



Universidade de Aveiro  
2021

**Ruslan Zagidullin  
Tavrizovich**

**Estudos de torneamento em liga de Ti-6Al-7Nb  
e Ti-13Nb-13Zr**





**Universidade de Aveiro**  
**2021**

**Ruslan Zagidullin**  
**Tavrizovich**

**Estudos de torneamento em liga de Ti-6Al-7Nb**  
**e Ti-13Nb-13Zr**

Dissertação apresentado à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Professor Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva, Professor Catedrático do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro e coorientação do professor Doutor António Manuel de Amaral Monteiro Ramos, Professor Auxiliar do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Este trabalho teve o apoio financeiro dos projetos UIDB/00481/2020 e UIDP/00481/2020 - FCT - Fundação para Ciência e Tecnologia; e CENTRO-01-0145-FEDER-022083 - Programa Operacional Regional do Centro (Centro2020), no âmbito do Acordo de Parceria Portugal 2020, através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional.

Dedico este trabalho a minha família por terem ajudado e acompanhado durante o meu percurso académico na Universidade de Aveiro.

## **o júri**

presidente

Prof. Doutor Robertt Angelo Fontes Valente  
professor associado da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor Pedro Miguel Soares Ferreira  
professor adjunto de Instituto Superior de Engenharia de Coimbra

Prof. Doutor António Manuel de Amaral Monteiro Ramos  
professor auxiliar da Universidade de Aveiro

## **agradecimentos**

A minha família que acompanhou o meu percurso académico, pela paciência e apoio prestado nos momentos mais difíceis, pela confiança em mim e motivação para nunca dar um passo para trás. Um especial OBRIGADO ao meu Pai e a minha Mãe! Sem eles nada seria possível.

Especialmente a minha Esposa pela confiança e por acreditar em mim. Por motivação e dedicação. Pelo carinho e força em momentos de fracasso.

Aos professores que ensinaram as ferramentas necessárias para poder exercer a profissão e representar a Universidade de Aveiro de melhor maneira e com todo o orgulho.

Ao meu co-orientador António Manuel de Amaral Monteiro Ramos pela paciência prestada durante o percurso académico e elaboração da presente Tese de Mestrado.

A Sílvia Carvalho (ex-colega, agora investigadora) e Professor António José da Fonseca Festas Membro da Comissão Executiva-Unidade Orgânica pelo apoio nas oficinas do Departamento de Engenharia Mecânica

A todos os meus amigos do curso MIEM que ficarão para sempre e que deram o apoio sem qual não irei conseguir alcançar os objetivos

Aos meus colegas de trabalho que também de várias formas contribuíram para o meu sucesso.

## palavras-chave

Maquinabilidade, ligas de titânio, torneamento, ferramentas de corte, lubrificação, MQL, rugosidade

## resumo

O estudo em causa é todo dedicado a maquinabilidade de ligas de titânio Ti-6Al-7Nb e Ti-13Nb-13Zr. Estudar e descrever os processos, efetuar ensaios práticos e tirar conclusões. Para ensaios práticos irei utilizar um torno CNC nas instalações de Universidade de Aveiro.

O objetivo é variar parâmetros de corte, de avanço e condições de maquinagem para poder perceber o comportamento da liga de titânio em função das alterações impostas pelo operador.

O material vai ser maquinado em pistas de 10 mm para posteriormente serem medidas as forças de corte, rugosidades e também analisadas as consequências como a qualidade de apara resultante de corte e o estado da pastilha. Irei utilizar ferramentas de medição tais como micrómetro, rugozímetro para obter valores de parâmetros de acabamento superficial e vários *softwares* de auxílio para obter parâmetros de forças de corte e também o microscópio ótico para análise do estado da ferramenta de corte e de apara resultante.

Os dados irão ser registados para poder trabalhá-los ter uma perceção melhor dos resultados obtidos. A parte teórica é feita na busca dos artigos científicos dos trabalhos realizados anteriormente para poder dar continuidade ao processo de estudo de maquinabilidade de titânio e o seu progresso.

