Tabela 3 e Tabela 4, respectivamente.

Tabela 3: Temperatura máxima (°C) obtida por simulação em ferramentas de corte com micro furos de diâmetros e profundidades diferentes.

| Profundidade (mm) | Diâmetro (mm) |            |
|-------------------|---------------|------------|
|                   | 0,1           | 0,2        |
| 0,25              | <b>991</b>    | <b>930</b> |
| 0,5               | <b>969</b>    | <b>878</b> |
| 0,75              | <b>948</b>    | <b>844</b> |
| 1                 | <b>929</b>    | <b>815</b> |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4: Temperatura máxima (°C) obtida por simulação em ferramentas de corte com micro ranhuras de larguras e profundidades diferentes.

| Profundidade (mm) | Largura (mm) |      |
|-------------------|--------------|------|
|                   | 0,08         | 0,16 |
| 0,25              | 566          | 582  |
| 0,5               | 581          | 534  |
| 0,75              | 607          | 512  |
| 1                 | 661          | 500  |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Nota-se que a maioria das texturas simuladas preenchidas com NTCs produziu temperaturas maiores do que a de Sugihara & Enomoto. Isto deve-se à menor densidade de furos das texturas propostas, as quais abrigam menores volumes de nanotubos. Porém, todas as micro ranhuras produziram temperaturas expressivamente menores que qualquer um dos microfuros, conforme pode-se observar pelos valores da Tabela 4. Baseado nestes resultados, e também das micro ranhuras de Sugihara & Enomoto preenchidas com NTCs, pode-se inferir que as micro ranhuras são as texturas mais promissoras para o preenchimento com NTCs. Em função das ranhuras excessivamente estreitas da proposta da Tabela 4, sua fabricação se torna tecnicamente impraticável, o que levou a uma nova proposta com ranhuras mais largas, de 0,3 mm, cujos valores de simulação da temperatura são mostrados na Tabela 5. Nota-se que as temperaturas diminuíram ainda mais, no entanto a análise de resistência mecânica da ferramenta de corte por elementos finitos (FEM) detectou valores próximos ao limite de escoamento do metal duro com 6% de cobalto, cujo valor é de 3000 MPa. Semelhante ao considerado por outros autores (INGRACI NETO, 2014; LI et al., 2017), uma carga estática de 600N, estimada em ensaio de usinagem, foi aplicada sobre a região de contato cavaco-ferramenta. Foi observado que apenas as texturas com profundidades de 0,25 e 0,50 mm apresentaram tensões de escoamento de 1930N e 2463N, respectivamente, abaixo da tensão limite do material da ferramenta de corte. Nas profundidades de 0,75 e 1,0 mm houve superação da tensão limite sendo identificadas tensões de 3581 e 4728N, respectivamente, as quais impossibilitam o uso da ferramenta de corte.

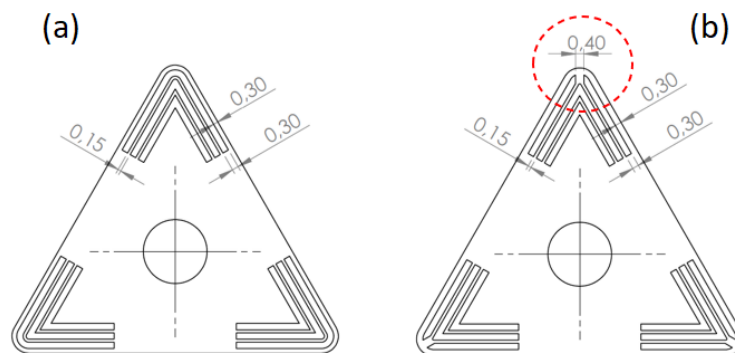
Tabela 5: Temperatura máxima (°C) obtida por simulação em ferramentas de corte com micro ranhuras de 0,3 mm de largura e diferentes profundidades.

| Profundidade (mm) | Largura (mm) |
|-------------------|--------------|
|                   | 0,3          |
| 0,25              | 554 °        |
| 0,5               | 518 °        |
| 0,75              | 501 °        |
| 1                 | 487 °        |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Devido ao resultado promissor desta geometria, uma nova versão foi proposta, na qual as características básicas foram mantidas sendo adaptados apenas aspectos necessários para superar os problemas de resistência mecânica. Como resultado, uma porção de material foi deixada na ponta da ferramenta de corte, funcionando como um reforço estrutural. A Figura 17 mostra a proposta anterior ( Figura 17 .a) e a nova versão modificada ( Figura 17 .b), onde é visto o detalhe da modificação.

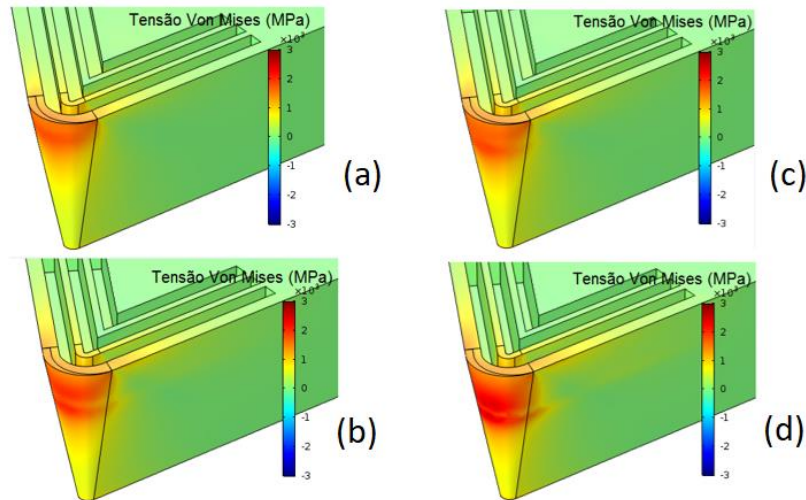
Figura 17: Ferramenta de corte com (a) micro ranhuras e (b) proposta com modificação (medidas em milímetros).



Fonte: Ribeiro (2019).

Na Figura 18 são mostradas as tensões sobre a ferramenta de corte nas profundidades de 0,25 (Figura 18a), 0,50 (Figura 18b), 0,75 (Figura 18c) e 1,0 mm (Figura 18d) cujas tensões máximas alcançaram 1781, 1898, 1984 e 2707 MPa, respectivamente. Devido à ranhura de maior profundidade (1,0 mm) ter induzido tensões próximas ao limite de escoamento do material seu uso foi descartado sendo adotadas as geometrias com as três profundidades menores.

Figura 18: Tensões na ferramenta de corte texturizada com micro ranhuras de 0,3 mm de largura nas profundidades de (a) 0,25 mm, (b) 0,50 mm, (c) 0,75 mm e (d) 1,0 mm.



Fonte: Ribeiro (2019).

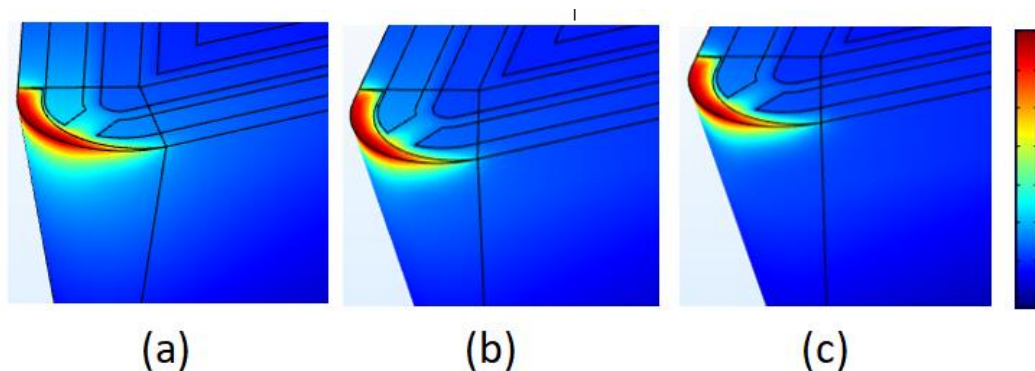
A modificação estrutural na ponta da ferramenta de corte acarretou um acréscimo de apenas 3 a 4 % nas temperaturas máximas, como é possível observar na Tabela 6, cujos valores obtidos por simulação podem ser visualizados na Figura 19.

Tabela 6: Temperatura máxima (°C) obtida por simulação em ferramentas de corte modificada com micro ranhuras de 0,3 mm de largura e diferentes profundidades.

| Profundidade (mm) | Largura (mm) |
|-------------------|--------------|
|                   | 0,3          |
| 0,25              | 576          |
| 0,5               | 536          |
| 0,75              | 518          |

Fonte: Elaborado pelo autor.

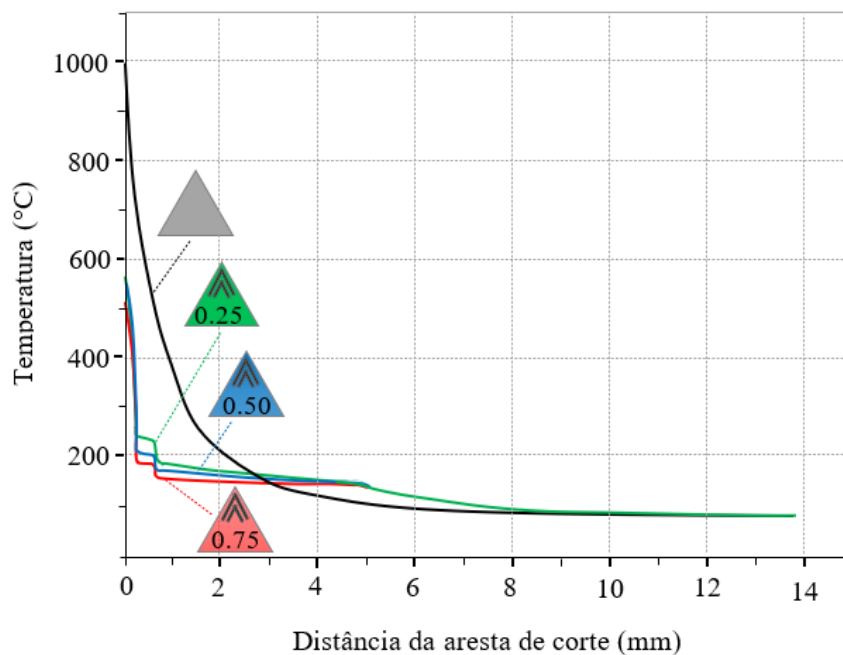
Figura 19: Simulação da temperatura na ferramenta de corte com micro ranhuras de 0,3 mm de largura nas profundidades de (a) 0,25 mm, (b) 0,50 mm e (c) 0,75 mm.



Fonte: Adaptado de Ribeiro (2019).

Na Figura 20 é apresentada a simulação da temperatura na superfície das ferramentas de corte tanto convencional quanto com micro ranhuras preenchidas com nanotubos de carbono com três profundidades diferentes, desde na posição da aresta de corte até 14 mm afastado dela. Enquanto a temperatura na ferramenta convencional diminui paulatinamente com o afastamento da aresta de corte, as ferramentas com nanotubos tem queda brusca da temperatura e os seus valores permanecem estáveis de 0,5 a 5 mm de distância da aresta de corte onde os NTCs estão localizados. A partir desse ponto as temperaturas das ferramentas tendem a um mesmo valor. Diante deste resultado, a aplicação de materiais de alta condutividade térmica nas ferramentas de corte, como é o caso dos NTCs, se mostra promissora.

Figura 20: Temperatura na superfície das ferramentas de corte convencional e com micro ranhuras preenchidas com NTCs com diferentes profundidades (0,25, 0,50 e 0,75 mm).



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.1.2 Definição das texturas e condições dos testes

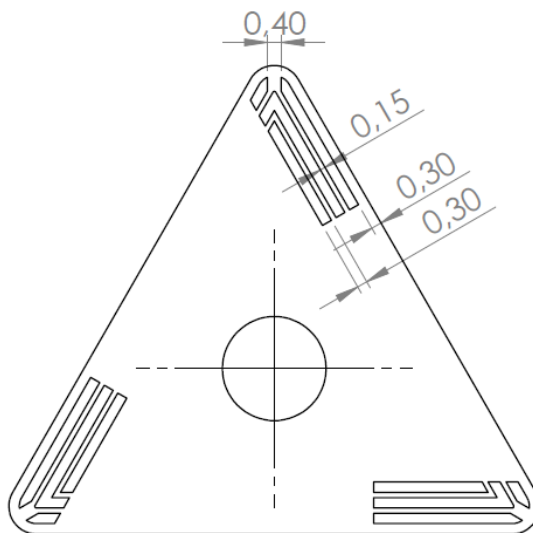
A partir das considerações feitas, definiu-se os tipos de texturas das ferramentas e as condições propostas nos testes definitivos. Assim, utilizou-se ferramentas com ranhuras de diferentes profundidades, tanto a seco quanto sob fluido de corte, e ferramentas com ranhuras de diferentes profundidades preenchidas com NTCs, neste caso sempre a seco. Todas as ferramentas são de metal duro com revestimento e sem quebra cavaco. Os testes também

envolveram ferramentas texturizadas encontradas na literatura, especificamente as de Sugihara & Enomoto, usinadas a seco e com fluido de corte, além da ferramenta convencional, as quais serviram de referência a fim do desempenho delas serem superadas pelos novos tipos propostos.

Em resumo, estabeleceu-se os tipos de ferramentas, com aplicação ou não de fluido de corte, adotando-se uma figura sugestiva para identificar cada uma, conforme é observado na Tabela 5.

As ferramentas com ranhuras sem preenchimento de NTCs propostas não contam com textura ao lado da aresta de corte secundária, conforme é visto na Figura 21, uma vez que neste tipo de geometria não é buscada a dissipação de calor. Desta forma, ranhuras com 0,1 mm de profundidade é o suficiente. Em adição, este tipo de geometria também contou com ranhuras de 0,25 mm, já que a mesma profundidade foi empregada no preenchimento com NTCs. As ferramentas que tem preenchimento com NTCs possuem texturas nas regiões das duas arestas de corte, principal e secundária, a fim de aumentar a dissipação de calor, além disso a profundidade das ranhuras começa em 0,25 mm, uma vez que o volume de NTC é importante.

Figura 21: Ferramenta de corte com micro ranhuras sem preenchimento com NTCs.



Fonte: Ribeiro (2019).

Tabela 5: Propostas das ferramentas de corte segundo o tipo de textura e preenchimento com e sem NTCs.

| Ferramenta             | Condição    | Representação                                                                       | Indicação |
|------------------------|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Convencional           | Seco        |    | 1.3       |
| Convencional           | Lubrificado |    | 2.3       |
| Micro furos            | Seco        |    | 3.3       |
| Micro furos            | Lubrificado |    | 4.3       |
| Micro ranhuras         | Seco        |   | 5.3       |
| Micro ranhuras         | Lubrificado |  | 6.3       |
| Micro ranhuras 0,1 mm  | Seco        |  | 7.3       |
| Micro ranhuras 0,1 mm  | Lubrificado |  | 8.3       |
| Micro ranhuras 0,25 mm | Seco        |  | 9.3       |
| Micro ranhuras 0,25 mm | Lubrificado |  | 10.3      |
| Micro ranhuras 0,25 mm | NTC         |  | 11.3      |
| Micro ranhuras 0,5 mm  | NTC         |  | 12.3      |
| Micro ranhuras 0,75 mm | NTC         |  | 13.3      |

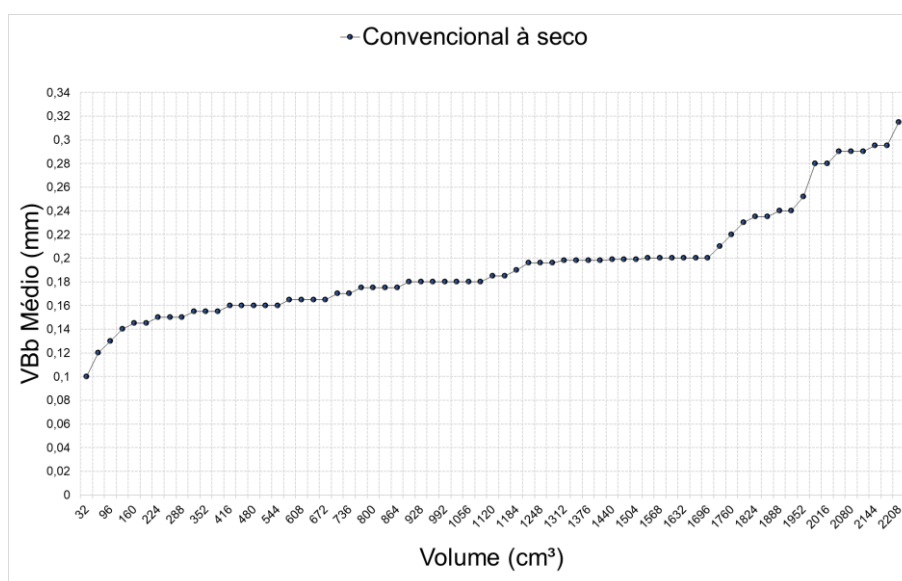
Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.1.3 Parâmetros de corte

Em trabalho desenvolvido por Ribeiro (2019), estudou-se as variáveis de saída nos diversos tipos de ferramentas de corte, compreendendo as convencionais, texturizadas a seco, texturizadas sob aplicação de fluido de corte e texturizadas com preenchimento de nanotubos de carbono. Com o objetivo de comparar o desempenho das ferramentas de corte texturizadas sem cobertura e ferramentas de corte texturizadas com cobertura, os ensaios preliminares foram feitos aplicando os mesmos parâmetros utilizados no referido trabalho, onde empregou-se avanço de 0,1 mm/rev, profundidade de corte de 1,0 mm aplicados às velocidades de corte de 50, 100 e 150 m/min. Foi estipulado um comprimento linear útil para atingir o tempo de, aproximadamente, 130 segundos de usinagem.

Foram realizados ensaios com a primeira velocidade de corte mencionada, 50 m/min a seco, onde foi possível avaliar que seriam necessários muitos ensaios devido ao alto rendimento da ferramenta com cobertura em baixas velocidades de corte, conforme observa-se na Figura 22. De acordo com Trent e Wright (2000), os custos do processo de usinagem geralmente dependem da taxa de remoção do material. No entanto, o aumento da taxa de remoção é geralmente acompanhado por um aumento na velocidade de corte. Assim a avaliação das ferramentas em questão em baixa velocidade de corte vai em sentido contrário às atuais pesquisas. Logo foi definido a reprodução da usinagem somente com velocidade de corte de 150 m/min.

Figura 22: Gráfico de vida de ferramenta para condição a seco (50m/min).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, buscou-se a variação do comprimento de corte e a fixação do tempo de usinagem em 130 segundos, avanço de 0,1 mm/rev, profundidade de corte de 1,0 mm aplicados apenas à velocidade de corte de 150 m/min.

