



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**

Faculdade de Engenharia Mecânica

**CARLOS VINICIUS LEMES**

**Estudo da influência dos tipos de  
revestimentos em ferramentas de metal duro  
no torneamento de titânio comercialmente  
puro grau 4**

CAMPINAS

2021

**CARLOS VINICIUS LEMES**

**Estudo da influência dos tipos de  
revestimentos em ferramentas de metal duro  
no torneamento de titânio comercialmente  
puro grau 4**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, na área de Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz

ESTE TRABALHO CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO CARLOS VINICIUS LEMES E ORIENTADA PELO PROF. DR. ANSELMO EDUARDO DINIZ.

**CAMPINAS**

**2021**

Ficha Catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

L543e Lemes, Carlos Vinicius, 1987-  
Estudo da Influencia dos tipos de revestimentos em ferramentas de metal  
duro no torneamento do titânio comercialmente puro grau 4 / Carlos Vinicius  
Lemes. – Campinas, SP : [s.n.], 2021.

Orientador: Anselmo Eduardo Diniz.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de  
Engenharia Mecânica.

1. Titânio. 2. Metais - Usinabilidade. 3. Titânio - Usinabilidade. 4. Titânio -  
Aplicações industriais. 5. Torneamento. 6. Carbonetos. I. Diniz, Anselmo  
Eduardo, 1959-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de  
Engenharia Mecânica. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Study of the influence of the coating on carbide tools in the  
turning of commercially pure grade 4 titanium

**Palavras-chave em inglês:**

Titanium

Metals - Machinability

Titanium - Machinability

Turning - Implants

Carbide tooling

Coating tool

**Área de concentração:** Materiais e Processos de Fabricação

**Titulação:** Mestre em Engenharia Mecânica **Banca examinadora:**

Anselmo Eduardo Diniz [Orientador]

Olivio Novask

Carlos Eiji Hirata Ventura

**Data de defesa:** 29-04-2021

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Mecânica

**Identificação e informações acadêmicas do(a) aluno(a)**

- ORCID do autor: 0000-0002-7918-0010

- Currículo Lattes do autor: <http://lattes.cnpq.br/1717550621832325>

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO**

**Estudo da influência dos tipos de  
revestimentos em ferramentas de metal duro  
no torneamento de titânio comercialmente  
puro grau 4**

Autor: **CARLOS VINICIUS LEMES**

Orientador: Prof. Dr. **ANSELMO EDUARDO DINIZ**

A banca examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta dissertação:

**Prof. Dr Anselmo Eduardo Diniz**  
**Universidade Estadual de Campinas Unicamp**

**Prof. Dr. Carlos Eiji Hirata Ventura**  
**Universidade Federal de São Carlos UFSCAR**

**Prof. Dr. Olivio Novaski**  
**Universidade Estadual de Campinas Unicamp**

A Ata de Defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no SIGA/Sistema de Fluxo de Dissertação/Tese e na Secretaria do Programa da Unidade.

Campinas, 29 de abril de 2021.

## **Agradecimentos**

Este trabalho não poderia ser concluído sem a ajuda de diversas pessoas e empresas as quais presto minha homenagem em agradecimento.

Ao professor Anselmo Eduardo Diniz pela oportunidade, pelos fundamentos teóricos e pela paciência em todo o período do mestrado.

Aos alunos, docentes, técnicos e secretárias da Faculdade de Engenharia Mecânica da Unicamp, que sempre estiveram dispostos a ajudar.

À minha família pela paciência e incentivo ao longo da realização deste trabalho.

## Resumo

O uso crescente do titânio e suas ligas na fabricação de implantes decorre da presença simultânea da excelente biocompatibilidade, relativa baixa densidade, alta resistência mecânica e à corrosão. Ao contrário das excelentes características de aplicação, a usinagem de titânio é considerada ruim, ou seja, classificado como material de difícil usinabilidade. O desafio constante dos fabricantes de implantes é aplicar no processo de usinagem as ferramentas de torneamento com melhor custo-benefício. Este trabalho visa comparar a vida útil do inserto sem revestimento com outros 3 tipos de revestimentos em ferramentas de metal duro (TiAlN, AlCrN e TiCN+TiN), revestimentos estes utilizados e recomendados por algumas empresas. Experimentos de torneamento foram realizados utilizando como peça o titânio comercialmente puro grau 4 (tipicamente utilizado em implantes dentários), testando 2 velocidades de corte para cada ferramenta utilizada. Os testes foram realizados em um torno CNC de cabeçote móvel (também tipicamente empregado na usinagem de peças pequenas, como é o caso do implante dentário), empregando fluido de corte integral em abundância. Os resultados demonstraram que o revestimento TiCN+TiN composto de uma estrutura multicamadas obteve a melhor vida útil e conseqüentemente o melhor custo-benefício entre os 4 insertos testados. Mesmo com o aumento da velocidade de corte, os resultados se mantiveram na mesma ordem de qualificação.

**Palavras chave:** usinabilidade; titânio; torneamento; metal duro

## **Abstract**

The increasing use of titanium and its alloys in the manufacture of implants is due to the simultaneous presence of excellent biocompatibility, relatively low density, high mechanical and corrosion resistance. However, its intensive use is harmed due to, among other factors, its poor machinability. The constant challenge for implant manufacturers is to make the machining process a cost-effective process. This work aims to compare the tool lives of the uncoated tool compared with other 3 types of coatings on carbide tools (TiAlN, AlCrN e TiCN+TiN), coatings used and recommended by some companies. The experiments were performed by turning commercially pure grade 4 titanium (usually used in dental implants), testing 2 cutting speeds for each tool used. The tests were carried out in a CNC lathe with a mobile tailstock (also usually used in the turning process of small parts, such as dental implants) using abundant integral cutting fluid. The results showed that the TiCN+TiN multi-layer structure coating reached the longest tool life and consequently, the best benefit among the 4 inserts tested. Even with the increase in the cutting speed, the results are kept in the same order of qualification.

**Keywords:** machinability; titanium; turning; carbide

## Lista de Figuras

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 - Implante de parafuso de titânio de raiz artificial para fixação de prótese dentária .....  | 15 |
| Figura 2 - Esquema representativo da transformação de fase do titânio.....  | 18 |
| Figura 3 - Diagrama de fase do titânio e oxigênio.....  | 22 |
| Figura 4 - Fatores de referência para implante dentário.....  | 25 |
| Figura 5 - Implante Odontológico usinado: a) Usinado (50X) e b) Usinado (500X)<br>.....   | 26 |
| Figura 6 - Bandas de cisalhamento termoplástico em um cavaco da liga Ti-6Al-4V:<br>(a) obtido experimentalmente e (b) obtido por simulação numérica.....  | 29 |
| Figura 7 - Zonas de deformação primária e secundária na usinagem.....   | 30 |
| Figura 8 - Morfologia dos cavacos de Ti para as mesmas condições de corte<br>( $V_c=87,96\text{m/min}$ ; $f=0,2\text{mm/rev}$ ; $a_p=0,2\text{mm}$ )..... | 34 |
| Figura 9 - Cavacos segmentados na usinagem de Ti-Cp Gr.2.....   | 35 |
| Figura 10 – Típico revestimento PVD em ferramenta de usinagem (imagem<br>representativa sem escala) .....   | 44 |
| Figura 11 - Representação esquemática de uma pastilha de metal duro com<br>revestimento triplo de $\text{TiC}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$ .....     | 45 |
| Figura 12 - Principais funções de cada camada para uma ferramenta com 4 coberturas<br>.....   | 45 |
| Figura 13 - Exemplos de estruturas de camadas PVD aplicados.....  | 47 |
| Figura 14 - Torno CNC cabeçote móvel .....  | 50 |
| Figura 15 - Imagem do suporte da ferramenta e ângulo .....  | 51 |
| Figura 16 - Informações técnicas do inserto utilizado .....   | 51 |
| Figura 17 - Ângulo de folga e de saída da ferramenta .....  | 52 |
| Figura 18 - Dados de corte recomendado pelo fabricante.....   | 52 |
| Figura 19 - Implante dentário com dimensões básicas a ser usinada.....  | 54 |
| Figura 20 - Foto frontal do inserto (ampliado 100x) .....   | 57 |
| Figura 21 - Foto superior do inserto (ampliado 100x) .....  | 58 |
| Figura 22 - a) Rugosímetro utilizado ; b) Medição da rugosidade superficial no blank<br>através do rugosímetro.....                                       | 59 |
| Figura 23 - Gráficos de rugosidade ( $R_a$ ) x Comprimento usinado (m) .....  | 62 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 24 - Gráfico de Rugosidade (Ra) x Comprimento usinado (m) com linha de média .....  | 63 |
| Figura 25 - Gráfico ilustrando o aumento da rugosidade (Ra) conforme aumenta o comprimento usinado (m) na $V_C$ de 55m/min ..... | 64 |
| Figura 26 - Gráfico ilustrando o aumento da rugosidade (Ra) conforme aumenta o comprimento usinado (m) na $V_C$ de 66m/min ..... | 64 |
| Figura 27 - Gráfico com resultado final do estudo de vida das ferramentas.....   | 66 |
| Figura 28 - Desgaste $V_B$ para cada ferramenta.....   | 68 |
| Figura 29 – Deformação do raio de ponta da ferramenta usada, sem escala.....   | 68 |
| Figura 30 - Teste 1 - a) Superfície de folga da ferramenta b) Superfície de saída da ferramenta .....                            | 69 |
| Figura 31 - Teste 2 - a) Superfície de folga da ferramenta b) Superfície de saída da ferramenta .....                            | 71 |
| Figura 32 - Teste 3 - a) Superfície de folga da ferramenta b) Superfície de saída da ferramenta .....                            | 72 |
| Figura 33 - Teste 4 - a) Superfície de folga da ferramenta b) Superfície de saída da ferramenta .....                            | 74 |
| Figura 34 - Teste 5 - a) Superfície de folga da ferramenta b) Superfície de saída da ferramenta .....                            | 75 |
| Figura 35 - Teste 6 - a) Superfície de folga da ferramenta b) Superfície de saída da ferramenta .....                            | 77 |
| Figura 36 - Teste 7 - a) Superfície de folga da ferramenta b) Superfície de saída da ferramenta .....                            | 79 |
| Figura 37 - Teste 8 - a) Superfície de folga da ferramenta b) Superfície de saída da ferramenta .....                            | 81 |

## Lista de Tabelas

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1 - Propriedades físicas do elemento titânio .....                                  | 17 |
| Tabela 2 - Composição e as propriedades mecânicas de algumas ligas de titânio ..           | 21 |
| Tabela 3 - Comparação de propriedades .....  | 24 |
| Tabela 4 - Comparação entre camadas de cobertura depositadas pelos métodos CVD e PVD ..... | 41 |
| Tabela 5 - Informações dos insertos utilizados nos testes .....                            | 53 |
| Tabela 6 - Condições de usinagem utilizadas e calculadas .....                             | 55 |
| Tabela 7 - Testes realizados.....  | 55 |
| Tabela 8 - Medidas encontradas na medição do raio de aresta.....                           | 60 |
| Tabela 9 - Teste 1 - Pontos medidos .....  | 69 |
| Tabela 10 - Teste 2 - Pontos medidos .....   | 71 |
| Tabela 11 - Teste 3 - Pontos medidos .....   | 73 |
| Tabela 12- Teste 4 - Pontos medidos .....  | 74 |
| Tabela 13 - Teste 5 - Pontos medidos .....   | 76 |
| Tabela 14- Teste 6 - Pontos medidos .....  | 77 |
| Tabela 15 - Teste 7 - Pontos medidos .....   | 79 |
| Tabela 16 - Teste 8 - Pontos medidos .....   | 81 |
| Tabela 17 - Análise de preços dos insertos e dos revestimentos .....                       | 83 |
| Tabela 18 - Análise do custo realizado em R\$/metro usinado .....                          | 84 |
| Tabela 19- Análise custo/benefício mensal .....  | 85 |

## Lista de abreviaturas e siglas

### Letras Latinas

|       |  |
|-------|--|
| $a_e$ | Penetração de trabalho [mm]                      |
| $a_p$ | Profundidade axial de corte [mm]                 |
| E     | Módulo de elasticidade [GPa]                     |
| $f_z$ | Avanço por dente [mm]                            |
| h     | Espessura do cavaco [mm]                         |
| hm    | Espessura média do cavaco [mm]                   |
| K     | Pressão específica de corte [N/mm <sup>2</sup> ] |
| n     | Rotação do eixo árvore [rpm]                     |
| $V_B$ | Desgaste de flanco [mm]                          |
| $v_c$ | velocidade de corte [m/min]                      |
| $v_f$ | velocidade de avanço [mm/min]                    |
| z     | número de dentes                                 |

### Letras Gregas

|                |                     |
|----------------|---------------------|
| $\alpha$       | fase alfa/liga alfa |
| $\beta$        | fase beta/liga beta |
| $\alpha+\beta$ | liga alfa-beta      |

### Abreviações

|         |                                    |
|---------|------------------------------------|
| APC     | Aresta postiça de corte            |
| CBN     | Cubic boron nitride                |
| CCC     | Estrutura cúbica de corpo centrado |
| CVD     | Chemical vapour deposition         |
| ELI     | Extra low intersticial             |
| HC      | Estrutura hexagonal compacta       |
| HSM     | High speed machining               |
| PVD     | Physical vapour deposition         |
| rpm     | Rotações por minuto                |
| Ti      | Titânio                            |
| Ti c.p. | Titânio comercialmente puro        |

# Sumário

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Agradecimentos .....</b>   | <b>5</b>  |
| <b>Resumo.....</b>  | <b>6</b>  |
| <b>Abstract .....</b>   | <b>7</b>  |
| <b>Lista de Figuras.....</b>  | <b>8</b>  |
| <b>Lista de Tabelas .....</b>   | <b>10</b> |
| <b>Lista de abreviaturas e siglas .....</b>   | <b>11</b> |
| <b>Sumário .....</b>  | <b>12</b> |
| <b>1 INTRODUÇÃO.....</b>  | <b>13</b> |
| <b>2 TITÂNIO – PROPRIEDADES E CARACTERÍSTICAS DE USINAGEM.....</b>  | <b>17</b> |
| <b>2.1 O Titânio .....</b>  | <b>17</b> |
| 2.1.1 Propriedades físico-químicas do Titânio.....  | 17        |
| 2.1.2 Características do titânio e suas ligas .....   | 19        |
| 2.1.3 Titânio utilizado em implantes dentários .....  | 24        |
| <b>2.2 Usinagem de titânio e suas ligas .....</b>   | <b>27</b> |
| 2.2.1 Usinabilidade do titânio comercialmente puro e suas ligas.....  | 27        |
| 2.2.2 Melhores práticas para a usinagem de titânio.....   | 34        |
| <b>2.3 Ferramentas de usinagem.....</b>   | <b>37</b> |
| 2.3.1 – Ferramentas para a usinagem de titânio .....  | 37        |
| 2.3.2 Revestimento em ferramentas de metal duro.....  | 40        |
| <b>3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....</b>   | <b>49</b> |
| <b>3.1 Condições gerais dos experimentos.....</b>   | <b>49</b> |
| <b>3.2 Ferramenta de Corte.....</b>   | <b>50</b> |
| <b>3.3 Condições de usinagem .....</b>  | <b>54</b> |
| <b>3.4 Medição e avaliação do inserto .....</b>   | <b>56</b> |
| <b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>   | <b>61</b> |
| <b>4.1 Análise dos dados gerados.....</b>   | <b>61</b> |
| <b>4.2 Análise do desgaste da ferramenta.....</b>   | <b>67</b> |
| 4.2.1 Análise do mecanismo de desgaste no teste 1 realizado com inserto sem revestimento e $v_c = 55\text{m/min}$ ..... | 69        |
| 4.2.2 Análise do mecanismo de desgaste no teste 2 realizado com inserto sem revestimento e $v_c = /\text{min}$ .....    | 71        |
| 4.2.3 Análise do mecanismo de desgaste no teste 3 realizado com inserto revestido TiAlN e $v_c = 55\text{m/min}$ .....  | 72        |

|   |           |
|---|-----------|
| 4.2.4 Análise do mecanismo de desgaste no teste 4 realizado com inserto revestido TiAlN e $v_c$<br>= 66m/min. ....    | 74        |
| 4.2.5 Análise do mecanismo de desgaste no teste 5 realizado com inserto revestido AlCrN e $v_c$<br>=55m/min. ....     | 75        |
| 4.2.6 Análise do mecanismo de desgaste no teste 6 realizado com inserto revestido AlCrN e $v_c$<br>=66m/min. ....     | 77        |
| 4.2.7 Análise do mecanismo de desgaste no teste 7 realizado com inserto revestido TiCN+TiN<br>e $v_c$ = 55m/min. .... | 79        |
| 4.2.8 Análise do mecanismo de desgaste no teste 8 realizado com inserto revestido TiCN+TiN<br>e $v_c$ =66m/min. ....  | 81        |
| <b>4.3 Análise do custo-benefício da aplicação .....</b>  | <b>83</b> |
| <b>5 CONCLUSÕES .....</b>   | <b>86</b> |
| <b>Referências .....</b>  | <b>88</b> |

# 1 INTRODUÇÃO

Ligas de titânio estão entre os melhores materiais para aplicações nas indústrias aeronáutica, aeroespacial, marítima, petroquímica, médica, nuclear e de geração de energia devido às suas propriedades inerentes como elevada relação resistência/peso, elevada resistência à fadiga e ao escoamento, resistência em altas temperaturas, biocompatibilidade e excelente resistência à corrosão. Porém, as mesmas propriedades físicas e químicas que tornam esse material desejável para uma série de aplicações também comprometem sua usinabilidade. Devido às altas dureza e resistência, temperaturas elevadas são geradas na usinagem. Como essas ligas têm baixa condutividade térmica, o calor gerado não é dissipado pelo cavaco, sendo retido pela ferramenta e provocando sua falha prematura. O baixo módulo de elasticidade desse material causa grandes deflexões na peça, que podem resultar em vibrações na ferramenta e baixa qualidade da superfície usinada (KHAN e MAITY, 2018; REVURU et al., 2017).

Segundo Machado et al. (2009) a dificuldade na usinagem do titânio é diretamente proporcional ao aumento do teor dos elementos de liga e o aumento da fase  $\beta$  dispersa na matriz do material. Dentre diversas características do titânio, a sua pobre condutividade térmica e sua elevada afinidade química com diversos materiais causam o rápido desgaste da ferramenta de corte (GUO e JAWAHIR, 2009).

As ligas de titânio apresentam em geral resistência mecânica comparável à dos aços, com cerca de 50% de sua densidade e resistência mecânica 400% superior às ligas de alumínio, com densidade apenas 50 % superior (ANTONIALLI, 2009).

Devido ao crescimento da utilização deste moderno material na indústria, a usinabilidade do titânio passou a ser um assunto de grande interesse para as indústrias que o manufaturam. Ao mesmo tempo, a fabricação de implantes dentários também vem crescendo tanto no mercado nacional, quanto no mercado mundial.

O titânio é um dos poucos materiais que são inertes à corrosão por todos os líquidos e tecidos do corpo, uma das grandes exigências para a implantação no corpo humano. Na área ortopédica, o titânio é comumente aplicado em próteses maxilo-faciais, joelho, quadril e crânio e na ortodontia em implantes dentais (ver Figura 1), na qual parafusos de titânio são introduzidos no osso da maxila para a osseointegração, constituindo “raízes artificiais” para fixação de próteses dentárias (LEYENS e PETERS, 2003).



Figura 1 - Implante de parafuso de titânio de raiz artificial para fixação de prótese dentária

Fonte: <http://www.mdfrossard.com.br>

Atualmente o Titânio comercialmente puro (Ti. c.p.) grau 4 e a liga Ti-6Al-4V são os materiais mais usados na produção de próteses e dispositivos médicos e odontológicos, por apresentarem uma boa combinação de propriedades (baixo módulo de elasticidade, resistência à corrosão e biocompatibilidade).

Diante deste cenário, torna-se interessante estudar meios de se melhorar a usinabilidade do titânio.

Na usinagem do titânio, a região de corte concentra elevadas temperaturas, de aproximadamente 1000°C mesmo para velocidades de corte moderadas (KHAN e MAITY, 2017). Estas temperaturas elevadas desenvolvidas na região de corte do titânio, junto com a baixa condutividade térmica do material, resultam em uma maior força de corte na usinagem. E devido ao cisalhamento adiabático, característico na formação do cavaco na usinagem do titânio, ocorre nesta situação uma variação contínua e cíclica de esforços, que pode ocasionar conseqüentemente uma elevada imprecisão dimensional da peça. Todas essas características citadas acima podem resultar em uma menor vida da ferramenta (JAHEDI et al., 2009).

Nesse escopo, é importante realizar-se pesquisas em revestimentos de ferramentas de metal duro para a sua usinagem, a fim de que seja possível, maiores vidas da ferramenta e/ou se possa usinar o titânio com velocidades mais altas.

A usinagem de titânio, seja ele puro ou contendo elementos de liga, requer uma seleção adequada do material da ferramenta de corte, pois a escolha correta irá afetar significativamente nos principais aspectos da usinagem do titânio, como a resistência ao desgaste da ferramenta, temperatura na zona de corte, qualidade da superfície usinada, variação dimensional e força de corte.

Atualmente é comum encontrar nas empresas que usinam o titânio uma incerteza da escolha certa do tipo de ferramenta para realizar o processo de usinagem. As principais dúvidas são: -Utilizar ou não utilizar revestimento na ferramenta? -Se o revestimento for utilizado, ele pode ou não conter titânio na sua composição?

Este trabalho visa contribuir com as pesquisas sobre a usinabilidade do titânio comercialmente puro (Ti c.p Gr4.) utilizado em prótese dentária através de um estudo sobre o comportamento de diferentes tipos de ferramentas aplicadas no torneamento deste material. Para isso foi avaliada a vida de insertos de metal duro com diferentes camadas de revestimento através da análise do desgaste da ferramenta aplicada no torneamento externo de amostras de titânio comercialmente puro grau 4. A partir dos resultados obtidos, objetiva-se avaliar a ferramenta com desempenho mais satisfatório e que apresente o melhor custo/benefício para esta determinada operação.

Os testes foram realizados em uma empresa do ramo médico/odontológico a qual emprega como matéria prima o titânio comercialmente puro grau 4 conforme norma ASTM F67. Os insertos utilizados neste trabalho, bem como as camadas de cobertura aplicadas aos mesmos foram fornecidos por empresas parceiras e de expressiva relevância em suas áreas de atuação.

Este trabalho vai mostrar no próximo capítulo as propriedades do titânio e as suas características de usinagem. Logo após temos o capítulo de procedimento experimental, na sequência será apresentado os resultados obtidos neste trabalho prático juntamente com suas discussões e, por último, teremos as conclusões e as sugestões para trabalhos futuros.

## 2 TITÂNIO – PROPRIEDADES E CARACTERÍSTICAS DE USINAGEM

### 2.1 O Titânio

#### 2.1.1 Propriedades físico-químicas do Titânio

Já na década de 60, um dos materiais mais vislumbrados como o metal do futuro era o titânio (Ti), por ser o nono elemento químico e o quarto metal estrutural mais abundante da crosta terrestre, sendo inferior apenas ao alumínio, ferro e magnésio. Ele normalmente é extraído dos minerais ilmenita ( $\text{FeTiO}_3$ ) e rutilo ( $\text{TiO}_2$ ) e dificilmente é encontrado em grandes quantidades. Essa característica, aliada à dificuldade na sua extração e processamento, tornam-no um material de alto custo (PETERS et al., 2003).

Na tabela periódica é encontrado no grupo 4, com número atômico 22 e peso atômico 47,9. A tabela 1 mostra as principais propriedades deste material.

|                               |                                 |
|-------------------------------|---------------------------------|
| <b>Numero atômico</b>         | <b>22</b>                       |
| <b>Massa atômica</b>          | <b>47,9</b>                     |
| <b>Densidade</b>              | <b>4,51 mg/m<sup>3</sup></b>    |
| <b>Ponto de fusão</b>         | <b>1688° C</b>                  |
| <b>Calor específico</b>       | <b>522 J/Kg.K (a 25° C)</b>     |
| <b>Calor latente de fusão</b> | <b>440 kJ/kg</b>                |
| <b>Condutividade térmica</b>  | <b>11,4 W/m.K (a -240° C)</b>   |
| <b>Resistividade elétrica</b> | <b>420 nΩ.m (a 20° C)</b>       |
| <b>Módulo de Elasticidade</b> | <b>110.000 N/cm<sup>2</sup></b> |

Tabela 1 - Propriedades físicas do elemento titânio

Fonte: Adaptado de Almeida, 2007

Dentre as propriedades químicas, destaca-se a alta reatividade deste metal, o que constitui uma desvantagem no seu processamento. O titânio combina-se muito facilmente com outros elementos, principalmente gases como nitrogênio e oxigênio os quais se dissolvem rapidamente no metal líquido ou sólido em temperaturas superiores a 400°C, provocando a perda de ductilidade deste.

O titânio é um material alotrópico. Em temperatura ambiente, tem uma estrutura cristalina hexagonal compacta (hc), chamada de fase alfa  $\alpha$ , a qual é estável até 882°C. Acima desta temperatura, a estrutura muda para cúbica de corpo centrado (ccc), chamado de fase beta  $\beta$ . A figura 2 mostra como é dada a transformação de fase do elemento Ti da estrutura hexagonal compacta (hc) para estrutura cúbica de corpo centrado (ccc).

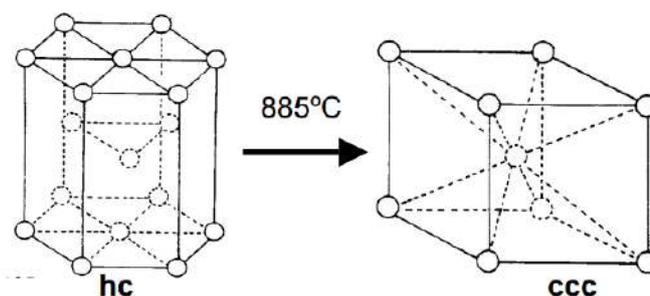


Figura 2 - Esquema representativo da transformação de fase do titânio

Fonte: OHLWEILER, O. A. 1973

O titânio de fase alfa é o titânio cuja tensão de escoamento é aumentada pela adição de pequenas quantidades de elementos estabilizadores desta fase, como Al, Sn, Ni e Cu. As ligas nas quais este elemento apresenta estrutura alfa não tem sua dureza aumentada com o resfriamento, mas têm maior resistência mecânica que o titânio puro comercial. Ligas  $\alpha + \beta$  são ligas de Ti com estrutura parcial, podendo conter elementos de liga como Mo (Molibdênio), V (Vanádio) e Ta (Tântalo) que, quando adicionados ao Ti puro em temperatura ambiente, tendem a promover a presença da fase  $\beta$ . Uma liga importante do ponto de vista industrial é a Ti6Al4V, a qual contém, 6% de Al (Alumínio) e 4% de V (Vanádio) e apresenta as duas fases estruturais. Elementos como o Mo e V são estabilizadores das ligas  $\beta$  e tem boa ductilidade quando não sofrem tratamento térmico. (BRAGA, 2007).

Outra propriedade química importante do Ti e suas ligas é a elevada resistência à corrosão. Por esse motivo, aliado à alta resistência e à biocompatibilidade, este material e suas ligas são amplamente empregados em implantes ortodônticos e ortopédicos na área de traumatologia.