Os resultados obtidos levaram a conclusão de que para a mesma aplicação a liga Ti-13Nb-13Zr é mais favorável comparada a Ti-6Al-7Nb visto que as forças de corte são mais baixas e acabamento superficial apresenta valores menores. Também se concluiu que o uso de emulsão na maquinagem de titânio torna o processo mais economicamente viável.

**keywords**

Machinability, titanium alloy, turning, cutting tool, lubrication, MQL, roughness

**abstract**

The study in question is entirely dedicated to the machinability of Ti-6Al-7Nb and Ti-13Nb-13Zr titanium alloys. Study and describe the processes, carry out practical tests and draw conclusions. For practical tests, I will use a CNC lathe at the University of Aveiro facilities.

The objective is to vary cutting parameters, feed, and machining conditions to understand the behavior of the titanium alloy as a function of changes imposed by the operator.

The material will be machined in 10 mm tracks to later measure the cutting forces, roughness and analyze the consequences such as chip quality resulting from cutting and the condition of the insert. I will use measurement tools such as a micrometer, roughness meter to obtain surface finish parameter values, and various assistive software to obtain cutting force parameters and the optical microscope to analyze the state of the cutting tool and resulting chip.

The data will be registered to work with them to have a better perception of the results obtained. The theoretical part is carried out in the search for scientific articles from previous works to continue the process of studying titanium machinability and its progress.

The results obtained led to the conclusion that for the same application the Ti-13Nb-13Zr alloy is more favorable compared to Ti-6Al-7Nb since the cutting forces are lower and the surface finish presents lower values. It was also concluded that the use of emulsion in titanium machining makes the process more economically viable.



# ÍNDICE

<b>CAPITULO I - Introdução</b> .....	1
Motivação/Objetivos.....	2
<b>CAPITULO II - Estado de Arte</b> .....	4
Enquadramento.....	4
Maquinagem .....	8
Torneamento.....	10
Maquinabilidade das ligas de titânio .....	14
Formação e tipos de apara .....	16
Parâmetros de corte.....	22
Ferramentas de corte .....	23
Forças de corte.....	25
Acabamento superficial.....	28
Maquinagem sustentável.....	33
Lubrificação e refrigeração na maquinagem .....	34
Vida útil e desgaste das ferramentas de corte.....	37
<b>CAPITULO III – Materiais e Metodologias</b> .....	40
Plano de ensaios e ligas de titânio a utilizar.....	40
Provetes das ligas .....	40
Parâmetros de corte.....	42
Plano de ensaios.....	43
Metodologia para avaliação .....	45
Forças de corte .....	46
Caracterização da apara. ....	48
Desgaste de ferramenta de corte.....	49
<b>CAPITULO IV – Resultados e Discussão</b> .....	50
Forças de corte resultantes.....	50
Apara resultante do corte .....	58
Rugosidade superficial .....	63
Desgaste de ferramenta de corte.....	68
<b>CAPITULO V – Conclusões</b> .....	70
Trabalhos futuros .....	71

<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....</b>	<b>72</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>75</b>
ANEXO 1 – Equações para cálculo de parâmetros de corte (SANDVIK 2021) .....	75
ANEXO 2 – Tipos de desgaste de ferramenta (Mitsubishi Tools 2021) .....	76