A seleção dos parâmetros utilizados durante os ensaios de usinagem foi de uma profundidade superior ao raio de ponta da ferramenta de corte (0,8 mm) utilizando um avanço que gerasse um desgaste progressivo na ferramenta de corte, o qual pudesse ser observado ao longo da vida.

### 3.2 FABRICAÇÃO E AVALIAÇÃO DAS FERRAMENTAS DE CORTE TEXTURIZADAS

Neste item, serão relacionados os procedimentos de fabricação das ferramentas de corte texturizadas, os métodos de deposição do revestimento e os procedimentos de deposição dos nanotubos de carbono.

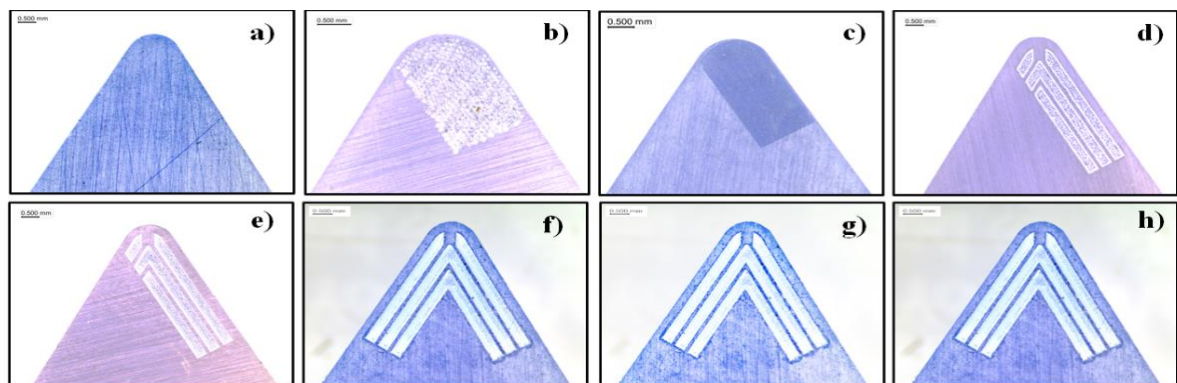
#### 3.2.1 Texturização e avaliação das ferramentas

Após a definição das geometrias das texturas a serem usinadas na superfície de saída da ferramenta de corte, as mesmas foram encaminhadas para a empresa LaserTools Tecnologia, no qual procedeu-se a texturização das mesmas pelo processo de usinagem à laser do tipo Nd-YAG. Acerca dos métodos observados em outros trabalhos referente ao tema, a usinagem à laser mostra-se como a mais apropriada, capaz de realizar a micro usinagem atendendo com precisão aceitável a atual demanda. Inicialmente a observação das ferramentas texturizadas foi realizada por meio do microscópio óptico Bioptika, modelo L60T, onde foi possível avaliar a texturização das geometrias e suas respectivas posições, certificando-se da sua precisão.

Encontram-se representadas na Figura 23 as ferramentas de corte convencional (Figura 23.a), com micro furos (Figura 23.b), micro ranhuras (Figura 23.c) micro ranhuras 0,1 mm de profundidade (Figura 23.d), micro ranhuras 0,25 mm de profundidade (Figura 23.e) e as ferramentas propostas para o uso com nanotubos de carbono, micro ranhuras 0,25; 0,5 e 0,75 mm de profundidade (Figura 23.f, g, h). Ainda assim, para melhor investigação das ranhuras, utilizou-se microscopia eletrônica de varredura (MEV), equipamento modelo JEOL modelo JSM-IT500HR, para averiguar as camadas interiores da região texturizada. Como observado na Figura 24, a texturização promoveu uma região com material fundido devido às altas temperaturas provenientes do processo à laser, semelhante ao citado em outros trabalhos

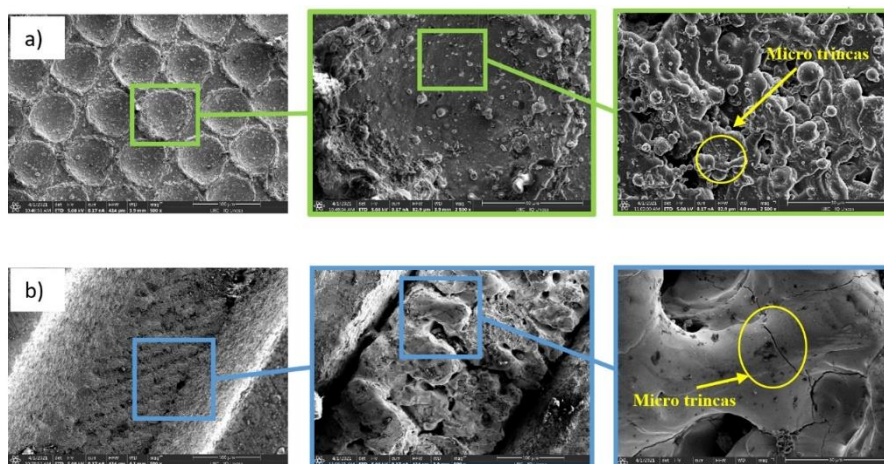
(MISHRA; GHOSH; ARAVINDAN, 2018b). O aparecimento de pequenas trincas é notado na camada fundida da textura, apesar disso, não é possível observar maiores danos à ferramenta de corte. Trincas semelhantes são observadas em todas as ferramentas texturizadas que apresentam micro ranhuras de 0,3 mm de largura. Logo, para as ferramentas texturizadas com micro furos e micro ranhuras, as imagens ampliadas foram capazes de mostrar com mais detalhes pequenos defeitos superficiais nas regiões texturizadas. Na Figura 24.b, observa-se que a texturização com micro ranhuras apresentou quantidades maiores de trincas e imperfeições na superfície do fundo da textura, fato ocorrido principalmente devido às dimensões reduzidas das geometrias que promoveu o acúmulo de material fundido da ferramenta de corte durante a texturização. Contudo, a Figura 24.a mostra a superfície texturizada com micro furos, onde é evidente a redução das imperfeições, observando-se um acabamento mais homogêneo comparado às micro ranhuras.

Figura 23: Imagem das ferramentas de corte texturizadas: (a) convencional; (b) micro furos; (c) micro ranhuras; (d) micro ranhuras com 0,1 mm de profundidade; (d) micro ranhuras com 0,25 mm de profundidade; (e) micro ranhuras em ambas arestas com 0,25 mm de profundidade; (g) com 0,50 mm de profundidade; e (h) com 0,75 mm de profundidade.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 24: Imagens de MEV das ferramentas texturizadas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2.2 Deposição do revestimento

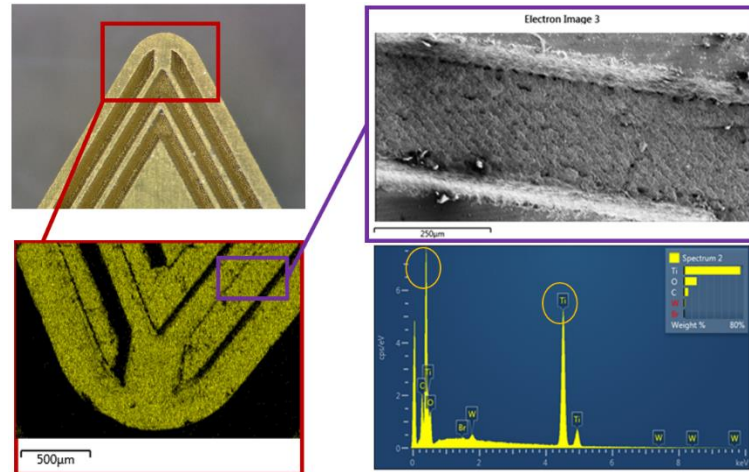
O revestimento utilizado foi o TiAlN, que é composto por nitreto de titânio alumínio, que representa um grupo de revestimentos duros constituindo-se de elementos metálicos de alumínio, titânio e nitrogênio, revestidos por deposição física de vapor (PVD) que apresenta uma estabilidade química superior àquela oferecida pelos revestimentos TiN e TiCN. O TiAlN é indicado para usinagem de materiais dúcteis, ou quando se deseja arestas de corte mais afiadas, conforme apontado por Diniz; Marcondes e Coppini (2006).

Durante a texturização a laser, a usinagem gera uma camada derretida do material da ferramenta devido ao intenso calor gerado pelo raio laser. Este material se acumula ao redor da borda da textura usinada e cria camadas sobrepostas ligadas à superfície. Sua remoção é necessária antes da deposição do revestimento, pois essas partículas fracamente ligadas à superfície podem agir como uma fonte potencial de remoção do revestimento. Para minimizar este efeito, as ferramentas passaram por uma limpeza em uma câmara de vácuo, sendo previamente aquecidas, para em seguida serem cauterizadas ionicamente por bombardeio com íons de argônio. Isso torna a superfície metálica pura e limpa, livre de qualquer contaminação atômica, condição essencial para se promover a aderência do revestimento.

Após a texturização a laser e a limpeza, as ferramentas foram enviadas à empresa Balzers S.A para a deposição do revestimento de TiAlN, sendo empregado o processo *magnetron sputtering PVD* (Physical Vapour Deposition). Por meio das imagens de EDS da superfície das ferramentas revestidas, observou-se a distribuição uniforme do revestimento por toda a superfície de saída e dentro das ranhuras, conforme mostrado na Figura 25. Ainda foi

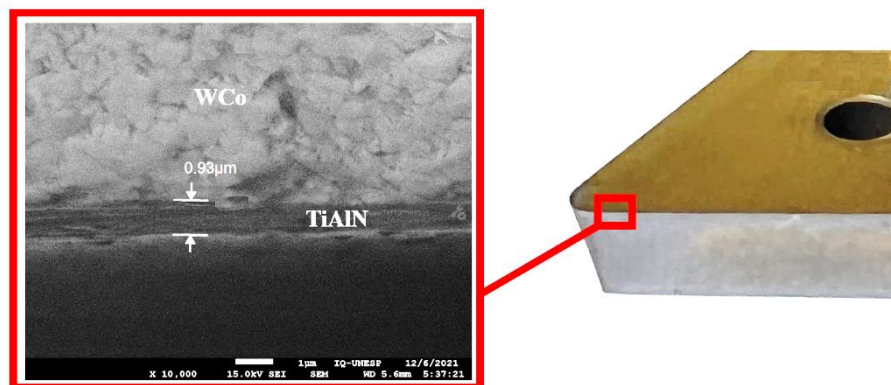
medida a espessura do revestimento que apresentou  $0,93\mu\text{m}$  de espessura (Figura 26), dimensão dentro da tolerância prevista para o referido processo de cobertura e a rugosidade ( $R_a$ ) medida na superfície de saída foi de  $0,205\mu\text{m}$ .

Figura 25: Imagem de MEV da ferramenta e composição elementar por EDS do revestimento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 26: Imagem de MEV da espessura do revestimento de TiAlN.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.2.3 Deposição dos nanotubos de carbono nas ferramentas de corte texturizadas

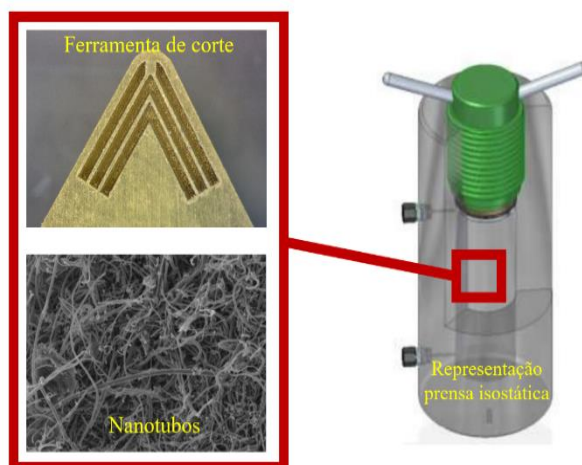
A deposição dos nanotubos de carbono para o preenchimento das micro ranhuras foi realizado por prensagem isostática, que é um processo de conformação e compactação de pós, baseado na pressurização hidráulica, em alta pressão, que age simultaneamente em todas as direções, resultando em peças com menores gradientes de densidade do que se o componente fosse prensado axialmente (FORTULAN et al., 2014). O dispositivo utilizado para a

compactação dos nanotubos de carbono dentro das micro ranhuras foi a prensa isostática de vasos gêmeos, do Laboratório de Tribologia e Compósitos da Escola de Engenharia de São Carlos – USP. As ferramentas juntamente com os nanotubos de carbono, estes em forma de pó, foram depositados sobre a superfície texturizada e encapsulados em uma membrana elástica. Então, foi aplicado vácuo e feita a vedação, logo em seguida foram inseridos em uma segunda membrana de borracha para aplicação do vácuo e vedação final. Devido à geometria reduzida da amostra, não foi realizada uma compactação uniaxial antes da prensagem isostática, então foram aplicadas duas compactações com uma pressão de 200 MPa por 5 minutos (Figura 27).

Após a prensagem isostática, todas as ferramentas apresentaram excesso de nanotubos de carbono em sua superfície (Figura 28.a). A retirada do excesso de nanotubos da superfície foi feita por meio de um leve lixamento, com lixa de granulometria 3000 mesh, específica para polimento e remoção de pequenas partículas, ficando conforme mostrado na Figura 28b.

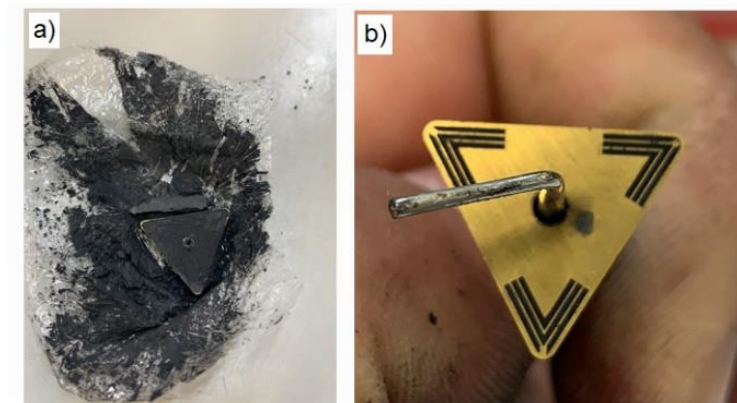
Após a limpeza foram realizadas análises por microscopia eletrônica de varredura com intuito de observar a compactação geral do material dentro das micro ranhuras, onde foi possível constatar que as superfícies das ferramentas apresentaram o aspecto indicado na Figura 29a. Uma busca mais aprofundada na superfície das ferramentas com nanotubos de carbono indicou bom grau de compactação dos nanotubos, sem vazios (Figura 29b, 33c, 33d e 33f). Assim, foi possível afirmar que os nanotubos de carbono foram corretamente depositados dentro das micro ranhuras de maneira uniforme em todas as ferramentas.

Figura 27: Representação do processo de prensagem isostática aplicado.



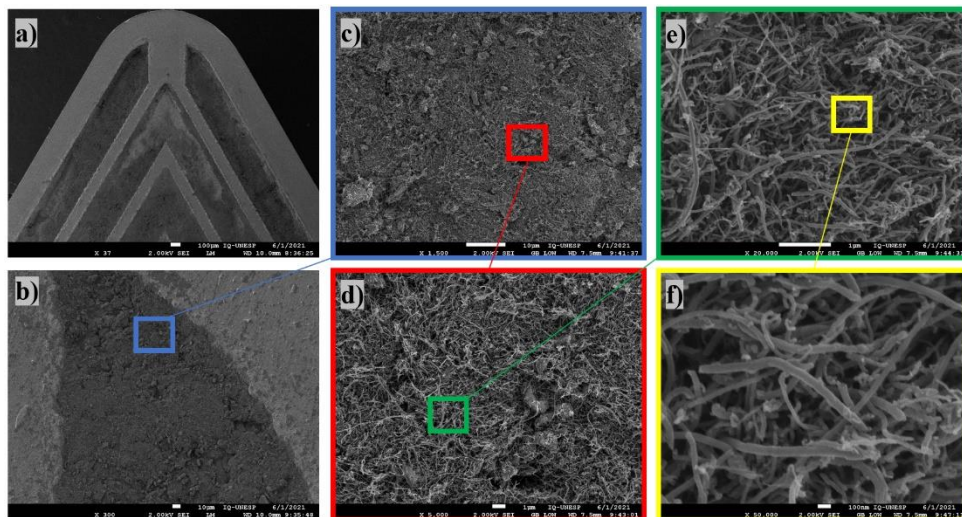
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 28: Imagem da ferramenta com ranhuras preenchidas com nanotubos de carbono: a) após prensagem isostática; b) após limpeza superficial.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 29: Ferramenta de corte texturizada com 0,75 mm de profundidade: Ampliação a)37x, b)300x, c)1500x, d)5000x, e)20000x e f)50000x.



Fonte: Elaborado pelo autor.

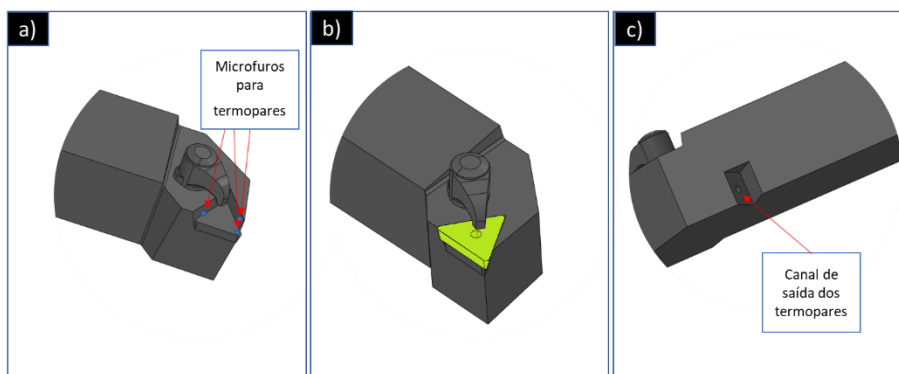
### 3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Nesta sessão são apresentadas as preparações dos materiais e os métodos envolvidos nos ensaios. Isso implica também nas análises utilizados para avaliação das ferramentas de corte durante e após a usinagem, bem como a interpretação dos dados sobre força de corte, temperatura, atrito, rugosidade e os mecanismos de desgaste identificados nas ferramentas de corte.