O titânio é um elemento muito reativo em altas temperaturas, queimando na presença de oxigênio. Por isso requer uma atmosfera inerte para seu processamento. O oxigênio se difunde no titânio rapidamente fragilizando o metal. O titânio puro possui bons níveis de soldabilidade e conformabilidade, sendo um elemento alotrópico que existe em mais de uma forma cristalográfica. A fase alfa pode se alterar em temperatura ambiente com a adição de elementos de liga, tais como Al, Sn, Ga, C, O e N. (ASM, 1980). A manipulação das fases presentes pela adição de elementos de liga e de tratamentos termomecânicos constitui a base para o desenvolvimento de diversas ligas com diferentes propriedades (WEISS e SEMIATIN, 1998).

### **2.1.2 Características do titânio e suas ligas**

As ligas de titânio são classificadas de acordo com a concentração de elementos de liga (alumínio e molibdênio) adicionados para modificar sua microestrutura e propriedades mecânicas. Os elementos de liga são divididos em  $\alpha$  e  $\beta$  estabilizadores, de acordo com a sua influência sobre a temperatura de transformação alotrópica do titânio.

As ligas de titânio da classe  $\alpha+\beta$  são as mais comuns dentro dos vários tipos de ligas de titânio. A Ti6Al4V é a mais conhecida por possuir estrutura cristalina hexagonal compacta (fase alfa) e cúbica de corpo centrado (beta) presentes em temperatura ambiente, combinando resistência mecânica e resistência à corrosão com conformabilidade e melhor usabilidade comparado ao Ti c.p.. Com excelentes combinações de resistência à corrosão, as ligas de titânio têm sido um excelente atrativo para aplicações nas indústrias aeronáuticas, automobilística e na fabricação de próteses ortopédicas (JESUINO et al., 2001).

Porém na área da implantodontia, o material mais comum encontrado no mercado é o de titânio comercialmente puro (Ti c.p.), muito documentado na literatura como um material de comprovado sucesso clínico. O Ti c.p. faz parte da classe de ligas  $\alpha$  e constitui quatro graus definidos pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM).

O Ti c.p. grau 1 possui as menores concentrações de oxigênio intersticial e ferro residual. O oxigênio atua como um agente endurecedor e mantém a microestrutura na fase  $\alpha$ , enquanto o ferro é um refinador dos grãos da fase  $\beta$  e diminui o endurecimento do material. Esta liga possui a menor resistência mecânica, porém apresenta alta ductilidade e facilidade para trabalho a frio. O Ti c.p. grau 2 é amplamente utilizado pela indústria em virtude de suas propriedades equilibradas de resistência mecânica e ductilidade. Possui resistência mecânica semelhante ao aço inoxidável comum, além de ser facilmente trabalhado a frio. O Ti c.p. grau 3 possui resistência mecânica um pouco maior que o grau 2, em razão da maior concentração de oxigênio e nitrogênio intersticial, porém sua ductilidade está abaixo dos demais. O Ti c.p. grau 4 apresenta a maior resistência mecânica do grupo do titânio puro. (BOYER, WELSCH e COLLINGS, 1994).

O grupo das ligas  $\alpha$  constitui, além do Ti c.p., ligas com a presença de elementos  $\alpha$ -estabilizadores ou neutros. Estas ligas são caracterizadas por apresentar apenas a fase  $\alpha$  em temperatura ambiente. Como não há a obtenção de fases metaestáveis com resfriamentos rápidos, os processos de tratamentos térmicos não geram variações na microestrutura. Podem ser utilizadas tanto em altas quanto em baixas temperaturas, devido à grande resistência à fluência e ausência de transição dúctil-frágil. Devido à sua estrutura hexagonal, as ligas  $\alpha$  em geral apresentam boa resistência mecânica, tenacidade à fratura, alto módulo de elasticidade e baixa ductilidade comparado as ligas de titânio da classe  $\beta$ . Suas aplicações envolvem principalmente a indústria química, militar e aeronáutica, em razão de sua elevada resistência à corrosão. A tabela 2 mostra as propriedades mecânicas de algumas ligas de titânio.

| LIGA                | COMPOSIÇÃO (%P.)                   | TIPO            | MODULO DE ELASTICIDADE (GPA) | LIMITE DE ESCOAMENTO (MPA) | LIMITE DE RESISTENCIA A TRACAO (MPA) | ALONGAMENTO (%) |
|---------------------|------------------------------------|-----------------|------------------------------|----------------------------|--------------------------------------|-----------------|
| <b>GRAU 1</b>       | Ti-0,20Fe-0,18O-0,005H-0,05N-0,08C | $\alpha$        | 100                          | 170-310                    | 240                                  | <b>24</b>       |
| <b>GRAU 2</b>       | Ti-0,30Fe-0,20O-0,015H-0,05N-0,08C | $\alpha$        | 103                          | 275-450                    | 345                                  | <b>20</b>       |
| <b>GRAU 3</b>       | Ti-0,30Fe-0,30O-0,015H-0,05N-0,08C | $\alpha$        | 105                          | 380-550                    | 440                                  | <b>18</b>       |
| <b>GRAU 4</b>       | Ti-0,30Fe-0,20O-0,015H-0,05N-0,08C | $\alpha$        | 100-120                      | 480-655                    | 550                                  | <b>18</b>       |
| <b>GRAU 6</b>       | Ti-5Al-2,5Sn                       | $\alpha$        | 109                          | 827                        | 861                                  | <b>15</b>       |
| <b>GRAU 9</b>       | Ti-3Al-2,5V                        | quase- $\alpha$ | 95-105                       | 480                        | 620                                  | <b>15</b>       |
| <b>TIMETA L1100</b> | Ti-6Al-2,75Sn-4Zr-0,4Mo-0,45Si     | quase- $\alpha$ | 112                          | 900-950                    | 1010-1050                            | <b>10-16</b>    |
| <b>TI-64 (GR 5)</b> | Ti-6Al-4V                          | $\alpha+\beta$  | 110-140                      | 800-1100                   | 900-1200                             | <b>13-16</b>    |
| <b>TI-6246</b>      | Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo                 | $\alpha+\beta$  | 114                          | 1000-1100                  | 1100-1200                            | <b>13-16</b>    |
| <b>TI-662</b>       | Ti-6Al-6V-2Sn                      | $\alpha+\beta$  | 110-117                      | 950-1050                   | 1000-1100                            | <b>10-19</b>    |
| <b>TI-1023</b>      | Ti-10V-2Fe-3Al                     | quase- $\beta$  | 110                          | 1000-1200                  | 1000-1400                            | <b>6-16</b>     |
| <b>TI-1313</b>      | Ti-13Nb-13Zr                       | quase- $\beta$  | 77                           | 836-908                    | 973-1037                             | <b>10-16</b>    |
| <b>TNZT</b>         | Ti-35Nb-7Zr-5Ta                    | $\beta$         | 55                           | 547                        | 596                                  | <b>19</b>       |
| <b>TMZF</b>         | <b>TI-12MO-6ZR-2FE</b>             | <b>B</b>        | <b>74-85</b>                 | <b>100-1060</b>            | <b>1060-1100</b>                     | <b>18-22</b>    |

Tabela 2 - Composição e as propriedades mecânicas de algumas ligas de titânio

Fonte: BOYER, R.; WELSCH, G.; COLLINGS, E. W., 1973

As ligas quase- $\alpha$  são caracterizadas por possuírem uma pequena fração de fase  $\beta$  retida em sua microestrutura. A fase  $\beta$  retida é proveniente do aumento do campo  $\alpha+\beta$  do titânio devido às pequenas concentrações de  $\beta$ -estabilizadores. Estas ligas apresentam quantidades de  $\beta$ -estabilizadores entre 1 e 2%.

As ligas  $\alpha+\beta$  apresentam teores balanceados de elementos  $\alpha$  e  $\beta$  estabilizadores, de modo que a faixa de formação de fases  $\alpha$  e  $\beta$  é estendida para a temperatura ambiente. As ligas  $\alpha+\beta$  podem conter desde 10% até 50% de fase  $\beta$  retida à temperatura ambiente. Processos de tratamentos térmicos e termo-mecânicos podem variar as concentrações volumétricas das fases  $\alpha$  e  $\beta$ , alterando a microestrutura e resultando em uma ampla variação das propriedades mecânicas da liga.

As ligas quase- $\beta$  possuem elevadas quantidades de elementos  $\beta$ -estabilizadores misturados com pequenas concentrações de  $\alpha$ -estabilizadores. Através de tratamentos

térmicos, é possível obter a formação de fases metaestáveis ou mistura de fases  $\alpha$  e  $\beta$ . Em geral, as ligas quase- $\beta$  apresentam boa resistência mecânica e ductilidade.

As ligas  $\beta$  são formadas com grandes quantidades de elementos  $\beta$ -estabilizadores, diminuindo acentuadamente a temperatura de mudança de fase. As ligas  $\beta$  metaestável são constituídas por uma quantidade de elementos suficientes para aumentar o campo  $\alpha+\beta$  de forma a resultar em uma microestrutura predominantemente  $\beta$  com taxas de resfriamento rápidas. As ligas  $\beta$  estáveis possuem a temperatura de início da transformação alotrópica abaixo da temperatura ambiente. Assim, mesmo com resfriamento lento, é possível reter a fase  $\beta$  na microestrutura. Processos de tratamentos térmicos podem alterar significativamente a microestrutura e as propriedades destas ligas. Por apresentarem uma estrutura cúbica de corpo centrado, as ligas  $\beta$  realizam uma transição dúctil para frágil em baixas temperaturas, restringindo suas aplicações em temperaturas criogênicas. Além disso, possuem baixa resistência à fluência, que impede sua utilização em temperaturas elevadas. As ligas do tipo  $\beta$  têm encontrado aplicações principalmente como próteses e implantes ortopédicos, em virtude de seu menor módulo de elasticidade comparado às ligas  $\alpha$ , além de sua excelente resistência à corrosão e biocompatibilidade (LEYENS e PETERS, 2003).

A figura 3 ilustra um diagrama de fase parcial do titânio e oxigênio. O oxigênio permanece em solução sólida intersticial, até o limite de solubilidade, aproximadamente 33% em peso e, deste modo, o metal apresenta uma única fase.

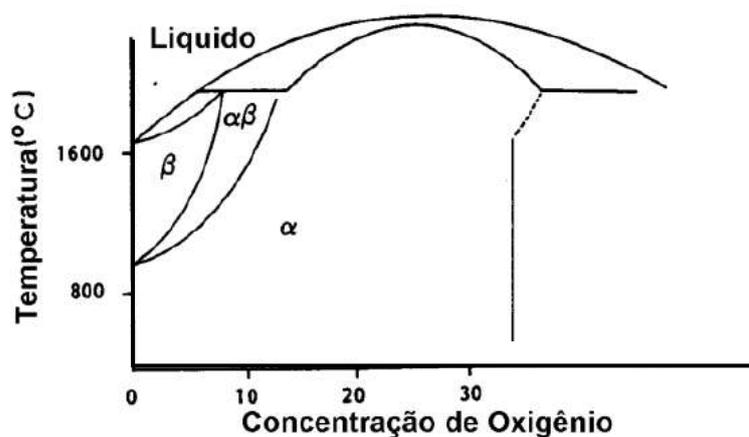


Figura 3 - Diagrama de fase do titânio e oxigênio

Fonte: VAN NOORT, R. 1987

Os elementos hidrogênio, nitrogênio e carbono têm uma grande solubilidade na estrutura hexagonal compacta (fase  $\alpha$ ) e na estrutura cúbica de corpo centrado (fase  $\beta$ ). Estes elementos formam uma solução sólida intersticial com o titânio e ajudam a estabilizar a fase  $\beta$ . O hidrogênio não fica na estrutura hexagonal, forma um hidreto,  $TiH_2$ , que antes era considerado como uma solução de hidrogênio no Ti, mas agora é confirmado como composto. Elementos de transição tais como molibdênio, nióbio e vanádio atuam como estabilizadores da fase  $\beta$ . O elemento alumínio, por outro lado, é estabilizador da fase  $\alpha$ . Quando o alumínio e vanádio são adicionados em pequenas quantidades ao titânio, melhoram-se as propriedades mecânicas, o que lhe garante utilidade em aplicações como aeroespaciais e implantes cirúrgicos. Com a adição de alumínio e vanádio a temperatura de transição  $\alpha/\beta$  é diminuída e ambas as fases,  $\alpha$  e  $\beta$ , podem coexistir em temperatura ambiente nas ligas Ti-6Al-4V.

As ligas de titânio apresentam elevadas temperaturas de fusão, alta dureza a quente, excelentes propriedades mecânicas, alta resistência a corrosão, ótima razão resistência-peso e biocompatibilidade, características que as tornam materiais ideais para aplicações na indústria aeroespacial, automotiva, petroquímica e biomédica (Rahman, Wang e Wong, 2006). Frente a outros materiais comumente utilizados pela indústria aeroespacial, elas apresentam em média, resistência mecânica comparável à dos aços, com cerca de metade de sua densidade. Assim, uma estrutura feita de titânio comparada com uma estrutura idêntica feita de aço (mesmo volume) tem perto do dobro de resistência mecânica desta última. Comparadas com as ligas de alumínio, as de titânio apresentam resistência mecânica cerca de quatro vezes maior, com densidade apenas 50% superior. Outras vantagens dessa liga sobre estes materiais relacionam-se à maior resistência à corrosão e menor perda de propriedades em temperaturas de trabalho elevadas (BOYER, 1996).

Na tabela 3 observa-se as propriedades das ligas de titânio mais usuais como titânio comercialmente puro Gr4 (TiC.P. Gr4), utilizado na área médica/odontológica, e a liga Ti6Al4V usada nas demais áreas onde o titânio se aplica. Na mesma tabela pode-se comparar as propriedades destes 2 materiais com as propriedades do aço e do alumínio também.

| <b>Características dos materiais</b>   | <b>Ti C.P. Gr 4</b> | <b>Liga Ti6Al4V</b> | <b>Aço</b>  | <b>Alumínio</b> |
|--|---------------------|---------------------|-------------|-----------------|
| <b>Norma</b>                           | ASTM F67<br>Gr4     | ASTM F136<br>Gr5    | ASTM<br>A36 | ASTM<br>B221    |
| <b>Densidade (g/cm<sup>3</sup>)</b>    | 4,51                | 4,43                | 7,86        | 2,71            |
| <b>Temperatura de fusão (°C)</b>       | 1668                | 1678                | 1410        | 660             |
| <b>Módulo de elasticidade (GPa)</b>    | 105                 | 114                 | 210         | 70              |
| <b>Lim de escoamento (MPa)</b>         | 683                 | 914                 | 500         | 500             |
| <b>Lim de resist a tração (MPa)</b>    | 790                 | 1041                | 600         | 550             |
| <b>Alongamento (%)</b>                 | 26                  | 19                  | 15          | 11              |
| <b>Calor espec. 20-100 °C (J/kg.K)</b> | 520                 | 580                 | 486         | 921             |
| <b>Condut. térmica (W/m.K)</b>         | 21,9                | 7,3                 | 51          | 237             |
| <b>Dureza (HB)</b>                     | 260                 | 312                 | 200         | 140             |

Tabela 3 - Comparação de propriedades

Fonte: Autor, adaptado de Almeida, 2017

### 2.1.3 Titânio utilizado em implantes dentários

Segundo Abdel-Hady, Hinoshita e Morinaga (2006) para que um material metálico seja utilizado como implante é necessário reduzido módulo de elasticidade e elevada resistência mecânica.

Já o autor Brien WJ (1997) diz que para um implante ter sucesso é necessário que se satisfaça diversos fatores, conforme figura 4, pois o material que será utilizado estará constantemente submetido a esforços mecânicos, térmicos e à agressividade do meio hospedeiro.

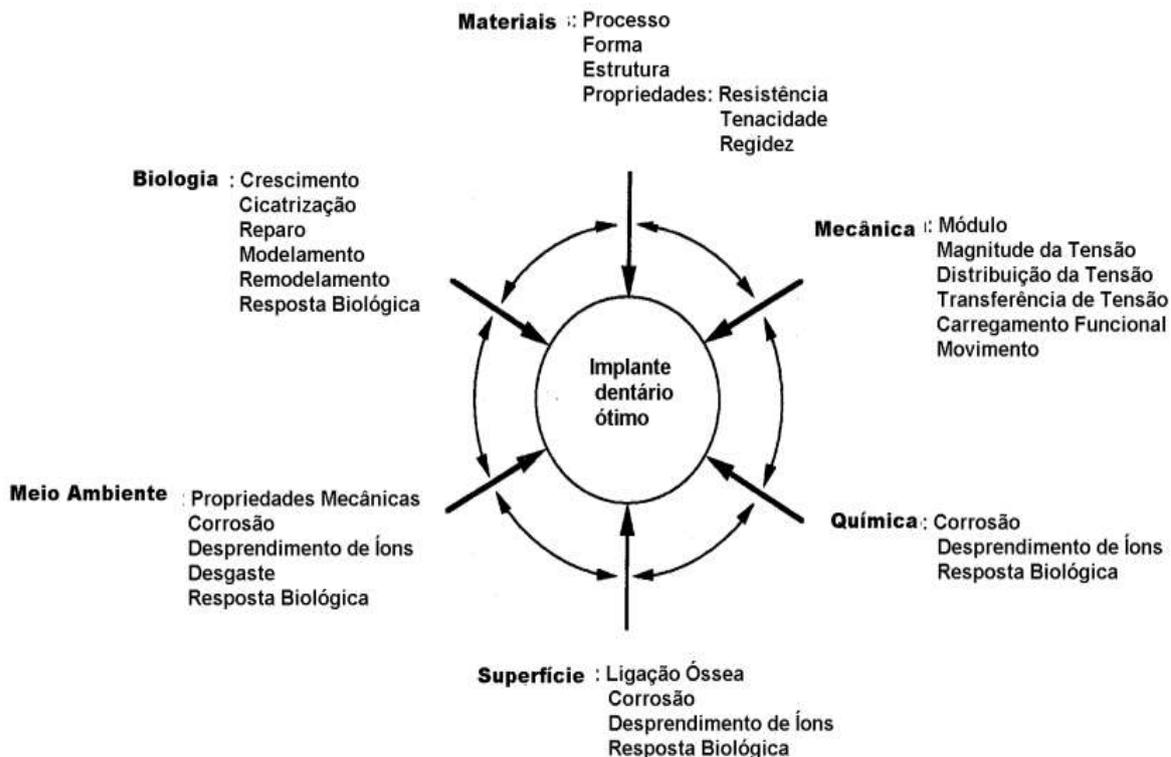


Figura 4 - Fatores de referência para implante dentário

Fonte: O BRIEN WJ. Dental materials and their selection. Chicago, Quintessence Publishing, 1997

Logo após a descoberta da osseointegração, iniciaram-se a confecção de implantes com equivalência de tamanho, formato e composição para esta aplicação, sempre buscando características mais similares possíveis ao osso humano. Porém o acabamento superficial do implante varia significativamente de acordo com as técnicas de acabamento e tratamento de superfície utilizadas pelos fabricantes, o que altera substancialmente o processo de osseointegração. Dessa forma, os resultados de pesquisas e experiências clínicas de um sistema de implantes não podem ser considerados e repetidos tão somente pelas semelhanças. Textura da superfície, composição, descontaminação de superfície, entre outros fatores, influem no bom desempenho dos implantes. (TEIXEIRA, 2001)

A rugosidade deve ser controlada, após a usinagem, através de diversos tratamentos, pois as células necessitam de pontos de ancoragem na superfície dos implantes, para iniciar a proliferação e constituir a biofixação dos implantes. Se as rugosidades forem muito menores que o tamanho das células, não existirão sítios de biofixação adequados. Em contra partida, se a superfície apresentar grandes picos ou vales, mas se estes possuírem superfícies lisas, as células poderão também não encontrar sítios de biofixação adequados. (Teixeira, 2001)

Devido à presença de micro ranhuras superficiais resultantes do processo de corte ou usinagem, a peça não exibe características de completa lisura superficial. As ranhuras superficiais são consideradas de extrema importância para o processo de adesão celular e produção de matriz proteica. Os implantes dentários usinados têm um valor médio de rugosidade de superfície (Ra) entre 0,53 e 0,96 $\mu$ m. (TEIXEIRA, 2001) A figura 5 mostra a superfície ampliada de uma peça de titânio com acabamento superficial usinado e rugosidade conforme citada, o que é considerada boa para o produto e sua aplicação.

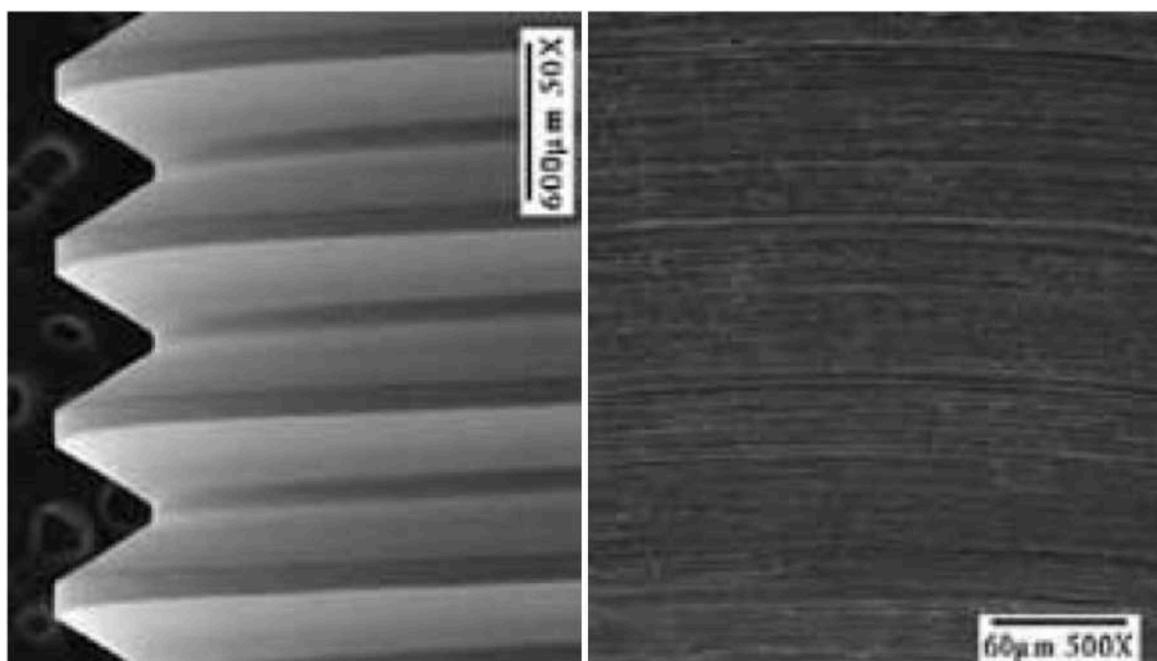


Figura 5 - Implante Odontológico usinado: a) Usinado (50X) e b) Usinado (500X)

Fonte: Silva, Julio - 2006

A osseointegração se dá com maior sucesso devido aos tratamentos de superfícies que são dados após a usinagem. Este processo de tratamento da superfície é complexo. Existem diversas opções e tipos de tratamentos, e alguns até em segredo de fabricantes, que não serão tratados em detalhes neste trabalho. A rugosidade do implante deve ser controlada no processo de usinagem a fim de controlar o processo como um todo e atingir a superfície desejada após os tratamentos superficiais submetidos e demais processos de fabricação do implante.

## 2.2 Usinagem de titânio e suas ligas

### 2.2.1 Usinabilidade do titânio comercialmente puro e suas ligas

Segundo Diniz et al. (2003), usinabilidade pode ser definida como uma grandeza tecnológica que expressa, por meio de um valor numérico comparativo, o índice de usinabilidade, um conjunto de propriedades de usinagem de um material em relação a outro tomado como padrão. A usinabilidade de um material está associada com pelo menos um dos seguintes fatores: a vida da ferramenta de usinagem, a taxa máxima de remoção de material, os esforços de corte, o acabamento superficial e as características do cavaco.

Já Stemmer (1995) define usinabilidade como a propriedade dos materiais de se deixarem trabalhar com ferramentas de corte. Explica que materiais de difícil usinagem oferecem problemas tais como desgaste rápido ou superaquecimento da ferramenta, “empastamento” ou “engate” da ferramenta pelo material da peça, “lascamento” da aresta cortante, mau acabamento da superfície usinada, necessidade de grandes forças ou potências de corte etc.

Especificamente ao abordar a usinabilidade das ligas titânio, Machado et al. (2009) explicam que, quando ligado ao alumínio (Al), manganês (Mn), estanho (Sn) ou vanádio (V), o titânio forma ligas de baixa densidade com excelente resistência mecânica e à corrosão, o que dificulta sua usinagem. A elevada temperatura gerada na usinagem destas ligas é a principal razão para o desgaste acelerado das ferramentas (curto tempo de vida), além de haver perigo de combustão durante a operação de corte. Sendo assim, são geralmente recomendadas velocidades de corte reduzidas no sentido de limitar as temperaturas de corte associadas à usinagem destas ligas, porém favorecendo a formação de aresta postiça de corte.

Rahman et al. (2003), ao analisarem a liga mais aplicada atualmente na indústria aeroespacial (Ti-6Al-4V), descobriram que sua usinabilidade é dificultada por sua alta reatividade química com o material da ferramenta e sua baixa condutividade térmica (aproximadamente 7,3 W/m.K), gerando alta temperatura entre cavaco, ferramenta e peça, favorecendo assim os mecanismos de difusão. Também se percebe que, devido à baixa condutividade térmica, da totalidade do calor gerado no processo, cerca de 80% é retido pela

ferramenta e 20% no cavaco, sendo que o tipo do cavaco gerado na usinagem desta liga é sempre segmentado independente das condições de corte.

De acordo com Machado e Wallbank (1990), os principais fatores que contribuem para a baixa usinabilidade apresentada pelas ligas de titânio são:

- A alta resistência mecânica, que se mantém mesmo nas temperaturas elevadas geradas pela usinagem, dificulta a deformação plástica necessária para a formação do cavaco.
- A pequena espessura do cavaco depois de deformado, conseqüentemente com uma área de contato pequena com a ferramenta, causa altas tensões na superfície da ferramenta (geralmente ocorre quando a ferramenta não é positiva).
- O alto coeficiente de atrito entre o cavaco e a superfície da ferramenta.
- A alta reatividade química que o titânio apresenta com quase todos os materiais de ferramentas nas temperaturas de corte ( $> 500^{\circ}\text{C}$ ).
- O processo de cisalhamento termoplástico adiabático na formação do cavaco de titânio – o baixo calor específico volumétrico do titânio (devido a sua baixa densidade) e a pequena área de contato com a presença de uma zona de fluxo bastante estreita entre o cavaco e a ferramenta (aproximadamente  $8\mu\text{m}$  comparados com  $50\mu\text{m}$  no corte de aço sob as mesmas condições) causam temperaturas de até  $1100^{\circ}\text{C}$  na ponta da ferramenta.
- A possibilidade de ocorrência de aresta postiça de corte (APC) em baixas velocidades de corte, levando a uma diminuição da qualidade do acabamento superficial.
- O baixo módulo de elasticidade implica em grandes deflexões da peça durante a usinagem, aumentando a vibração e o atrito, prejudicando o acabamento
- A tendência que o titânio apresenta de entrar em ignição, devido a sua alta reatividade e às elevadas temperaturas envolvidas no processo.
- Alta taxa de encruamento.

A capacidade de manter excelentes propriedades mecânicas em temperaturas elevadas é um dos principais motivos que justificam a utilização das ligas de titânio pela indústria aeroespacial. No entanto, é também uma característica altamente nociva em termos de usinabilidade, pois dificulta a deformação plástica necessária para a formação do cavaco (MACHADO e WALLBANK, 1990).