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Percentagem de minérios extraídos em Portugal (Boletim das Minas Vol.50 N°2, Lisboa 2015).....	6	
Figura 2 – Variedades de titânio comercializado (Donachie 2000).....	7	
Figura 3 – a) Exemplo de pás de uma turbina (BOYER, RR, 1996.) e b) Prótese de Joelho em Titânio (Breme J. Eisenbareth E.; Biehl V, 2003).....	7	
Figura 4 - Torneamento cilíndrico (wikipedia.org).....	10	
Figura 5 Fatores que influenciam a geometria da apara (Machado, 2009).....	17	
Figura 6 - Tipos de apara (Machado, 2009).....	17	
Figura 7 - Formação da apara (Machado, 2009).....	18	
Figura 8 - Formação de apara vista no microscópio (Caraguzel, 2014).....	19	
Figura 9 - Diagrama de corte (Caraguzel, 2014).....	19	
Figura 10 - Movimentos da ferramenta e apara (Caraguzel, 2014).....	19	
Figura 11 - Análise de forças de corte (Caraguzel, 2014).....	20	
Figura 12 - Tipos de apara (Groover, 2015).....	20	
Figura 13 - Formas das aparas obtidas em função do material utilizado, vista exterior (em cima) e corte transversal (em baixo) de Ti CP, Ti-6Al-4V, Ti-6Al-7Nb e Latão para $V_c=56$ m/min, $f=0,02$ mm/rot e $a_p=0,4$ mm (Abele & Frohlich, 2009).....	21	
Figura 14 - Diagrama de movimentos no torneamento (Machado, 2009).....	22	
Figura 15 - Processo de CVD (Revista IH, 2016)	Figura 16 - Processo PVD (Revista IH, 2016).....	24
Figura 17 - Força de corte em função do avanço (Sun, Brandt, Dargusch, 2009).....	26	
Figura 18 - Forma, ondulação e rugosidade de uma superfície (Stephenson, Agapiou, 2015).....	28	
Figura 19 - Representação de um projeto Box-Behnken de três fatores (Box, 2005).....	30	
Figura 20 - Fatores que afetam a fabricação sustentável e os seus níveis desejados (Fratila, 2013).....	33	
Figura 21 - Sistema MQL. a) principio de funcionamento; b) aplicação externa; c) aplicação interna.(Stephenson, Agapiou, 2015).....	36	
Figura 22 - Comparação de maquinagem a ar seco, liquido abundante e MQL para a) desgaste da ferramenta; b)rugosidade superficial.(Dhar, Kamruzzaman, Ahmed,2006)....	37	
Figura 23 - Efeitos de $V_c$ (velocidade de corte), $f$ (velocidade de avanço) e $A_p$ (profundidade de corte) para vida útil de ferramenta (revistaferramental.com, 2021).....	38	
Figura 24 - Tres fases da durabilidade de ferramenta de corte. Gráfico analítico. (revistaferramental.com, 2021).....	38	
Figura 25 - Fatores que afetam a vida útil das ferramentas de corte (Adaptado do Davim, 2008).....	39	
Figura 26 - Pistas dos provetes maquinadas.....	43	
Figura 27 - Diagrama de corte.....	44	
Figura 28 - Gráfico das forças, a) sinal obtido na medição, b) filtro de 8° refinamento, c) 10° refinamento.....	47	
Figura 29 - Classificação da apara segundo a norma ISSO 3685.....	48	

Figura 30 - Medição das faces de saída e de ataque das ferramentas de corte ISO 3685 ...	49
Figura 31 - Forças resultantes das diferentes condições de corte a) Fx b) Fy c) Fz. ....	52
Figura 32 - Forças resultantes das diferentes condições de corte a) Fx b) Fy c) Fz. ....	53
Figura 33 - Forças de corte para Vc constante .....	54
Figura 34 - Forças de corte com velocidade de avanço constante .....	55
Figura 35 - Forças de corte para Vc constante .....	56
Figura 36 - Forças de corte com avanço constante.....	57
Figura 37 - Valores de Ra para a liga Ti-6Al-7Nb para avanços a) 0,035mm/rot e b) 0,077mm/rot.....	64
Figura 38 - Valores de Rt para a liga Ti-6Al-7Nb para avanços a) 0,035mm/rot e b) 0,077mm/rot.....	64
Figura 39 - Valores de Ra para a liga Ti-13Nb-13Zr para avanços a) 0,035mm/rot e b) 0,077mm/rot.....	65
Figura 40 - Valores de Rt para a liga Ti-13Nb-13Zr para avanços a) 0,035mm/rot e b) 0,077mm/rot.....	66