### 3.3.1 Porta ferramentas

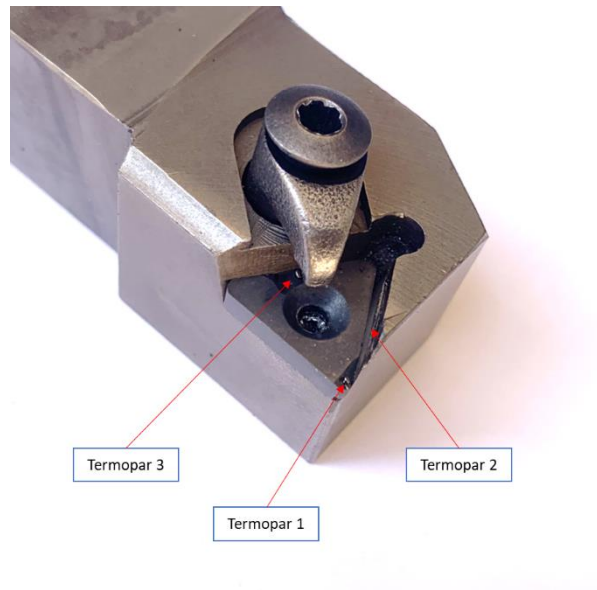
O modelo de ferramenta de corte utilizada neste trabalho é do modelo TPUN 160308-IC20, com o correspondente porta ferramenta CTGP-L 20x20. Neste suporte porta ferramentas foram realizadas pequenas mudanças para a instalação de micro termopares do tipo K, os quais medem 0,3 mm de diâmetro. Para tanto, foram usinados furos no porta ferramentas e na base do assento. O respectivo assento foi perfurado em dois locais (Figura 30.a) por meio do processo de eletroerosão, empregando um equipamento da marca AgieCharmiles modelo SP-1 com eletrodos capilares de cobre de 0,3 mm de diâmetro fixados a um mandril especialmente fabricado para este procedimento. Dois termopares foram fixados para permanecer em contato com a superfície inferior da ferramenta de corte, ou seja, os mesmos fixados no assento com a utilização de adesivo epóxi nos furos e o terceiro em contato com a lateral da ferramenta de corte, da mesma forma, fixado por adesivo epóxi no furo. Após a montagem da ferramenta, os termopares não exibem contato direto com o ambiente exterior, como mostrado na Figura 30b. A passagem dos termopares ocorre por um furo usinado na parte lateral do termopar (Figura 30c), protegendo-os de possíveis avarias durante os ensaios. A posição final dos termopares no suporte de ferramentas está apresentada na Figura 31.

Figura 30: Representação do porta ferramentas. a) canais para passagem dos termopares; b) ferramenta sobre os termopares; c) canal de saída dos condutores.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 31: Posição final dos termopares no suporte de ferramentas.



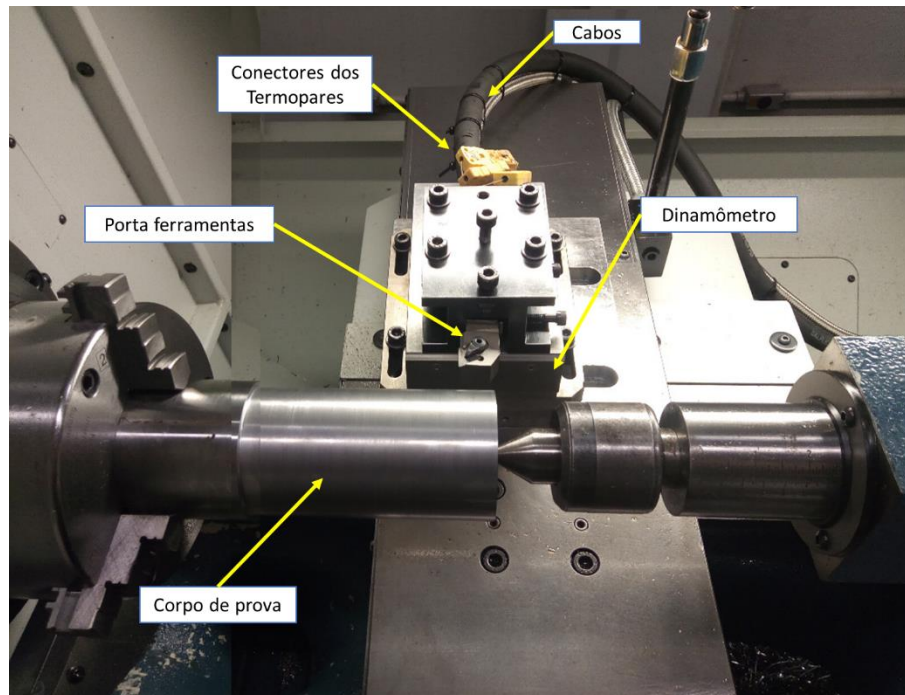
Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.3.2 Montagem do conjunto para usinagem

Os ensaios práticos de usinagem foram executados em um torno CNC da marca ROMI, modelo Centur 30D com comando Siemens 802D, onde foi montado um dinamômetro da marca Kistler, modelo 9257BA, para aquisição de sinais de até três coordenadas, como mostrado na Figura 32. Os sinais emitidos pelo dinamômetro são enviados até a unidade de controle 5233 A1, onde os sinais foram denominados  $F_y$ ,  $F_x$  e  $F_z$  para registro dos esforços atingidos durante o torneamento. A unidade de controle do dinamômetro possui saídas coaxiais que foram conectadas a um módulo de aquisição de dados analógicos da National Instrument modelo NI-9207.

Da mesma forma, os sinais dos termopares foram enviados ao módulo de entrada analógica da National Instrument modelo NI-9214. Ambos módulos operam conectados ao chassi de ethernet cDaq-9188, também da National Instrument e processados e armazenados em um computador com um Instrumento Virtual (IV) no software de análise Labview® (Figura 33). A captação dos sinais de força e temperatura foram com frequência de aquisição de 200 Hz.

Figura 32: Disposição do conjunto no torno CNC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 33: Representação dos componentes para aquisição de dados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.3.3 Corpos de prova

Foram utilizados corpos de prova cilíndricos, em aço ABNT 1045, com 75 mm de diâmetro e comprimento de usinagem de 200 mm. Para a velocidade de corte estudada, aplicaram-se comprimento linear de corte inicial de 140 mm para atingir o tempo de usinagem desejado, ampliando este comprimento a cada passe, resultante da redução do diâmetro. Na Figura 32, apresentada previamente, é mostrado, junto aos demais itens utilizados, o corpo de prova preso na placa e apoiado pelo contra ponta rotativo fixado no mangote do torno CNC. A escolha do corpo de prova com 75 mm foi necessária para atender o comprimento de corte exigido, devido ao tempo de usinagem estipulado, considerando que será usinado até o diâmetro mínimo de 50 mm, uma vez que seriam necessários 210 mm de comprimento linear útil de usinagem para atingir o tempo de 130 segundos. O comprimento total do corpo de prova foi de 300 mm, onde ao comprimento útil de usinagem de 200 mm, ainda soma-se 100 mm de segurança entre a placa e o dinamômetro.

### 3.3.4 Análise de dados

Entre um passe e outro, para registrar a progressão do desgaste da ferramenta de corte, utilizou-se um estereomicroscópio trinocular Bioptika, modelo L60T. Ao longo dos ensaios, o desgaste da ferramenta foi medido até alcançar o valor limite de 0,3mm, ou até que a operação fosse interrompida caso ocorresse alguma falha catastrófica na ferramenta. Este limite atende à norma ISO 3685 que estabelece para o final de vida da ferramenta de corte, o desgaste de flanco médio de 0,3 mm ( $VB_B$ ).

Também foram realizadas imagens por microscopia eletrônica de varredura (MEV) no último passe de cada ferramenta de corte, e feita análise EDS, com equipamento da marca JEOL modelo JSM-IT500HR. Com isso, pôde-se avaliar a adesão de elementos químicos nas ferramentas de corte nos últimos passes de cada condição.

Para analisar a rugosidade dos corpos de prova foi utilizado um rugosímetro portátil digital da marca Time Inc. modelo ITRPSD200, com ajuste de *cut-off* igual a 0,8mm, em 5 trechos de medição e aplicação de filtro gaussiano, sendo os valores mensurados apresentados em  $R_a$  ( $\mu\text{m}$ ) e  $R_z$  ( $\mu\text{m}$ ).

Os dados da temperatura nos termopares fixados no porta ferramentas, foram adquiridos gerando sinais conforme mostrado mostrados na Figura 35 e, após a aquisição e

processamento, foram avaliados quanto ao seu valor máximo para cada ensaio, sendo posteriormente comparados com os resultados das simulações em software.

Os dados das forças de corte foram coletados em cada passe e representados através de seus valores médios para cada ensaio até o fim da vida das ferramentas. Os valores das forças de corte medidos durante os ensaios, conforme mostrado na Figura 36, foram aplicados para a quantificação do coeficiente de atrito entre cavaco e ferramenta utilizando as Equações 5, 6 e 7, propostas por Vasumathy e Meena (2017).

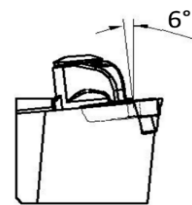
$$F_{at} = (F_{xy} + F_z \tan \alpha) \cos \alpha \quad (5)$$

$$F_N = (F_z - F_{xy} \tan \alpha) \cos \alpha \quad (6)$$

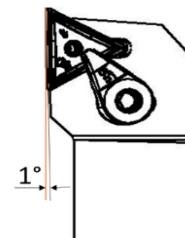
$$\mu = \frac{F_{at}}{F_N} \quad (7)$$

onde,  $F_{at}$  é a força de atrito,  $F_N$  é a força na direção normal à superfície de saída e  $F_{xy} = F_x / \sin(90 - \theta)$ ,  $\alpha$  é o ângulo de saída e  $\theta$  é o ângulo de posicionamento da ferramenta ou ângulo lateral da aresta de corte. Para o conjunto em questão, a ferramenta de corte e o porta ferramentas possui  $\theta = 1^\circ$  e  $\alpha = 6^\circ$  (Figura 34). O ângulo lateral da aresta de corte é estabelecido como o ângulo entre a aresta de corte e a superfície lateral do porta ferramentas (FERRARESI, 1977) . Tal relação, que apresenta o valor do coeficiente global de atrito, não indica somente o atrito em determinada região, que como já mostrado pode ter origem na superfície de flanco, ponta ou superfície de saída da ferramenta de corte (BAILEY, 1975).

Figura 34: Ângulo da aresta de corte lateral e ângulo de saída do porta ferramentas.



Ângulo de saída ( $\alpha$ )

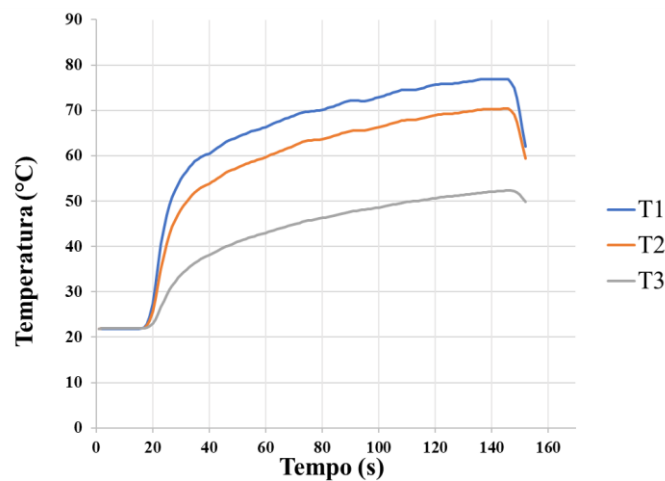


Ângulo lateral da aresta de corte ( $\theta$ )

Fonte: Elaborado pelo autor.

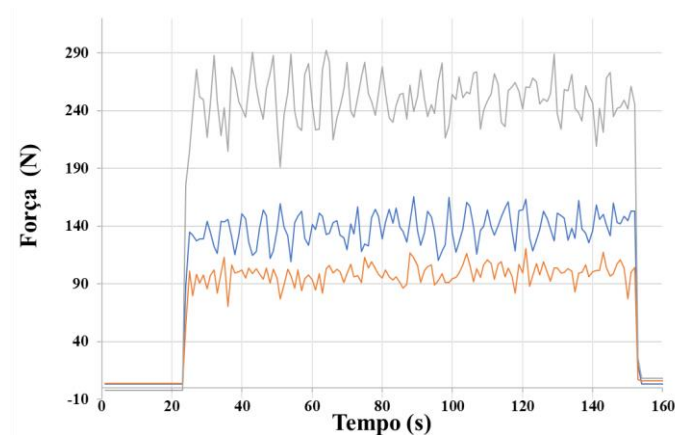
Os ensaios totalizam 13 condições diferentes, conforme mostrado na Figura 37, sendo: ferramenta convencional (Figura 37a); ferramenta texturizada com micro furos (Figura 37b); ferramenta texturizada com micro ranhuras (Figura 37c); ferramenta texturizada com micro ranhuras de 0,1 mm de profundidade (Figura 37.d); e ferramenta texturizada com micro ranhuras de 0,25 mm de profundidade (Figura 37.e), todas avaliadas em corte a seco e com fluido de corte. Ademais, têm-se 3 tipos de ferramentas de corte com ranhuras preenchidas com NTCs, sendo ferramentas com micro ranhuras de 0,25 mm, 0,5 mm e 0,75 mm de profundidade, respectivamente Figura 37.f, Figura 37.g e Figura 37.h.

Figura 35: Temperatura obtida no ensaio preliminar.



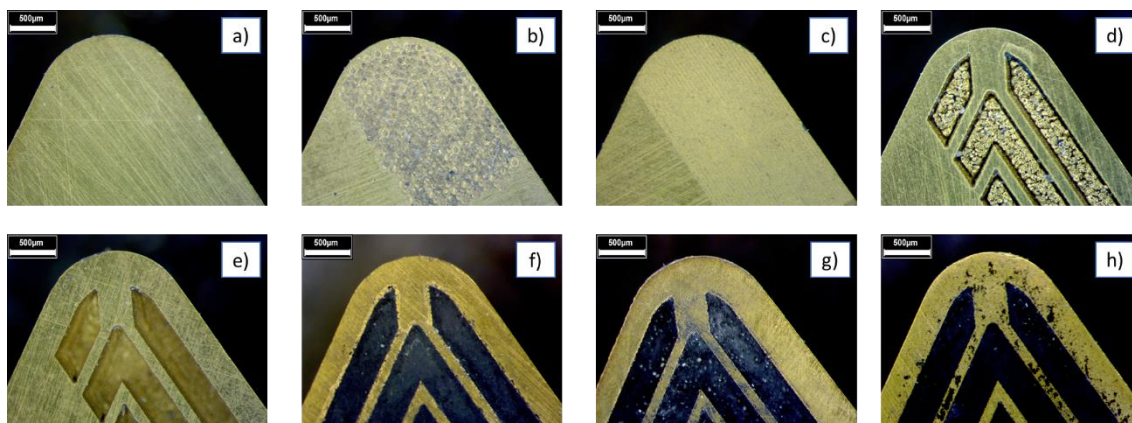
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 36: Forças de usinagem obtidas no ensaio preliminar.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 37: Ferramentas de corte (a) convencional, (b) com micro furos, (c) micro ranhuras, (d) micro ranhuras com 0,1 mm de profundidade, (e) micro ranhuras com 0,25 mm de profundidade, (f) micro ranhuras com 0,25 mm e NTCs, (g) micro ranhuras com 0,5 mm e NTCs, (h) micro ranhuras com 0,75 mm e NTCs.



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.4 ENSAIOS PRELIMINARES

Previamente, foi definido que seriam realizados ensaios com velocidades de corte de 50 m/min 100 m/min e 150 m/min para a reprodução fiel dos ensaios comparativos com ferramentas sem cobertura anterior feitos no trabalho de Ribeiro (2019). Porém, como já mencionado anteriormente, no primeiro ensaio preliminar verificou-se que seria necessário um número excessivo de ensaios devido ao rendimento superior de ferramentas com cobertura em baixas velocidades de corte. Por isso, adotou-se somente a velocidade de corte de 150 m/min, pelo fato de exigir melhor desempenho das ferramentas de corte.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste item são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios definitivos, sendo divididos em itens: rugosidade, análise EDS, atrito, temperatura, forças de usinagem, e vida de ferramenta (desgaste de flanco).

### 4.1 VIDA DE FERRAMENTA E VOLUME DE MATERIAL REMOVIDO

Neste tópico é apresentado e discutido o desempenho das ferramentas de corte relacionando o desgaste médio de flanco ( $VB_B$ ) em função do volume de material removido.

Os valores obtidos para o desgaste de flanco durante os ensaios para as condições a seco, com fluido de corte e com nanotubos de carbono, estão indicados na Figura 38, Figura 39 e Figura 40, respectivamente. As imagens das ferramentas nas condições a seco, com fluido de corte e com nanotubos de carbono em seus passes iniciais e finais estão indicadas, nas Figura 41, Figura 42 e Figura 43, respectivamente.

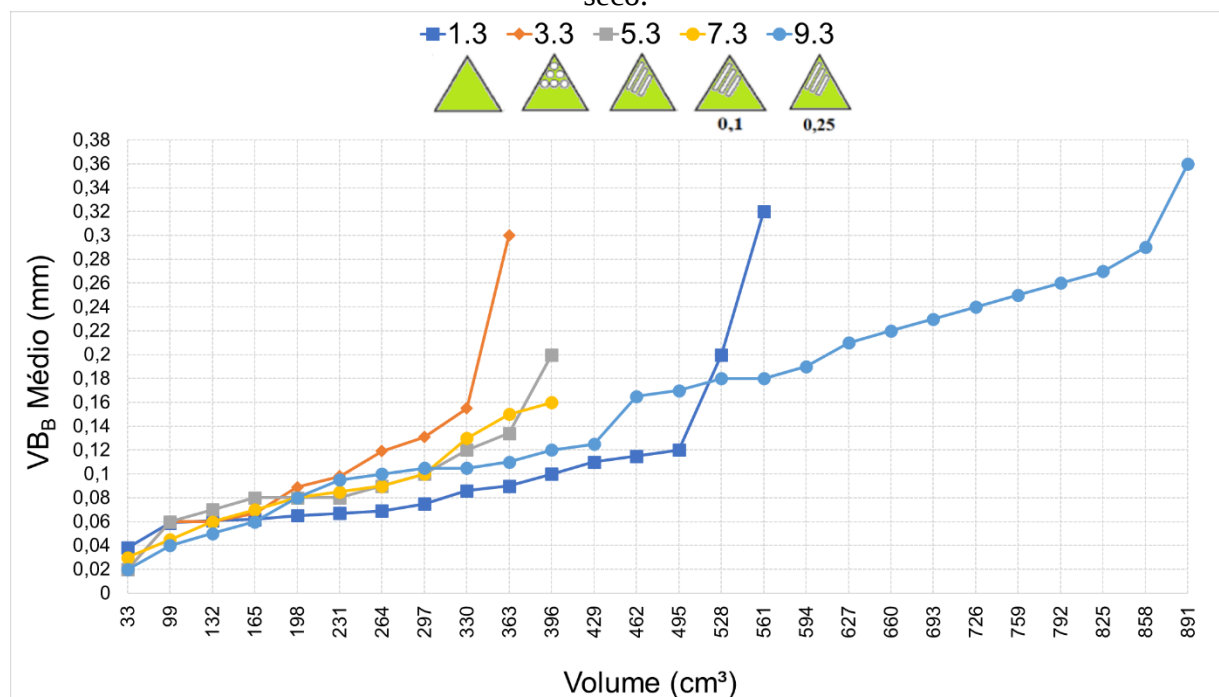
No comportamento da progressão do desgaste de flanco médio na usinagem a seco, as ferramentas com micro furos e micro ranhuras (condições 3.3 e 5.3) mostraram rápido desgaste, apresentando uma vida inferior à ferramenta convencional (condição 1.3). O posicionamento da texturização próximo da aresta de corte para tais condições pode ter sido decisivo para a redução de vida apresentada. Uma vez que a tensão obtida na superfície de saída é máxima nas regiões da aresta de corte (TRENT; WRIGHT, 2000) e devido às micro trincas observadas na avaliação por MEV para dadas condições, pode ter ocorrido uma fragilização local, indicando que as regiões próximas à aresta de corte devem ser preservadas (KOSHY; TOVEY, 2011). A ferramenta com ranhura de 0,1mm de profundidade (condição 7.3) resultou na avaria de sua ponta, sendo os ensaios finalizados antes de se obter o critério de fim de vida. Referente ao aumento de vida, a ferramenta com micro ranhuras 0,25 mm de profundidade (condição 9.3) superou a ferramenta convencional em 55,57 %.