Devido às suas propriedades térmicas, especialmente sua baixa condutividade, o titânio apresenta cavacos tipicamente segmentados (*saw-tooth*), formados por bandas estreitas de material intensamente cisalhado separadas por bandas mais largas de material pouco cisalhado, como mostrado na figura 6. Essas camadas intensamente cisalhadas são denominadas bandas de cisalhamento termoplástico, ou bandas de cisalhamento adiabático (TRENT e WRIGHT, 2000)

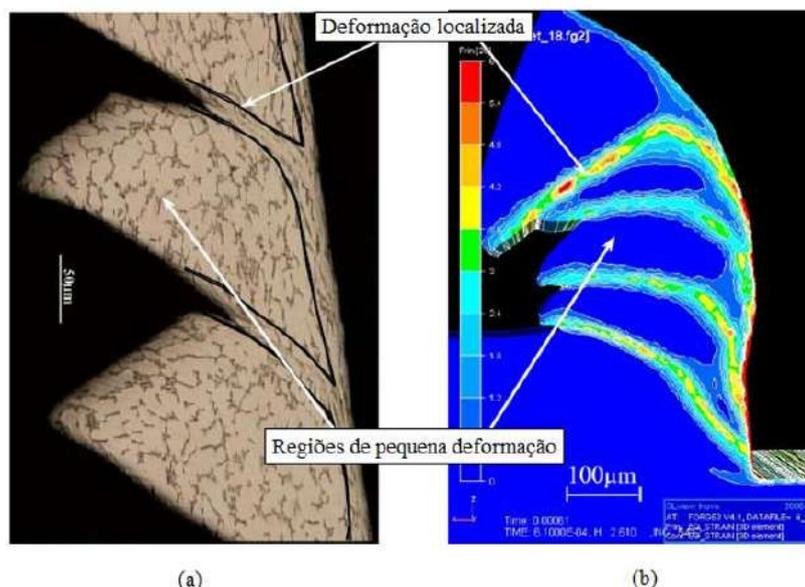


Figura 6 - Bandas de cisalhamento termoplástico em um cavaco da liga Ti-6Al-4V: (a) obtido experimentalmente e (b) obtido por simulação numérica

Fonte: Adaptado de CALAMAZ et al, 2011

Segundo Bayoumi e Xie (1995), o cisalhamento no corte de metais ocorre nas zonas de cisalhamento primária e secundária, como mostrado na figura 7. A maior parte da deformação do material da peça durante a usinagem ocorre na zona de deformação (cisalhamento) primária. A porção de material na ponta da ferramenta e na sua superfície de saída (região OC) na figura 7 está sujeita a altas tensões compressivas, que podem superar o valor de resistência mecânica do material e causar algum tipo de instabilidade plástica na peça. O cisalhamento se inicia aproximadamente ao longo da linha AO e o processo de cisalhamento na zona de cisalhamento primária termina aproximadamente ao longo da linha OB. Além disso, a deformação em cisalhamento aumenta gradualmente enquanto o material escoar pela zona de deformação primária (BAYOUMI e XIE, 1995).

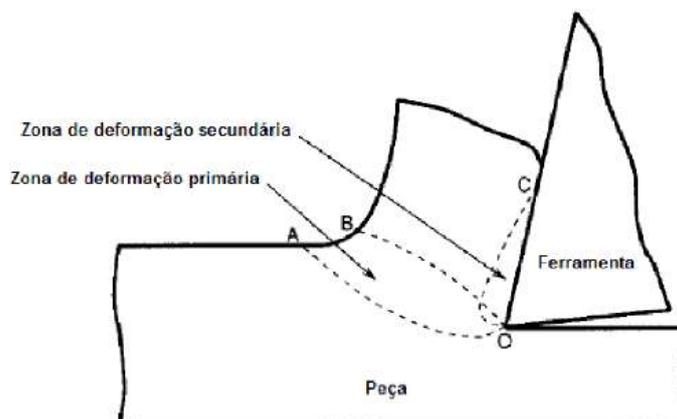


Figura 7 - Zonas de deformação primária e secundária na usinagem

Fonte: Adaptado de BAYOUMI e XIE, 1995

A teoria de cisalhamento adiabático sugere que a instabilidade termoplástica catastrófica é a causa principal da formação do cavaco segmentado. Essa instabilidade ocorre quando a diminuição da resistência ao cisalhamento do material devido ao calor gerado associada com um aumento da deformação é maior que o aumento da resistência mecânica devido ao encruamento (SHAW, 2004).

Quando as forças geradas pelo processo de corte excedem o limite de escoamento do material da peça, o cisalhamento começa a ocorrer em um plano particular. A energia associada à deformação do material é convertida em calor, causando altas temperaturas de forma concentrada, devido às propriedades térmicas do material. Essas altas temperaturas causam um amolecimento localizado do material, gerando um plano de deslizamento, de maneira semelhante ao que ocorre na formação de cavacos contínuos. Com o prosseguimento da deformação, ocorre uma rotação no plano de cisalhamento, que começa a se afastar da ponta da ferramenta e a se movimentar sobre a superfície de saída. Essa rotação persiste até que o aumento da força, provocada pela rotação, exceda a força necessária para deformar um material em temperatura menor, em outro plano mais favorável (MACHADO et al., 2009).

Segundo Komanduri e Hou (2002), além da instabilidade termoplástica (encruamento x diminuição da resistência ao cisalhamento devido ao calor), existem outros mecanismos que podem gerar redução da resistência ao cisalhamento do material na banda de cisalhamento sem o efeito do calor como, por exemplo, a geração de micro-trincas na banda de cisalhamento e uma redução na área real sujeita a tensão.

O tipo do cavaco formado também tem influência na usinabilidade, bem como no acabamento da superfície usinada, isso pode ocorrer devido a formação de cavacos segmentados na usinagem do Ti, os quais apresentam-se na forma macroscopicamente contínua e que consistem em estreitas bandas de material altamente deformadas entre segmentos com pouca ou quase nenhuma deformação. Esse tipo de cavaco é formado quando as altas temperaturas geradas em função da deformação proveniente da usinagem, aliadas à baixa condutividade térmica do titânio, provocam amolecimento térmico localizado que diminui a resistência mecânica do material. Com isso, são formadas bandas de cisalhamento adiabáticas (ASB) com resistência menor que o material ao seu redor, o que leva a deformações localizadas e à morfologia característica desse tipo de cavaco. A ocorrência de ASB pode causar grandes variações nas forças de corte e induzir vibração auto-excitada, o que provoca problemas de usinagem e prejuízo à qualidade da superfície usinada (MACHADO et al., 2015; STEPHENSON e , 2016).

Para alguns materiais, como as ligas de titânio, o cisalhamento adiabático ocorre em baixas velocidades de corte. Portanto, para as velocidades de corte convencionalmente utilizadas na usinagem do titânio, o cavaco é predominantemente segmentado. Para outros materiais, a velocidade de corte necessária para que ocorra cisalhamento adiabático é muito maior (KOMANDURI e HOU, 2002). De acordo com Sun, Brandt e Dargusch (2009), o cisalhamento adiabático resulta em uma variação cíclica das forças com uma significativa variação da magnitude, causando vibração. Essa vibração gerada pelo processo de corte limita a taxa de remoção de material e tem um papel importante na redução da vida da ferramenta.

As ligas de titânio apresentam módulo de elasticidade relativamente baixo quando comparadas com outros metais que possuem alta resistência mecânica. Segundo Boyer, Welsch e Collings (1994) a liga Ti-6Al-4V pode ser encontrada com uma ampla faixa de módulos de elasticidade, variando de 100 a 130 GPa (aproximadamente metade do valor de aços comuns). Esse baixo módulo de elasticidade pode causar vibrações auto-excitadas (*chatter vibrations*), além de problemas de deflexão da peça e aumento do atrito (MACHADO e WALLBANK, 1990). As forças na direção perpendicular à peça podem aumentar de três a quatro vezes devido à aderência do titânio na superfície desgastada da ferramenta. Isso, aliado ao baixo módulo de elasticidade do titânio, pode causar a deflexão da peça (YANG e LIU, 1999). Segundo Ezugwu e Wang (1997), o baixo módulo de elasticidade das ligas de titânio proporciona maiores variações na espessura do cavaco, decorrentes da deflexão da peça, gerando altos níveis de vibrações auto-excitadas, podendo

causar micro-lascamento da aresta de corte e quebra prematura da ferramenta. Com isso, é gerado o “efeito mola”, ou seja, com o baixo módulo de elasticidade e alta resistência mecânica, é necessária uma grande força para a remoção do cavaco, e essa força vai deformar elasticamente a porção de material da superfície da peça que será removido. Seguindo a usinagem para próximo passo de avanço, essa porção de material cortada no passo anterior tem recuperação elástica, e essa recuperação elástica não é precisa, fazendo com que a espessura de cavaco a ser removida no próximo passo seja variável, o que gera vibração.

Devido ao baixo módulo de elasticidade do titânio, o “efeito mola” é mais acentuado neste material do que nos aços. A peça de titânio apresenta a tendência de se afastar da ferramenta de corte, a não ser que se mantenham cortes pesados ou que um apoio adequado seja utilizado. Cavacos menos espessos tendem a se dobrar sob as pressões utilizadas na ferramenta causando vibrações, fricção com a ferramenta e problemas relacionados com tolerâncias dimensionais. Por conseguinte, a rigidez do sistema completo é muito importante, assim como o uso de ferramentas afiadas e com formato apropriado (INFONET, 2010)

Outra característica importante da usinagem de titânio é o alto coeficiente de atrito entre o cavaco e a superfície da ferramenta. Segundo Shaw (2004), a alta tendência que o titânio apresenta de formar uma camada de óxido sobre sua superfície e a dificuldade que os lubrificantes apresentam em absorver ou reagir com essa superfície oxidada torna as ligas de titânio bastante difíceis de serem lubrificadas, o que proporciona um alto coeficiente de atrito, aumentando a geração de calor. As ligas de titânio exibem também uma forte tendência a reagirem quimicamente com todos os materiais para ferramentas de usinagem conhecidos, especialmente sobre a aresta de corte, onde altíssimas temperaturas são geradas. Este cenário propicia a ocorrência de adesão de material da peça e arrancamento de partículas da ferramenta (*attrition*), acompanhados de desgaste acelerado, geralmente acompanhado por um mecanismo difusivo, ou quebra da aresta (RAHMAN, WONG e ZAREENA, 2003).

Comparadas com a usinagem de aço ou mesmo de cobre, as forças de corte e a potência consumida durante a usinagem de ligas de titânio são consideravelmente menores (TRENT e WRIGHT, 2000). Contudo, ocorrem altas tensões mecânicas próximas à aresta de corte, principalmente devido à pequena área de contato entre o cavaco e a ferramenta (cerca de 1/3 da área de contato quando se usina aço nas mesmas condições de corte), decorrente da segmentação do cavaco no processo de cisalhamento adiabático e também devido à elevada resistência mecânica que as ligas de titânio apresentam em altas temperaturas (EZUGWU e WANG, 1997).

Outro problema é a alta taxa de encruamento do titânio, que faz com que a dureza da superfície seja mais alta que a peça, ou seja, durante a usinagem, o material da peça sofre cargas térmicas, mecânicas e químicas, que podem ocasionar endurecimento por deformação a frio. (ULUTAN e OZEL, 2011).

Durante a usinagem, as altas taxas de encruamento proporcionam maiores esforços de corte. A alta resistência mecânica, alta ductilidade e a baixa condutividade térmica incentivam diversos mecanismos de desgaste da ferramenta como difusão, abrasão, aderência “*attrition*”, aresta postiça de corte e desgaste de entalhe gerado pela rebarba encruada, o que faz com que se tenham vidas mais curtas de ferramentas comparando-se à usinagem de aços comuns (KORKUT, 2004).

Como alta taxa de encruamento é também uma das propriedades deste tipo de material, esta rebarba encruada gerada no fim da profundidade de corte é bastante dura e cria um efeito de sulcamento nesta região da ferramenta, gerando grande desgaste de entalhe (BIERMANN, HEILMANN, 2009).

O desgaste do tipo entalhe, no fim do contato da ferramenta com a peça (fim da profundidade de usinagem), também ocorre devido à oxidação, causada pela diferença de temperaturas entre a região da ferramenta em contato com a peça e a região vizinha, fora do corte e também causada pelo contato com as rebarbas do corte altamente encruadas.

Ângulos de posição pequenos são preferíveis para evitar o desgaste tipo entalhe e a formação de rebarbas, pois essas ferramentas aumentam o comprimento de contato entre ferramenta e peça, melhorando a distribuição de calor e dos esforços. (SANDVIK COROMANT, 2010).

Devido à alta resistência mecânica e à baixa condutividade térmica do titânio, as ferramentas aquecem muito durante o processo de torneamento, o que impossibilita o corte a seco, pois a alta temperatura envolvida no processo pode inclusive ocasionar incidentes com fogo. Portanto, deve-se utilizar fluidos de corte no processo de usinagem de titânio. Segundo Deonísio (1996), na usinagem das ligas de titânio a aplicação do fluido de corte é utilizada para incrementar a vida da ferramenta, melhorar o acabamento superficial, minimizar a ocorrência de pontos de solda entre a peça e a ferramenta e reduzir a tensão residual da peça.

### 2.2.2 Melhores práticas para a usinagem de titânio

A formação do cavaco e o mecanismo do cisalhamento adiabático, visto anteriormente neste trabalho, são dependentes das condições de corte e propriedades do material da peça. Sobre esses aspectos, Li e Xu, 2017, compararam a morfologia dos cavacos de titânio comercialmente puro grau 2 (Ti-CP Gr. 2 – usado na fabricação de implantes) e Ti-6Al-4V sob velocidades de corte ( $v_c$ ) entre 34,5 m/min e 141,37 m/min. Eles concluíram que os cavacos de Ti-CP Gr. 2 são aproximadamente contínuos e que não há ocorrência aparente de cisalhamento adiabático, ao passo que os cavacos de Ti-6Al-4V são segmentados (Figura 8). Esses autores atestaram que a presença de impurezas na liga Ti-6Al-4V faz com que ela tenha, aproximadamente, uma resistência mecânica 2 vezes maior e uma condutividade térmica 2,8 vezes menor do que o Ti-CP Gr. 2, o que influencia sobremaneira na morfologia do cavaco. A maior condutividade térmica do Ti-CP Gr. 2 facilitaria a dissipação do calor gerado, de modo que a temperatura necessária ao amolecimento térmico do material não fosse atingida e não haveria a ocorrência de ASB, formando cavaco contínuo. No entanto, Gu, 2018, atestou a formação de cavaco em fita somente para pequenas velocidades de corte ( $v_c$ ) e avanços ( $f$ ) no torneamento de Ti-CP Gr. 2, ao passo que o aumento desses parâmetros promove a formação de cavacos segmentados, podendo, inclusive, provocar a separação de cada segmento do cavaco se a  $v_c$  for extremamente elevada (acima de 160 m/min), como mostrado na Figura 9.

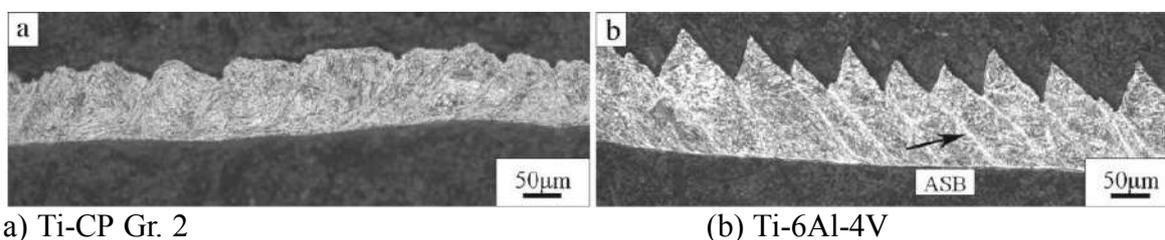


Figura 8 - Morfologia dos cavacos de Ti para as mesmas condições de corte ( $V_c=87,96\text{m/min}$  ;  $f=0,2\text{mm/rev}$  ;  $a_p=0,2\text{mm}$ )

Fonte: Li e Xu, 2017

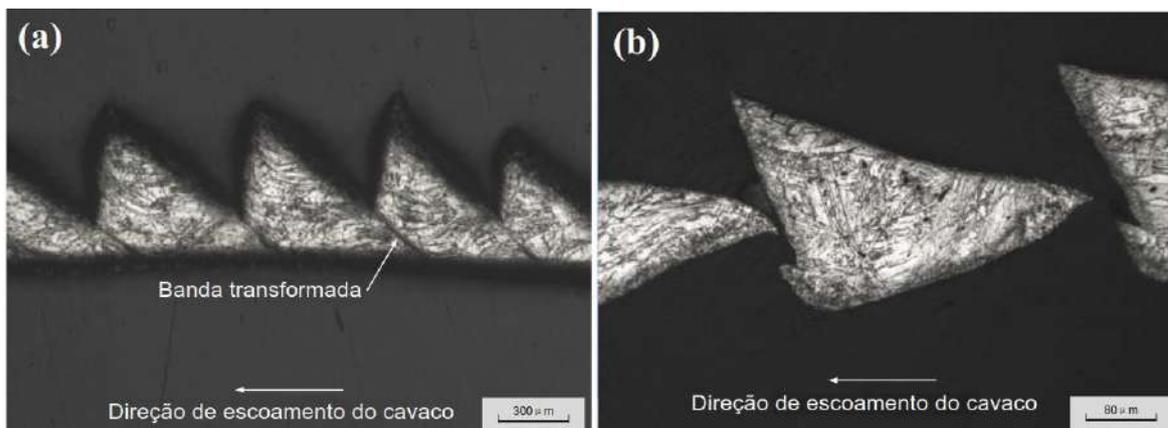


Figura 9 - Cavacos segmentados na usinagem de Ti-Cp Gr.2

Fonte: adaptado de Gu 2018

Para minimizar as dificuldades mencionadas, as pesquisas sobre usinagem de titânio foram direcionadas em quatro tópicos de interesse: (1) desenvolvimento de novos materiais de ferramenta; (2) melhoramento dos projetos de ferramentas existentes; (3) condução de estudos extensivos de usinabilidade visando verificar as combinações apropriadas de ferramentas, máquinas e parâmetros de corte e; (4) desenvolvimento e implementação de processos de usinagem híbridos avançados (NIKMANet al., 2014). A abordagem tradicional da usinagem de titânio sugere algumas recomendações gerais para um processo de fabricação bem-sucedido (DONACHIE Jr., 2000; PETERS e LEYENS, 2003a; STEPHENSON, 2016):

- a peça deve ser tão curta quanto possível e as máquinas e dispositivos de fixação devem ser rígidos para tornar o corte estável, minimizando vibrações;
- ferramentas afiadas devem ser utilizadas e substituídas nos primeiros sinais de desgaste, pois sua falha acontece rapidamente após o desgaste inicial;
- é necessária a aplicação de grandes quantidades de fluido de corte para promover a dissipação do calor produzido na usinagem;
- baixa velocidade de corte ( $v_c$ ) deve ser usada para controlar as temperaturas geradas e maximizar a vida da ferramenta;
- alto avanço ( $f$ ) deve ser utilizado, pois a temperatura de usinagem é menos afetada pelo  $f$  do que pela  $v_c$ . Além disso, conforme Ezugwu e Wang, (1997), maior  $f$  proporciona aumento de produtividade, o que compensaria um pouco a diminuição da  $v_c$ ;

- a profundidade de corte ( $a_p$ ) de cada passe sucessivo deve ser maior do que a profundidade da camada endurecida por deformação (encruada) do passe anterior;
- ferramentas com ângulos de saída e inclinação positivos e ângulo de folga adequado devem ser usadas, sobretudo em torneamento de acabamento, por favorecer a formação e o escoamento de cavacos e evitar a formação de aresta postiça de corte (APC).

Aliados à abordagem tradicional de usinagem, outros métodos também têm sido investigados mais recentemente no intuito de incrementar a produtividade, buscando minimizar os problemas inerentes à fabricação de peças em Ti. Dentre eles, destacam-se o emprego de *kit* de análise de vibração; usinagem termicamente assistida; uso de meios de refrigeração alternativos, como refrigeração em alta pressão e criogênica; uso de ferramentas e suportes com maior condutividade térmica; usinagem híbrida (combina várias técnicas em uma mesma operação); e adoção de operações que visam eliminar ou minimizar problemas decorrentes de deflexão da peça ou tensões residuais provenientes da usinagem (PRAMANIK e LITTLEFAIR, 2015).

Mesmo com a adoção de estratégias avançadas, a seleção apropriada dos parâmetros de corte na usinagem com ferramentas de geometria definida é um dos pontos fundamentais para o sucesso na operação de corte do titânio. Como já mencionado, a abordagem tradicional de fabricação recomenda a adoção de baixas  $v_c$  e altos  $f$  e  $a_p$ , visando aliar um aumento de produtividade com a mitigação dos problemas decorrentes das propriedades do material.

Está consolidado na literatura que o aumento da  $v_c$  tem efeito pronunciado na redução da vida útil da ferramenta, pois é o principal parâmetro responsável pelo aumento de temperatura na região de formação dos cavacos, o que acelera os mecanismos de desgaste. Essa é a razão pela qual a curva de vida de uma ferramenta é expressa em termos da velocidade de corte (MACHADO et al., 2015; VEIGA et al., 2013). Além disso, a baixa condutividade térmica do Ti faz com que a temperatura da usinagem não seja eficientemente dissipada pelo cavaco, ficando concentrada na ferramenta e favorecendo ainda mais sua deterioração. Por outro lado,  $v_c$  baixas e intermediárias podem favorecer a ocorrência de aresta postiça de corte (APC), na qual uma porção do cavaco se une à ferramenta por meio de ligações químicas devido à deformação e encruamento do material durante a usinagem. O material da peça adere à superfície de saída da ferramenta, o que tem efeito prejudicial ao acabamento da peça. Sabemos também que há um determinado valor de velocidade de corte em que a temperatura de corte aumenta ao ponto em que a APC é eliminada, pois a

temperatura de recristalização do cavaco é ultrapassada e não há mais encruamento (Diniz et al., 2014).

Em termos de acabamento de peça de titânio torneada, a seleção das condições de corte pode vir de encontro ao preconizado pelo ponto de vista da produtividade. Alguns estudos (que serão citados posteriormente) demonstraram que a adoção de níveis mais altos de  $v_c$  pode melhorar o acabamento, assim como menores valores de avanço ( $f$ ) e profundidade de corte ( $a_p$ ) tendem a proporcionar uma rugosidade mais baixa em detrimento da maior taxa de remoção de material. Por outro lado, conforme Diniz et al., 2014, a diminuição de  $f$  reduz a espessura do cavaco, tornando-o mais flexível (dúctil), o que dificulta sua quebra, teoria esta geralmente observada quando é gerado cavacos contínuos). Isso pode gerar cavacos longos com tendência a enrolar na peça, danificando o acabamento da superfície usinada e, em alguns casos, causando a quebra da ferramenta. Isso é mais problemático em materiais como o titânio. Além disso, para um dado raio de ponta de ferramenta ( $r_\epsilon$ ), uma menor  $a_p$  faz com que o cavaco seja dobrado lateralmente, com grande ângulo de fluxo, o que também dificulta a sua quebra. Outrossim, conforme Sandvik, 2017, a força radial exercida sobre a peça (força passiva) aumenta quando  $r_\epsilon$  é maior que  $a_p$ , podendo causar vibração que compromete o acabamento. Dessa forma, a seleção dos parâmetros de corte requer um estudo criterioso para que proporcione as melhores condições de usinagem conforme os resultados desejados.

## **2.3 Ferramentas de usinagem**

### **2.3.1 – Ferramentas para a usinagem de titânio**

Segundo Pervaiz et al., 2014, o material da ferramenta de corte é o parâmetro mais básico que influencia a usinabilidade, não sendo possível conduzir eficientemente um processo de usinagem se o mesmo não for apropriado, mesmo que outros fatores sejam cuidadosamente monitorados. Para Machado et al., 2015, as principais propriedades desejáveis em uma ferramenta de corte são:

- alta dureza;
- tenacidade suficiente para evitar falha por fratura;
- alta resistência ao desgaste abrasivo;
- alta resistência à compressão;
- alta resistência ao cisalhamento;
- boas propriedades térmicas e mecânicas em temperaturas elevadas;
- alta resistência ao choque térmico;
- alta resistência ao impacto;
- baixa afinidade química.

Tendo em vista os motivos que promovem a baixa usinabilidade das ligas de Ti, Gupta e Laubscher (2016), afirmam que as propriedades mais importantes na escolha de uma ferramenta para o processamento desse material são: alta dureza a quente, alta condutividade térmica (para minimizar os gradientes e choques térmicos), baixa afinidade química com o titânio e alta resistência compressiva e ao cisalhamento.

Levando em consideração essas propriedades, os materiais de ferramentas mais comumente utilizados na usinagem de Ti são diamante sintético policristalino (PCD), nitreto de boro cúbico (CBN) e metal-duro revestido e não revestido (GUPTA e LAUBSCHER, 2016; PRAMANIK, 2013).

O uso de ferramentas de corte de metal duro mostrou resultados não muito satisfatórios porque, devido ao fato do titânio ser um péssimo condutor de calor, altas temperaturas se concentravam muito próximas à aresta de corte, ocorrendo altas deformações plásticas levando à fratura prematura das ferramentas de corte (NABHANI, 2001).

Ferramentas de cerâmica não são comumente usadas, pois na usinagem das ligas de titânio, este material apresenta baixo desempenho devido a altas taxas de desgaste por causa de sua alta reatividade química com este tipo de liga (EZUGWU et al., 2003).

Por estas razões, a usinagem de titânio requer ferramentas com características de alta dureza, resistência ao desgaste, dureza e resistência a quente e alta condutividade térmica (RAHMAN, WONG & ZAREENA, 2003; NARUTAKI & MURAKOSHI, 1983).

Ferramentas de metal-duro são as mais amplamente utilizadas para a usinagem do titânio por possuírem boa combinação de dureza e tenacidade. Ferramentas de CBN são adequadas para usinagem de Ti devido à alta dureza a quente, mas são vulneráveis à quebra e lascamento devido a sua extrema dureza, o que deixa sua aplicação restrita a operações

de acabamento. Além disso, esse material é reativo ao Ti, o que favorece o mecanismo de difusão. Ferramentas de diamante apresentam baixo desgaste na usinagem, mas são altamente reativas quando a temperatura excede 700°C e seu custo muito elevado é um limitante para sua ampla utilização. Ferramentas de cerâmica e de aço-rápido são pouco utilizadas devido à fragilidade da primeira e à baixa dureza a quente da segunda (HOSSEINI e KISHAWY, 2014; PERVAIZ et al., 2014).

O metal duro é um produto da metalurgia do pó que consiste basicamente de partículas de carbonetos de tungstênio (WC) aglutinadas com um ligante rico em cobalto (Co), podendo haver a adição de outros elementos, como carbonetos de titânio, tântalo e nióbio. O tamanho de grão do WC e a quantidade de Co do ligante são os parâmetros mais importantes de ajuste da relação dureza/tenacidade de uma classe. O aumento do teor de Co e a diminuição do tamanho de grão de WC contribuem para aumentar a tenacidade do substrato. O refino do grão também contribui para a melhora das propriedades da ferramenta (incrementando sua dureza a quente), redução da condutividade térmica e aumento da resistência da cunha de corte, além de proporcionar menor tendência à aderência em comparação às ferramentas com grãos convencionais. Assim, ferramentas de metal duro de grãos finos são utilizadas para aplicações que requerem alta dureza a quente e alta resistência a microlascamentos, como é o caso da usinagem de aços inoxidáveis, superligas e titânio (DINIZ et al., 2014; MACHADO et al., 2015; ROSA, 2017).