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Propriedades de titânio.....	11
Tabela 2 - Classificação das ligas de titânio (Knoll & Schaeffer, 2006) .....	13
Tabela 3 - Composição química da liga Ti-6Al-4V segundo a norma ASTM B 381-71 (Knoll & Schaeffer, 2006).....	13
Tabela 4 - Composição química das ligas de titânio puro (em percentagem) (ASTM International, 2021) .....	14
Tabela 5 – Índice de maquinabilidade dos materiais (Donachie 2000) .....	15
Tabela 6 – Fatores que afetam a maquinabilidade (Adaptado de Davim J P, 2008) .....	16
Tabela 7 – Parâmetros de torneamento recomendados. (Donachie, 2000) .....	23
Tabela 8-Composição química do Ti-CP Gr. 4(UPM, 2020) .....	29
Tabela 9-Propriedades mecânicas do Ti-CP Gr. 4(UPM, 2020).....	29
Tabela 10— Parâmetros de corte iniciais recomendados para ferramenta TNMG 160404-SF 1105 para maquinagem de titânio (Sandvik, 2018).....	29
Tabela 11-Matriz de experiência e resultados (Singh, Sharma, 2017).....	31
Tabela 12-Tabela de resultados ANOVA para torneamento de Ti-CP Gr.4(Singh, Sharma, 2017).....	32
Tabela 13-Principais métodos de lubrificação no uso da EFM (Gupta, Laubscher, 2016).....	35
Tabela 14 - Propriedades mecânicas de Ti-6Al-7Nb. ....	40
Tabela 15 - Propriedades químicas de Ti-6Al-7Nb. ....	40
Tabela 16 - Propriedades mecânicas de Ti-13Nb-13Zr. ....	41
Tabela 17 - Propriedades químicas de Ti-13Nb-13Zr.....	41
Tabela 18 - Parâmetros de corte para ensaio (adaptado Secotools) .....	43
Tabela 19 - Forças de corte resultantes para a liga Ti-6Al-7Nb a) a seco e b) com emulsão. ....	50
Tabela 20 – Forças de corte resultantes para a liga Ti-13Nb-13Zr a) a seco e b) com emulsão.....	50
Tabela 21 - Aparas resultante de corte de liga Ti-6Al-7Nb.....	59
Tabela 22 - Aparas resultante de corte de liga Ti-13Nb-13Zr.....	60
Tabela 23 - Aparas de liga Ti-6Al-7Nb vista no microscópio.....	61
Tabela 24 - Aparas da liga Ti-13Nb-13Zr vista no microscópio.....	61
Tabela 25 - Valores das rugosidades Ra e Rt em condições de corte a) seco e b) emulsão da liga Ti-6Al-7Nb.....	63
Tabela 26 - Valores das rugosidades Ra e Rt em condições de corte a) seco e b) emulsão da liga Ti-13Nb-13Zr.....	63
Tabela 27 - Resultados de desgaste de ferramenta de corte .....	68

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AIMMAP - Associação dos industriais Metalúrgicos Metalomecânicos e Afins de Portugal  
AISI - American Iron and Steel Institute  
Al - Alumínio  
Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>- Oxido de Alumínio  
ANOVA- Análise da Variância  
APT- Automatically Programmed Tool  
ASTM- American Society for Testing and Materials  
BBD- Box-Behnken Design  
C- Carbono  
ccc- Cubica de Corpo Centrado  
CAD- Computer Added Design  
CAM- Computer Added Manufacturing  
CBN- Nitreto Cubico de Boro  
CN- Control Numeric  
CNC- Computer Numeric Control  
Co- Cobalto  
Cr- Crómio  
CVD- Chemical Vapor Deposition  
DFM- Design For Manufacturing  
EFM- Environmentally Friendly Machining  
f- Avanço  
Fa- Força de Penetração  
Fc- Força de Corte  
Ff- Força de Avanço  
FeTiO<sub>3</sub>- Ilmenite  
GL- Graus de Liberdade  
HC- Hexagonal Compacta  
HfN- Nitreto de Háfnio  
IBM- International Business Machines Corporation  
IT- Intervalo da Tolerância  
MIT- Massachusetts Institute of Technology  
Mo- Molibdénio  
MQL- Minimum Quantity Lubrification  
N- Azoto  
Nb- Nióbio  
O- Oxigénio  
PCD- Diamante Policristalino  
PIB- Produto Interno Bruto  
PVD- Physical Vapor Deposition  
Ra- Rugosidade Média Aritmética  
Rt- Amplitude Máxima de Rugosidade  
Si- Silício