As vidas das ferramentas sob aplicação de fluido refrigerante mostraram maior capacidade de remoção de material quando comparadas à ferramenta convencional (condição 2.3). Apenas a ferramenta da condição 6.3 (micro ranhuras rasas) apresentou vida inferior à ferramenta convencional. O destaque se deu para a condição 4.3 (micro furos), que apresentou aumento de vida de 39,75 %, seguido da condição 10.3 (micro ranhuras com 0,25mm de

profundidade) com aumento de 9,1 % e da condição 8.3 (micro ranhuras com 0,1mm de profundidade) com 7,96 %, conforme pode-se observar na Figura 39.

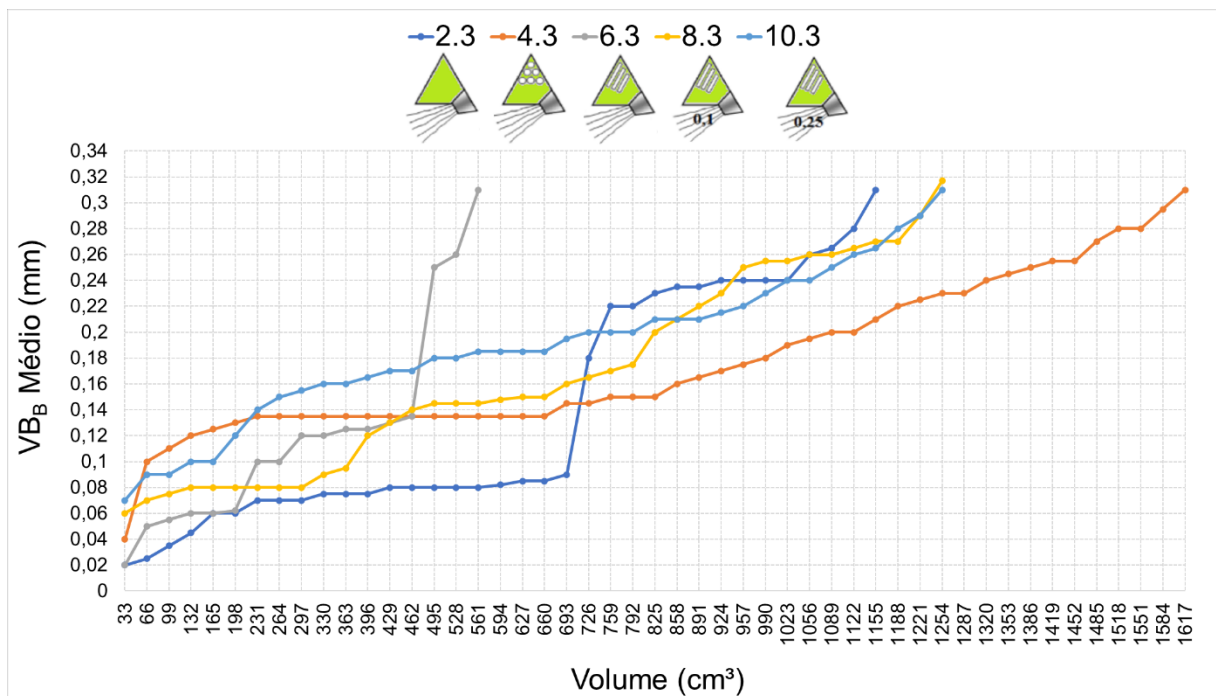
As ferramentas texturizadas com nanotubos de carbono não apresentaram falhas, como observado na Figura 43. A condição que obteve maior capacidade de remoção de material foi a 13.3 (micro ranhuras com 0,75 mm de profundidade e NTCs), seguida pela condição 12.3 e 11.3 (micro ranhuras com 0,5 e 0,25 mm de profundidade com NTCs). Nota-se que todas as ferramentas com NTCs superaram a ferramenta convencional na usinagem a seco (condição 1.3), com destaque para a condição 13.3 (micro ranhuras com 0,75 mm de profundidade e NTCs) que superou em 187% o volume de material removido, seguido pela condição 12.3 (82,91%) e condição 11.2 (71,04%). Comparando-se com a melhor condição texturizada a seco, que foi a 9.3 (micro ranhuras com 0,25 mm de profundidade), as condições das ferramentas texturizadas com NTCs 13.3, 12.3 e 11.3 apresentaram vida 84,5, 17,57 e 9,94% superior, respectivamente. Em comparação à melhor ferramenta de corte texturizada sem NTC e a melhor condição com NTC, que foi a ferramenta com micro furos com fluido de corte (condição 4.3) e micro ranhuras de 0,75 mm de profundidade com NTC (condição 13.3), respectivamente, nota-se resultados equivalentes, mostrando o ótimo desempenho da aplicação dos nanotubos de carbono. A comparação da vida de ferramenta, dada em volume de material removido, para as melhores condições é apresentada na Figura 44.

Figura 38: Desgaste de flanco em função do volume de material removido em condições a seco.



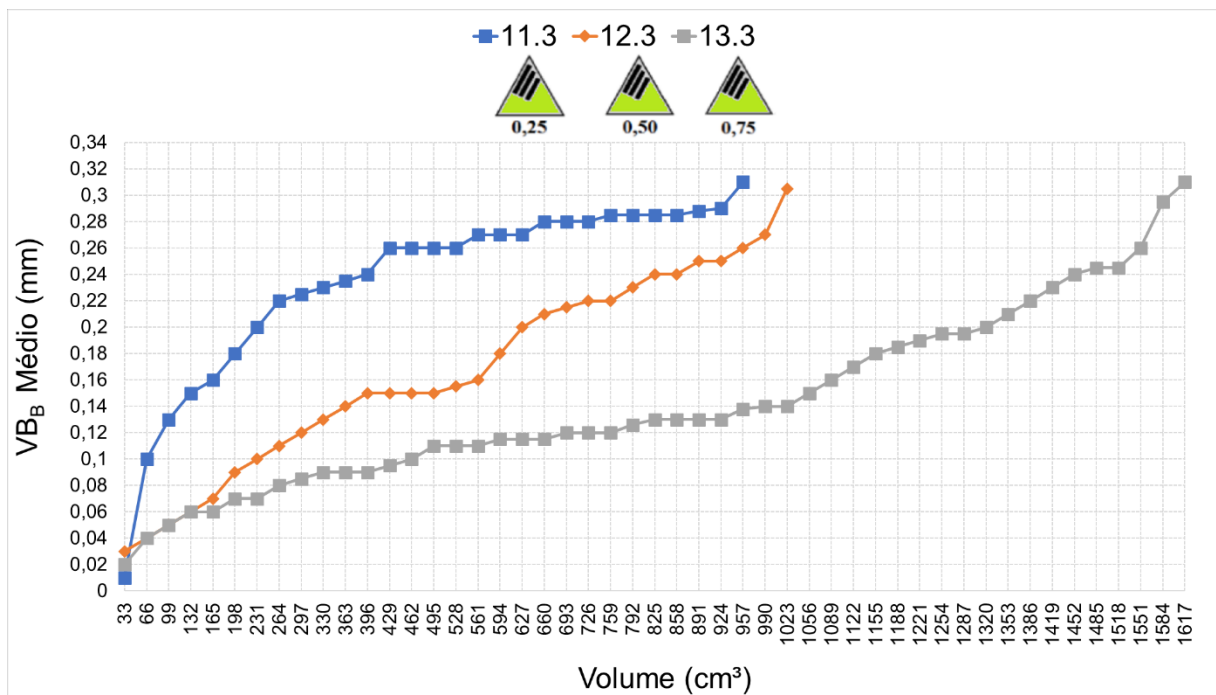
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 39: Desgaste de flanco em função do volume de material removido com aplicação de fluido de corte.



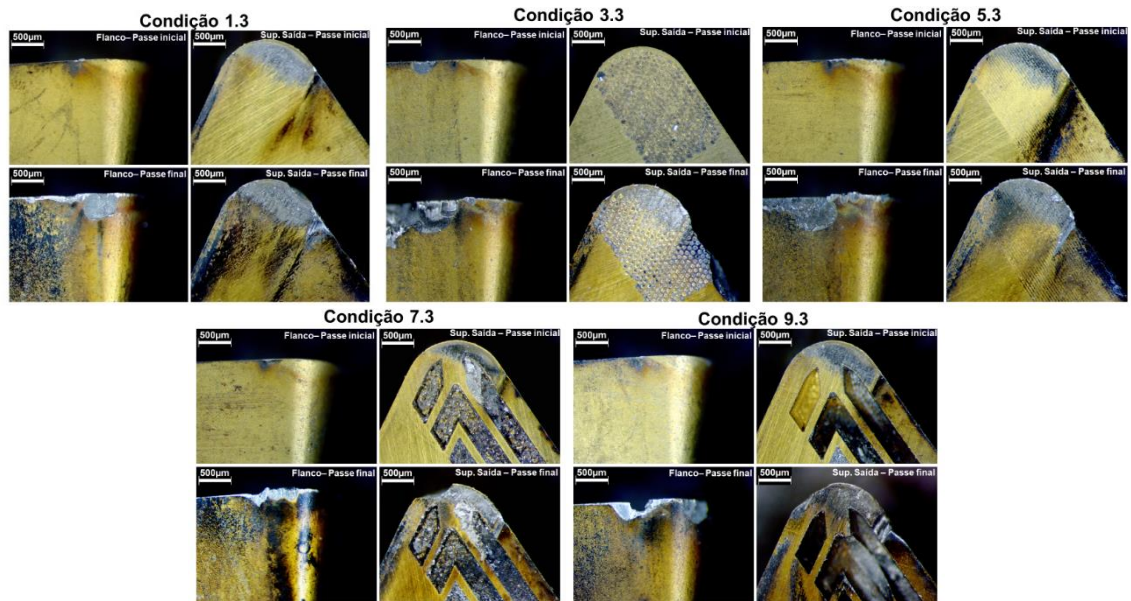
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 40: Gráfico de vida de ferramentas para condição com nanotubos de carbono.



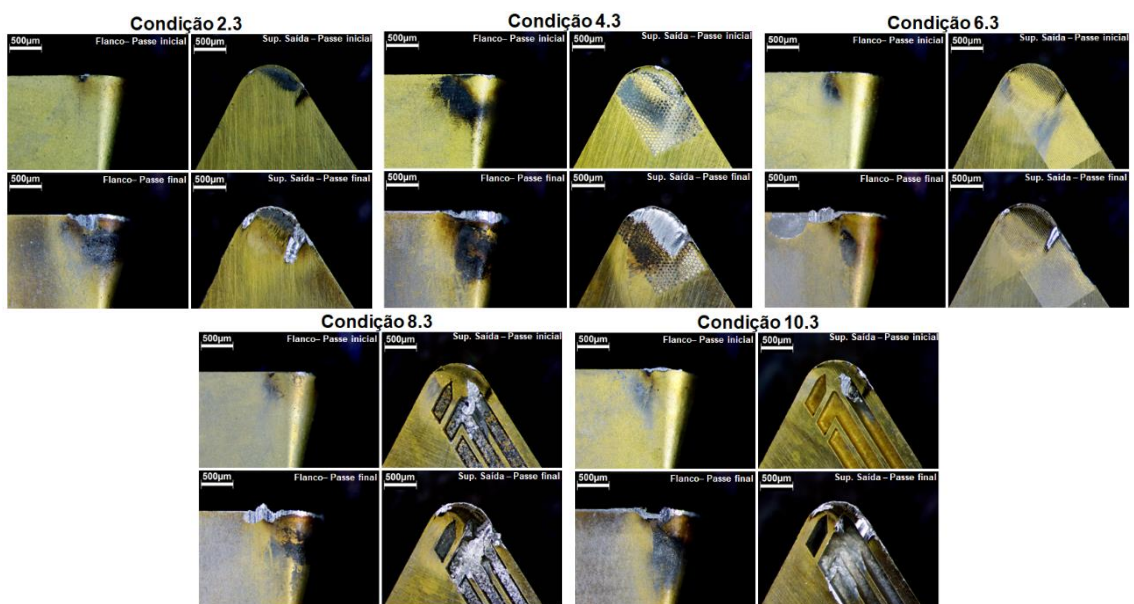
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 41: Ferramenta de corte no início e final da vida na usinagem a seco.



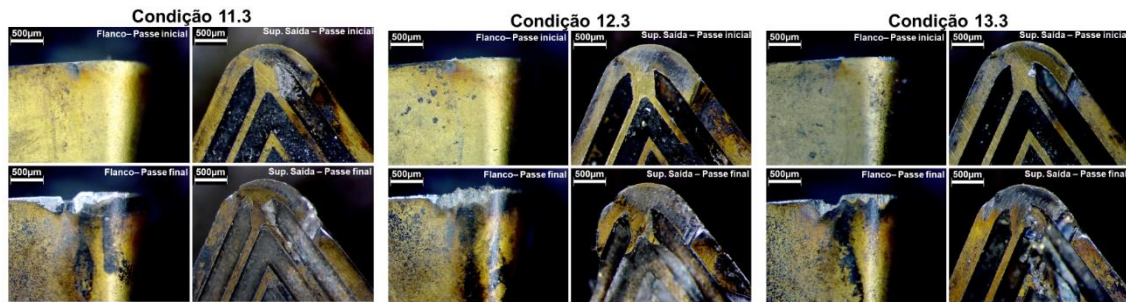
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 42: Ferramenta de corte no início e final da vida na usinagem com fluido de corte.



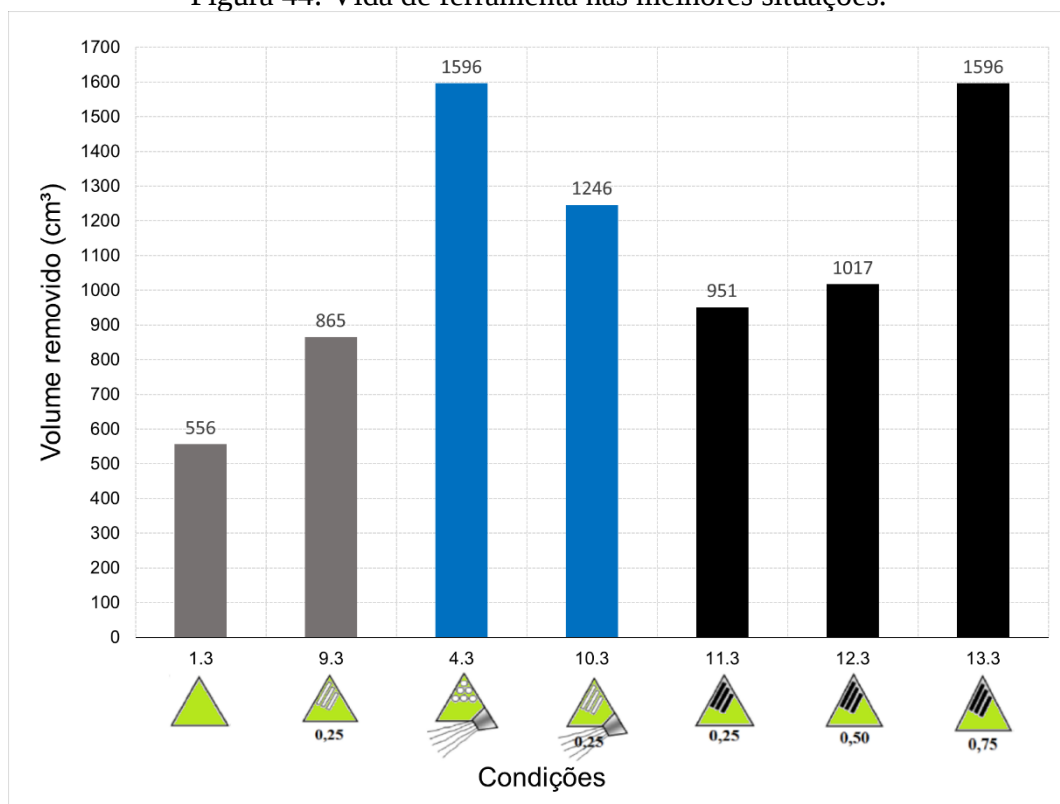
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 43: Ferramenta de corte com NTCs no início e final da vida.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 44: Vida de ferramenta nas melhores situações.

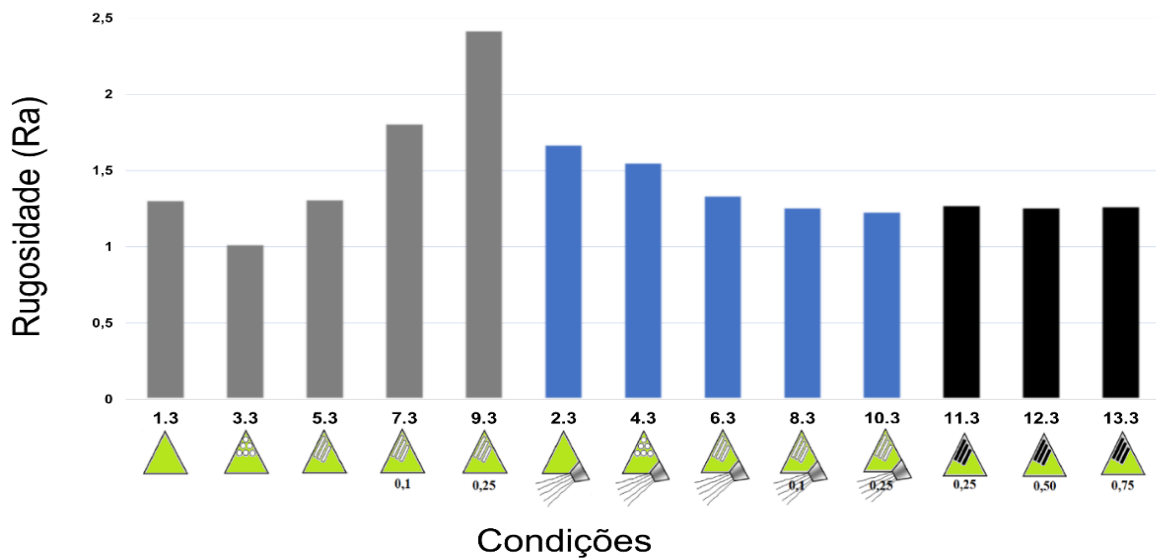


Fonte: Elaborado pelo autor.