Outro aspecto importante no torneamento de Ti refere-se à geometria da ferramenta de corte. Acerca disso, uma das práticas comuns para incrementar a vida da ferramenta é tornar o ângulo de saída ( $\gamma_o$ ) mais positivo para reduzir a área da ferramenta ocupada pelo cavaco, deformando menos o próprio cavaco e conseqüentemente facilitando o corte, diminuindo a força de trabalho durante a usinagem e minimizando assim a temperatura do processo (GUPTA e LAUBSCHER, 2016). Adicionalmente, há uma tendência de diminuição das forças de atrito, forças de corte e da adesão do material da peça na ferramenta (presença de APC), já que um aumento de  $\gamma_o$  aumenta o ângulo de cisalhamento do cavaco, o que reduz sua espessura e facilita o escoamento do mesmo. Isso reduz as forças de corte e tensões na ponta do inserto, ocasionando menor vibração. Tais conseqüências também apresentam efeito benéfico na melhoria da rugosidade, tendo em vista que menores vibrações, forças de corte e desgaste da ferramenta contribuem para uma melhor qualidade da superfície usinada (NOUARI e MAKICH, 2014; STEPHENSON e , 2016). Além disso, durante a usinagem pode haver fluxo lateral, em que uma porção do material à frente da

ferramenta é comprimida entre aresta de corte e a própria peça, escoando de frente à superfície de folga da ferramenta. Parte desse material se recupera elasticamente e outra porção sofre deformação permanente sem, contudo, se separar da peça. Essa porção não removida sob a forma de cavaco fica na peça na forma de rebarbas dos sulcos formados e pode comprometer a qualidade da superfície usinada. Assim, quanto maior  $\gamma_o$ , menor é o fluxo de material na superfície da peça (MACHADO et al., 2015).

Outra característica da geometria da ferramenta que influencia a rugosidade é o raio de ponta ( $r_\epsilon$ ). De modo geral, maior  $r_\epsilon$  diminui os efeitos das marcas de avanço (diminui a rugosidade teórica), com apreciável melhora no acabamento. Contudo, um raio de ponta excessivamente alto pode induzir vibrações devido ao aumento do atrito causado pela maior área de contato e pela maior força na direção de profundidade, prejudicando a qualidade da superfície usinada. A mudança do ângulo de posição principal da ferramenta ( $\chi_r$ ) pode ter efeitos opostos na superfície da peça. Uma redução de  $\chi_r$  pode melhorar o acabamento pela diminuição das marcas de avanço, o que promove um melhor escoamento do cavaco. Por outro lado, menor  $\chi_r$  reduz a espessura do cavaco, tornando-o mais flexível e dificultando sua quebra. Isso normalmente é um problema na usinagem de materiais dúcteis, pois o cavaco pode enrolar na peça, prejudicando o acabamento. Além disso, um menor  $\chi_r$  também aumenta a força de profundidade, incentivando a vibração de peça e/ou da ferramenta (DINIZ et al., 2014; MACHADO et al., 2015).

### **2.3.2 Revestimento em ferramentas de metal duro**

A aplicação de revestimentos em ferramentas também é um método bastante utilizado para incrementar sua vida útil e aumentar seu desempenho em termos de alta produtividade, da utilização de parâmetros de corte mais agressivos ou em situações de maior exigência da ferramenta, como na usinagem a seco e em materiais de difícil corte. Entre as vantagens do uso dos revestimentos, estão o aumento da dureza da superfície e da resistência ao desgaste da ferramenta; prevenção de reações químicas entre ferramenta e peça; redução da formação de aresta postiça de corte; diminuição do atrito entre ferramenta e cavaco e/ou entre ferramenta e peça, que reduz o calor gerado; prevenção da deformação da aresta de corte devido ao aquecimento excessivo; redução da parcela de calor que flui

para a ferramenta; aumento da resistência à oxidação e corrosão; e melhoria da qualidade da superfície de peças usinadas (ASTAKHOV e DAVIM, 2008; STEPHENSON e , 2016). Os dois processos mais comuns utilizados para revestir as ferramentas são por deposição química de vapor (CVD) e deposição física de vapor (PVD), os quais podem ser aplicados em camadas únicas ou múltiplas. No processo CVD, a ferramenta é aquecida em um forno e exposta a uma atmosfera gasosa específica, cuja reação química forma a camada de revestimento. No processo PVD, o material do revestimento é vaporizado e condensa na superfície da ferramenta (SANDVIK, 2017; STEPHENSON e , 2016). A Tabela 4 apresenta as principais características de ambos os processos.

|                                    | <b>CVD – DEPOSIÇÃO QUÍMICA DE VAPOR</b>   | <b>PVD – DEPOSIÇÃO FÍSICA DE VAPOR</b>   |
|------------------------------------|---|--|
| <b>TEMPERATURA DE REVESTIMENTO</b> | ~ 1000° C   | ~ 500° C   |
| <b>TENACIDADE</b>                  | Reduzida  | Não é afetada  |
| <b>ARESTA DE CORTE</b>             | Arredondamento requerido  | Pode ser aresta viva   |
| <b>ESPESSURA DO REVESTIMENTO</b>   | Até 12µm  | Até 4µm  |
| <b>CAMADAS</b>                     | Multicamadas de TiC-TiN, TiN-TiCN-TiN, TiC-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>   | TiN-TiC-TiNAl  |
| <b>PRINCIPAIS APLICAÇÕES</b>       | Torneamento e mandrilamento   | Fresamento, roscamento, furação  |
| <b>VANTAGENS</b>                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Maior resistência ao desgaste</li> <li>-Maior resistência à craterização</li> <li>-Cobertura uniforme</li> <li>-Coberturas espessas</li> <li>-ótima aderência ao substrato</li> <li>-Resistência térmica</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>-Substitui ferramentas sem revestimento com mesma tenacidade e pouca interferência na geometria da aresta</li> <li>-Reduz APC</li> <li>-Maior tenacidade</li> </ul> |

Tabela 4 - Comparação entre camadas de cobertura depositadas pelos métodos CVD e PVD

Fonte: Adaptado de Machado et al, 2015, e Sandvik, 2014

Ao final da década de 60, pesquisadores depositaram uma fina camada de carbeto de titânio (TiC) sobre a superfície do metal duro (WC-Co), visando conjugar a tenacidade do substrato com a resistência ao desgaste e a dureza a quente do filme fino. Neste período foram experimentados vários materiais para recobrimento com resultados extremamente satisfatórios e que resultaram em um aumento da velocidade de corte e da vida da ferramenta. Atualmente os mais aplicados são o carbonitreto de titânio (TiCN), o carbeto de titânio

(TiC), o óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), e o nitreto de titânio (TiN) (Marcondes, 1990 e Diniz et. al., 2014).

O TiCN possui excelente capacidade de aderência ao substrato de metal duro e a outras camadas de revestimento e, aliada a camadas de revestimento de outros materiais com valores semelhantes de seus coeficientes de expansão térmica, proporcionam uma forte barreira à formação de trincas quando do resfriamento no processo de deposição sobre o substrato (SEMIATIN; SOPER; SHIVPURI, 1994). Estas características juntamente com uma boa tenacidade e baixa resistência ao desgaste por difusão são justificativas para o seu uso preferencial como camada intermediária do substrato e outros revestimentos.

O TiC possui propriedades bastante similares ao TiCN, diferindo basicamente por apresentar um coeficiente de atrito inferior, o que possibilita também a sua utilização como camada única de revestimento. Camada deste material é comumente utilizada como camada base (ou camada inferior) para os revestimentos de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e TiN, pois estas composições melhoram a resistência ao desgaste de cratera e de flanco (DINIZ et. al., 2014).

O  $\text{Al}_2\text{O}_3$  apresenta elevada dureza a quente e alta resistência à oxidação, conferindo à camada deste material a condição de ser a mais eficiente na resistência ao desgaste de cratera. Funciona também, como barreira às reações químicas e à difusão devido a sua estabilidade química em altas temperaturas e, por ter baixa condutividade térmica, protege a ferramenta do calor gerado no corte (GOH; 1996). Estas características explicam porque o principal uso da alumina é como camada intermediária em pastilhas de várias camadas.

A camada de TiN apresenta alta capacidade de aderência a uma grande variedade de materiais para substratos e revestimentos e apresenta excelente estabilidade química. Além disso, possui baixo coeficiente de atrito e boa tenacidade, fatores que concedem a este revestimento a condição de um dos mais utilizados industrialmente (PRENGEL et al., 1996).

Já o Nitreto de Titânio-Alumínio (TiAlN) é um revestimento derivado do TiN e obtido pelo processo PVD com temperatura menor de  $500^\circ\text{C}$ . Durante o processo de deposição, parte dos átomos de Ti é substituída por átomos de Al. Os átomos de alumínio são retidos no material (revestimento) na forma de solução sólida, causando endurecimento. A alta microdureza superficial (3.500 HV 0,05) proporciona maior resistência ao desgaste. A substituição dos átomos pode significar, também, melhora de resistência à oxidação e estabilidade química, dependendo da aplicação. Uma proporção de átomos típica é de Ti0,6 Al0,4 N. Os revestimentos com TiAlN têm se sobressaído principalmente em usinagem a

seco, mas também são aplicáveis com fluidos de corte. (KANZLER, 2009). A temperatura máxima de operação recomendada para trabalho é de 900°C. (BALZERS, 2019)

O Nitreto de Titânio-Alumínio (TiAlN) revestido por WC/C é um tipo de revestimento que tem como característica minimizar a utilização de fluidos de corte, através da aplicação de uma camada de WC/C sobre o revestimento de TiAlN, reduzindo o coeficiente de atrito (testado contra o aço a seco) de 0,4 para 0,2 e garantindo sua aplicação em processos de furação e rosqueamento. (BALZERS, 2007).

O Nitreto de Cromo-Alumínio (AlCrN) é um revestimento de alto rendimento, isento de titânio. Possui características como a elevada resistência à oxidação e dureza a quente. Estas propriedades conferem a este produto uma incomparável resistência ao desgaste, tanto em condições normais como sob esforços mecânicos elevados. As capacidades das ferramentas modernas podem assim ser melhor exploradas através da alta microdureza (3.200 HV 0,05) (KANZLER, 2009). Este é um revestimento obtido pelo processo de PVD com temperatura menor de 500°C também, cor cinza claro e a temperatura máxima de operação é de 1100°C (BALZERS, 2019)

O Nitreto de Cromo (CrN) é um excelente revestimento para usinagem de ligas de alumínio, ligas de cobre e aços de baixa liga. O CrN também pode ser utilizado como uma alternativa para as ligas de titânio e níquel. Este revestimento tem uma baixa tendência para formar arestas postiças (SANDVIK, 2014).

O Nitreto de Titânio Alumínio e Silício (Al, Ti, Si)N tem estabilidade térmica mais elevada que o (Al, Ti)N e é utilizado para o revestimento em situações em que se precisa de uma aresta de corte mais positiva. Este tipo de revestimento é empregado em usinagem de materiais endurecidos, em sua maioria no fresamento.

As temperaturas utilizadas para o revestimento de PVD são mais baixas do que a de revestimento de CVD. Portanto, durante o revestimento PVD o substrato não é danificado e a dureza do mesmo não é afetada. Como resultado, o revestimento de PVD pode ser aplicado a uma vasta gama de substratos, tais como o metal duro e cermet, assim também como em ferramentas de aço rápido (HSS) e ferramentas de metal duro soldadas (MITSUBISHI, 2006). O revestimento PVD também é frequentemente usado para brocas, fresas de topo, ferramentas de rosqueamento, etc. Isso porque o PVD pode ser realizado em ferramentas que exigem aresta de corte mais afiada sem que a mesma apresente danos e arredondamento excessivo. Os revestimentos depositados pelo processo PVD são mais finos, em geral com espessura média de 3µm.

Observa-se na figura 10 uma ferramenta com camada de revestimento PVD típica. (camada monobloco + camada superficial)

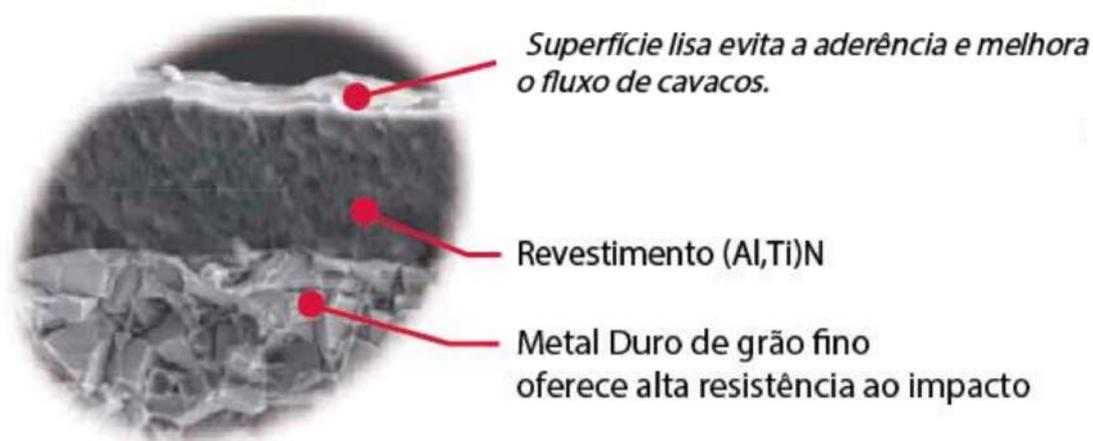


Figura 10 – Típico revestimento PVD em ferramenta de usinagem (imagem representativa sem escala)

Fonte: Tungaloy 2013

Em termos de adesão ao substrato, o revestimento fabricado por CVD oferece maior aderência das camadas com o substrato. Ao efetuar uma cobertura pelo processo CVD na fronteira entre o substrato e o revestimento (devido a uma reação química), um tipo de ligação ocorre e isso leva a uma maior adesão. No caso do processo PVD que é a deposição física, devido ao fato de se ter temperaturas mais baixas, este tipo de ligação na fronteira não ocorre e, como tal a adesão é menor.

Ao se utilizar um revestimento CVD, devido ao calor do processo na aresta de corte, podem ser gerados carbeto muito quebradiços que são precipitados ( $W_6Co_6C$ ,  $W_3Co_3C$ ). Quando isto ocorre, a aresta de corte se torna extremamente dura e quebradiça e não pode ser efetivamente utilizada. Este fenômeno recebe o nome de fase “beta”.

O próprio revestimento utilizando o processo CVD limita a obtenção de arestas de corte mais afiadas, já que a espessura da camada é maior, em média  $10\mu m$ , o que deixa a aresta de corte mais arredondada. Além disso, devido à alta temperatura do processo, é necessário que se faça uma operação de arredondamento da aresta de corte antes da operação de revestimento, a fim de minimizar a possibilidade de ocorrência de trincas na aresta.

Segundo Machado et. al., (2009), 95% do metal duro usado na indústria possui camada superficial de revestimento e a tendência é que esse número cresça cada vez mais. As ferramentas de metal duro revestidas podem apresentar várias camadas de revestimento sempre visando uma ferramenta com núcleo tenaz, resistente ao desgaste, quimicamente

estável e dura. As combinações de melhores resultados são as de TiN-TiC-TiCN-TiN e TiC-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-TiN, nas quais a espessura total do revestimento não deve ser superior a 12 µm, para que a aresta não seja fragilizada originando pequenos lascamentos nas camadas (DEGARMO et al., 1999).

A figura 11 ilustra um exemplo de ferramenta de metal duro com revestimento triplo e a figura 12 descreve de maneira simplificada as principais funções de cada camada para um exemplo de ferramenta com quatro coberturas.

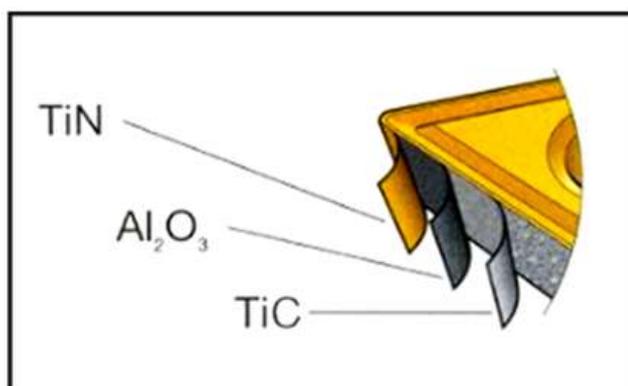


Figura 11 - Representação esquemática de uma pastilha de metal duro com revestimento triplo de TiC+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+TiN

Fonte: adaptado de <https://vacaero.com/information-resources/>

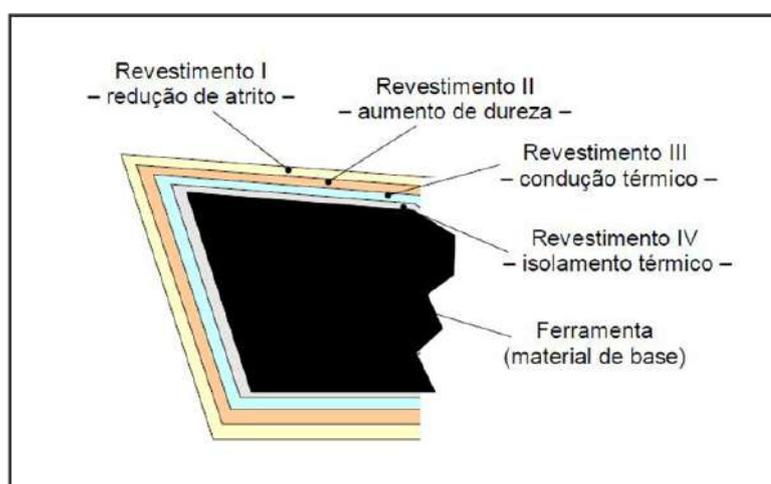


Figura 12 - Principais funções de cada camada para uma ferramenta com 4 coberturas

Fonte: adaptado de <https://vacaero.com/information-resources/>

Segundo PLATIT, 2017, as formas das estruturas das camadas aplicadas pelo processo de PVD podem variar, de acordo com cada fabricante, porém, existem alguns tipos de revestimentos facilmente encontrados por diversos fabricantes, pois possuem grande aplicabilidade na indústria.

A estrutura de monocamada, ou monobloco, pode ser encontrada com ou sem camada de adesão. A estrutura monobloco sem camada de adesão pode ser produzida pelo processo mais rápido e econômico. Todo o trabalho é feito com um único material e uma única configuração, executado durante todo o processo de deposição. Já a estrutura de camada com uma camada de adesão deve ser aplicada especialmente em situações em que se tem um alto teor de alumínio. Exemplos de camada de adesão são o TiN ou CrN.

Nas camadas de estrutura gradiente, a camada se inicia com 100% de uma composição de material e termina com 100% de outra composição. Neste caso a proporção de componentes duros (por exemplo, AlN) é aumentado continuamente, geralmente para obter a maior dureza na parte superior do revestimento.

As camadas de estruturas múltiplas, ou também chamadas de multicamadas ou “sanduíches”, têm maior tenacidade com menor dureza quando comparado com o revestimento monobloco. A estrutura multicamadas absorve as trincas pelas subcamadas e evita assim a propagação dessas trincas geradas durante o processo de aplicação.

A estrutura com nano camadas é a estrutura convencional para os chamados “nanocoatings”. É uma versão mais moderna de multicamadas com camadas finas de <20 nm em cada.

Existe também a camada estrutural com nano compósitos que quando depositados, os grãos nano cristalinos duros (TiAlN ou AlCrN) ficam homogêneos em uma matriz de SiN- amorfo.

Através do calotest, é possível ver a estrutura da camada aplicada na ferramenta. Na figura 13 temos alguns exemplos usuais de estrutura de camadas usualmente aplicadas.

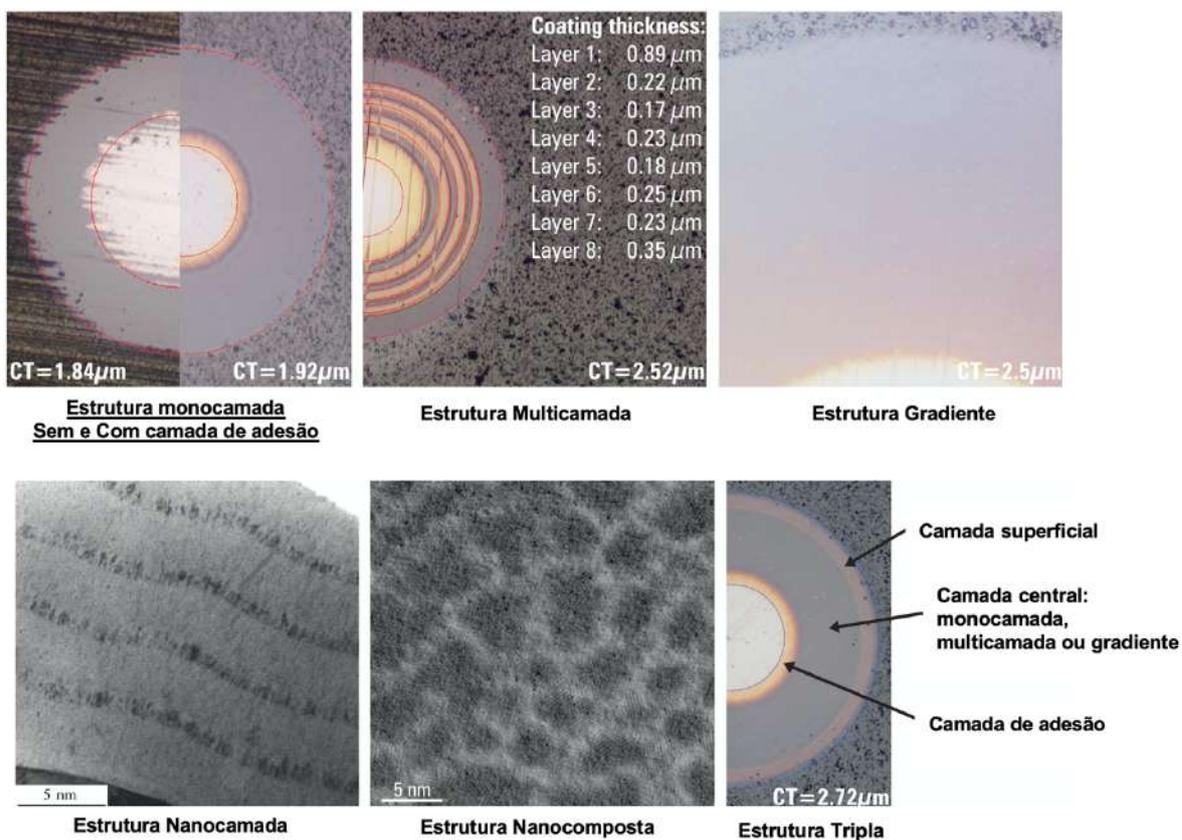


Figura 13 - Exemplos de estruturas de camadas PVD aplicados

Fonte: Platit 2017

Gupta e Laubscher, 2016, afirmam que o metal-duro não revestido (que supostamente seria mais resistente ao processo de desgaste difusivo da ferramenta na usinagem de titânio) é um dos melhores e mais extensivamente material de ferramenta utilizados na usinagem de Ti. Contudo, é sabido que o metal duro com revestimento também é utilizado, (exemplos de revestimento: TiAlN, TiN, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e AlCrN) e este revestimento se torna importante na redução do desgaste e, conseqüentemente, no aumento de vida da ferramenta. Pervaiz et al., 2014, ressaltam que o metal-duro sem revestimento só pode ser utilizado para o processamento do Ti em baixas  $v_c$ , uma vez que as altas temperaturas geradas em altas  $v_c$  causam amolecimento térmico da ferramenta e promovem rápida difusão, diminuindo muito a sua vida útil. Por isso, conforme esses autores, as ferramentas de metal-duro revestidas têm superado as ferramentas não revestidas em termos de desempenho na usinagem de ligas de Ti devido às vantagens oferecidas pelo revestimento, o que também foi atestado por Revuru et al., 2017. Além disso, os autores que defendem a superioridade do uso do revestimento também afirmam que as ferramentas revestidas pelo

processo PVD são mais adequadas para a usinagem de Ti porque mantêm a integridade do substrato e oferecem maior resistência à difusão em comparação às ferramentas equivalentes revestidas pelo processo CVD.

## **3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL**

### **3.1 Condições gerais dos experimentos**

Os experimentos deste trabalho foram realizados em uma empresa do setor médico odontológico especializada no estudo, desenvolvimento e fabricação de implantes dentários e seus respectivos componentes protéticos.

O material a ser usinado nos experimentos é o mais utilizado atualmente para fabricação de implantes dentários: titânio comercialmente puro conforme ASTM F67 Grau 4. Foram torneadas nos ensaios barras cilíndricas de diâmetros que variam entre 4,76mm (3/16”) até 6,35mm (1/4”) trefiladas, com tolerância h9.

A máquina-ferramenta utilizada para realização dos testes foi um Torno Automático CNC cabeçote móvel (tipo suíço), tipicamente utilizada para o torneamento de peças pequenas. Esta máquina possui alimentador de barras automático e sistema de fixação da peça por pinça e bucha de guia, o método convencional para este tipo de máquinas. Como esse processo é realizado continuamente, sempre com a mesma força de fixação, o sistema é considerado rígido para o processo de torneamento. A figura 14 mostra a máquina utilizada neste trabalho.

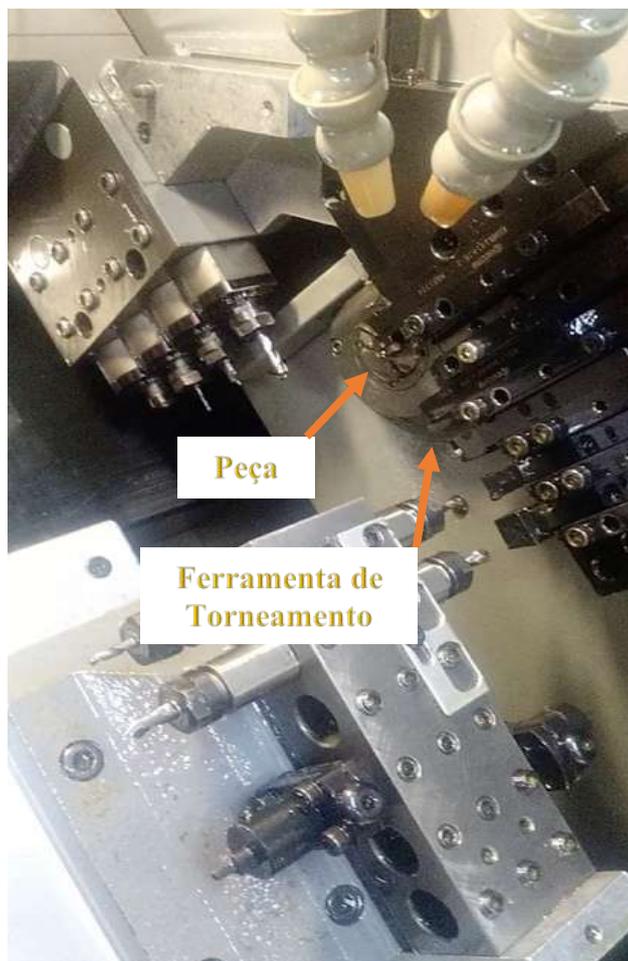


Figura 14 - Torno CNC cabeçote móvel

Fonte: Autor

### 3.2 Ferramenta de Corte

Em pesquisas preliminares realizadas, foi constatada certa deficiência de informações no que se refere a propostas de ferramentas de usinagem para o titânio comercialmente puro. Assim, foi então decidido testar o inserto sem cobertura recomendado para usinagem de materiais da mesma classe que o titânio, ou seja, classe “S”, que é a classe de metal duro recomendada para a usinagem de superligas e ligas resistentes ao calor.