Sn- Estanho  
SQ- Soma Quadrática  
Ti- Titânio  
TiAlN- Nitreto de Titânio e Alumínio  
TiB<sub>2</sub>- Diboreto de Titânio  
TiC- Carboneto de Titânio  
TiCN- Carbonitreto de Titânio  
Ti-CP- Titânio Comercialmente Puro  
TiN- Nitreto de Titânio  
TNMG- Código da Ferramenta Sandvik  
TiO<sub>2</sub>- Dióxido de Titânio  
u- Unidade  
V- Vanádio  
V<sub>c</sub>- Velocidade de Corte  
V<sub>p</sub>- Velocidade de Penetramento  
WC- Carboneto de Tungstênio  
α- Alfa  
β- Beta

## **LISTA DE UNIDADES**

°C- Graus Celsius

E- Modulo de Elasticidade

GPa- Giga Pascal

HB- Brinell Hardness

HRC- Rockwell C Hardness

K- Kelvin

Kg/m<sup>3</sup>- Quilogramas por Metro Cubico

mm- Milímetros

m/min- Metros por Minuto

mm/rot- Milímetros por Rotação

MPa- Mega Pascal



## **CAPITULO I - Introdução**

No século XXI, onde os problemas económicos, políticos e ambientais estão expostos perante a humanidade, existe um forte crescimento na procura e desenvolvimento de materiais metálicos e não-metálicos bem como a reutilização e otimização nos materiais já existentes no mercado. Nos dias de hoje, a concorrência intelectual na produção de diversos componentes para diferentes tipos de utilização obriga as empresas e instituições recorrer a uma análise detalhada nos processos de produção e nos materiais utilizados para esse propósito. Nos materiais metálicos, não é segredo nenhum que os metais influenciam muito o nosso dia a dia, e estamos rodeados de bens de utilização ligas e materiais extraídos da terra. Se no século XX não se dava muita preocupação a escassez dos minerais da crosta terrestre, hoje em dia devido ao crescimento da população mundial e a diversidade de oferta de produtos é necessário recorrer ao desenvolvimento de novos materiais ou o estudo de materiais de substituição tal como otimização de meios de transformação desses materiais em produtos.

Segundo AIMMAP (2018) – “*Associação dos Industriais Metalúrgicos, Metalomecânicos e Afins de Portugal*” em Portugal, setor metalomecânico representa cerca de 18% do PIB e é um dos pontos mais importantes para economia do país visto que representa um terço dos produtos exportados para vários países.

Um dos materiais que teve forte crescimento na procura desde o início do século XXI é o titânio e as suas ligas. Na indústria aeronáutica a utilização da liga já se tornou uma aplicação normal visto que é um material que tem boa resistência e trabalha em ambientes extremos e temperaturas elevadas. Mas também por alguns desses aspetos e não só, a utilização do titânio na indústria biomédica tem vindo a aumentar, principalmente para o fabrico de próteses para o corpo humano. Elevada resistência a corrosão, biocompatibilidade e propriedades mecânicas favoráveis foram o alvo para melhorar a vida das pessoas com capacidades reduzidas. No entanto, segundo Donachie (2000) o titânio e as suas ligas foram classificados como materiais de difícil maquinabilidade, uma vez que lhe são intrínsecas propriedades como alta reatividade química e baixa condutibilidade térmica. Neste sentido torna-se importante o estudo de ligas de forma a encontrar soluções otimizadas para diferentes aplicações. Na presente tese de mestrado irei focar-me especialmente em duas

ligas Ti-13Nb-13Zr e Ti-6Al-7Nb para avaliar os resultados obtidos perante as mesmas condições de maquinagem e verificar qual delas as duas apresentai melhores resultados.