## 4.2 RUGOSIDADE

Ao longo dos ensaios foi avaliado o acabamento por meio da medida da rugosidade média aritmética ( $R_a$ ). A Figura 45 mostra os valores obtidos. As características do revestimento TiAlN, como alta estabilidade térmica, menor coeficiente de atrito, bom acabamento superficial, alta resistência à adesão e melhor resistência ao desgaste, podem ser as razões que conferem bom acabamento superficial à peça (ARULKIRUBAKARAN; SENTHILKUMAR, 2017).

Figura 45: Rugosidade média aritmética (Ra) em diferentes condições.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para as condições com fluido de corte, verifica-se a redução dos parâmetros de rugosidade em função da profundidade das micro ranhuras, as quais, ainda, permitiram a diminuição da rugosidade em relação à condição convencional (2.3). Nota-se que a rugosidade foi tanto menor quanto maior a profundidade das micro ranhuras. O melhor acabamento observado para as condições com fluido de corte foi da ferramenta com ranhuras de 0,25mm (10.3), com redução de 26,2% nos valores médios de Ra comparada à condição 2.3 (ferramenta convencional com aplicação de fluido de corte). Tais valores evidenciam a reduzida formação de aresta postiça e baixo desgaste de flanco nos períodos iniciais da usinagem (Figura 42).

Comparando as imagens de desgaste das ferramentas nas condições a seco (Figura 41) e com nanotubos de carbono (Figura 43) nota-se a minimização da aresta postiça e o melhor acabamento superficial promovido pelo uso das ferramentas de corte com nanotubos de carbono.

Em trabalho realizado por Zhang et al. (2015), onde também foram utilizadas ferramentas texturizadas e revestidas com TiAlN, observou-se o efeito da texturização da superfície de saída na melhoria das superfícies usinadas. O efeito foi mais significativo nas condições em que houve aplicação de fluido de corte, uma vez que a maior vida nestas condições manteve a integridade da aresta de corte por mais tempo.

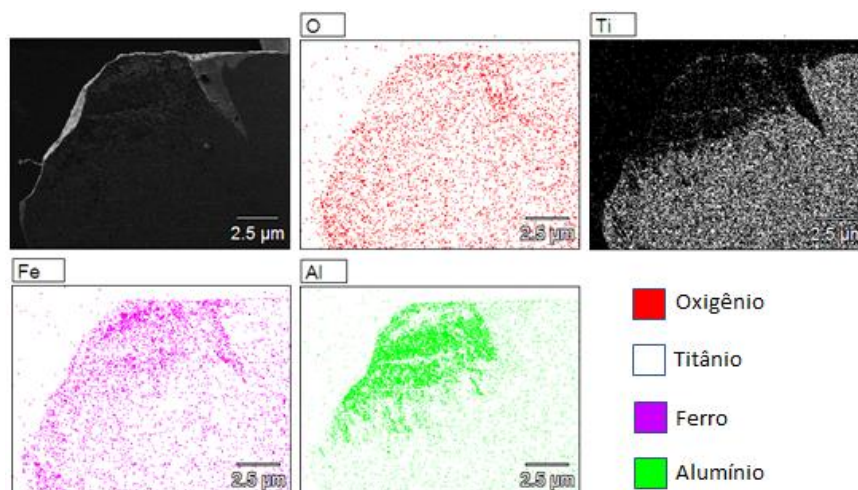
### 4.3 ANÁLISE EM MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos na análise em microscopia eletrônica de varredura (MEV) usando, também, a técnica de dispersão de raios x (EDS). Os mapeamentos buscaram identificar os principais elementos provenientes do processo de usinagem remanescentes na ferramenta de corte.

#### 4.3.1 Usinagem a seco

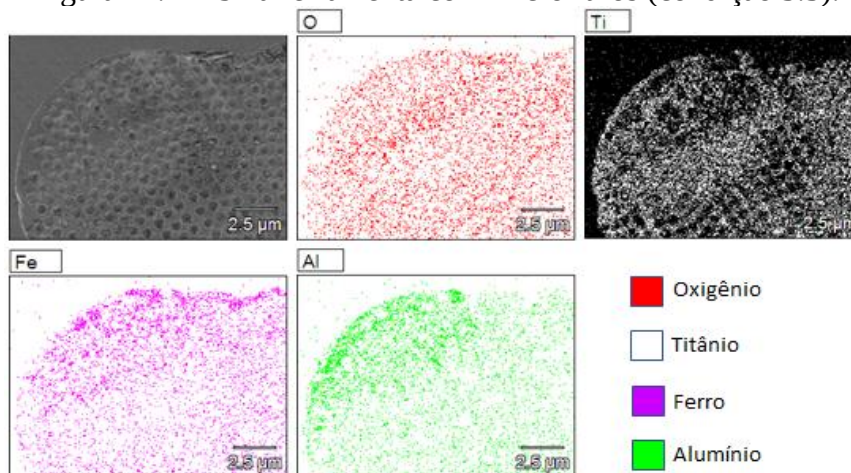
A análise da distribuição dos elementos para as condições a seco é indicada na Tabela 7. O mapeamento da condição 1.3 (ferramenta convencional), 3.3 (ferramenta com micro furos), 5.3 (ferramenta com micro ranhuras), 7.3 (ferramenta com micro ranhuras de 0,1 mm de profundidade) e 9.3 (ferramenta com micro ranhuras de 0,25 mm de profundidade) encontram-se na Figura 46, Figura 47, Figura 48, Figura 49 e Figura 50, respectivamente. Essas figuras referem-se ao final de vida das ferramentas de corte.

Figura 46: EDS na ferramenta convencional (condição 1.3).



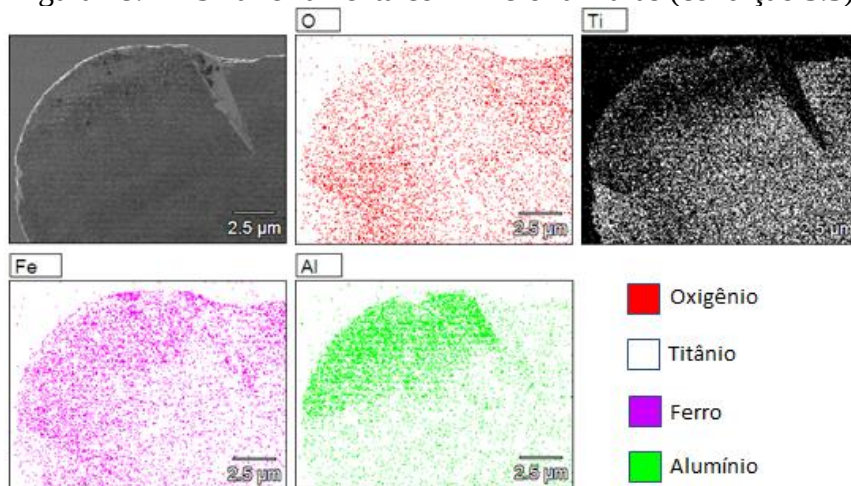
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 47: EDS na ferramenta com micro furos (condição 3.3).



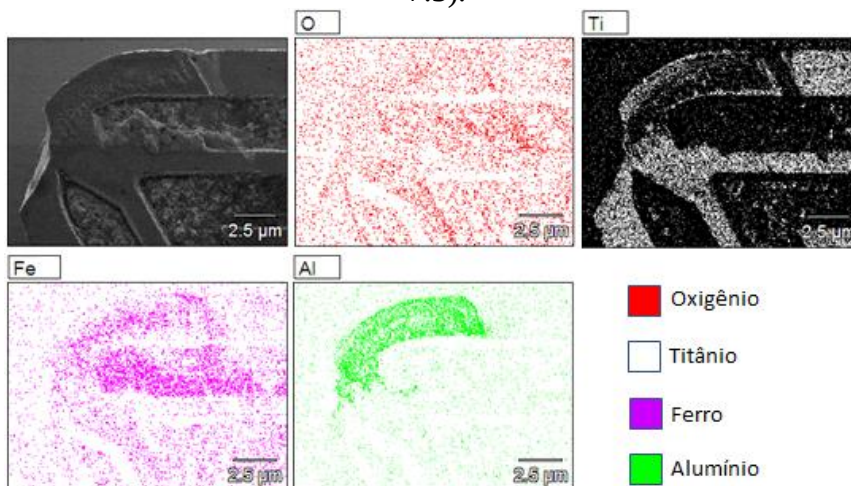
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 48: EDS na ferramenta com micro ranhuras (condição 5.3).



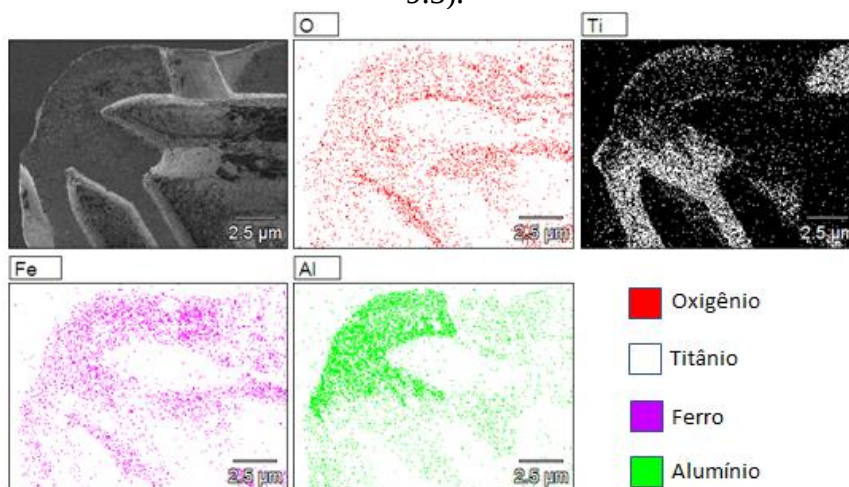
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 49: EDS na ferramenta com micro ranhuras de 0,1 mm de profundidade (condição 7.3).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 50: EDS na ferramenta com micro ranhuras de 0,25 mm de profundidade (condição 9.3).



Fonte: Elaborado pelo autor.

As Figura 48, Figura 49 e Figura 50 mostram presença de ferro, indicando que o aprisionamento de partículas nas micro ranhuras auxiliou no aumento da vida nas condições 5.3 (micro ranhuras), 7.3 (micro ranhuras 0,1) e 9.3 (micro ranhuras 0,25), similar ao defendido por (ARSLAN et al., 2016). Este efeito foi maior ainda nas condições com maior profundidade de ranhura, as quais conseguem armazenar maior quantidade de material, que podem ser provenientes do corte derivado. As amostras ranhuradas apresentaram menor adesão e taxa de desgaste em comparação com outras amostras sem texturas (VASUMATHY; MEENA, 2017).

Conforme a Tabela 7, a superfície de saída da amostra não texturizada da condição 1.3, apresenta maior exposição do substrato de tungstênio (6,11%) em comparação com a amostra da condição 5.3 (1,01%), isto é, micro ranhuras, as quais apresentam mesma vida, evidenciando maior desgaste do revestimento para a condição convencional, assim como relata o estudo de (ZHANG et al., 2015), onde se constatou que na amostra não texturizada o substrato foi exposto e nenhum Ti e Al podem ser detectados na região de contato, enquanto que para a amostra texturizada o desgaste foi inibido até certo ponto e maiores quantidades de elementos de Ti e Al foram observados pelas análises EDX. A presença de oxigênio na superfície de saída é evidenciada em todas as amostras. A ferramenta 1.1 (convencional) apresentou maior formação de óxidos (12,24%) comparada com a ferramenta 7.3 (micro ranhuras) (11,48%), que apresentam mesma vida, indicando ter alcançado maior temperatura na usinagem. A relação entre oxidação e erosão está associada ao aumento da temperatura local (KUNIOSHI, 2004), logo, pode ser relacionada aos mecanismos de *attrition*, bem como concomitantemente presentes os mecanismos de desgaste abrasivo e de difusão (RIBEIRO et al., 2020). Tal evidência pode ser feita por meio da comparação da Figura 46 (condição 1.3) com a Figura 49

(condição 7.3), em que, conforme indicado na Tabela 7, se observa redução de óxidos na superfície devido a remoção parcial de material com o fluxo do cavaco, causando regiões com maior desgaste.

Dessa forma, constata-se que para a usinagem a seco a redução da área de contato ferramenta/cavaco e o aprisionamento de detritos foram eficazes no desempenho das ferramentas com maior profundidade da ranhura.

Tabela 7: Distribuição dos elementos químicos por EDS para usinagem a seco (%).

| Ferramenta                         | Representação                                                                       | O     | Al   | Ti    | Fe    | W     | Co   |
|------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------|------|-------|-------|-------|------|
| Convencional<br>(1.3)              |    | 12,24 | 8,54 | 57,96 | 14,57 | 6,11  | 0,59 |
| Micro furos<br>(3.3)               |   | 17,14 | 2,44 | 45,38 | 16,55 | 15,93 | 0,64 |
| Micro ranhuras<br>(5.3)            |  | 17,33 | 6,3  | 49,81 | 25,94 | 1,01  | 0,6  |
| Micro ranhuras<br>0,1 mm<br>(7.3)  |  | 11,48 | 5,35 | 28,33 | 19,75 | 8,88  | 0,51 |
| Micro ranhuras<br>0,25 mm<br>(9.3) |  | 15,47 | 7,98 | 28,34 | 21,9  | 25,22 | 0,9  |

Fonte: Elaborada pelo autor.

#### 4.3.2 Usinagem com aplicação de fluido de corte.

A distribuição dos elementos para as condições com fluido de corte é indicada na Tabela 8 e o mapeamento com os elementos é apresentado na correspondentes Figura 51, Figura 52, Figura 53, Figura 54 e Figura 55.

As condições sob fluido de corte geraram menor difusão de ferro nas regiões de escorregamento do cavaco, se comparado a condição a seco, os óxidos presentes nas imagens de EDS também foram levemente diminuídos com a aplicação de fluido de corte, conforme

aponta Trent e Wright, (2000). Todas as ferramentas de corte apresentaram aumento de vida se comparadas à condição de usinagem a seco, sendo possível afirmar que a maior lubricidade na interface de contato proporcionadas pelas micro poças de fluido através da lubrificação hidrodinâmica foram eficientes para o aumento da vida das ferramentas (WU et al., 2014).

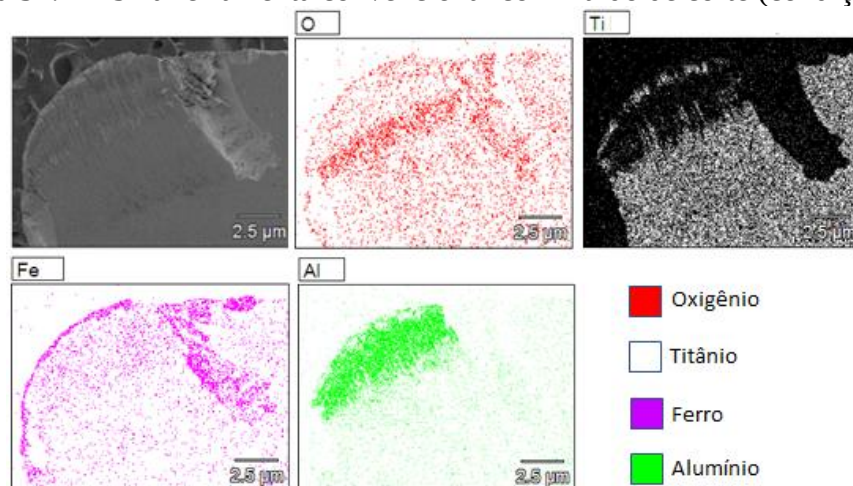
Acerca da lubrificação, constata-se em todas as ferramentas lubrificadas uma região escurecida, segundo relatado por Alagan et al. (2018) tais regiões escurecidas mostram pontos de evaporação de fluido de corte (ponto de Lindefrost), onde o vapor formado produz uma barreira que impede a penetração do fluido de corte. Observa-se menor presença de óxidos para as condições 10.3 (micro ranhuras de 0,25 mm com fluido de corte), Figura 55, indicando assim a menor presença de partículas oxidadas. A maior existência de óxidos (13,14 %) na condição 8.3, Figura 54, com a ferramenta de micro ranhuras de 0,1mm e fluido de corte, pode também, ser a causa para o desgaste acentuado de cratera, que devido à condição de *attrition* formada pelas partículas oriundas da aresta postiça, que resultou em contínua remoção de material abrasivo. Observa-se que as texturas com maior profundidade, representadas pela condição 8.3 (Figura 54) e condição 10.3 (Figura 55) apresentaram aumento de vida que refletem a maior capacidade de refrigeração delas. A presença de superfícies texturizadas com maior dimensão promove aumento da área de troca térmica o que favorece a dissipação térmica entre superfície texturizada e fluido de corte, melhorando a troca térmica mais do que o aspecto tribológico (ALAGAN et al., 2018). As micro ranhuras com maiores profundidade puderam, ainda, ser mais eficazes no armazenamento de detritos e posterior remoção dos mesmos pelo fluido de corte (RIBEIRO et al., 2020). A incapacidade do fluido em penetrar o mais próximo possível das regiões de contato não permitiu a remoção dos detritos, devido ao rápido entupimento das geometrias com baixa profundidade, como já apontado por Xing et al. (2014), sendo estes constantemente carregados e criando maior desgaste abrasivo na superfície de corte.