O porta-ferramenta utilizado foi o PDACL 1010M-07S, trata-se de um suporte quadrado de 10mm x 10mm para fixação, e  $91^\circ$  de  $\chi_r$  que é o posicionamento do inserto. Conforme mostra a figura 15 a seguir, o inserto fica na posição neutra, ou seja, sem inclinação no suporte, porém o inserto conta com  $20^\circ$  de ângulo de saída em sua própria

geometria derivada do quebra-cavaco AS escolhido. Sendo assim, a ferramenta como um todo é positiva em  $20^\circ$ .

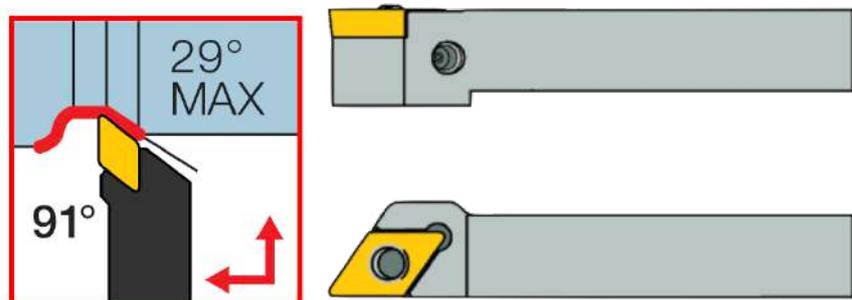


Figura 15 - Imagem do suporte da ferramenta e ângulo

Fonte: <http://iscardobrasil.com.br>

O inserto para a aplicação foi o DCGT 07 02 02 AS – IC 20. Trata-se de um inserto sem cobertura de geometria positiva, com 2 arestas e quebra-cavaco nomeado pelo fabricante com as letras AS. A figura 16 apresenta as informações técnicas do inserto fornecida pelo fabricante. A figura 17 mostra os ângulos de saída e de folga da ferramenta, medidos no microscópio confocal Alicona. E a figura 18 mostra os dados de corte recomendados para esta aplicação. Para a usinagem de titânio o fabricante recomendou seguir os parâmetros recomendados da classe “S”.

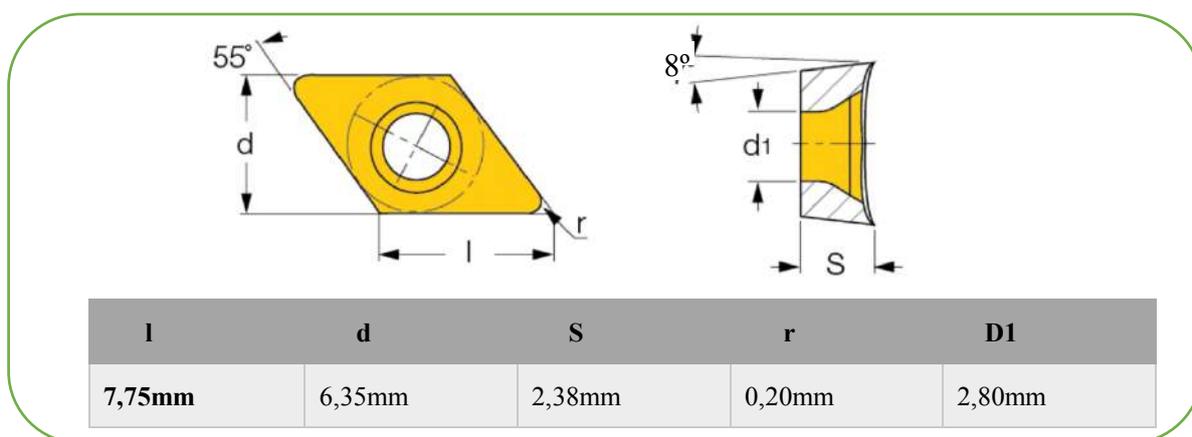


Figura 16 - Informações técnicas do inserto utilizado

Fonte: <http://iscardobrasil.com.br>

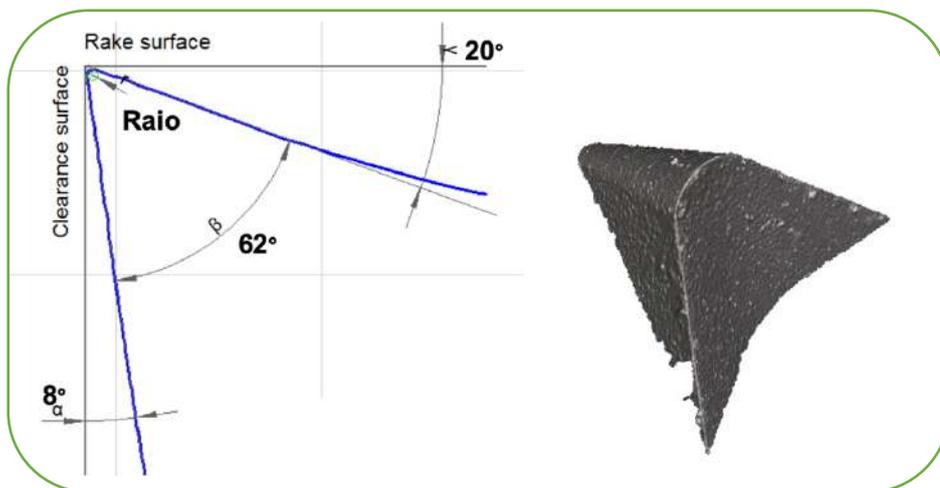


Figura 17 - Ângulo de folga e de saída da ferramenta

Fonte: Autor, adaptado de <http://iscardobrasil.com.br>

|   |  |
|---|--|
| S | ap 0,5mm (0,1-1,1)<br>f 0,05 mm/rev (0,04-0,08)<br>Vc 40 m/min (30-70) |
|---|--|

Figura 18 - Dados de corte recomendado pelo fabricante

Fonte: <http://iscardobrasil.com.br>

Posteriormente foram revestidos por método PVD outros 3 tipos de insertos idênticos, porém com diferentes composições e microestrutura. Os revestimentos foram: TiAlN, AlCrN e TiCN+TiN. Todos os insertos possuem a mesma base, ou seja, o metal duro utilizado de substrato possui as mesmas características, sendo a microdureza de 1650 (HV 0.05) e um tamanho médio de grão de 1,8 microns.

A tabela 5 mostra um resumo com todas as informações coletadas a respeito das ferramentas e revestimentos utilizados neste trabalho:

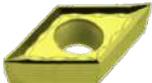
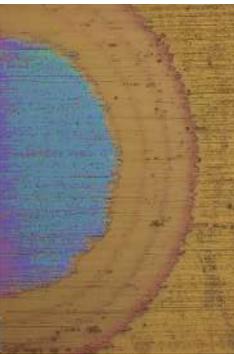
| Material utilizado no revestimento                       | S/ Revestimento   | TiAlN  | AlCrN   | TiCN+TiN   |
|--|---|--|---|--|
| Imagem do inserto  |  |                 |                               |   |
| Cor externa do inserto                                   | Cinza   | Cinza violeta  | Cinza   | Amarelo 500  |
| Tipo de estrutura micrométrica                           | -   | <b>Monocamada</b><br>(Camada de aderência: TiN ;<br>Camada monobloco de TiAlN – 50% Ti e 50% Al) | <b>Dupla camada</b><br>(Camada de aderência: CrN ;<br>Camada monobloco de AlCrN ;<br>Camada superficial AlCrBN) | <b>Multi-camadas</b><br>(a camada mais escura é TiN e a mais clara TiCN. As camadas de aderência e a superficial são de TiN) |
| Imagem da camada micrométrica gerada através do Calotest | -   |                |                              |    |
| Micro dureza superficial (HV 0.05)                       | 1670  | 3300   | 3800  | 2950   |
| Coefficiente de atrito contra o aço a seco               | 0,3   | 0,15   | 0,30  | 0,17   |
| Espessura total da camada (µm)                           | -   | 2-4  | 2-4   | 2-4  |
| Temperatura máxima de trabalho (°C)                      | 500   | 900  | 1100  | 800  |
| Temperatura do processo PVD (°C)                         | -   | 450  | 450   | 400  |

Tabela 5 - Informações dos insertos utilizados nos testes

Fonte: Autor adaptado de Platit 2017 e Balzers 2019

O inserto sem revestimento possui um valor referência de R\$60,22. Cada tipo de revestimento possui um custo por unidade diferente, devido ao seu tipo de processamento, ou seja, o TiAlN custa R\$2,92 a unidade, o AlCrN custa R\$ 5,05 e o TiCN+TiN custa R\$ 3,88. Valores estes mencionados referem-se a base do ano de 2020.

### 3.3 Condições de usinagem

A operação de torneamento realizada nos ensaios é considerada usinagem média (não é desbaste, nem acabamento) no diâmetro externo da peça esquematizada na figura 19, que é feita de um titânio odontológico de comprimento que pode variar entre 8,5 e 15,0 mm (Cota B na figura). Essa usinagem é feita deixando as dimensões externas da peça acabada, partindo de um diâmetro de 6,35mm ou 4,76 que são os diâmetros de barras (Cota D). O Diâmetro do implante e a dimensão do ângulo de entrada (cotas A e C) dependem do modelo de implante a ser usinado.

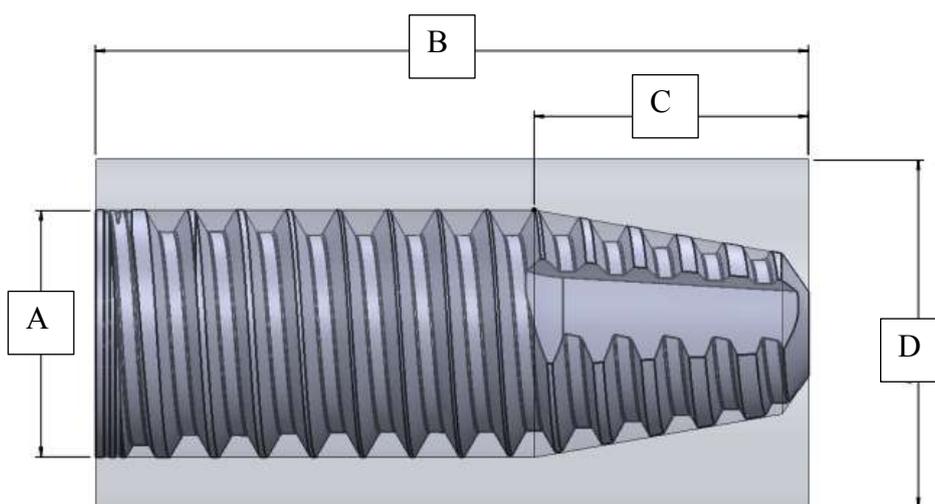


Figura 19 - Implante dentário com dimensões básicas a ser usinada

Fonte: Autor

Inicialmente, os parâmetros de corte utilizados foram aqueles recomendados pelo fabricante da ferramenta, ou seja:  $v_c=55\text{m/min}$  e  $f=0,06\text{mm/r}$ . Em seguida, foram realizados experimentos com  $v_c=66\text{m/min}$  (20% a mais que a inicial). O corte da peça foi realizado

com um passe apenas da ferramenta, ou seja, a profundidade de usinagem ( $a_p$ ) variou de acordo com o modelo da peça usinada. O comprimento usinado por ferramenta e o volume de cavaco removido por ferramenta também variou conforme o modelo de peça a ser usinada.

A usinagem foi feita com refrigeração externa em abundância a todo o momento. O fluido de corte usado no equipamento é um fluido integral à base de ésteres vegetais, não miscível em água.

Segue na tabela 6 os valores das condições de usinagem utilizadas e calculadas para as 2 condições dos testes.

|   |        |                      |
|---|--------|----------------------|
| <b>VELOCIDADE DE CORTE 01</b>                   | 55     | m/min                |
| <b>VELOCIDADE DE CORTE 02</b>                   | 66     | m/min                |
| <b>AVANÇO</b>                                   | 0,06   | mm/rev               |
| <b>AP MÉDIO</b>                                 | 1,2    | mm                   |
| <b>RPM MÁXIMO</b>                               | 8000   | rpm                  |
| <b>TAXA DE REMOÇÃO DE CAVACO MÉDIO (Q)</b>      | 3,96   | cm <sup>3</sup> /min |
| <b>VOLUME MÉDIO DE CAVACO REMOVIDO POR PEÇA</b> | 109,87 | mm <sup>3</sup>      |
| <b>ÂNGULO <math>\chi_R</math></b>               | 91°    | graus                |
| <b>ÂNGULO DE SAÍDA</b>                          | 20°    | graus                |
| <b>ÂNGULO DE FOLGA</b>                          | 8°     | graus                |
| <b>TEMPO DE CORTE POR PEÇA COM VC 55 m/min</b>  | 3,1    | segundos             |
| <b>TEMPO DE CORTE POR PEÇA COM VC 66 m/min</b>  | 2,6    | segundos             |
| <b>RUGOSIDADE MÁXIMA PERMITIDA</b>              | 0,8    | Ra ( $\mu$ m)        |

Tabela 6 - Condições de usinagem utilizadas e calculadas

Fonte: Autor

Resumindo, temos o seguinte cenário para o início dos testes conforme tabela 7:

|                        | <b>V<sub>c</sub> 55M/MIN</b> | <b>V<sub>c</sub> 66M/MIN</b> |
|------------------------|------------------------------|------------------------------|
| <b>S/ REVESTIMENTO</b> | Teste1                       | Teste2                       |
| TIALN                  | Teste 3                      | Teste 4                      |
| ALCRN                  | Teste 5                      | Teste 6                      |
| TICN+TIN               | Teste 7                      | Teste 8                      |

Tabela 7 - Testes realizados

Fonte: Autor

Cada ensaio realizado foi replicado uma vez, ou seja, foram realizados 16 testes ao total.

O critério de fim de vida da ferramenta utilizada neste trabalho não foi medido na ferramenta e sim na peça usinada, ou seja, o critério para fim de vida da ferramenta foi a rugosidade superficial da peça alcançar valores iguais ou superiores 0,8 Ra.

Já a referência de comparação entre as ferramentas utilizadas neste trabalho foi o comprimento usinado total de cada ferramenta até alcançar a rugosidade igual ou superior a 0,8 Ra.

### **3.4 Medição e avaliação do inserto**

Nas ferramentas de metal duro, o desgaste frontal é geralmente maior que o desgaste de cratera. Os desgastes aumentam progressivamente até a quebra da cunha cortante, que deve ser evitada devido a suas consequências danosas. Na usinagem de muitos materiais, esta quebra se dá para valores de  $V_B$  de 0,8 a 1,5mm. Em operações de acabamento, a ferramenta deve ser retirada muito antes do desgaste atingir valores que ponham em risco a aresta de corte, a fim de não comprometer a precisão da peça e seu acabamento superficial. Nessas operações, o valor de  $V_B$  não deve exceder 0,2mm para uma qualidade IT7 e 0,3mm para uma qualidade IT8 em operações de torneamento. (DINIZ, 2014)

Quando se utiliza ferramentas de metal duro com cobertura, o desgaste de flanco da ferramenta (nessas ferramentas o desgaste de cratera, em geral, é muito pequeno ou inexistente) cresce muito lentamente, decorrente da alta resistência ao desgaste das camadas de cobertura da ferramenta, até atingir valores de  $V_B$  da ordem de 0,3 a 0,4mm. (Diniz, 2014)

Neste momento, as camadas de cobertura já estão quase que totalmente consumidas pelo desgaste e, então, o corte passa a ser realizado pelo substrato da ferramenta, que é bem menos resistente ao desgaste, o que faz com que o desgaste de flanco passe a crescer bem rapidamente, chegando a valores da ordem de 0,8 a 1,0 mm num tempo muito curto. Assim, a ferramenta deve ser substituída quando este momento for atingido. (DINIZ, 2014)

Neste trabalho, inicialmente, a vida do inserto foi dada pelo acabamento superficial da peça, verificado em microscópio com lente de 40x de aumento. A ferramenta que torneia a parte externa do implante deixa as dimensões prontas para posteriormente passar pela

operação de roscamento com a ferramenta de rosca externa. Portanto, o acabamento deixado pela ferramenta de torneamento anterior a de roscamento é o acabamento final da peça. Assim, a rugosidade é muito importante para garantir a qualidade da peça acabada.

O próprio operador, com sua experiência já sabe o momento certo de trocar o inserto apenas analisando o acabamento superficial da peça (rugosidade) verificada visualmente na peça usinada. Ao medir o desgaste de uma ferramenta que foi considerada “gasta” pelo operador, a rugosidade superficial medida com o rugosímetro foi de  $0,8R_a$ , o desgaste  $V_B$  medido foi de  $0,2\text{mm}$  e o tipo de desgaste foi o de flanco, como se pode observar nas figuras 20 e 21 abaixo. Estes dados citados foram apenas os dados iniciais encontrados na empresa, e que serviram de referências para seguimento ao trabalho.

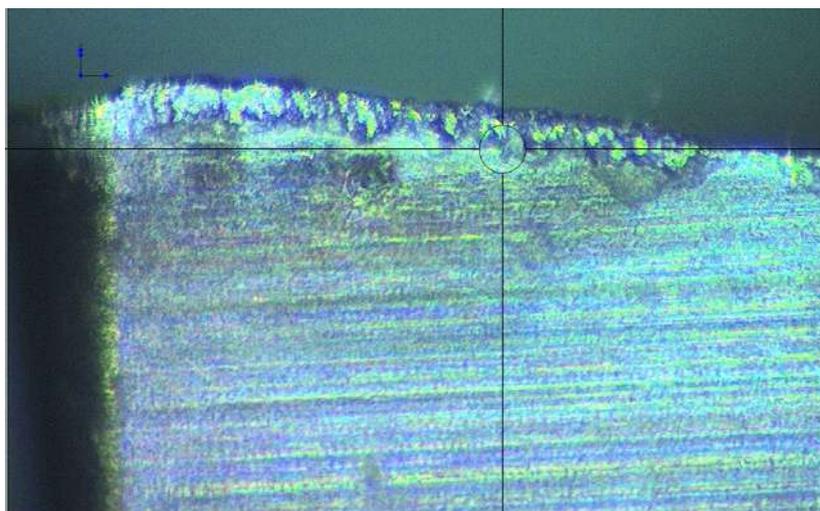


Figura 20 - Foto frontal do inserto (ampliado 100x)

Fonte: Autor

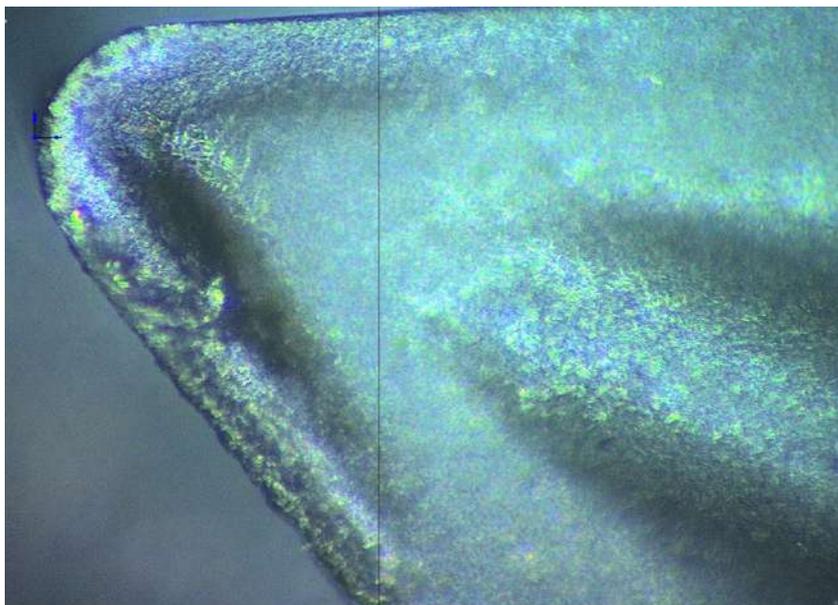


Figura 21 - Foto superior do inserto (ampliado 100x)

Fonte: Autor

Por se tratar de uma percepção do operador, este método de processo e avaliação de fim de vida útil não pode ser utilizada neste trabalho. Sendo assim, foram parametrizados os programas de usinagem de implantes no CNC, a fim de que, a cada 100 peças, um blank extra fosse usinado apenas com o torneamento externo realizado (sem a posterior operação de roscamento). Em cada blank usinado foi medido a rugosidade em Ra. O limite para uma rugosidade aceitável foi de 0,8 Ra máximo, ou seja, quando a rugosidade da peça (blank) chegasse a 0,8Ra, significava que a ferramenta tinha chegado ao seu fim de vida. Foi utilizado para medições um rugosímetro tradicional da própria empresa, com um cut off de 0,8 mm e com a realização de 3 medições em cada blank, para obter uma confirmação do valor encontrado. A figura 22 mostra uma medição de rugosidade de um blank, fixado em um dispositivo através de uma rosca, contida no interno do implante, garantindo assim o paralelismo da peça e uma boa rigidez para efetuar a medição da rugosidade.

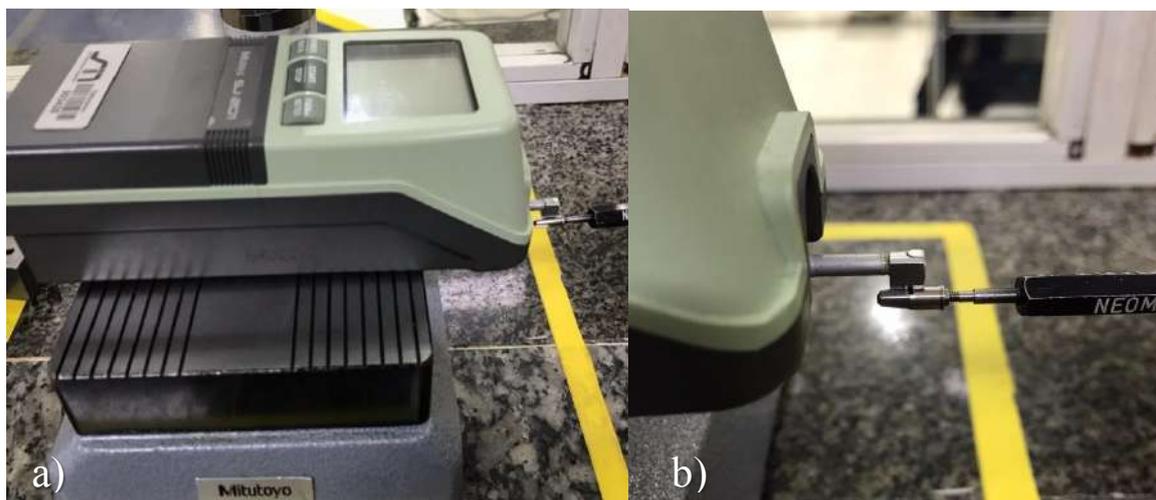


Figura 22 - a) Rugosímetro utilizado; b) Medição da rugosidade superficial no blank através do rugosímetro

Fonte: Autor

Após o término do teste, foi feita uma avaliação dos insertos usados, a fim de se observar o tipo de desgaste e medição do  $V_B$  de cada inserto. Para esta aplicação, foi utilizado um microscópio digital, que pode ampliar de 50 a 500 vezes com o auxílio de um computador, e realizar a medição através de comparação com uma transparência de escala real.

Antes de iniciar os testes, foram medidos os raios de aresta de cada inserto, além da rugosidade na aresta, afim de correlacionar estes dados com o resultado futuro do trabalho, pois é conhecido que a micro geometria pode ter influência na usinagem de uma forma geral. O equipamento utilizado para realizar estas medições foi o microscópio confocal Alicona. Trata-se de um dispositivo óptico de medição 3D para medição automática de arestas de corte. As arestas são medidas independentemente do tipo, tamanho, material ou acabamento superficial da ferramenta. Com este equipamento é possível medir raios maiores que  $2\mu\text{m}$ .

Após realizar a medição do raio de aresta em todos os insertos utilizados no teste, observa-se que os raios de aresta encontrados variam entre  $5\mu\text{m}$  e  $7\mu\text{m}$ . Já a Rugosidade do raio de aresta variou entre  $0,451\ \mu\text{m Ra}$  e  $0,648\ \mu\text{m Ra}$ . A tabela 8 mostra as medições encontradas neste equipamento para os raios de aresta e rugosidade para cada ferramenta. Com estes dados podemos observar que não houve diferença significativa entre os insertos no que se refere a micro geometria.

|                | <b>S/REVEST</b>     | <b>TIALN</b>        | <b>ALCRN</b>        | <b>TICN+TIN</b>     |
|----------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Raio de aresta | 5 $\mu\text{m}$     | 7 $\mu\text{m}$     | 6 $\mu\text{m}$     | 6 $\mu\text{m}$     |
| Rugosidade Ra  | 0,521 $\mu\text{m}$ | 0,648 $\mu\text{m}$ | 0,451 $\mu\text{m}$ | 0,481 $\mu\text{m}$ |

Tabela 8 - Medidas encontradas na medição do raio de aresta

Fonte: Autor

Para entender a fundo o mecanismo de desgaste gerado nos insertos testados, foi utilizado para verificação dos insertos usados um microscópio eletrônico de varredura (MEV) que produz imagens de alta ampliação e resolução. Ao mesmo tempo, foi utilizada a técnica de espectroscopia de energia dispersa (EDS), a fim de se observar elementos químicos presentes na superfície da ferramenta. Estes dados serão apresentados no capítulo 4.2.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Análise dos dados gerados

Após a realização dos 16 testes (8 testes e 8 réplicas), os valores de rugosidade superficial da peça medida a cada 100 peças foi anotado, e com isso foram gerados gráficos relacionando a rugosidade com o comprimento usinado. O critério de fim de vida da ferramenta foi o mesmo para todos os testes, ou seja, o fim de vida deu-se através da rugosidade da peça, quando seu valor atingia  $Ra = 0,8 \mu\text{m}$ .

A figura 23 mostra o comportamento da rugosidade da peça ao longo do comprimento usinado para cada teste realizado, com réplica. Considera-se como inserto 01 o primeiro teste, e o inserto 02 a réplica realizada.

Em seguida foi estudada e acrescentada uma linha de tendência linear para cada teste, e, mais em seguida, foi acrescentada uma linha de tendência média para cada 2 testes realizados. Sendo assim, temos os seguintes gráficos da figura 24.