## Motivação/Objetivos

A vasta gama de aplicabilidade de titânio e as suas ligas em diferentes indústrias e processos obriga um estudo bastante pormenorizado da sua maquinabilidade para aumentar o desempenho dos produtos finais. Para além disso é muito importante fazer uma análise desses metais perante maquinagem otimizada e sustentável. O objetivo da presente dissertação é analisar a maquinabilidade de liga de titânio no processo de torneamento cilíndrico exterior recorrendo a um torno CNC, em diferentes condições de corte. Durante o processo devemos trabalhar seguindo o conceito de maquinagem sustentável a nível da lubrificação como do desperdício do material.

A avaliação da maquinabilidade de titânio será feita pelos seguintes aspetos:

- Análise da apanha resultante do processo de maquinagem;
- Análise das forças de corte envolvidas no processo;
- Análise da rugosidade e precisão dimensional dos provetes utilizados;
- Análise de desgaste da ferramenta de corte;
- Análise de utilização de lubrificante no processo.

Para cumprir os objetivos anteriormente descritos irão ser realizados diferentes testes de corte para dar resposta a avaliação da apanha, acabamento superficial, desgaste de ferramenta, medição das forças de corte durante o processo e a influência de lubrificação MQL durante o processo de forma a melhorar os aspetos acima referidos.

A dissertação é dividida em seis capítulos de forma fluida onde cada capítulo seguinte é a continuação do capítulo anterior.

No presente **CAPÍTULO I** tem o lugar a introdução e objetivos onde são descritos os aspetos a abordar na presente tese e descrever a importância da investigação na área.

O **CAPÍTULO II** serve para descrever o estado da arte do estudo em causa. Neste capítulo apresenta-se o estado de arte da investigação na maquinabilidade de ligas de titânio.

Todo o procedimento experimental do processo está descrito no **CAPITULO III**. Onde são expostos os métodos e procedimentos, que tipo de ensaios e materiais estão a ser trabalhados e também discutir e avaliar na prática a teoria descrita nos capítulos anteriores.

No **CAPITULO IV** estão presentes os resultados obtidos nos ensaios experimentais. Cada tipo de ensaio está em separado para uma melhor compreensão dos resultados obtidos.

No **CAPITULO V** e **VI** encontram-se discussões e conclusões respetivamente. Nos presentes capítulos obtemos uma visão qualitativa dos trabalhos realizados e discussões dos mesmos.

## **CAPITULO II - Estado de Arte**

### **Enquadramento**

Analisando os processos e meios de transformação de matéria-prima em produto por remoção de material a maquinagem tem o papel fundamental na produção de bens que utilizamos no nosso dia-a-dia. Esse processo de corte de metais consiste em remoção de material partir de um bloco bruto ou com pré-forma até obter a geometria do produto final. (J.P. Davim, A. Festas, A. Completo 2015)

O processo de formação da apara é complicado e variável, e apenas pode ser explicado por uma combinação de mecanismos que dependem de aspetos metalúrgicos (material da peça e da ferramenta), da temperatura de corte e dos gradientes desenvolvidos, da espessura da apara, que condicionam as tensões. Outro fator de relevo é do ângulo de ataque e do estado de afiamento da ferramenta, que afetam o sistema de forças aplicado Shaw (1984).

Até os dias de hoje a maquinagem continua a ser um processo difícil de compreender devido a vasta quantidade de parâmetros que influenciam a formação de apara e remoção de material. Parâmetros estes que obrigam fazer uma investigação abrangente para otimizar os processos de corte, lubrificação e remoção de material para tornar o processo cada vez mais rentável e colmatar eventuais lacunas existentes na produção de componentes de todo o tipo de materiais maquináveis por processo de remoção de material.