Tabela 8: Distribuição dos elementos químicos por EDS para usinagem com fluido (%).

| Ferramenta                          | Representação                                                                      | O     | Al   | Ti    | Fe    | W     | Co   |
|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------|------|-------|-------|-------|------|
| Convencional<br>(2.3)               |   | 12,51 | 8,61 | 54,76 | 12,79 | 8,98  | 0,66 |
| Micro furos<br>(4.3)                |   | 13,27 | 0,94 | 18,47 | 20,85 | 44,36 | 0,35 |
| Micro ranhuras<br>(6.3)             |   | 12,39 | 2,05 | 71,29 | 6,51  | 7,14  | 0,61 |
| Micro ranhuras<br>0,1 mm<br>(8.3)   |   | 13,14 | 3,04 | 30,35 | 30,04 | 21,15 | 0,78 |
| Micro ranhuras<br>0,25 mm<br>(10.3) |  | 9,11  | 2,66 | 23,22 | 13,38 | 29,82 | 0,57 |

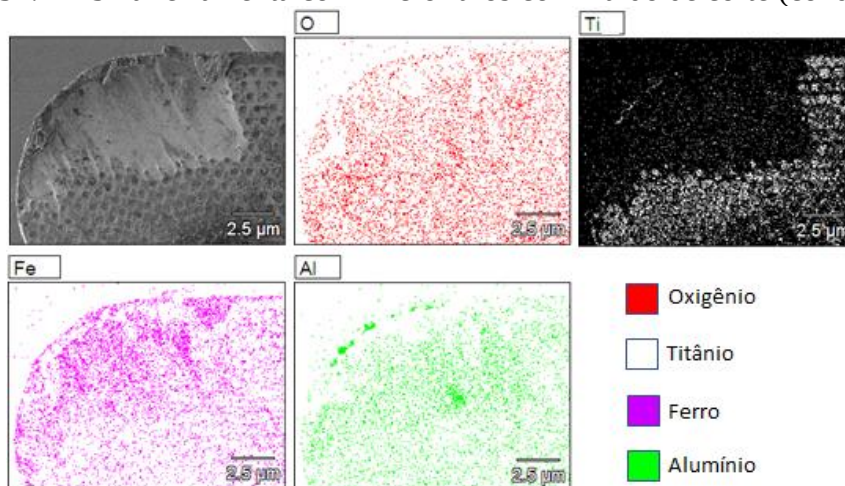
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 51: EDS na ferramenta convencional com fluido de corte (condição 2.3).



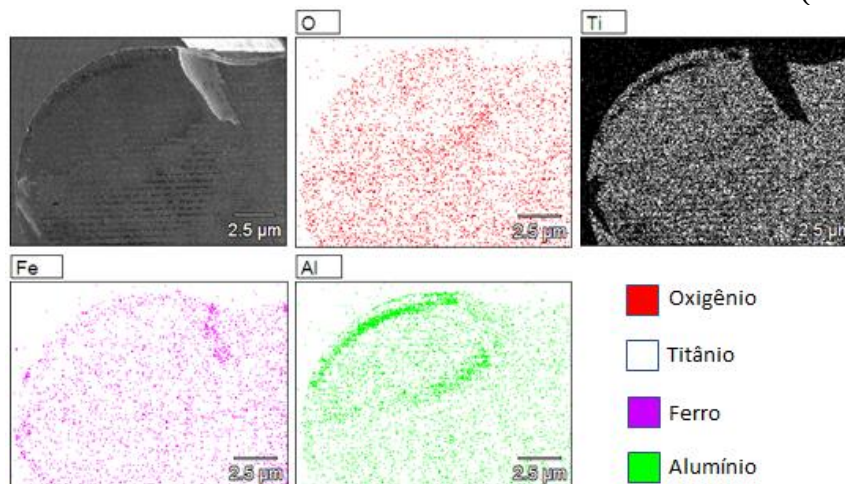
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 52: EDS na ferramenta com micro furos com fluido de corte (condição 4.3)



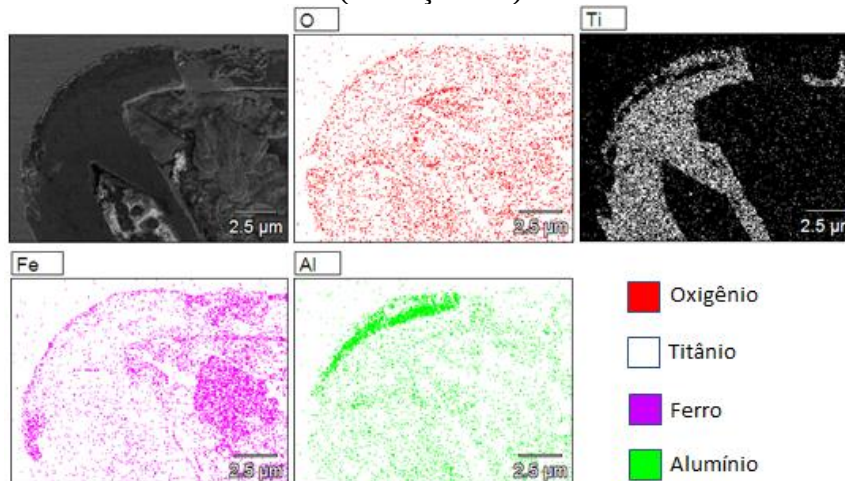
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 53: EDS na ferramenta com micro ranhuras com fluido de corte (condição 6.3)



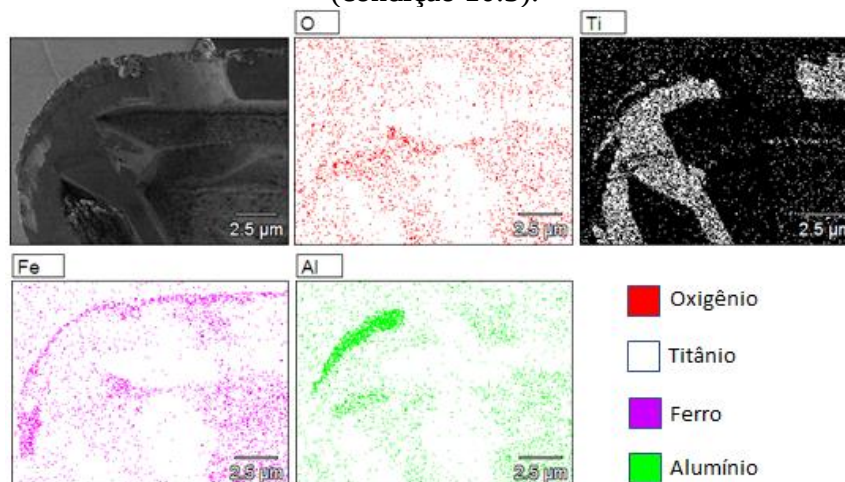
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 54: EDS na ferramenta com micro ranhuras de 0,1 mm com fluido de corte (condição 8.3).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 55: EDS na ferramenta com micro ranhuras de 0,25 mm com fluido de corte (condição 10.3).



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.3.3 Ferramentas de corte com nanotubos de carbono (NTCs)

Assim como nas ferramentas de corte anteriormente indicadas, o mapeamento das ferramentas de corte com micro ranhuras preenchidas com NTCs foi realizado, as quais são apresentadas na Figura 56, Figura 57 e Figura 58, para as ferramentas com 0,25, 0,50 e 0,75 mm de profundidade, nesta ordem. O mapeamento com os percentuais de elementos obtidos por EDS é mostrado na Tabela 9. A ferramenta de corte correspondente à condição 13.3, isto é, micro ranhuras de 0,75 mm com NTC (Figura 58), apresentou excelentes resultados de vida de ferramenta, como indicado na seção que trata sobre o tema, obtendo aumento de 187% em relação à condição a seco (convencional, 1.3), chegando a se equiparar com as ferramentas texturizadas sob fluido de corte. As ferramentas com NTCs apresentaram desempenho de acordo com a profundidade das micro ranhuras, as quais mostraram menores quantidades de óxidos para as ferramentas com maior profundidade de ranhuras, conforme indicado na Tabela 9 (22,68% para condição 11.3, 18,53% para condição 12.3 e 11,75% para condição 13.3). As ferramentas nas condições 12.3 e 13.3 apresentam, respectivamente, os valores de 36,37 e 27,01% de ferro, em função do acúmulo de cavaco e detritos em suas micro ranhuras. Para essas condições 12.3 e 13.3, os valores de oxigênio presentes (18,53 e 11,75%) acham-se acumulados, principalmente, nas regiões com adesão de ferro, conforme mostrado na Figura 57 e Figura 58. O calor formado nas regiões de contato foi dissipado pela alta condutividade térmica dos NTCs possibilitando diminuir a aderência de material na aresta de corte, reduzindo a formação de arestas postiça. Isto posto, os resultados com o fluido de corte, na sua melhor

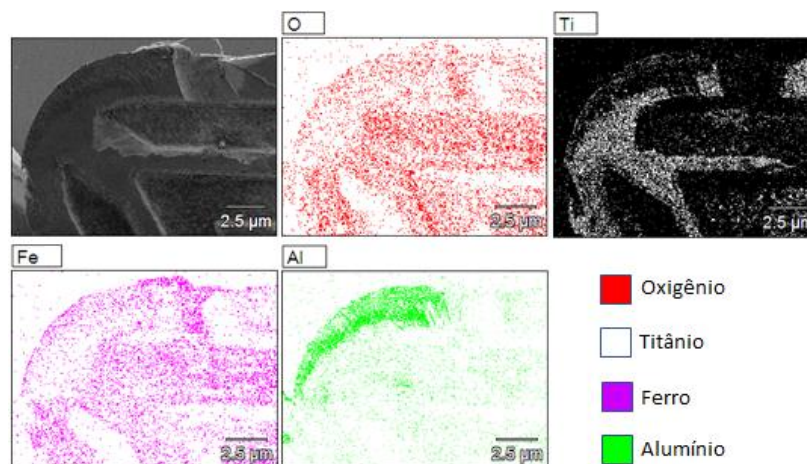
condição, foi equivalente à melhor condição com NTCs ao longo da vida da ferramenta. Ademais, a remoção gradual de nanotubos pode ter resultado na diminuição também gradativa da adesão. A presença de NTCs na condição 13.3 (ranhuras de 0,75 mm com nanotubos), proporcionou maior área de troca térmica e facilitou a redução dos mecanismos de desgaste. Perante o exposto, o emprego de NTCs nas ferramentas de corte proporcionou resultados favoráveis em comparação ao corte a seco e, mesmo, com fluido de corte.

Tabela 9: Distribuição dos elementos químicos por EDS para usinagem com NTCs (%).

| Ferramenta                       | Representação                                                                       | O     | Al   | Ti    | Fe    | W     | Co   |
|----------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------|------|-------|-------|-------|------|
| Micro ranhuras<br>0,25 mm (11.3) |    | 22,68 | 6,53 | 24,03 | 25,09 | 14,44 | 0,95 |
| Micro ranhuras<br>0,5 mm (12.3)  |   | 18,53 | 3,49 | 19,16 | 36,37 | 19,53 | 0,58 |
| Micro ranhuras<br>0,75 mm (13.3) |  | 11,75 | 7,22 | 13,72 | 27,01 | 13,08 | 0,68 |

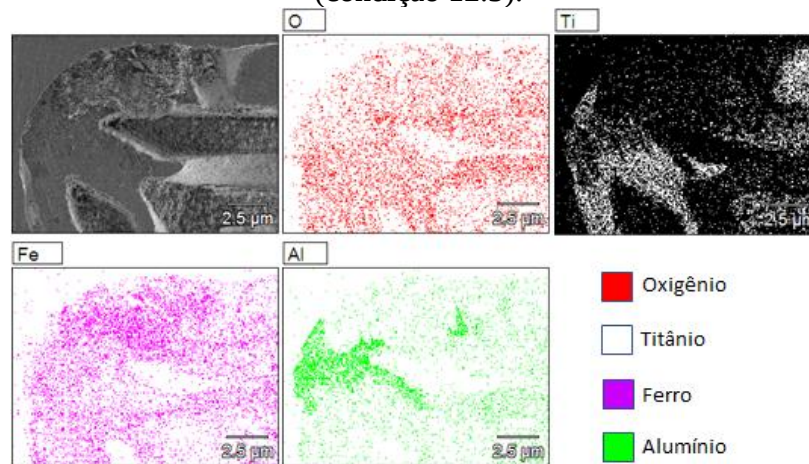
Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 56: EDS na ferramenta com micro ranhuras de 0,25 mm de profundidade com NTCs (condição 11.3).



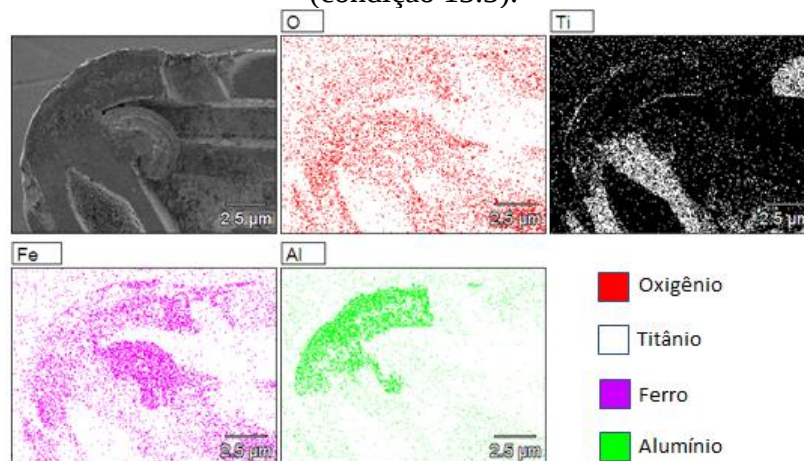
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 57: EDS na ferramenta com micro ranhuras de 0,5 mm NTCs (condição 12.3).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 58: EDS na ferramenta micro ranhuras de 0,75 mm com NTCs (condição 13.3).

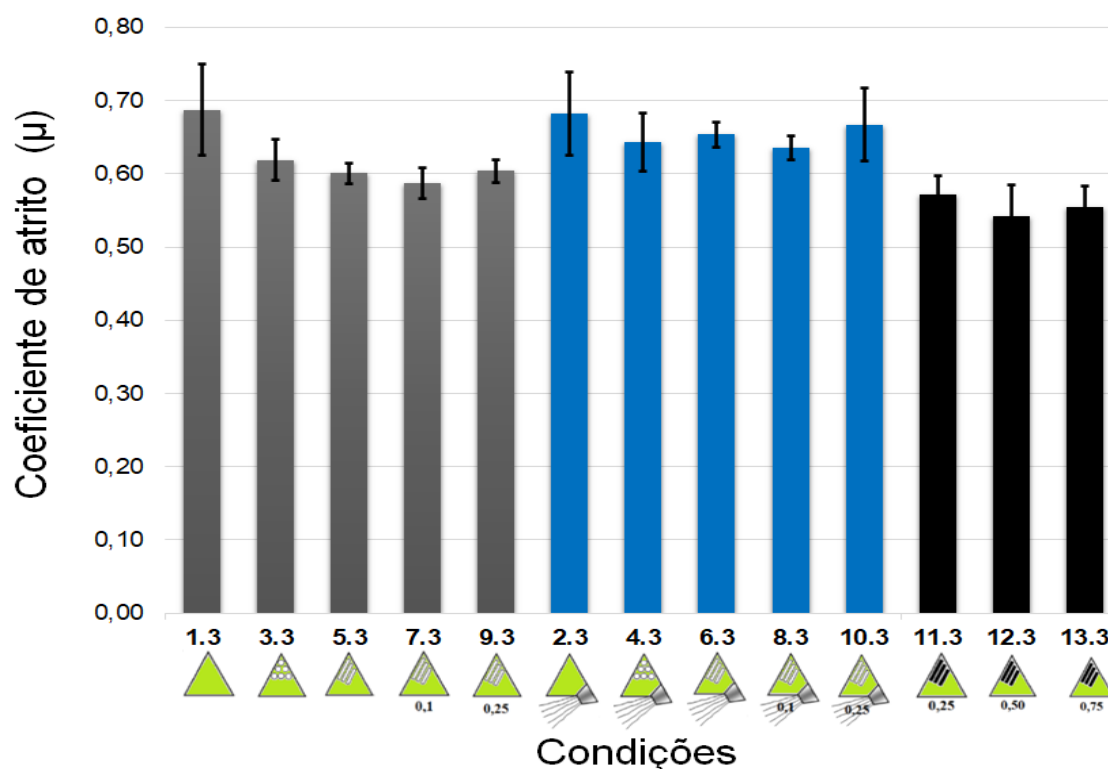


Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.4 ATRITO

Em razão das inúmeras variantes dentro do processo de usinagem que podem influenciar a relação de atrito entre cavaco e ferramenta, a resposta positiva quanto à capacidade de redução de atrito com a aplicação de NTCS vem a reforçar os resultados obtidos. Na Figura 59 estão apontados os valores obtidos dos coeficientes de atrito em todas as condições.

Figura 59: Coeficiente de atrito médio obtido ao longo dos testes em todas as condições de usinagem.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se na Figura 59 que o coeficiente de atrito médio das ferramentas de corte texturizadas foi reduzido em comparação com as ferramentas não texturizadas, conforme apontam alguns trabalhos que tratam do assunto (VASUMATHY; MEENA, 2017; SUGIHARA; ENOMOTO, 2017; JIANXIN et al., 2012). A maior temperatura do cavaco deve ter auxiliado na redução do atrito entre cavaco e ferramenta, como observado na comparação entre a condição convencional 1.3 ( $\mu = 0,68$ ) e 2.3, convencional com fluido de corte ( $\mu = 0,69$ ), mantendo essa tendência também para as ferramentas texturizadas, onde a média do coeficiente de atrito foi maior para as ferramentas sob fluido de corte. A redução da área de contato constatada para as ferramentas texturizadas possibilitou a redução de atrito com valor médio de 0,60 para as ferramentas a seco e 0,65 para as ferramentas com fluido de corte. A condição 7.3 (micro ranhuras de 0,1mm) apresentou o melhor resultado ( $\mu=0,59$ ) para as ferramentas texturizadas a seco enquanto as condições 4.3 e 8.3 (micro furos e micro ranhuras de 0,1mm, respectivamente) alcançaram os melhores resultados ( $\mu=0,64$ ) para as ferramentas texturizadas com fluido de corte.

O vapor formado pelas altas temperaturas e a velocidade de escoamento do cavaco podem ter gerado barreiras para a capilaridade do fluido de corte aumentando o atrito

(ALAGAN et al., 2018; KOSHY; TOVEY, 2011). Sendo assim, considera-se que a função refrigerante do fluido de corte foi mais evidente do que o seu potencial de lubrificante, notado pelas menores temperaturas nesta condição.

O uso de NTCs no interior das micro ranhuras produziu ótimos resultados para redução do atrito, com média de 16% menor que nas ferramentas de corte texturizadas com fluido de corte e 7% menor nas ferramentas texturizadas a seco. A redução no atrito em texturas com lubrificação semi-sólida, em comparação com outros tipos de ferramentas, também é apontada por Arulkirubakaran; Senthilkumar; Kumawat, (2016), nas quais a redução dos valores do coeficiente de atrito situaram-se entre 5 a 10%. As ferramentas com NTCs produziram valores mais baixos de coeficiente de atrito, sendo a micro ranhuras com 0,5 mm de profundidade com NTCs (condição 12.3) a melhor delas, ou seja,  $\mu$  igual a 0,54.