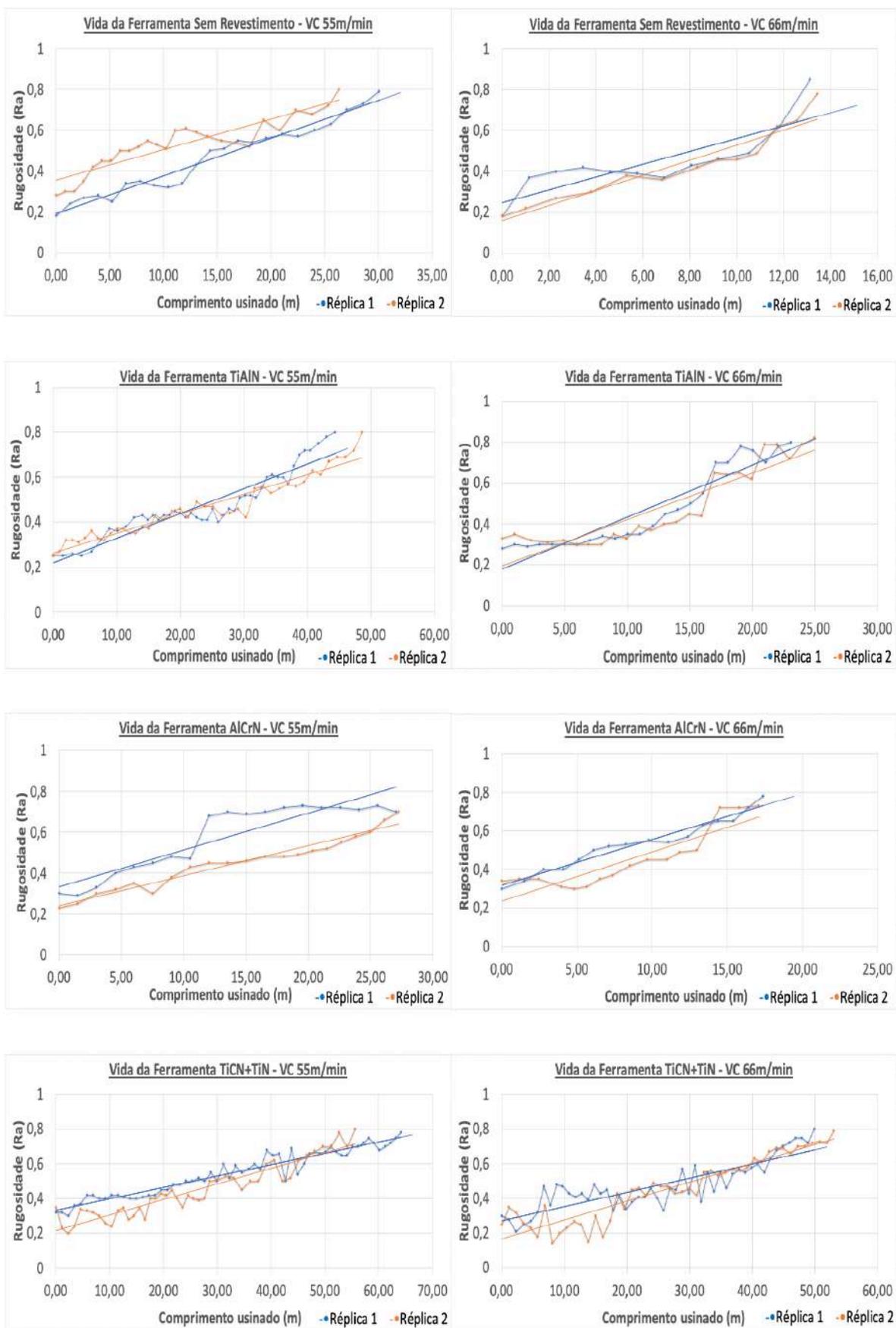


Figura 23 - Gráficos de rugosidade (Ra) x Comprimento usinado (m)

Fonte: Autor

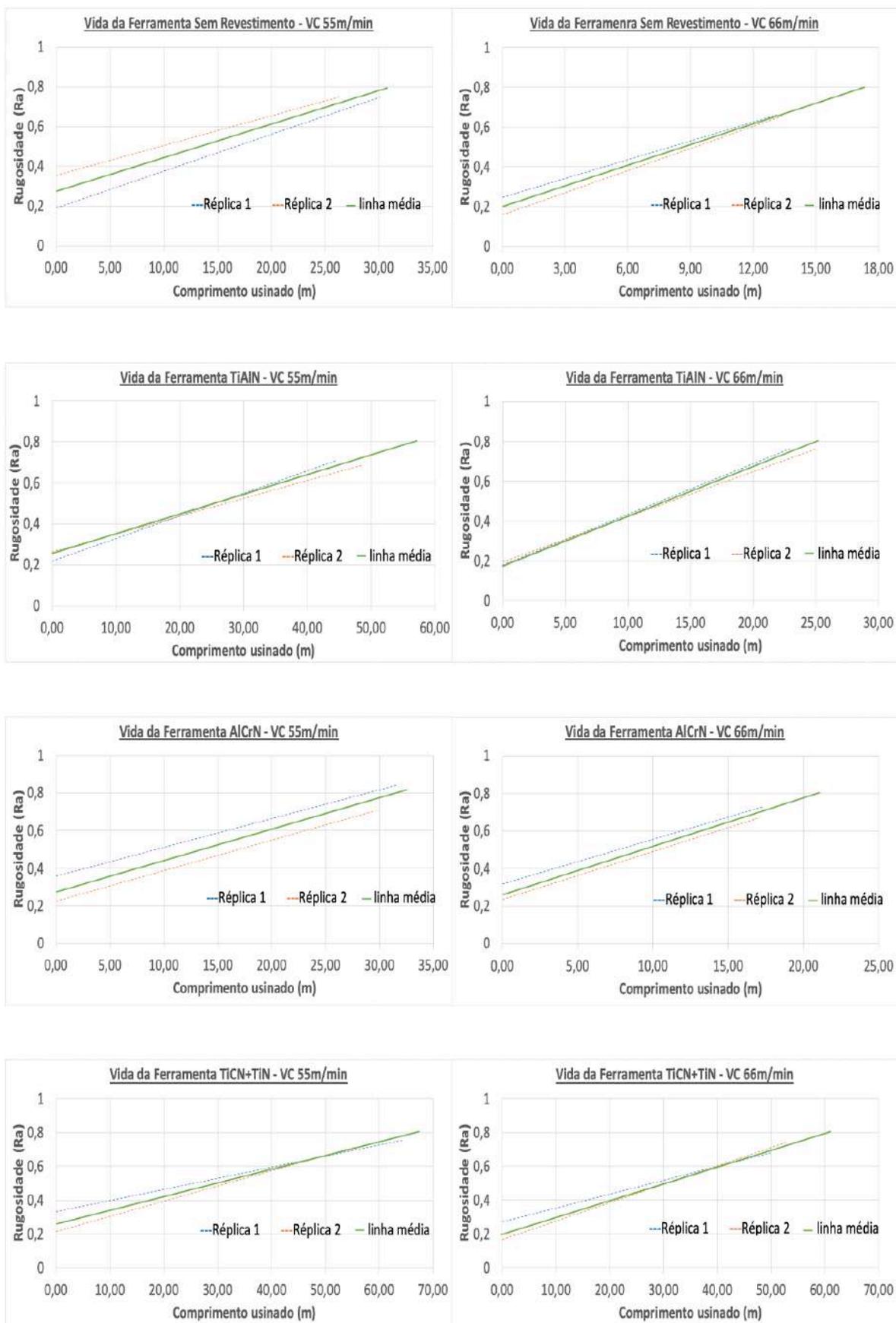


Figura 24 - Gráfico de Rugosidade (Ra) x Comprimento usinado (m) com linha de média

Fonte: Autor

Seguindo a linha de estudos e resultados apresentados nos gráficos 23 e 24, foi possível gerar um resumo em apenas um gráfico que mostra o desempenho estimado para cada tipo de inserto testado neste trabalho. Ver figuras 25 e 26.

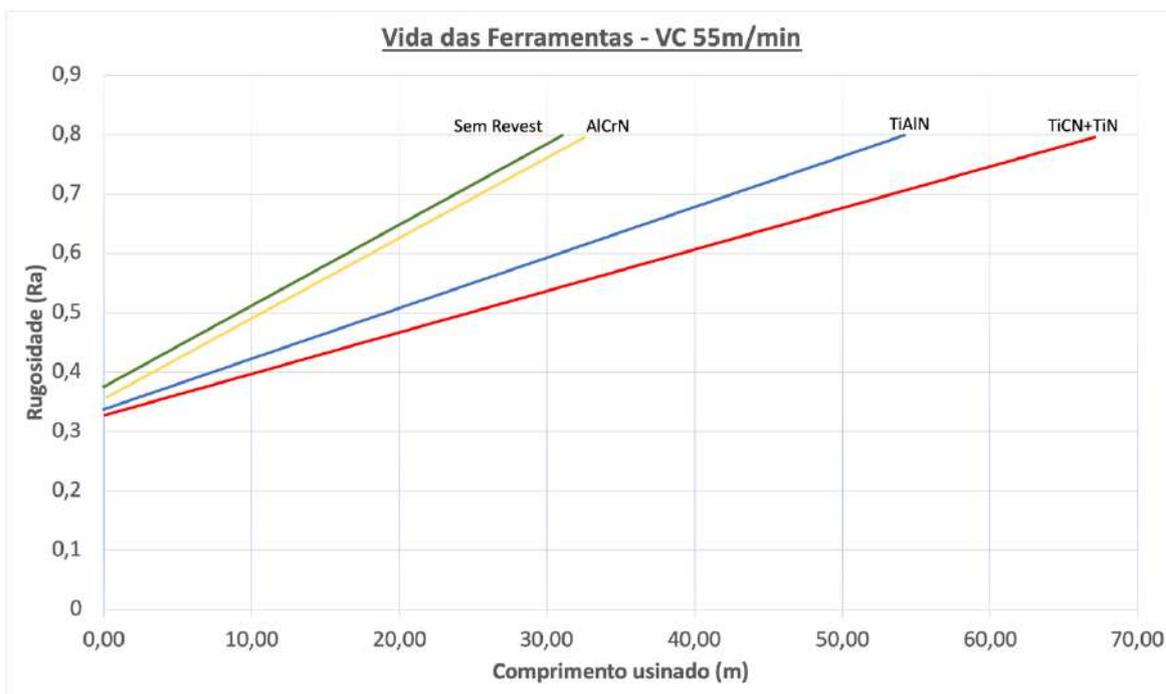


Figura 25 - Gráfico ilustrando o aumento da rugosidade (Ra) conforme aumenta o comprimento usinado (m) na Vc de 55m/min

Fonte: Autor

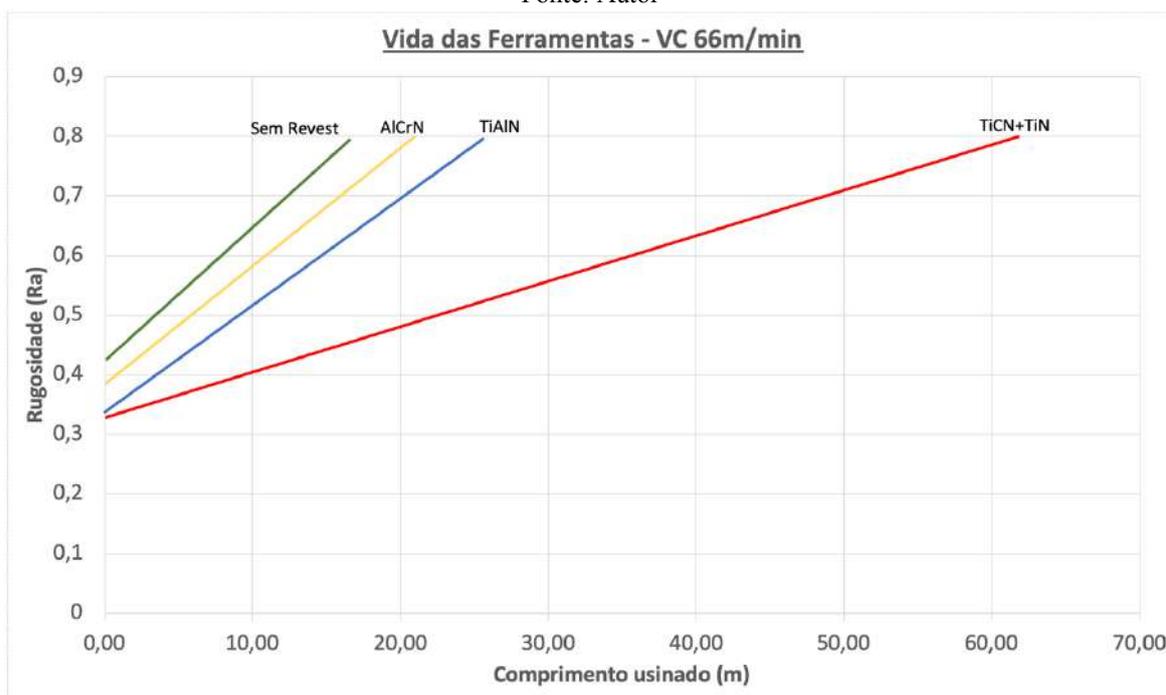


Figura 26 - Gráfico ilustrando o aumento da rugosidade (Ra) conforme aumenta o comprimento usinado (m) na Vc de 66m/min

Fonte: Autor

Pode-se ver na figura 26 que a rugosidade no início da vida foi muito pouco influenciada pelo material da ferramenta quando a velocidade de corte utilizada foi 55 m/min. Todas as rugosidades estavam entre 0,33 e 0,38  $\mu\text{m}$ . Ao longo dos ensaios, os valores de rugosidade para cada ferramenta se distanciaram devido às diferentes taxas de desgaste da ferramenta, que influenciaram diretamente o valor da rugosidade. Isto mostra que os diferentes valores de raio de aresta mostrados na tabela 8 e os diferentes valores de coeficiente de atrito do material da pastilha mostrados na tabela 5, parâmetros que poderiam ter influenciado na rugosidade da peça, não a influenciaram, pelo menos no início da vida da ferramenta. Já quando se utilizou  $v_c = 66$  m/min (figura 26), os valores de rugosidade em início de vida foram mais dispersos (entre 0,33 e 0,43  $\mu\text{m}$ ), devido ao fato de que cada ferramenta se desgastava em uma taxa diferente e maior do que na velocidade menor. Assim, quando se utilizou  $v_c = 66$  m/min já havia um desgaste da ferramenta no momento da primeira medição da rugosidade da peça tal que influenciasse seu valor. Para confirmar este fato, vê-se na figura 26 que o inserto que gerou menor valor de rugosidade no início de vida, também foi aquele que gerou uma curva de crescimento da rugosidade (e, conseqüentemente do desgaste) mais lenta. O oposto também é verdadeiro, isto é, o material da pastilha que gerou maior valor de rugosidade no início da vida da ferramenta, também foi aquele que gerou uma curva de crescimento da rugosidade mais acelerada.

A partir das figuras 25 e 26 pode-se estabelecer a vida de cada ferramenta usando o critério estabelecido, isto é, o valor de comprimento usinado quando a peça atingiu rugosidade  $R_a = 0,8$   $\mu\text{m}$ . Assim, a figura 27 mostra, os resultados de vida de ferramenta para cada condição testada, utilizando como critério de fim de vida da ferramenta o momento em que a peça atingiu a rugosidade  $R_a = 0,8$   $\mu\text{m}$ .

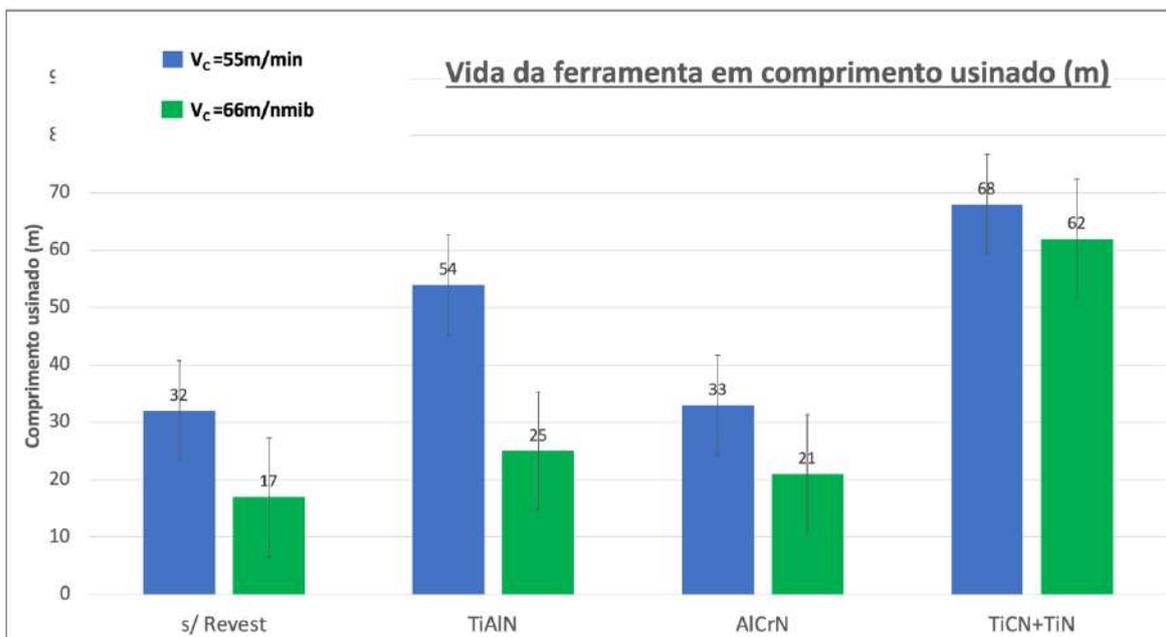


Figura 27 - Gráfico com resultado final do estudo de vida das ferramentas

Fonte: Autor

Observa-se na figura que o inserto revestido com TiCN+TiN obteve um maior rendimento, ou seja, usinou uma maior quantidade de peças, expressado em metros usinados, tanto para a  $v_c$  de 55m/min, quanto para a  $v_c$  de 66m/min.

Observa-se também que quanto maior a  $v_c$ , menor será a vida útil do inserto, conforme teoria apresentada neste trabalho. Com este olhar, vale a pena ressaltar que o inserto revestido com TiAlN foi o que obteve maior diferença em vida útil, entre 55m/min e 66m/min, quando comparado com os demais insertos testados, isto é, foi o inserto que mais danos sofreu com o aumento da temperatura da ferramenta causado pelo aumento da velocidade de corte

Vê-se que para o inserto revestido com TiCN+TiN, a diferença de vida entre as  $v_c$  55m/min e 66m/min é a menor, quando comparado com os demais testados, ou seja, este material de cobertura foi aquele que mais resistência teve ao aumento da temperatura de corte causado pelo aumento da velocidade de corte.

Tem-se também que para a  $v_c$  de 55m/min, o inserto revestido com TiCN+TiN foi o melhor usinando 68 metros, ou seja, o maior valor de todo o teste. Já o TiAlN obteve o segundo melhor resultado para essa  $v_c$ . Para a  $v_c$  de 66m/min, o TiCN+TiN obteve um resultado bem superior, comparado com os demais nesta  $v_c$ .

Há que se tentar explicar o comportamento dos materiais de ferramenta em termos de vida. A primeira tentativa de se fazer isso é utilizando suas propriedades mostradas na

tabela 5. A ferramenta com pior desempenho em termos de vida foi a sem revestimento. Isto foi devido ao fato de que ela possui a menor micro-dureza, o maior coeficiente de atrito e a menor temperatura de trabalho dentre todos os materiais testados. Portanto, a suposta maior estabilidade química dos elementos do metal duro sem cobertura em relação ao titânio e ao alumínio presentes nas camadas de cobertura não foi suficiente para fazer com que este material tivesse um desempenho superior em termos de vida de ferramenta.

A ferramenta que obteve a maior vida (metal duro com cobertura de TiCN+TiN) não tinha as melhores propriedades, pelo menos dentre aquelas citadas na tabela 5. Vê-se na tabela que este material possui a menor dureza dentre os revestimentos testados, o segundo menor coeficiente de atrito e a menor temperatura de trabalho entre os revestimentos testados. Então, não se pode usar estas propriedades para explicar o maior rendimento deste material. Mais para frente neste trabalho vai se estudar os mecanismos de desgaste das ferramentas a fim de se entender as razões que fizeram este material ser o mais adequado para o torneamento do titânio puro grau 4 dentre os materiais testados.

## 4.2 Análise do desgaste da ferramenta

Para todas as aplicações, o critério de fim de vida foi a rugosidade superficial máxima de 0,8 Ra ( $\mu\text{m}$ ) na superfície torneada da peça, ou seja, não houve uma avaliação de condições de ferramentas nem medição de  $V_B$  durante o processo.

Após o término dos testes, os insertos foram avaliados para verificar o tipo de desgaste e medição de  $V_B$ . O desgaste  $V_B$  variou entre 0,10mm e 0,50mm no momento em que a Ra era 0,8  $\mu\text{m}$ . Assim, pode-se afirmar que o desgaste  $V_B$  não teve influência direta no aumento da rugosidade, mas sim algum outro tipo de desgaste da ferramenta. A figura 28 mostra o valor do desgaste  $V_B$  ao fim da vida da ferramenta encontrado em cada ferramenta utilizada no trabalho. (medições feitas através de comparações com as imagens geradas no MEV)

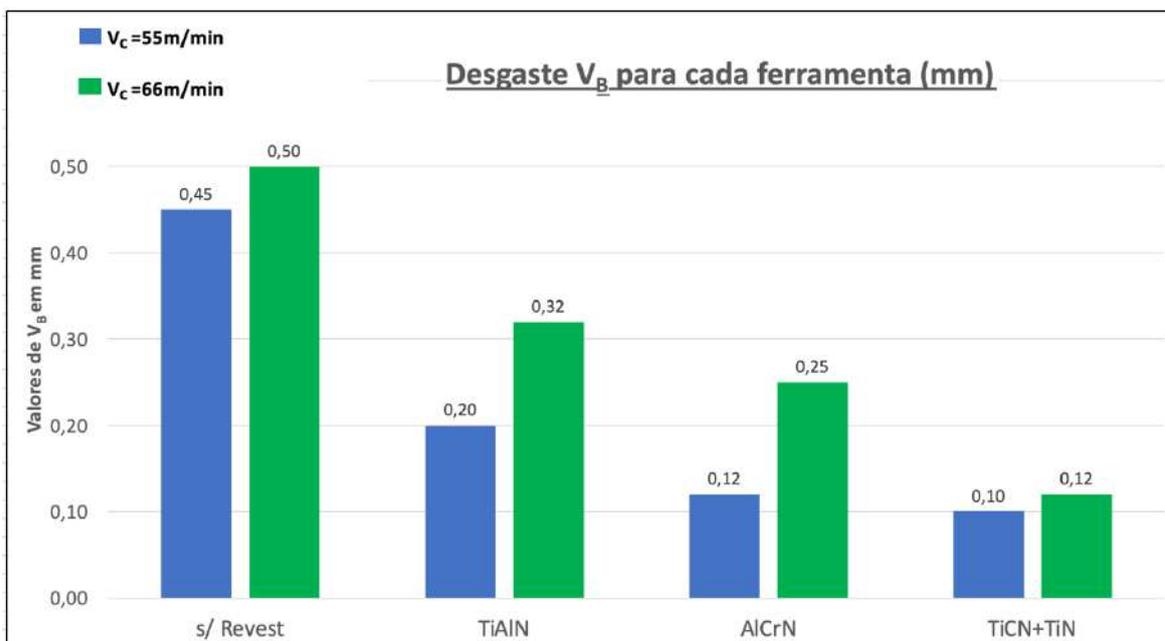


Figura 28 - Desgaste  $V_B$  para cada ferramenta

Fonte: Autor

A rugosidade da peça torneada depende da forma da ponta da ferramenta de uma forma geral. Assim, a deformação de sua ponta (variação da forma da ponta em relação à forma inicial) é o tipo de desgaste que deve influenciar a rugosidade superficial da peça e este desgaste não é diretamente relacionado com o desgaste de flanco da ferramenta. A figura 29 mostra a deformação irregular que ocorre na ponta da ferramenta e que influencia diretamente na rugosidade da peça.

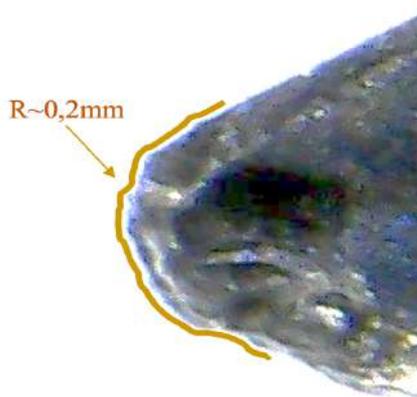


Figura 29 – Deformação do raio de ponta da ferramenta usada, sem escala

Fonte: Autor

A fim de analisar melhor o mecanismo de desgaste da ferramenta, foi feita a análise dos insertos no microscópio eletrônico de varredura (MEV) com espectroscopia de energia dispersa (EDS). Assim foi possível gerar imagens ampliadas da superfície de folga (a) e a superfície de saída (b), e obter conclusões referentes ao mecanismo de desgaste em cada ferramenta, deformação no raio da ponta e observar os materiais aderidos nas superfícies da ferramenta.

#### 4.2.1 Análise do mecanismo de desgaste no teste 1 realizado com inserto sem revestimento e $v_c = 55\text{m/min}$ .

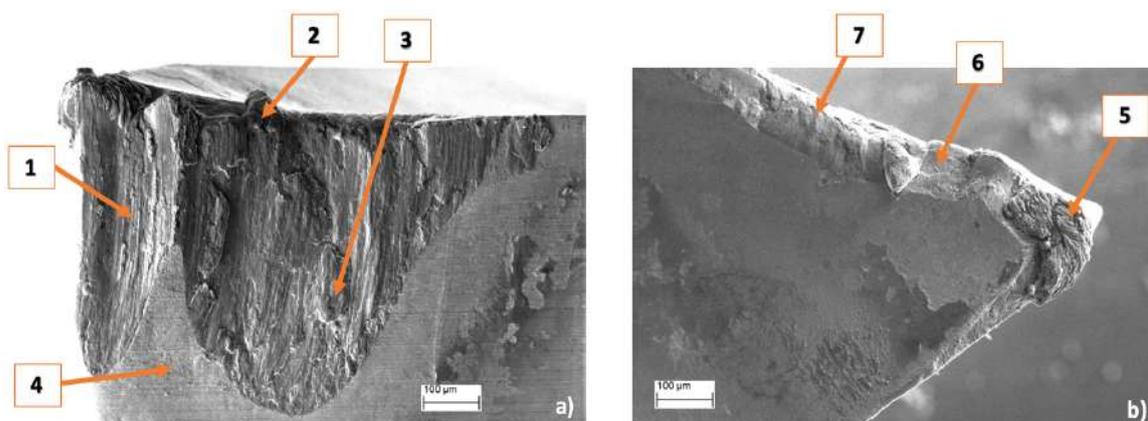


Figura 30 - Teste 1 - a) Superfície de folga da ferramenta b) Superfície de saída da ferramenta

Fonte: Autor

|   | Ti     | W      | Co    |
|---|--------|--------|-------|
| 1 | 100%   |        |       |
| 2 | 99,92% |        |       |
| 3 | 100%   |        |       |
| 4 | 1%     | 96,31% | 2,69% |
| 5 | 100%   |        |       |
| 6 | 62,36% | 36,21  | 1,43% |
| 7 | 96,18% | 0,82%  | 0,95% |

Tabela 9 - Teste 1 - Pontos medidos

Fonte: Autor

No teste 1, foi possível observar que o desgaste  $V_B$  da ferramenta está com 0,45mm. Observa-se uma superfície e raio de aresta muito deformados devido ao desgaste da ferramenta, perda de partículas, e também muito material aderido às superfícies da ferramenta, como pode ser observado nos pontos 2, 3, 5 e 7. O ponto 5 parece indicar que houve formação de aresta postiça de corte durante o processo de usinagem com esta ferramenta, já que, neste ponto, houve formação de um abcesso de titânio proveniente da peça sobre a superfície da ferramenta.