Tal como observado na avaliação EDS, as ferramentas com NTCs reduziram a formação de aresta postiça e oxidação, devendo ter minimizado o desgaste por *attrition*. Ainda, nas regiões de deslizamento, a presença de NTCs e sua remoção e espalhamento gradativos ao longo da usinagem podem ter gerado um filme de NTCs que atuaram como lubrificante, proporcionando menor atrito na interface cavaco-ferramenta. Os resultados confirmam que esse tipo de ferramenta, auto lubrificada, pode resultar em um coeficiente de atrito reduzido na interface do cavaco e ferramenta (ÖZEL et al., 2021).

#### 4.5 TEMPERATURA

Na Figura 60 e Figura 61 estão dispostos os valores das temperaturas obtidas nos termopares ao longo dos ensaios. A vida da ferramenta convencional sem aplicação de fluido de corte, teve uma temperatura média (condição 1.3) de 134,8°C no termopar 1, de 131,7° C no termopar 2 e 86,4°C no termopar 3. Logo, foram obtidas médias de temperaturas de 125,2°C para as condições texturizadas (3.3, 5.3, 7.3 e 9.3) no termopar 1, de 115,6 °C no termopar 2 e 80,3 °C no termopar 3, indicando que a redução da área cavaco/ferramenta e maior contato com o ar, melhorando a troca térmica por convecção natural, proporcionada pelas texturas, foi eficiente para a minimização da temperatura. O destaque se deu na condição 7.3, que apresentou as menores médias de temperaturas, 122,8°C (T1), 112°C (T2) e 75,2°C (T3). Estes resultados vêm ao encontro à literatura (SHARMA; PANDEY, 2016; ORRA; CHOUDHURY, 2018).

A aplicação de fluido de corte reduziu substancialmente a temperatura nos termopares, uma vez que o fluido aplicado em abundância tem a capacidade de refrigerar todo o conjunto

da ferramenta e o porta ferramenta, resultando em temperaturas de 39°C (T1), 30,3°C (T2) e 27,3°C (T3) para a condição convencional com fluido de corte (2.3). A melhor condição texturizada, que foi a 4.3 (micro furos), apresentou valores de 31,7°C (T1), 28,5 °C (T2) e 27,1°C (T3), com redução de 18,7% (T1), 5,9% (T2) e 0,7% (T3) em relação à ferramenta convencional. Já as ferramentas texturizadas com fluido de corte apresentaram redução de 2,8 a 10,6% comparadas à condição convencional com fluido de corte, exceto para a condição 6.3 que teve um aumento da média de temperatura de 3%, corroborando para sua curta vida. As condições 6.3, 8.3 e 10.3 (micro ranhuras, micro ranhuras 0,1 e micro ranhuras 0,25 com fluido de corte) apresentaram menor variação de temperatura ao longo dos ensaios. Todavia, a condição 4.3 (micro furos) teve maior variação em razão das menores temperaturas nos ensaios iniciais, porém com o desgaste por abrasão e a consequente redução das profundidades dos micro furos a temperatura aumentou no final dos ensaios. As reduções de temperatura reforçam os resultados obtidos quanto ao aumento de vida para as condições 4.3 e 10.3

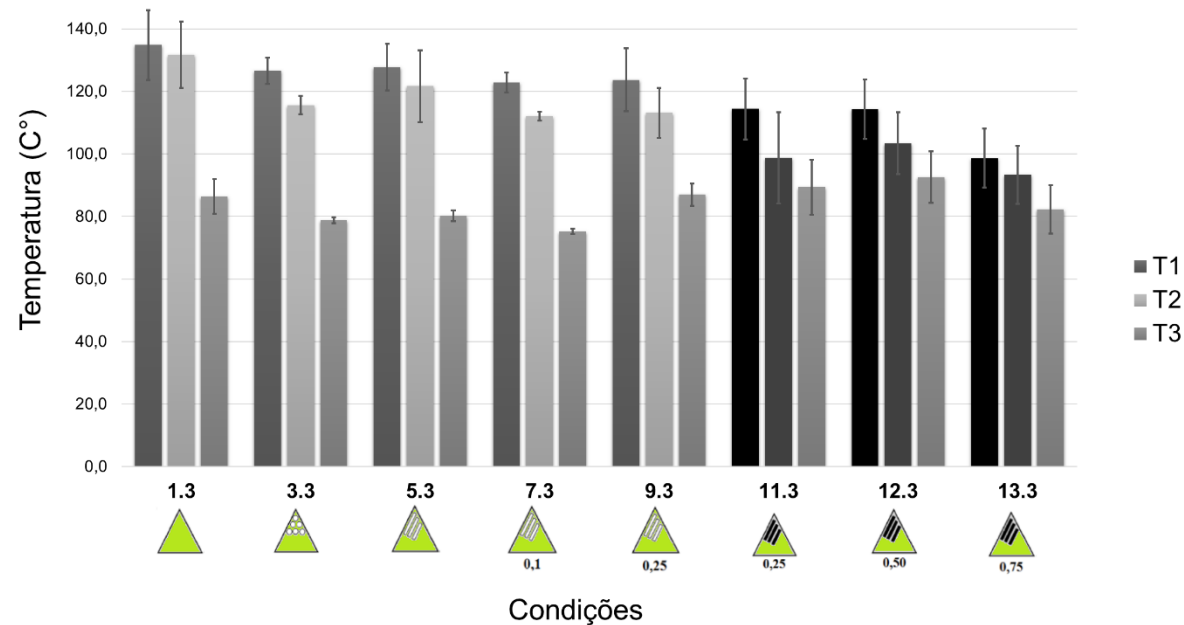
Conforme apontado na Figura 60, as condições preenchidas com NTCs contribuíram para a redução das temperaturas quando comparadas ao corte a seco para ferramentas texturizadas e convencional. O maior volume de NTCs na condição 13.3 (micro ranhuras com 0,75 mm e NTC) auxiliou nas menores médias de temperaturas para os ensaios a seco. Tal condição apresentou temperaturas médias de 98,6°C (T1), 93,3°C (T2) e 82,3°C (T3), indicando reduções de 26,8% (T1), 29,1% (T2) e 4,7% (T3) em relação à condição convencional (1.1).

De acordo com Ribeiro (2019), a gradativa remoção dos nanotubos de carbono no decorrer dos ensaios gera aumento da temperatura. Destaca-se que, mesmo com a remoção progressiva dos nanotubos de carbono, os valores obtidos para o percentual de carbono e as imagens de fim de vida das condições 11.3, 12.3 e 13.3 (profundidade de 0,25 mm e NTCs; profundidade de 05 mm e NTCs; e, profundidade de 0,75 mm e NTCs, respectivamente) mostram que as regiões com nanotubos de carbono ainda permaneceram preenchidas, sobretudo na aresta secundária de corte e nas regiões mais afastadas das micro ranhuras, proporcionando maior troca térmica que as condições texturizadas a seco.

Os resultados obtidos referentes à temperatura comprovam que tal redução auxiliou no aumento de vida para a condição 13.3 (micro ranhuras com 0,75 mm NTC) que se equiparou com a melhor condição sob fluido de corte. Nesta condição sugere-se a presença de *attrition* e desgaste abrasivo, podendo-se inferir que o aumento de vida das ferramentas preenchidas com NTCs deve-se aos bons resultados obtidos para o coeficiente de atrito e auxiliadas pela redução

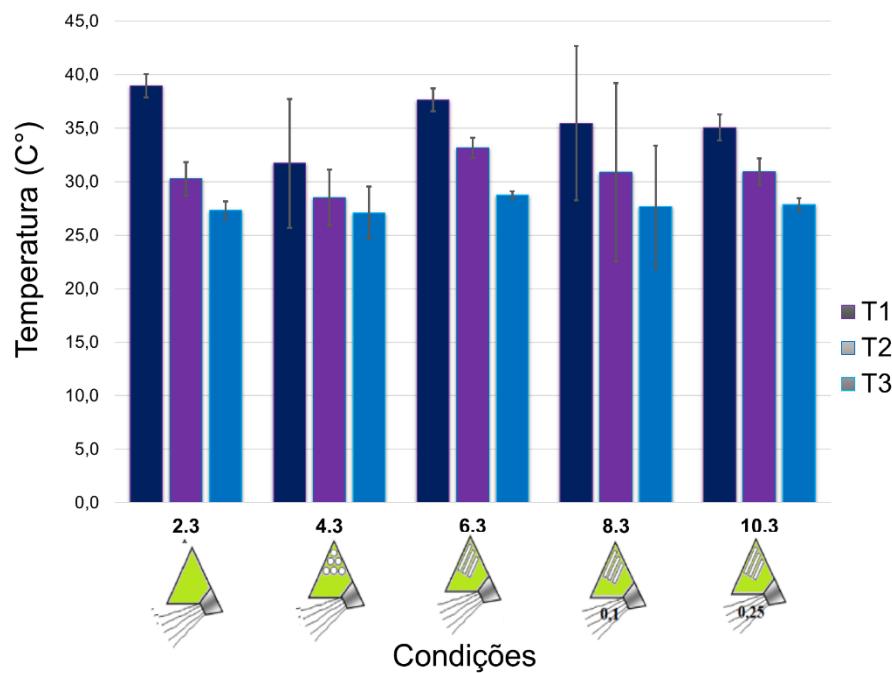
de temperatura, em que a maior dissipação térmica pode ter auxiliado na redução da formação de arestas postiças, assim justificando os melhores resultados para tal condição.

Figura 60: Temperaturas nos termopares para as condições a seco.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 61: Temperaturas nos termopares para as condições sob fluido de corte.

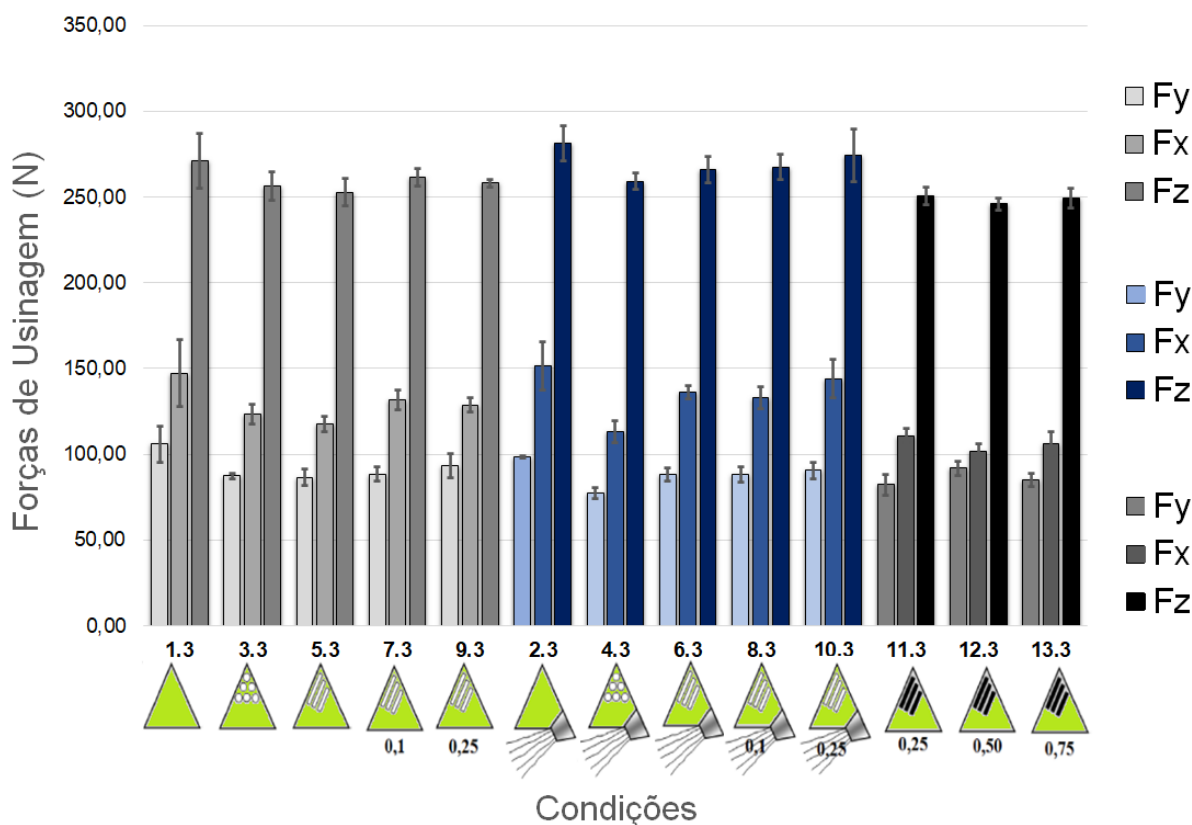


Fonte: Elaborado pelo autor

#### 4.6 FORÇA DE USINAGEM

A Figura 62 apresenta os valores médios das componentes da força de usinagem, isto é, força de corte ( $F_z$ ), força de avanço ( $F_x$ ) e força de profundidade ( $F_y$ ), ao longo dos ensaios até o final de vida da ferramenta de cada condição.

Figura 62: Componentes da força de usinagem média para todas condições de ensaio.



Fonte: Elaborada pelo autor.

De modo geral, observa-se na Figura 62 que as ferramentas texturizadas apresentaram menores forças do que a ferramenta convencional a seco e sob fluido de corte. Tomando-se apenas as condições a seco, a ferramenta com micro ranhuras (5.3) apresentou forças ligeiramente menores às demais. Os valores verificados foram de 252,61 N para a força de corte ( $F_z$ ), 117,73 N para a força de avanço ( $F_x$ ) e 86,49 N para a força radial ( $F_y$ ), sendo que na condição convencional (1.3) obteve-se 271,29 N ( $F_z$ ), 147,23 N ( $F_x$ ) e 106,11 N ( $F_y$ ). As condições 3.3, 7.3 e 9.3 (micro furos, micro ranhuras 0,1 mm e micro ranhuras 0,25 mm, respectivamente) apresentaram também diminuição nas forças de usinagem, com reduções que variam de 7,69 à 21,02% comparadas com a condição convencional. Quanto aos micro furos e

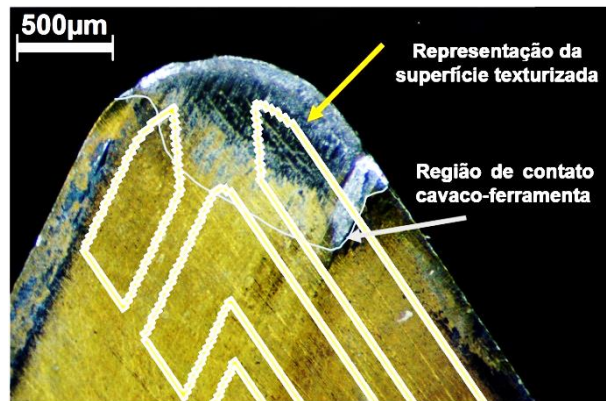
micro ranhuras, cujas texturas foram baseadas na literatura, o melhor desempenho delas também foi atestado por Enomoto e Sugihara (2012).

A capacidade de redução das forças de usinagem das ferramentas texturizadas em relação à ferramenta convencional, quando sob fluido de corte, também apresentou diminuição. Considerando todas as ferramentas, com exceção das condições com NTCS, a ferramenta com micro furos (4.3) apresentou as menores médias de forças entre as ferramentas obtendo valores de 77,5 N (Fy), 130,64 N (Fx) e 259,12 N (Fz) frente aos valores de 98,44 N (Fy), 151,53 N (Fx) e 281,29 N (Fz) obtidos na condição convencional com fluido de corte (2.3). Estes resultados reforçam o bom desempenho da condição 4.3 quanto à vida de ferramenta. A aplicação de fluido de corte gerou, além do atrito já observado, também o aumento das forças quando comparadas às condições a seco, tal fato pode ter se dado pelo maior resfriamento e imediato endurecimento do cavaco. Resultados semelhantes foi encontrado por Kawasegi et al. (2009).

Já a capacidade da redução da área de contato cavaco/ferramenta conseguida com as ferramentas de corte com micro ranhuras de 0,1, 0,25, 0,5 e 0,75 mm pode ser visto na Figura 63, na qual é representada a região de contato cavaco/ferramenta da condição 1.3 (ferramenta convencional) projetada sobre as micro ranhuras.

A aplicação de NTCs reduziu significativamente os esforços de corte se comparados às condições a seco e sob fluido de corte, no qual aponta-se que a condição 12.3 (micro ranhuras de 0,5 mm e NTCs) apresentou os melhores resultados, atingindo valores médios de 91,93 N (Fy), 101,74 N (Fx) e 245,91 N (Fz). Resultados que representam reduções percentuais de 13,36 % (Fy), 30,93 % (Fx) e 9,35 % (Fz) comparadas à condição convencional a seco (1.3) e 6,28 % (Fy), 13,58 % (Fx) e 2,65 % (Fz) em relação a melhor condição texturizada a seco (5.3). A comparação da condição 12.3 com a condição convencional refrigerada (2.3) indica a redução de 6,61 % (Fy), 32,85 % (Fx) e 12,57% (Fz). Já em comparação com a melhor condição texturizada e refrigerada 4.3, aumento de 18,61 % (Fy) e redução de 22,12 % (Fx) e 5,09 % (Fz) foram obtidos. As condições 11.3 e 13.3 (micro ranhuras de 0,25 mm NTC e micro ranhuras de 0,75 mm NTC, respectivamente) apresentaram resultados muito próximos à condição 12.3, logo alcançaram as menores forças de corte quando comparadas com todas as demais condições sem aplicação de NTCs.

Figura 63: Comparação entre área de contato na condição 1.3 e posicionamento da superfície texturizada.



Fonte: Elaborada pelo autor.

A condição com NTCs proporcionou um aumento da dissipação térmica na região da aresta de corte e não deve ter reduzido drasticamente a temperatura do cavaco como as condições sob fluido de corte. A condição com NTCs causou aumento de vida equiparando-se à melhor condição texturizada sob fluido de corte, como já observado na seção sobre a vida da ferramenta, mostrando que apenas a redução de forças não foi a causa determinante do aumento do volume de material removido para as condições com nanotubos de carbono.

## 5. CONCLUSÕES

A partir do exposto, bem como através da análise dos resultados obtidos do processo de torneamento do aço ABNT 1045 com ferramentas de corte texturizadas revestidas com TiAlN, nas condições a seco, sob fluido de corte e com nanotubos de carbono, é possível concluir que:

A aplicação de revestimento de TiAlN e a texturização da superfície de saída das ferramentas de corte proporciona aumento de vida da ferramenta, redução da força de usinagem, redução do atrito e adesão entre cavaco e ferramenta, bem como diminuição da temperatura na zona de corte.

Em comparação à trabalho similar, a aplicação do revestimento de TiAlN proporcionou redução das forças de corte e temperatura, bem como alcançou expressivo aumento de vida de até 792% em relação às ferramentas de corte não revestidas.

Em relação aos ensaios a seco, as ferramentas texturizadas apresentaram forças de usinagem e atrito inferiores quando comparadas à condição convencional. A condição com micro ranhuras de 0,25 mm de profundidade proporcionou maior aumento de vida, se comparada às demais condições a seco. Foram notadas reduções no atrito, nos esforços de corte e nas temperaturas, devido, principalmente, à redução na área de contato e na maior capacidade de armazenamento de detritos, visto que as micro ranhuras com maior profundidade conservaram-se presentes nas regiões de contato até o final da vida das ferramentas.

Referente às condições sob fluido de corte, todas as ferramentas de corte apresentaram aumento de vida se comparadas às condições de usinagem a seco, sendo possível afirmar que a maior lubricidade na interface de contato, auxiliadas pelas micro texturas, formaram micro poças de fluido, onde ocorreu lubrificação hidrodinâmica, que foi eficiente para o aumento da vida das ferramentas.

A condição com nanotubos de carbono deve ter aumentado a dissipação térmica na região da aresta de corte, além de ser capaz de promover coeficientes de atrito abaixo de todas as condições a seco e sob fluido de corte. Com relação à vida de ferramenta, esta mostrou-se equivalente à melhor condição texturizada sob fluido de corte, apresentando redução das forças de usinagem, de oxidação superficial e adesão de ferro, indicando que os nanotubos de carbono, mesmo depositados apenas uma vez antes da usinagem, mostram-se comprovadamente como uma sugestão promissora para a utilização na usinagem sem fluido de corte, podendo otimizar as condições de corte.

## 6. REFERÊNCIAS

- ABUKHSHIM, N. A.; MATIVENGA, P. T.; SHEIKH, M. A. Heat generation and temperature prediction in metal cutting: A review and implications for high speed machining. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 46, n. 7–8, p. 782–800, 2006.
- AJAYAN, P. M. Nanotubes from Carbon. **Chemical Reviews**, v. 99, n. 7, p. 1787–1799, 1999.
- ALAGAN, N. T. et al. Influence of surface features for increased heat dissipation on tool wear. **Materials**, v. 11, n. 5, p. 1–17, 2018.
- ARSLAN, A. et al. Surface Texture Manufacturing Techniques and Tribological Effect of Surface Texturing on Cutting Tool Performance: A Review. **Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences**, v. 41, n. 6, p. 447–481, 2016.
- ARULKIRUBAKARAN, D.; SENTHILKUMAR, V. Performance of TiN and TiAlN coated micro-grooved tools during machining of Ti-6Al-4V alloy. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 62, p. 47–57, 1 jan. 2017.
- ARULKIRUBAKARAN, D.; SENTHILKUMAR, V.; KUMAWAT, V. Effect of micro-textured tools on machining of Ti-6Al-4V alloy: An experimental and numerical approach. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 54, p. 165–177, 2016a.
- ARULKIRUBAKARAN, D.; SENTHILKUMAR, V.; KUMAWAT, V. Int . Journal of Refractory Metals and Hard Materials Effect of micro-textured tools on machining of Ti – 6Al – 4V alloy : An experimental and numerical approach. **Rmhm**, v. 54, p. 165–177, 2016b.
- BACCI DA SILVA, M.; WALLBANK, J. **Cutting temperature: prediction and measurement methods-a review** **Journal of Materials Processing Technology**. [s.l: s.n.].
- BAILEY, J. A. Friction in metal machining-Mechanical aspects. **Wear**, v. 31, n. 2, p. 243–275, 1975.
- BOBZIN, K. High-performance coatings for cutting tools. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, v. 18, n. 2017, p. 1–9, 2017.
- BOOTHROYD, G. Temperatures in Orthogonal Metal Cutting. **Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers**, v. 177, n. 1, p. 789–810, 1963.
- BOOTHROYD, G.; KNIGHT, W. A. **Fundamentals of Machining and Machine Tools**. 2nd. ed. New York: [s.n.].
- BRUZZONE, A. A. G. et al. Advances in engineered surfaces for functional performance. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 57, n. 2, p. 750–769, 2008.
- CHANG, W. et al. Investigation of microstructured milling tool for deferring tool wear. **Wear**, v. 271, n. 9–10, p. 2433–2437, 29 jul. 2011.

CHILDS, T. H. C. et al. **Metal machining: theory and applications**. [s.l.] Butterworth-Heinemann, 2000.

DENG, Y. et al. Physical vapor deposition technology for coated cutting tools: A review. **Ceramics International**, v. 46, n. 11, p. 18373–18390, 2020.

DHAGE, S.; JAYAL, A. D.; SARKAR, P. Effects of surface texture parameters of cutting tools on friction conditions at tool-chip interface during dry machining of AISI 1045 steel. **Procedia Manufacturing**, v. 33, p. 794–801, 2019.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. Tecnologia da usinagem dos materiais. 2006.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. Avarias e desgastes da ferramenta. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**, v. 8, p. 107, 2013.

DUAN, R. et al. Experimental assessment of derivative cutting of micro-textured tools in dry cutting of medium carbon steels. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 92, n. 9–12, p. 3531–3540, 1 out. 2017.

DUAN, R. et al. Effect of derivative cutting on machining performance of micro textured tools. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 45, p. 544–556, 1 set. 2019.

ENOMOTO, T. et al. Highly wear-resistant cutting tools with textured surfaces in steel cutting. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 61, n. 1, p. 571–574, 2012.

FAHAD, M.; MATIVENGA, P. T.; SHEIKH, M. A. On the contribution of primary deformation zone-generated chip temperature to heat partition in machining. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 68, n. 1–4, p. 99–110, 1 set. 2013.

FANG, Z.; OBIKAWA, T. Cooling performance of micro-texture at the tool flank face under high pressure jet coolant assistance. **Precision Engineering**, v. 49, p. 41–51, 2017.

FASASI, A. Y. et al. Nano-second UV laser processed micro-grooves on Ti6Al4V for biomedical applications. **Materials Science and Engineering C**, v. 29, n. 1, p. 5–13, 1 jan. 2009.

FENG, Y. et al. Fabrication techniques and cutting performance of micro-textured self-lubricating ceramic cutting tools by in-situ forming of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiC. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 68, n. July, p. 121–129, 2017.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. Vol 1 ed. São Paulo: Blücher, Edgard, 1977.

FERREIRA, D. C. Análise Numérica da Influência Térmica dos Revestimentos em Ferramentas de Corte Usando o Programa COMSOL e Problemas Inversos. 2017.

FERREIRA, O. P. Nanotubos e nanobastões de óxidos e sulfetos de metais de transição obtidos via sistemas bidimensionais (lamelares): preparação, caracterização e propriedades. **SP:(SN)**, 2006.

FLEISCHER, J.; PABST, R.; KELEMEN, S. Heat flow simulation for dry machining of power train castings. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 56, n. 1, p. 117–122, 2007.

FORTULAN, C. A. et al. Twin vessel isostatic press: Design . **Ceramica**, v. 60, n. 354, p. 199–204, 2014.

HAMANN, J. C.; MESLIN, F.; SARTKULVANICH, J. Criteria for the quality assessment of constitutive equations dedicated to cutting models. **Machining Science and Technology**, v. 6, n. 3, p. 331–351, 2002.

HAN, Z.; FINA, A. Thermal conductivity of carbon nanotubes and their polymer nanocomposites: A review. **Progress in Polymer Science (Oxford)**, v. 36, n. 7, p. 914–944, 2011.

INGRACI NETO, R. R. **Avanços no torneamento utilizando um porta- ferramentas refrigerado internamente com fluido em mudança de fase**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Câmpus de Bauru—Bauru: Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Câmpus de Bauru, 2014.

INSPEKTOR, A.; SALVADOR, P. A. Architecture of PVD coatings for metalcutting applications: A review. **Surface and Coatings Technology**, v. 257, p. 138–153, 2014.

JIANXIN, D. et al. Performance of carbide tools with textured rake-face filled with solid lubricants in dry cutting processes. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 30, n. 1, p. 164–172, 2012.

JIANXIN, D.; WENLONG, S.; HUI, Z. Design, fabrication and properties of a self-lubricated tool in dry cutting. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 49, n. 1, p. 66–72, 2009.

KAWASEGI, N. et al. Development of cutting tools with microscale and nanoscale textures to improve frictional behavior. **Precision Engineering**, v. 33, n. 3, p. 248–254, 2009.

KIM, D. M. et al. Influence of a micropatterned insert on characteristics of the tool-workpiece interface in a hard turning process. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 229, p. 160–171, 2016.

KISHAWY, H. A. et al. Micro-textured cutting tools: Phenomenological analysis and design recommendations. **CIRP Annals**, v. 70, n. 1, p. 65–68, 1 jan. 2021.

KOSHY, P.; TOVEY, J. Performance of electrical discharge textured cutting tools. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 60, n. 1, p. 153–156, 2011.

KÜMMEL, J. et al. Study on micro texturing of uncoated cemented carbide cutting tools for wear improvement and built-up edge stabilisation. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 215, n. May, p. 62–70, 2015.

KUNIOSHI, C. T. Comportamento De Oxidação E Erosão-Oxidação De. 2004.

- LI, N. et al. Experimental investigation with respect to the performance of deep submillimeter-scaled textured tools in dry turning titanium alloy Ti-6Al-4V. **Applied Surface Science**, v. 403, p. 187–199, 2017.
- LIAN, Y. et al. Preparation of tungsten disulfide (WS<sub>2</sub>) soft-coated nano-textured self-lubricating tool and its cutting performance. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 68, n. 9, p. 2033–2042, 2013.
- LIU, A. et al. Friction and wear properties of TiN, TiAlN, AlTiN and CrAlN PVD nitride coatings. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 31, p. 82–88, 2012.
- LIU, X. et al. Performances of micro-textured WC-10Ni3Al cemented carbides cutting tool in turning of Ti6Al4V. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 84, n. April, p. 104987, 2019.
- MELKOTE, S. N. et al. Advances in material and friction data for modelling of metal machining. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 66, n. 2, p. 731–754, 2017.
- MISHRA, S. K.; GHOSH, S.; ARAVINDAN, S. Characterization and machining performance of laser-textured chevron shaped tools coated with AlTiN and AlCrN coatings. **Surface and Coatings Technology**, v. 334, n. July 2017, p. 344–356, 2018.
- MOORE, D. F. A history of research on surface texture effects. **Wear**, v. 13, n. 6, p. 381–412, 1969.
- OBIKAWA, T. et al. Micro-texture at the coated tool face for high performance cutting. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 51, n. 12, p. 966–972, 2011a.
- OBIKAWA, T. et al. Micro-texture at the coated tool face for high performance cutting. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 51, n. 12, p. 966–972, dez. 2011b.
- OKOSHI, M.; SATA, T. Friction on relief face of cutting tool. **Scientific Papers of the Institute of Physical and Chemical Research**, v. 52, n. 1493, p. 216–223, 1958.
- ORRA, K.; CHOUDHURY, S. K. Tribological aspects of various geometrically shaped micro-textures on cutting insert to improve tool life in hard turning process. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 31, p. 502–513, 1 jan. 2018.
- ÖZEL, T. et al. Structured and textured cutting tool surfaces for machining applications. **CIRP Annals**, v. 70, n. 2, p. 495–518, 2021.
- PAK, S. Y. et al. Synergistic improvement of thermal conductivity of thermoplastic composites with mixed boron nitride and multi-walled carbon nanotube fillers. **Carbon**, v. 50, n. 13, p. 4830–4838, nov. 2012.
- PALDEY, S.; DEEVI, S. C. **Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti,Al)N: a review**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <[www.elsevier.com/locate/msea](http://www.elsevier.com/locate/msea)>.
- PRENGEL, H. G.; PFOUTS, W. R.; SANTHANAM, A. T. State of the art in hard coatings for carbide cutting tools. **Surface and Coatings Technology**, v. 102, n. 3, p. 183–190, 1998.

QI, Y. et al. Wear of WC inserts textured by shot peening and electrical discharge machining. **Wear**, v. 452–453, 15 jul. 2020.

QUINTO, D. T.; SANTHANAM, A. T.; JINDAL, E. C. **Mechanical Properties, Structure and Performance of Chemically Vapor-deposited and Physically Vapor-deposited Coated Carbide Tools\*Materials"** Science and Engineering, A. [s.l: s.n.].

RAJBONGSHI, S. K.; SARMA, D. K. Performance parameters studies in machining of AISI D2 steel with dot-textured, groove-textured & non-textured cutting tool at the flank face. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 83, n. May, p. 104970, 2019.

RANJAN, P.; HIREMATH, S. S. Role of textured tool in improving machining performance: A review. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 43, n. March, p. 47–73, 2019.

RAO C et al. Nanotubes. **CHEMPHYSCHEM**, v. 2, n. 2, p. 78–105, 9 fev. 2001.

RIBEIRO, F. S. F. **AVALIAÇÃO DE FERRAMENTAS DE CORTE TEXTURIZADAS PREENCHIDAS COM NANOTUBOS DE CARBONO**. Dissertação (Mestrado—[s.l.] Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2019.

RIBEIRO, F. S. F. et al. Grinding assessment of workpieces with different interrupted geometries using aluminum oxide wheel with vitrified bond. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 108, n. 3, p. 931–941, 2020.

SANTECCHIA, E. et al. Wear resistance investigation of titanium nitride-based coatings. **Ceramics International**, v. 41, n. 9, p. 10349–10379, 2015.

SHARMA, V.; PANDEY, P. M. Recent advances in turning with textured cutting tools: A review. **Journal of Cleaner Production**, v. 137, p. 701–715, 2016.

SHAW, M. C. **Metal cutting principles**. 2nd. ed. Shaw MC (2005) Metal Cutting Principles, 2nd ed. Oxford University Press, Oxford.: New York: Oxford university press, 2005.

SIJU, A. S.; WAIGAONKAR, S. D. Effects of rake surface texture geometries on the performance of single-point cutting tools in hard turning of titanium alloy. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 69, p. 235–252, 1 set. 2021.

SILVA COSTA, E.; BACCI DA SILVA, M.; ROCHA MACHADO, A. **Burr Produced on the Drilling Process as a Function of Tool Wear and Lubricant-Coolant Conditions**. [s.l: s.n.].

SU, Y. et al. Cutting mechanism and performance of high-speed machining of a titanium alloy using a super-hard textured tool. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 34, n. June, p. 706–712, 2018.

SUGIHARA, T.; ENOMOTO, T. Development of a cutting tool with a nano/micro-textured surface-Improvement of anti-adhesive effect by considering the texture patterns. **Precision Engineering**, v. 33, n. 4, p. 425–429, out. 2009.

SUGIHARA, T.; ENOMOTO, T. Crater and flank wear resistance of cutting tools having micro textured surfaces. **Precision Engineering**, v. 37, n. 4, p. 888–896, out. 2013.

- SUGIHARA, T.; ENOMOTO, T. Performance of cutting tools with dimple textured surfaces: A comparative study of different texture patterns. **Precision Engineering**, v. 49, p. 52–60, 2017.
- SUGIHARA, T.; NISHIMOTO, Y.; ENOMOTO, T. Development of a novel cubic boron nitride cutting tool with a textured flank face for high-speed machining of Inconel 718. **Precision Engineering**, v. 48, p. 75–82, 1 abr. 2017.
- SUGIHARA, T.; SINGH, P.; ENOMOTO, T. **Development of novel cutting tools with dimple textured surfaces for dry machining of aluminum alloys**. Procedia Manufacturing. Anais...Elsevier B.V., 2017.
- SUGIHARA, T.; TANAKA, H.; ENOMOTO, T. **Development of Novel CBN Cutting Tool for High Speed Machining of Inconel 718 Focusing on Coolant Behaviors**. Procedia Manufacturing. Anais...Elsevier B.V., 2017.
- T.A. EDISON. Process of Duplicating Phonograms. **US Patent 484 582**, 1982.
- THOMSEN, E. G.; MACDONALD, A. G.; KOBAYASHI, S. Flank friction studies with carbide tools reveal sublayer plastic flow. **Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME**, v. 84, n. 1, p. 53–62, 1962.
- TRENT; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**. 4th ed ed. [s.l.] Butterworth–Heinemann, 2000.
- TYURIN, A. et al. Microstructure of WC-Co hard alloy surface after laser treatment. **Surface Engineering**, v. 31, n. 1, p. 74–77, 1 jan. 2014.
- VASUMATHY, D.; MEENA, A. Influence of micro scale textured tools on tribological properties at tool-chip interface in turning AISI 316 austenitic stainless steel. **Wear**, v. 376–377, p. 1747–1758, 2017.
- WAKUDA, M. et al. Effect of surface texturing on friction reduction between ceramic and steel materials under lubricated sliding contact. **Wear**, v. 254, n. 3–4, p. 356–363, 2003.
- WENLONG, S. et al. Cutting performance of cemented-carbides-based self-lubricated tool embedded with different solid lubricants. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 52, n. 5–8, p. 477–485, 2011a.
- WENLONG, S. et al. Performance of a cemented carbide self-lubricating tool embedded with MoS<sub>2</sub> solid lubricants in dry machining. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 13, n. 1, p. 8–15, 2011b.
- WU, Z. et al. Performance of the micro-texture self-lubricating and pulsating heat pipe self-cooling tools in dry cutting process. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**, v. 45, p. 238–248, 2014.
- XIE, J. et al. Micro-grinding of micro-groove array on tool rake surface for dry cutting of titanium alloy. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, v. 13, n. 10, p. 1845–1852, 2012.
- XIE, J. et al. Experimental study on cutting temperature and cutting force in dry turning of titanium alloy using a non-coated micro-grooved tool. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 73, p. 25–36, 2013.

XING, Y. et al. Effect of laser surface texturing on Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/TiC ceramic sliding against steel under dry friction. **Materials and Design**, v. 52, p. 234–245, 2013.

XING, Y. et al. Cutting performance and wear characteristics of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/TiC ceramic cutting tools with WS<sub>2</sub>/Zr soft-coatings and nano-textures in dry cutting. **Wear**, v. 318, n. 1–2, p. 12–26, 2014.

YAZID, M. N. A. W. M.; SIDIK, N. A. C.; YAHYA, W. J. **Heat and mass transfer characteristics of carbon nanotube nanofluids: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews** Elsevier Ltd, , 2017.

ZE, W. et al. Performance of the self-lubricating textured tools in dry cutting of Ti-6Al-4V. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 62, n. 9–12, p. 943–951, 2012.

ZHAI, W. et al. **Carbon nanomaterials in tribology. Carbon** Elsevier Ltd, , 1 ago. 2017.

ZHANG, K. et al. Effect of micro/nano-scale textures on anti-adhesive wear properties of WC/Co-based TiAlN coated tools in AISI 316 austenitic stainless steel cutting. **Applied Surface Science**, v. 355, p. 602–614, 2015.

ZHANG, S.; ZHU, W. TiN coating of tool steels: a review. **Journal of Materials Processing Tech.**, v. 39, n. 1–2, p. 165–177, 1993.

ZOREV, N. N. Inter-relationship between shear processes occurring along tool face and shear plane in metal cutting. **International research in production engineering**, v. v. 49, p. 143–152, 1963.