Já o desgaste frontal (ou de flanco – foto “a” na figura) também contém titânio proveniente do material da peça (pontos 1, 2 e 3 da análise EDS), mas também tem sulcos paralelos à direção de corte. Isso ocorre geralmente quando o material aderido é arrancado da peça, conseqüentemente partículas da ferramenta são levadas junto com este material (*attrition*). Estas partículas neste caso, causaram também desgaste da região da ferramenta que atrita com elas ocasionando os sulcos paralelos (abrasão). (TRENT e WRIGHT, 2000)

Observa-se que o titânio da peça fica aderido à superfície de folga da ferramenta. Isto ocorre pela extrusão do cavaco em formação entre a aresta de corte e a superfície usinada, gerada pela alta pressão normal que o cavaco impõe à ferramenta e também, por alguma vibração entre ferramenta e peça, que possibilitava a geração de espaços, para que este cavaco em formação passasse entre a ferramenta e a peça. (TRENT e WRIGHT, 2000)

Através desta figura podemos observar que, toda a região desgastada na superfície de folga estava tomada por material da peça aderido. Como houve formação de aresta postiça de corte bem na ponta da ferramenta (ponto 5 da análise EDS), a região de desgaste de flanco indicada pela seta 1 na figura, pode ter sido causada pelas contínuas quebras desta aresta, que também levava consigo partículas da ferramenta.

Observando o raio da ponta da ferramenta, vê-se que houve muita deformação, ou seja, está com um formato muito diferente da sua condição inicial, o que foi o fato gerador do rápido crescimento da rugosidade superficial da peça.

O mecanismo de desgaste predominante que se pode observar foi a adesão (*Attrition*), ou seja, há indícios de que ocorreram movimentos cíclicos de material aderido sequenciado por arrancamento deste material aderido levando consigo grãos da ferramenta. A aparência superficial da ferramenta que sofre este mecanismo de desgaste é de uma superfície áspera e deformada devido à subtração de grãos. Porém, nas regiões indicadas pelas setas 1 e 3 observa-se também que há riscos paralelos na direção de corte, ou seja, vertical na ferramenta, o que significa que houve também o mecanismo de abrasão nesta região, ou seja,

partículas duras do material ou da própria ferramenta podem ter arrancado partículas da ferramenta na direção de corte, ocasionando este aspecto visual na ferramenta.

#### 4.2.2 Análise do mecanismo de desgaste no teste 2 realizado com inserto sem revestimento e $v_c = 66\text{m/min}$ .

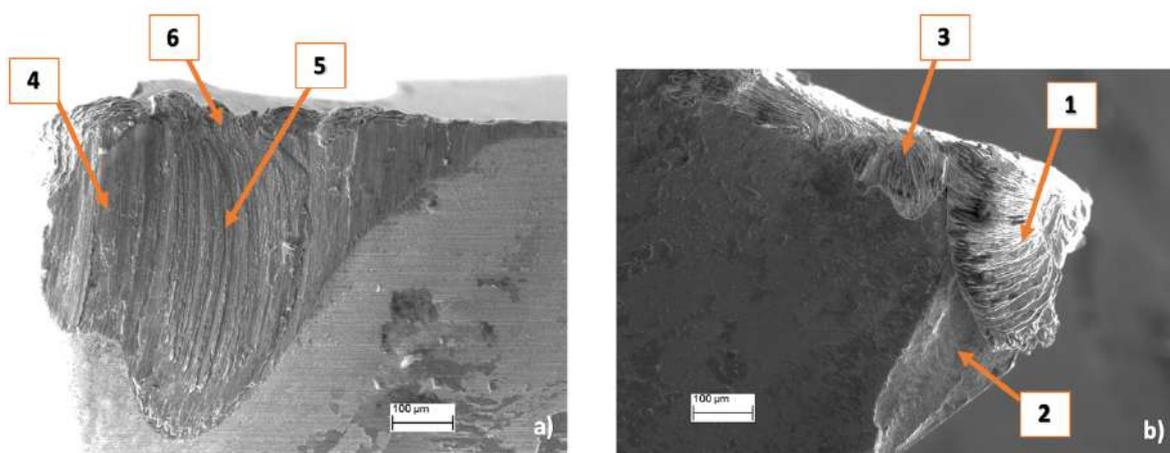


Figura 31 - Teste 2 - a) Superfície de folga da ferramenta b) Superfície de saída da ferramenta

Fonte: Autor

|   | Ti     | W      | Co    |
|---|--------|--------|-------|
| 1 | 100%   |        |       |
| 2 | 9,11%  | 87,53% | 3,37% |
| 3 | 100%   |        |       |
| 4 | 97,03% | 2,97%  |       |
| 5 | 100%   |        |       |
| 6 | 98,83% | 0,28%  |       |

Tabela 10 - Teste 2 - Pontos medidos

Fonte: Autor

No teste 2 foi possível observar que o desgaste  $V_B$  da ferramenta está em 0,5mm. Observa-se uma superfície e raio de aresta muito deformados também devido ao desgaste da ferramenta, perda de partículas, e também ao material aderido à superfície da ferramenta,

como pode ser observado nos pontos 1, 3, e 5 da figura 31b. Pode-se dizer também que criou-se aresta postiça de corte durante o processo de usinagem com esta ferramenta no ponto indicado pela seta 1, no qual se vê um acúmulo (não somente uma camada fina) de material do cavaco sobre a ferramenta.

A forma do raio da ponta da ferramenta observada na imagem b) está muito diferente da condição inicial e ainda mais deformada que a ferramenta do teste 1. Observando o gráfico de rugosidade em relação ao comprimento usinado, observa-se que a rugosidade superficial da peça aumentou rapidamente já no início do teste, assim como a ferramenta do teste 1, o que indica que a condição de desgaste aconteceu logo nas primeiras peças usinadas, facilitando ainda mais o desgaste prematuro para este teste, já que o critério de fim de vida neste caso foi o de rugosidade superficial da peça.

Na superfície de folga (figura 31a) vê-se material aderido da peça na ferramenta (pontos 1, 2 e 3), indicando que houve o mesmo mecanismo de desgaste citado nos testes anteriores também ocorreu nesta condição, isto é, o desgaste ocorreu por adesão (*Attrition*). Também pode-se ver (na figura 31a) riscos paralelos à direção de corte, indicando que houve também o mecanismo de abrasão nesta região de superfície de folga, que pode ter sido causada por partículas abrasivas presentes na peça e/ou pelas partículas da ferramenta que foram dela removidas pelo mecanismo de *attrition*.

#### 4.2.3 Análise do mecanismo de desgaste no teste 3 realizado com inserto revestido TiAlN e $v_c = 55\text{m/min}$ .

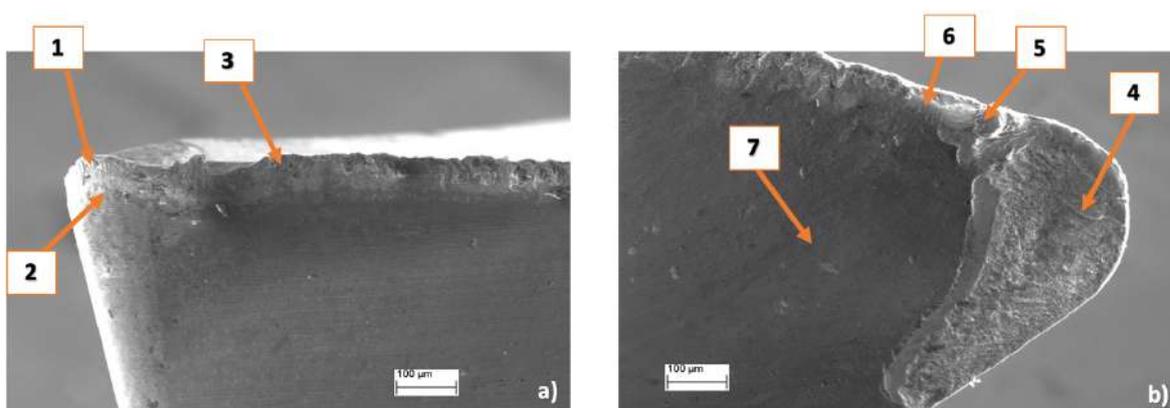


Figura 32 - Teste 3 - a) Superfície de folga da ferramenta b) Superfície de saída da ferramenta

Fonte: Auto

|   | Ti     | W      | Co    | Al     | N      |
|---|--------|--------|-------|--------|--------|
| 1 | 97,30% |        |       | 2,70%  |        |
| 2 | 20,37% | 51,21  | 3,59% | 0,86%  | 23,97% |
| 3 | 100%   |        |       |        |        |
| 4 | 7,84%  | 90,90% | 1,26% |        |        |
| 5 | 100%   |        |       |        |        |
| 6 | 49,36% | 47,56% | 2,48% |        |        |
| 7 | 71,23% |        |       | 28,77% |        |

Tabela 11 - Teste 3 - Pontos medidos

Fonte: Autor

Já no teste 3, o desgaste  $V_B$  da ferramenta medido após o fim do teste está em 0,2mm. Observa-se que também há altos relevos e deformação de raio de aresta, o que significa que também há aderência de material da peça. Mas a ponta da ferramenta está muito menos deformada no fim de sua vida que nas condições em que não se utilizou revestimento na ferramenta. O raio da ponta da ferramenta sofreu pouquíssima deformação, o que contribuiu para um rendimento e vida maior que as ferramentas sem revestimento.

Na figura 32b) observa-se que não houve formação de cratera profunda. Os elementos químicos encontrados no ponto 4 (W e Co) são de origem do substrato da ferramenta, e esse pequeno teor de Ti encontrado deve ser do revestimento da ferramenta (que nesta condição é de TiAlN), devido ser uma porcentagem baixa. Assim, neste ponto já houve remoção quase total da camada de cobertura da ferramenta e seu substrato já está exposto.

No ponto 1, o teor de Ti encontrado muito provavelmente é oriundo do material da peça, devido ao seu alto valor. O teor de Ti na cobertura é da ordem de 70% (ponto 7 da figura) e, no ponto 1 o teor é próximo a 100%. Porém, há um pequeno teor de Al neste ponto, que é um elemento utilizado no revestimento, indicando que parte da cobertura ainda permanece neste ponto. Já no ponto 5, o Ti encontrado é somente da peça, pois trata-se de uma região de alto relevo da peça, ou seja, material aderido na ferramenta.

Na superfície de folga (figura 32a) o mecanismo de desgaste predominante foi novamente a adesão (*Attrition*) na ferramenta, ou seja, subtração de grãos da ferramenta a cada descolamento da porção de material aderido na ferramenta. Isto se conclui do fato de que pontos mostrados desta superfície (pontos 1 e 3) estão tomados por titânio oriundo do material da peça e o ponto 2 apresenta titânio e material do substrato (W e Co). Então, houve

extrusão de material da peça/cavaco entre ferramenta e peça, material que aderiu à superfície de folga, propiciando o fenômeno de *attrition*. O ponto em que elementos do substrato estão a mostra (ponto 2) indica que, no momento em que esta ferramenta foi retirada do corte, havia ocorrido arrancamento de partículas aderidas desta região, o que é típico do processo de *attrition* como já descrito.

#### 4.2.4 Análise do mecanismo de desgaste no teste 4 realizado com inserto revestido TiAlN e $v_c = 66\text{m/min}$ .

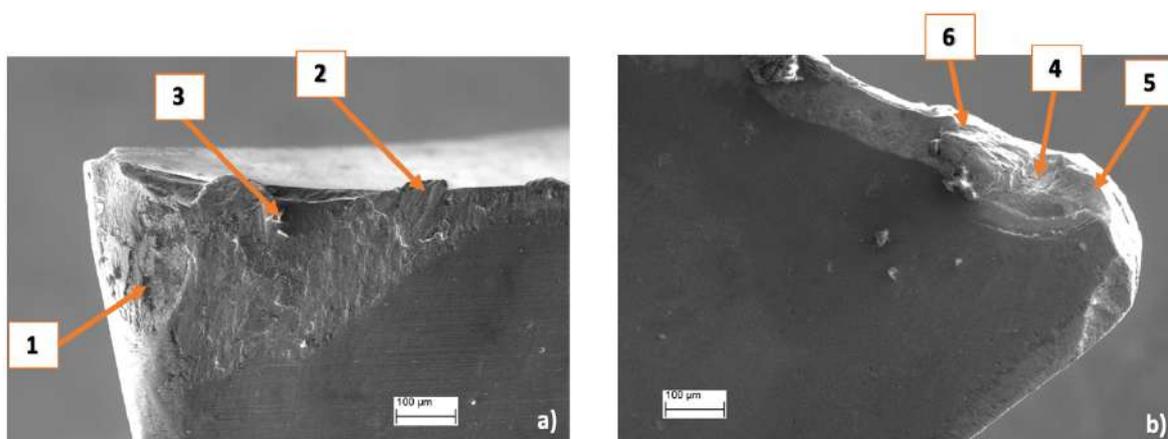


Figura 33 - Teste 4 - a) Superfície de folga da ferramenta b) Superfície de saída da ferramenta

Fonte: Autor

|   | Ti     | W      | Co    | Al    | Fe    |
|---|--------|--------|-------|-------|-------|
| 1 | 52,84% | 44,44% | 2,40% | 0,32% |       |
| 2 | 99,60% |        |       | 0,40% |       |
| 3 | 85,38% | 13,81% | 0,80% |       |       |
| 4 | 13,95% | 83,73% | 2,33% |       |       |
| 5 | 42,59% | 51,76% | 2,53% |       | 3,12% |
| 6 | 99,48% |        |       | 0,52% |       |

Tabela 12- Teste 4 - Pontos medidos

Fonte: Autor

Já no teste 4, o desgaste  $V_B$  da ferramenta medido após o fim do teste está em 0,32mm. Observa-se que também há altos relevos e deformação de raio de aresta, o que significa que também há aderência de material da peça na ferramenta, porém não parece ter aresta postiça de corte. A forma do raio da ponta da ferramenta variou bastante em relação à forma original, o que fez com que a ferramenta atingisse o valor de rugosidade que determinava o fim de vida da ferramenta.

O mecanismo de desgaste predominante que se pode observar foi a adesão (*Attrition*) visto que se pode detectar elevados teores de material da peça (Ti) em quase todos os pontos medidos. Vale lembrar que neste caso não há desgaste por abrasão porque não há riscos abrasivos na ferramenta.

Analisando-se o desgaste da superfície de folga (figura 33a), vê-se que, no ponto 1 há tanto material da peça (Ti) quanto material do substrato (W e Co), indicando que, neste momento, esta porção da ferramenta tinha acabado de sofrer arrancamento das partículas aderidas. Já os pontos 2 e 3 mostram um percentual de Ti maior do que o presente na cobertura, indicando novamente a presença de Ti do material aderido na ferramenta, ocasionando o mecanismo de *attrition*.

#### 4.2.5 Análise do mecanismo de desgaste no teste 5 realizado com inserto revestido AlCrN e $v_c = 55\text{m/min}$

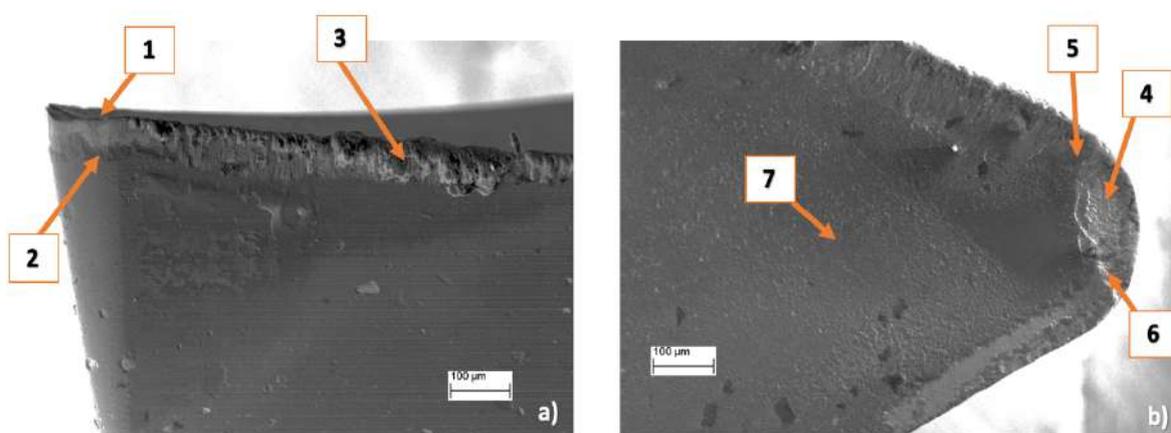


Figura 34 - Teste 5 - a) Superfície de folga da ferramenta b) Superfície de saída da ferramenta

Fonte: Autor

|   | Ti     | W      | Co     | Al     | Cr     |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| 1 | 50,97% | 47,32% | 1,71%  |        |        |
| 2 | 1,46%  |        |        | 46,95% | 51,59% |
| 3 | 99,24% |        |        | 0,43%  | 0,33%  |
| 4 | 8,76%  | 70,05% | 19,93% | 0,45%  | 0,81%  |
| 5 | 61,29% | 37,39% | 0,88%  | 0,44%  |        |
| 6 | 16,13% | 81,58% | 2,28%  |        |        |
| 7 | 2,27%  | 3,34%  |        | 44,95% | 49,44% |

Tabela 13 - Teste 5 - Pontos medidos

Fonte: Autor

No teste 5, foi possível observar que o desgaste  $V_B$  da ferramenta está em 0,12mm. Observa-se uma superfície e raio de aresta deformados devido ao desgaste da ferramenta, perda de partículas e também ao material aderido à superfície da ferramenta, como pode ser observado em todos os pontos medidos, com exceção ao ponto 7 que refere-se a um ponto na ferramenta afastado da aresta de corte, ou seja, este é um ponto do revestimento utilizado na ferramenta.

Observando o raio da ponta da ferramenta, vê-se que não houve muita deformação, ou seja, está com um formato muito similar ao da sua condição inicial. Outro fator que pode ter influenciado ao resultado ruim dessa ferramenta é o “desplacamento” que ocorreu na superfície de saída da ferramenta, e a adesão do material da peça que pode ser observado nos pontos 4, 5 e 6, prejudicando diretamente a rugosidade superficial da peça.

Analisando o desgaste da superfície de saída da ferramenta (figura 34b) vê-se que nos pontos 4 e 6 a presença de material da peça (Ti) é pequena. Este pequeno teor de Ti presente nestes pontos tem que ser oriundo da peça, pois a cobertura neste caso não contém este elemento. Somente no ponto 5 vê-se uma presença mais acentuada de Ti, indicando alguma adesão de material do cavaco. Porém, percebe-se na figura que o desgaste de cratera não foi profundo, isto é, não caracterizou-se uma cratera que poderia prejudicar o desempenho da ferramenta e levá-la à quebra.

Já a análise da superfície de folga (figura 34a) indica a presença do mecanismo de *attrition* com ponto em que somente se tem a presença de material da peça/cavaco (ponto 3) e ponto em que o substrato está a mostra, mas também se tem algum material da peça aderido (ponto 1). Já o ponto 2, que está na borda da região de desgaste, indica principalmente a

presença de material da cobertura da ferramenta (Al e Cr). Não se vê riscos abrasivos nesta região de desgaste.

#### 4.2.6 Análise do mecanismo de desgaste no teste 6 realizado com inserto revestido AlCrN e $v_c = 66\text{m/min}$ .

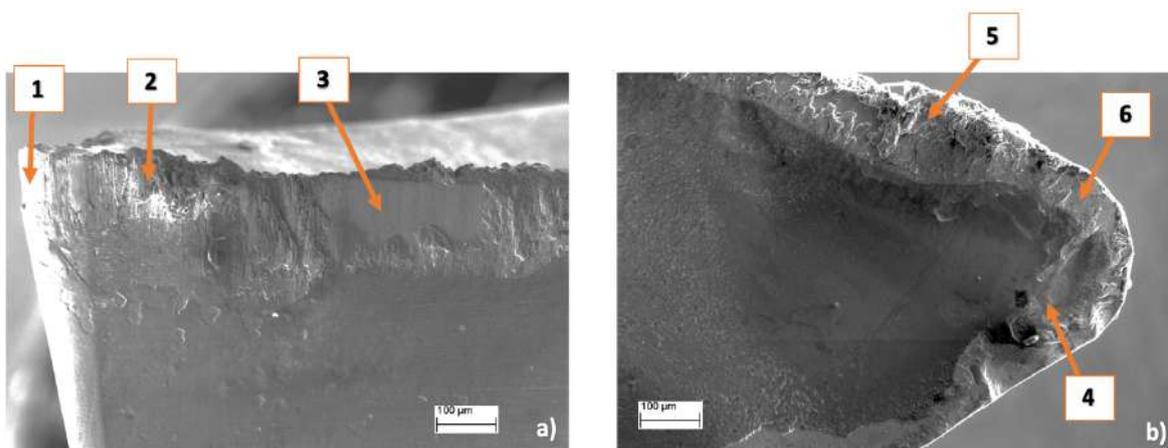


Figura 35 - Teste 6 - a) Superfície de folga da ferramenta b) Superfície de saída da ferramenta

Fonte: Autor

|   | Ti     | W      | Co    | Al    | Cr    |
|---|--------|--------|-------|-------|-------|
| 1 | 69,37% | 29,75% | 0,88% |       |       |
| 2 | 99,74% |        |       | 0,26% |       |
| 3 | 8,28%  | 90,48% | 1,24% |       |       |
| 4 | 12,92% | 81,24% | 5,84% |       |       |
| 5 | 99,23% |        |       | 0,58% | 0,19% |
| 6 | 16,13% | 81,24% | 2,12% | 0,58% | 0,19% |

Tabela 14- Teste 6 - Pontos medidos

Fonte: Autor

Já no teste 6 (figura 35), o desgaste  $V_B$  da ferramenta está com 0,25mm. Observa-se que também há altos relevos e deformação de raio de aresta maiores que no teste 5 devido ao aumento da  $v_c$ . O mesmo se observa no raio da ponta da ferramenta, ou seja, maior deformação comparado ao raio da ponta da ferramenta do teste 5.

Neste caso em que o revestimento da ferramenta não possui Ti, todo o Ti encontrado nos pontos medidos são da peça usinada. Em alguns pontos como o 3, 4 e 6, os elementos W e Co foram encontrados em altos valores, ou seja, são pontos em que o substrato de metal duro da ferramenta prevalece.

No ponto 3 ocorreu o mecanismo de desgaste difusão, já que a superfície está com aspecto liso e polido e a porcentagem de elemento da peça (Ti) é pequena. Este mecanismo de desgaste consiste em subtração de material no aspecto partículas do tamanho de átomos e, devido ao fato de que a retirada de partículas da ferramenta é no nível atômico, a superfície desgastada fica com aspecto liso. Este mecanismo de desgaste se dá devido ao aumento da  $v_c$  e, conseqüentemente, ao aumento da temperatura do processo. (TRENT e WRIGHT, 2000)

No ponto 1 já se tem um percentual bem maior do elemento Ti proveniente do material da peça, mas também temos neste ponto verifica-se a presença de elementos do substrato da ferramenta. Ponto 2 temos uma grande porção de material da peça aderido na ferramenta. Assim, conclui-se que o principal mecanismo de desgaste da superfície de folga foi a adesão (*Attrition*) na ferramenta, ou seja, subtração de grãos da ferramenta. Muito próximo da região 1 observa-se um desgaste em uma porção pequena com abrasão, pois há pequenos sulcos na vertical.

Na superfície de saída (figura 35) ocorreu também aderência de material do cavaco sobre a ferramenta (ponto 5) que provocou remoção de partículas da ferramenta, como pode ser visto nos pontos 4 e 6, nos quais se tem algum Ti da peça, mas também elementos do substrato da ferramenta (W e Co).

#### 4.2.7 Análise do mecanismo de desgaste no teste 7 realizado com inserto revestido TiCN+TiN e $v_c = 55\text{m/min}$ .

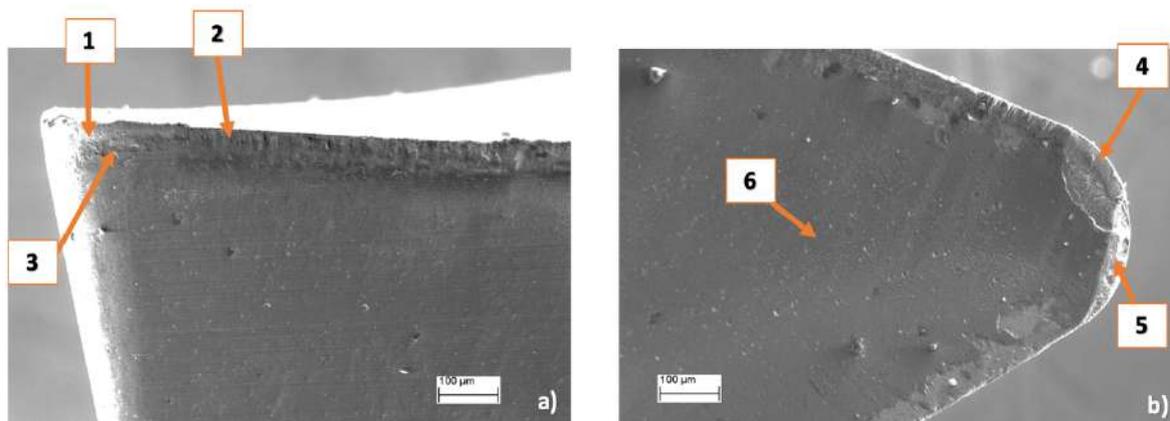


Figura 36 - Teste 7 - a) Superfície de folga da ferramenta b) Superfície de saída da ferramenta

Fonte: Autor

|   | Ti     | W      | Co    | N      | C      |
|---|--------|--------|-------|--------|--------|
| 1 | 10,06% | 70,98% | 2,73% |        | 16,23% |
| 2 | 72,30% |        |       | 27,70% |        |
| 3 | 74,61% |        |       | 25,39% |        |
| 4 | 89,45% | 10,55% |       |        |        |
| 5 | 97,53% | 2,47%  |       |        |        |
| 6 | 74,19% |        |       | 22,07% | 3,73%  |

Tabela 15 - Teste 7 - Pontos medidos

Fonte: Autor

No teste 7 (figura 36), tem-se  $V_B$  medido de 0,10mm, ou seja, o menor  $V_B$  entre todas as ferramentas deste trabalho. Se o critério de fim de vida fosse o desgaste de flanco da ferramenta, e a operação fosse um desbaste, ou alguma operação em que o  $R_a$  da peça pudesse ser maior, esta ferramenta ainda poderia ser utilizada, pensando em usar um  $V_B$  médio e usual de 0,3mm.

Observa-se uma superfície e raio de aresta pouco deformados e que há material aderido à superfície da ferramenta, como pode ser observado nos pontos 1, 2, 3, 4 e 5.

Com relação ao desgaste da superfície de folga (figura 36a), no ponto 1 o Ti detectado pode ser da peça ou da ferramenta, por ser uma porcentagem baixa. Os elementos que prevalecem neste ponto são provenientes do substrato da ferramenta. Nos pontos 2 e 3, pode-se dizer que o elemento que prevalece é o Ti, que pode ser da ferramenta e/ou da peça. O mecanismo de desgaste predominante na superfície de folga que se pode observar foi a adesão (*Attrition*). A aparência áspera e com sinais de subtração de grãos na superficial da ferramenta confirma este mecanismo de desgaste, além da confirmação de pequenas partículas de material aderido. Vê-se também alguns riscos abrasivos, o que conduz à conclusão que, somado ao *attrition*, a abrasão também contribuiu para o desgaste desta superfície.

Com relação ao desgaste da superfície de saída, vê-se aderência de material do cavaco no ponto 5 dada a presença de alto percentual de Ti. Nestas imagens pode-se notar que não há aresta postiça de corte (não há um acúmulo de material de cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta – figura 36b).

Observando o raio da ponta da ferramenta, vê-se que houve muito pouca deformação, ou seja, está com um formato similar à condição inicial, e isso influencia muito na rugosidade superficial da peça. Como a rugosidade superficial da peça é o critério de fim de vida da ferramenta, esta ferramenta foi a que mais usinou peças neste trabalho, com um total de 68 metros usinados.

No ponto 6 apenas confirma-se os elementos presentes no revestimento aplicado nesta ferramenta.

#### 4.2.8 Análise do mecanismo de desgaste no teste 8 realizado com inserto revestido TiCN+TiN e $v_c=66\text{m/min}$ .

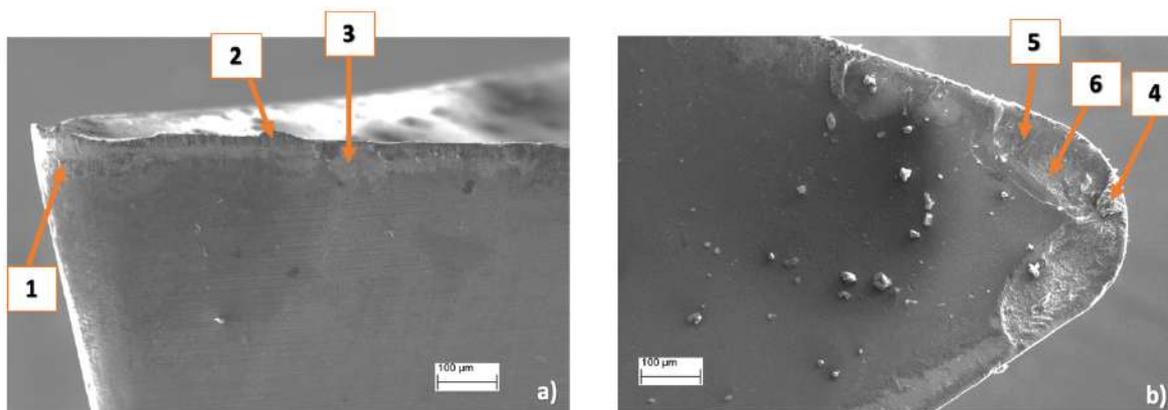


Figura 37 - Teste 8 - a) Superfície de folga da ferramenta b) Superfície de saída da ferramenta

Fonte: Autor

|   | Ti     | W      | Co    | C      |
|---|--------|--------|-------|--------|
| 1 | 4,01%  | 73,63% | 3,28% | 19,08% |
| 2 | 87,70% |        |       | 12,30% |
| 3 | 2,25%  | 81,65% | 2,07% | 14,03% |
| 4 | 99,66% | 0,34%  |       |        |
| 5 | 94,46% |        |       | 5,54%  |
| 6 | 9,62%  | 73,30% | 1,38% | 15,70% |

Tabela 16 - Teste 8 - Pontos medidos

Fonte: Autor

Já no teste 8, tem-se um  $V_B$  medido de 0,12mm, ou seja, valor baixo se comparado com as demais ferramentas deste trabalho. Se o critério de fim de vida fosse o  $V_B$  da ferramenta, e a operação fosse um desbaste, ou alguma operação em que o Ra da peça pudesse ser maior, esta ferramenta também poderia ser utilizada.

Observa-se uma superfície e raio de aresta pouco deformados e que há material da peça aderido à superfície da ferramenta, como pode ser observado nos pontos 2, 4 e 5.

Com relação ao desgaste da superfície de saída da ferramenta, vê-se que este desgaste foi pouco profundo, não chegando a caracterizar uma cratera. No ponto 5 existe material do

cavaco aderido, sem haver acúmulo dele. No ponto 6, o Ti encontrado refere-se a material do revestimento aplicado na ferramenta, pois não há aderência neste ponto e o teor deste elemento é bem baixo. Já no ponto 4 pode-se afirmar que existe um pequeno acúmulo de material de cavaco, mas não se pode afirmar que houve aresta postiça de corte neste ponto.

O raio da ponta da ferramenta também deformou muito pouco, assim como o teste 7, ou seja, está com um formato similar à condição inicial, o que contribuiu para uma vida maior comparada as demais ferramentas do trabalho. Esta ferramenta foi a segunda que mais usinou peças neste trabalho, com um total de 62 metros usinados.

Com relação ao desgaste da superfície de folga (figura 37a), no ponto 1 o substrato da ferramenta está bastante exposto (W e Co) e o Ti presente ali pode ser oriundo do próprio revestimento da ferramenta. No ponto 2, existe um alto teor de Ti, indicando que o mecanismo de desgaste predominante foi a adesão (*Attrition*) também. A aparência áspera e com sinais de subtração de grãos na superficial da ferramenta confirma este mecanismo de desgaste. O ponto 3 é muito similar ao ponto 1.

#### **4.2.9 – Conclusão sobre mecanismo de desgaste da ferramenta**

Ao fim da secção 4.1 verificou-se que a ferramenta que obteve a maior vida (metal duro com cobertura de TiCN+TiN) não tinha as melhores propriedades, pelo menos dentre aquelas citadas na tabela 5. Vê-se na tabela que este material possui a menor dureza e a menor temperatura de trabalho dentre os revestimentos testados. Apresentou também um baixo coeficiente de atrito, similar ao menor coeficiente obtido entre todas as ferramentas. Resta então responder à pergunta: por que uma ferramenta com dureza menor e menos resistente ao calor foi a que apresentou maior vida da ferramenta? Esta resposta pode ser dada pelo mecanismo de desgaste. Verificou-se durante a análise dos mecanismos de desgaste que a aderência (*attrition*) foi o principal mecanismo de desgaste presente. Para resistir a este mecanismo, a ferramenta deve ter baixo coeficiente de atrito, para minimizar a aderência. A ferramenta que obteve a mais longa vida de todas (aquela com cobertura de TiN/TiCN) tinha baixo coeficiente de atrito, mas somente esta característica não explica tudo, já que a ferramenta com cobertura de TiAlN tinha coeficiente de atrito até menor. Outra característica importante para que a ferramenta resista ao *attrition* é a resistência das camadas a terem suas partículas arrancadas durante a ocorrência do *attrition*. Dentre as

propriedades das ferramentas/revestimentos mostrados na tabela 5 não existe nenhuma que meça esta característica. Porém, pode-se apontar que uma ferramenta multi-camada como aquela com cobertura de TiN+TiCN, em que cada camada de cobertura tem espessura nanométrica, resiste mais a este arrancamento, devido à pequena espessura de suas camadas.

Também os valores de raio da aresta da ferramenta e de rugosidade da superfície do inserto mostrados na tabela 8 não tiveram influência nos resultados de vida da ferramenta, já que a variação destes valores entre as diversas ferramentas não foi muito grande e a ferramenta que obteve maior vida não foi aquela que possuía os menores valores de raio de aresta e de rugosidade de sua superfície. Em trabalhos futuros, pode-se realizar algum tipo de acabamento nas superfícies da ferramenta a fim de se obter rugosidade bem mais baixa que aquelas obtidas neste trabalho, a fim de se testar a influência deste parâmetro na diminuição da aderência de material da peça/cavaco na ferramenta e, conseqüentemente, na sua vida.

### 4.3 Análise do custo-benefício da aplicação

Realizando-se uma análise em relação ao custo-benefício da utilização das ferramentas testadas, observa-se primeiramente, o custo de cada inserto, conforme mostrado na tabela 17. Vê-se nesta tabela que o TiCN+TiN, que é o inserto que obteve a maior vida em comprimento usinado, não é o inserto mais caro. Após o inserto sem revestimento, que tem o menor valor de aquisição, o inserto revestido com TiAlN é segundo de menor valor. A tabela 17 mostra o custo referência considerado neste trabalho para cada inserto.

|             | R\$ INSERTO | R\$ REVESTIMENTO | R\$ TOTAL | DIFERENÇA (%) |
|-------------|-------------|------------------|-----------|---------------|
| SEM REVEST. | R\$ 60,22   | R\$ 0,00         | R\$ 60,22 | 0%            |
| TiAlN       | R\$ 60,22   | R\$ 2,92         | R\$ 63,14 | 5%            |
| ALCRN       | R\$ 60,22   | R\$ 5,05         | R\$ 65,27 | 8%            |
| TiCN+TiN    | R\$ 60,22   | R\$ 3,88         | R\$ 64,10 | 6%            |

Tabela 17 - Análise de preços dos insertos e dos revestimentos

Fonte: Autor

Fazendo uma relação direta com o preço unitário de cada inserto com a vida apurada de cada ferramenta medida em comprimento usinado, tem-se então o custo por metro usinado (R\$/m usin). A tabela 12 mostra que o inserto revestido com TiCN+TiN obteve um menor valor em R\$/m usinado, sendo para a velocidade de corte de 55m/min o menor valor. Ver tabela 18.

|            | <b>V<sub>c</sub> 55M/MIN</b> | <b>V<sub>c</sub> 66M/MIN</b> |
|------------|------------------------------|------------------------------|
| S/ REVEST. | R\$ 0,94/m usin              | R\$ 1,77/m usin              |
| TIALN      | R\$ 0,58/m usin              | R\$ 1,26/m usin              |
| ALCRN      | R\$ 0,99/m usin              | R\$ 1,55/m usin              |
| TICN+TIN   | R\$ 0,47/m usin              | R\$ 0,52/m usin              |

Tabela 18 - Análise do custo realizado em R\$/metro usinado

Fonte: Autor

Porém, para completar a análise de custo/benefício, deve-se considerar o tempo de troca e a frequência, ou seja, quantas trocas serão necessárias para cada inserto, pois o custo de máquina parada também é importante neste estudo. Pode-se considerar que, quanto maior o comprimento usinado do inserto, menos trocas são necessárias no mês, conseqüentemente, menos tempo de máquina parada ocorrerá por motivo de troca de ferramentas. Para este estudo, foi considerado 5 minutos para a troca do inserto, e o custo hora/máquina de R\$150,00 como sendo um valor estimado. O comprimento usinado para cada teste já foi relacionado anteriormente, o comprimento médio usinado por peça é de 11,27mm, conforme mencionado na tabela 6 e a produção horária é de 20 peças por hora. Considera-se também a produção de 3 turnos com 8h ininterruptos cada turno, pois a máquina trabalha de forma automática. Sendo assim, tem-se o seguinte resultado mensal mostrado na tabela 19:

|                        |          | <b>COMPR<br/>USIN<br/>MÉDIO<br/>EM<br/>METROS</b> | <b>N°<br/>PEÇA<br/>S USIN<br/>NA<br/>MÉDI<br/>A</b> | <b>N° DE<br/>INSERTO<br/>GASTOS<br/>NO MÊS</b> | <b>R\$<br/>GASTO<br/>COM<br/>INSERTO</b> | <b>R\$ GASTO<br/>COM<br/>PARADAS DE<br/>MÁQUINA</b> | <b>R\$<br/>TOTAL</b> |
|------------------------|----------|---|---|--|--|---|----------------------|
| <b>V<sub>c</sub>55</b> | Sem rev  | 32  | 2839,4  | 3,7  | R\$ 223,96                               | R\$ 46,49   | <b>R\$ 270,45</b>    |
|                        | TiAlN    | 54  | 4791,5  | 2,2  | R\$ 139,15                               | R\$ 27,55   | <b>R\$ 166,70</b>    |
|                        | AlCrN    | 33  | 2928,1  | 3,6  | R\$ 235,39                               | R\$ 45,08   | <b>R\$ 280,47</b>    |
|                        | TiCN+TiN | 68  | 6033,7  | 1,8  | R\$ 112,19                               | R\$ 21,88   | <b>R\$ 134,06</b>    |
| <b>V<sub>c</sub>66</b> | Sem rev  | 17  | 1508,4  | 7,0  | R\$ 421,58                               | R\$ 87,51   | <b>R\$ 509,09</b>    |
|                        | TiAlN    | 25  | 2218,3  | 4,8  | R\$ 300,57                               | R\$ 59,51   | <b>R\$ 360,08</b>    |
|                        | AlCrN    | 21  | 1863,4  | 5,7  | R\$ 369,90                               | R\$ 70,84   | <b>R\$ 440,74</b>    |
|                        | TiCN+TiN | 62  | 5501,3  | 1,9  | R\$ 123,04                               | R\$ 23,99   | <b>R\$ 147,04</b>    |

Tabela 19- Análise custo/benefício mensal

Fonte: Autor

Nestas condições, o TiCN+TiN utilizando  $v_c=55\text{m/min}$ , obteve um maior comprimento usinado por aresta, conseqüentemente, a máquina irá parar menos vezes por mês para trocar o inserto, e o custo total com a ferramenta é de R\$134,06 mensal, ou seja, é a opção mais econômica apresentada. Quando há possibilidade de trabalhar com o mínimo custo possível, e que a máquina não seja gargalo na produção, esta opção se torna a mais viável.

O inserto com TiCN+TiN e  $v_c=66\text{m/min}$  obteve o segundo menor custo mensal com ferramenta para esta operação. Em casos em que a máquina é um gargalo na produção, a utilização desta ferramenta com esta velocidade de corte se torna a mais indicada. O comprimento usinado por aresta neste caso será um pouco inferior, 62 metros, porém, devido ao fato de que a velocidade de corte ser maior, o tempo de usinagem será menor e a utilização da máquina para usinar a demanda mensal de peças da empresa será também menor, o que é fator preponderante quando se tem uma máquina gargalo.

## 5 CONCLUSÕES

Na aplicação testada neste trabalho, o tempo de contato entre ferramenta/peça é considerado um tempo de contato relativamente pequeno (2,6 segundos para  $V_c$  66m/min e 3,1 segundos para  $V_c$  55m). Portanto, este fator deve ser considerado de grande importância na geração dos resultados deste trabalho. Para aplicações em que o tempo de contato for maior, os resultados podem ser diferentes.

Baseado nos resultados deste trabalho pode-se concluir para condições similares às aqui testadas que:

- A dureza superficial da ferramenta influenciou pouco no resultado, pois a ferramenta de maior dureza superficial não obteve o melhor resultado.
- O coeficiente de atrito encontrado na superfície das ferramentas influenciou os resultados, pois as ferramentas que obtiveram os melhores resultados são as de menor coeficiente de atrito.
- O desgaste de flanco ( $V_B$ ) gerado na ferramenta não teve nenhuma relação com a rugosidade da peça, pois com critério de fim de vida da ferramenta utilizado ( $R_a$  da peça igual a  $0,8 \mu\text{m}$ ), o  $V_B$  variou entre  $0,10\text{mm}$  e  $0,50\text{mm}$ .
- O raio de aresta e a rugosidade superficial do inserto não influenciaram nos resultados do teste realizado.
- Com o aumento da velocidade de corte, teve-se redução na vida da ferramenta.
- Quando se utilizou revestimento de TiCN+TiN observou-se que o desgaste  $V_B$  no momento de fim de vida foi muito baixo, ou seja, se o critério de fim de vida da ferramenta fosse o valor  $V_B$ , e a rugosidade da peça não fosse importante, seria possível continuar usinando com este inserto.
- O inserto sem revestimento obteve a menor vida devido às suas piores propriedades, (menor dureza superficial, grande coeficiente de atrito e menor temperatura máxima de trabalho).
- A ferramenta que apresentou a maior vida dentre todas as testadas foi aquela recoberta com TiN/TiCN. Supõe-se que isto ocorreu porque, devido ao seu baixo coeficiente de atrito e ao fato de ser multi-camadas e com camadas de revestimento de espessura nanométrica, ela pôde resistir ao principal

mecanismo de desgaste que incluía aderência de material sobre ela (baixo coeficiente de atrito) e arrancamento de suas partículas (devido à pequena espessura de suas camadas).

- O mecanismo de desgaste predominante em todos os experimentos foi a adesão (*attrition*).

Considerando a análise de vida do inserto, com o comprimento usinado como métrica para mensurar o fim de vida, e observando a análise econômica calculando o custo-benefício, conclui-se que a ferramenta com revestimento de TiCN+TiN é a mais indicada para a usinagem de titânio comercialmente puro grau 4 para as 2  $v_c$ 's apresentadas.

## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Alguns trabalhos podem ser realizados no torneamento do titânio de grau puro, a partir dos resultados obtidos neste trabalho. São eles:

- O uso de suporte de refrigeração com vazão direcionada e alta pressão.
- Utilizar o revestimento TiAlN com composição de 33%Ti e 67%Al (o revestimento utilizado neste trabalho foi de 50%Ti e 50%Al), uma vez conhecido que a usinagem de titânio gera muito calor, e o alumínio melhora a propriedade de resistência a altas temperaturas.
- Utilizar a ferramenta com revestimento de TiN/TiCN e superfícies de folga e de saída com rugosidades bem baixas (superfícies polidas).

## Referências

ABDEL-HADY, M., HINOSHITA, K. and MORINAGA, M. (2006). **General approach to phase stability and elastic properties of  $\beta$ -type Ti-alloys using electronic parameters.** *Scr Mater*, 55, 477 -80.

ANTONIALLI, A.I.S., 2009, **Uma Contribuição ao Fresamento Frontal da Liga de Titânio Ti-6Al-4V**, 137 f. Tese (Mestrado) – UNICAMP, Campinas.

BAYOUMI, A. E.; XIE, J. Q. **Some metallurgical aspects of chip formation in cutting Ti6Al4V alloy.** *Materials Science and Engineering A*, v. 190, p. 173-180, 1995.

BIERMANN, D.; HEILMANN, **“Burr Minimization Strategies in Machining Operations” Institute of Machining Technology**, Technische Universität Dortmund, Baroper Str. 301, 44227 Dortmund, Germany, 2009

BOYER, R. R. **An overview on the use of titanium in the aerospace industry.** *Materials Science and Engineering A*, v. 213, p. 103-114, 1996.

BOYER, R.; WELSCH, G.; COLLINGS, E. W. **Materials properties handbook: titanium alloys.** **ASM International:** USA. 1994.

BRAGA, FRANCISCO JOSÉ CORRÊA. **Modificação de superfície empregando-se laser e recobrimento de implantes dentários de titânio com apatitas**, Tese Doutorado Araraquara; 2007.

CALAMAZ M, COUPARD D, NOUARI M, GIROT F (2011) **Numerical analysis of chip formation and shear localization processes in machining the Ti-6Al-4V titanium alloys.** *Int J Adv Manuf Technol* 52:887–895

C. LEYENS, M. PETERS. **Titanium and Titanium alloys; Fundamental and application**, 2003, WILEY-VCH, Germany, ISBN 3-527- 30534-3. <http://www.mdfrossard.com.br>

COLLINGS, E.W. **The Physical Metallurgy of Titanium Alloys.** Ohio: Metals Handbook, American Society for Metals, v.3 p. 353-360, 1985.

CO. A. A.; FALDINI, S.B.; ALMEIDA, G.F.C.; SEKERES, T. S.; KUNIOSHI, C.T.; MORCELLI, A.E.; LIMA, N.B. **Caracterização microestrutural da liga Ti6Al4V comercial utilizada como biomaterial**. In: 17º Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais, 15-19 de novembro, 2006, Foz do Iguaçu, Paraná Brasil. p. 4365-4376.

DAVID A. STEPHENSON , JOHN S. AGAPIOU (2016) **Livro “Metal Cutting Theory and practice”**, third edition. Editora CRC press, Tayloy & Francis Group

DEGARMO, E. P., BLACK, J. T., KOHSER, R. A. **Cutting tools for machining**. In: Materials and processes in manufacturing: machining. 8a ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 1999. 618-43p.

DINIZ, A.E., MARCONDES, F.C., COPPINI, N.L., 2003, **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**, 9. ed., Artliber Editora, São Paulo, 151-170p.

EZUGWO, E.O. ; WANG, Z.M. **Titanium alloys and their machinability, School of Engineering Systems and Design**, South Bank University, London SE1 OAA, UK, 1995

EZUGWU, E. O.; WANG, Z.M. **Titanium alloys and their machinability – a review. Journal of Materials Processing Technology**, v. 68, p. 262-274, 1997.

FARHAD NABHANI, **Machining of aerospace titanium alloys, School of Science & Technology (2001)**, University of Teesside, Middlesbrough TS1 3BA, UK

GOH, G. K. L. et al. **Transitions in Wear Mechanisms of Alumina Cutting Tools**. *Wear*, v.201, p.199-208, 1996.

GUO, Y., LI W., JAWAHIR, I., 2009, **“Surface Integrity Characterization and Prediction in Machining of Hardened and Difficult to Machine Alloys: State of Art Research Review and Analysis”**, *Machining Science and Technology* vol. 3 pp. 437-470.

GUPTA, K, JAIN, NK, LAUBSCHER, RF. **“Hybrid machining processes”**. Cham: Springer, 2016

HOSSEINI, A, KISHAWY, HA. **Cutting Tool Materials and Tool Wear. In: Davim, JP (ed) Machining of Titanium Alloys, Materials Forming, Machining and Tribology**. Berlin: Springer-Verlag, 2014

JAHEDI, M. Z., ZAHIRI, S. H., GULIZIA, S., TIGANIS, B., TANG, C., FRASER, D., 2009, “**Direct Manufacturing of Titanium Parts by Cold Spray**”, Materials Science Forum.

JESUINO, G.A.; RIBEIRO, L.M.F., NAKAZATO, R.Z.; CODARO, E.N.; O. HEIN, L.R. **Propriedades mecânicas e resistência à corrosão da liga Ti4Al4V obtida da reciclagem da liga Ti6Al4V**. MAT. RES., São Carlos, v. 4, n. 2, 63-69, 2001.

J. PAULO DAVIM, VICTOR P. ASTAKHOV, **Machining of hard materials**, Editora Springer London Dordrecht Heidelberg, New York, 2008

KANZLER, G. **Cobertura em pastilhas intercambiáveis**. Disponível em: <http://usinagemvirtual.blogspot.com.br/2009/09/cobertura-em-pastilhas-intercambiaveis.html>. Acesso em: 07 de março de 2014. 2009.

KHAN, A., MAITY, K., 2017, “**Comparative Study of Some Machinability Aspects in Turning of Pure Titanium with Untreated and Cryogenically Treated Carbide Inserts**”, Journal of Manufacturing Processes vol. 28 pp. 272-284.

KOMANDURI, R.; HOU, Z. **On Thermoplastic Shear Instability in the Machining of a Titanium Alloy (Ti-6Al-4V)**. Metallurgical and Materials Transactions A, v 33A, p. 2995-3010, 2002.

KORKUT, I. ; KASAP, M. ; CIFTCI, I. ; SEKER, U. **Determination of optimum cutting parameters during machining of AISI 304 austenitic stainless steel**. Materials & Design, v.25, p.303-305, 2004

LÜTJERING, G.; WILLIAMS, J. C. **Titanium**, 1 ed. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2003. 406 p.

MACHADO, A.R., ABRÃO, A.M., COELHO, R.T., SILVA, M. B., 2009, “**Teoria da Usinagem dos Materiais**”, Ed. Blucher, São Paulo, 371p.

MACHADO, Á. R.; WALLBANK, J. **Machining of titanium and its alloys: A review**. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, v. B204, n. 1, p 53-60, 1990.

MARCONDES, F.C. **A história do metal duro**. Usinagem, 1a ed. São Paulo: CPA, 1990. p. 13-50.

MITSUBISHI. “**MITSUBISHI Tooling Technology, Level 2**”, MITSUBISHI Materials, 288 pags. 2006.

MITSUBISHI. “**MITSUBISHI Tooling Technology, Level 1**”, MITSUBISHI Materials, 162 pags. 2007.

MITSUBISHI. (s.d.). **Metal duro com cobertura (CVD & PVD)**. Disponível em: [http://www.MITSUBISHIcarbide.net/contents/mht/pt/html/product/technical\\_information/grade/milling/f\\_cvd\\_pvd.html](http://www.MITSUBISHIcarbide.net/contents/mht/pt/html/product/technical_information/grade/milling/f_cvd_pvd.html). Acesso em: 11 de março de 2014. 2013.

O BRIEN WJ. “**Dental materials and their selection**”. Chicago, Quintessence Publishing, 1997

OERLIKON BALZERS COATING. **O processo PVD**. Disponível em: <http://www.oerlikonbalzerscoating.com/bbr/por/01-products-services/03-coatingtechnology/02-pvd-process/indexW3DnavidW261.php>. Acesso em: 15 de março de 2014. 2010.

OHLWEILER, O. A. **Química inorgânica**. São Paulo: Edgard Blucher, 1973. v. 2.

PLATIT, **Coating guide, 19 th edition**, Coatings microstructures, 2017. <http://www.platit.com>

PRENGEL, H. G.; PFOUTS, W. R.; SANTHANAM, A. T. Coating carbide cutting tools. **Manufacturing Engineering**, p. 82-88, July, 1996.

RAHMAN, M., WONG, Y.S., ZAREENA A.R., 2003, **An overview of the machinability of aeroengine alloys**, Journal of Material Processing Technology, Vol. 134, pp. 233-253.

RAHMAN, M.; WONG, Y. S.; ZAREENA, A. R. **Machinability of titanium alloys**. JSME International Journal, v. 46, n. 1, p. 107-115, 2003.

SAHOO, B.; SAHU, S. K.; BHATTACHARYA, D.; DHARA, D.; PRAMANIK, P. **Colloids Surf. B** 2013, 101, 280–289.

SANDVIK COROMANT. **Manual Técnico de Usinagem** (Tecnologia da Usinagem dos Metais), 2010. Também disponível em <http://www.coromant.sandvik.com>.

SANDVIK COROMANT. **Titanium Machining**. Application Guide. Sandviken, 2004, p.88

SEMIATIN, S. L.; SOPER, J. C.; SHIVPURI, R. **A simple-model for conventional hot-rolling of sheet materials**. *Metallurgical and Materials Transactions A-Physical Metallurgy And Materials Science*, v. 25 (8), august, p. 1681-1692, 1994.

SHAW, M. C. **Metal cutting principles**. 2 ed. New York: Oxford University Press, 2004. 651 p.

STEMMER, C. E., 1995, **Ferramentas de Corte I**, 4. ed., Editora da UFSC, Florianópolis, 249p.

STEMMER, Caspar Erich. **Ferramentas de Corte I e II**. 6ª Edição, Florianópolis: Editora da UFSC, 2005. 249 p.

SUN, S.; BRANDT, M.; DARGUSCH, M. S. **Characteristics of cutting forces and chip formation in machining of titanium alloys**. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 49, p. 561-568, 2009.

TEIXEIRA ER. **Superfície dos implantes: o estágio atual**. In: Dinato JC, Polido WD. *Implantes osseointegrados: cirurgia e prótese*. São Paulo: Artes Médicas; 2001. cap.5, p.63-80

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

TUNGALOY CUTTING TOOLS. **Catálogo 2013-2014**. Iwaki, Fukushima, Japão. 2014.

ULUTAN, D.; OZEL, T. **Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloy: a review**. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 51, p. 250-280, 2011.

VAN NOORT, R. **Titanium:the implant material of today**. *Journal of Materials Science*, v. 22, p.3801-3811, 1987.

WANG, M.; ZHANG, Y. **Diffusion wear in milling titanium alloys**. *Materials Science and Technology*, v. 4, n. 6, p. 548-553, 1988.

WEISS, I. & SEMIATIN, S. L. **Thermomechanical processing of beta titanium alloys an overview.** MATERIALS SCIENCE & ENGINEERING, 243, 46-65, 1998.

YANG, X.; LIU, C. R. **Machining titanium and its alloys.** *Machining Science and Technology*, v. 3, n. 1, p. 107-139, 1999.

ZOREV, N.N. , OVSEENKO, A.N. **Influence of the cutting process on strength properties and deformation of parts made of titanium alloys.** – In: Proc. Int. Symp. Spored Machinability Activity. – American Society for Metals, 1978, p. 257-271.