Titãs..., os fortes e invencíveis que enfrentavam os Deuses do Olimpo para chegar ao poder da Antiga Grécia. Os resistentes e incansáveis..., foi por essas propriedades que o farmacêutico Alemão Martin Heinrich Klaproth deu o nome ao mineral que extraiu de uma rocha de rutilo ( $TiO_2$ ), minério, mas puro, em 1795 (Donachie, 1982). Mas quatro anos antes, o mineralogista Inglês William Gregor extraiu o mesmo mineral de uma rocha de ilmenite ( $FeTiO_3$ ), e o nome que lhe deu na altura não tinha influência Grega, e denominou-o de menaquita.

A baixa procura e falta de aplicabilidade desse material, fizeram com que o mineral durante décadas não era explorado por não existir meios de extração de minério puro, e apenas anos e anos depois, os investigadores começaram a investigar e desenvolver maneiras

de extrair o elemento recém-descoberto do Rutilo e de Imenita. Mudança veio em 1910, quando um químico chamado Matthew Hunter desenvolveu um método para produzir metal de Titânio, misturando Rutilo com coque e Cloro. O processo denominado Hunter se tornou o primeiro processo em escala industrial para produção desse metal.

Passados 20 anos, durante a década 1930 um investigador de Luxemburgo chamado William Kroll começou a experimentar o titânio e 8 anos depois desenvolveu um processo posteriormente chamado de processo de Kroll. Anos depois, no início de segunda guerra mundial, para poder continuar a trabalhar no fruto da sua criação o Kroll mudou-se para Estados Unidos e patenteou o seu processo em 1940. Por razões políticas e culturais a patente acabou por ser anulada, e a justificação disso foi a cidadania do Kroll. Não sendo cidadão americano ele não podia patentear a sua invenção nos Estados Unidos, mas sete anos depois, passando por várias “guerras” com o estado americano a patente ficou restabelecida. (Donachie, 1982).

O processo de Kroll é feito em várias etapas passando o gás cloro através do Rutilo num colorador. Durante próxima etapa do processo tetracloreto de titânio e cloretos são produzidos a partir do minério. A remoção do oxigénio através do processo de destilação deixa o tetracloreto de titânio na forma líquida. Ao adicionar magnésio ou sódio líquido resulta uma esponja metálica que é triturada e colocada num forno de arco elétrico de vácuo. Esponja essa é derretida dentro do forno, mas ao contrário de outros metais não é derramada porque se solidifica no vácuo. A quantidade de etapas para produzir o titânio puro torna o material muito caro, comparado por exemplo ao aço. Após dominar o processo de produção de titânio, o William Kroll usou uma técnica semelhante para produção de metal de zircónio. Tanto titânio como zircónio são usados para produção de peças na indústria espacial e aeronáutica. Mas o titânio, ao contrário do zircónio não é prejudicial para a saúde e é usado em aplicações medicinais. O processo de Kroll veio substituir o processo de Hunter e continua a ser a tecnologia dominante relativamente à produção de titânio, assim como a principal força motriz para a produção mundial de magnésio metálico. (Donachie 2000)

O Titânio está entre os 10 elementos mais abundantes da crosta terrestre. Uma análise de Serviço Geológico dos Estados Unidos aponta que 97,9% das rochas ígneas possuem fragmentos de titânio. Geograficamente, o minério está presente em vários países do mundo, mas alguns deles, todos juntos, representam 86% da quantidade mundial desse mineral. Austrália, África do Sul, Canadá, Noruega e Ucrânia, são os maiores possuidores de Titânio. (Bedinger, George M, 2017) Portugal tem uma baixa presença desse mineral na costa terrestre, por exemplo em Viana do Castelo existe uma mina de titânio. Dos 100% de produção de diferentes minerais apresentados na Figura 1 apenas 0,4 % pertencem a produção de titânio, mas existem várias empresas que transformam essa liga para diferentes tipos de utilização, desde indústrias metalúrgicas até aplicações medicinais e de engenharia.

<b>Cálculos auxiliares</b>				
<b>Total</b>		<b>Tipo de mina (substância) no Distrito de Viana do Castelo</b>	<b>nº</b>	<b>%</b>
231	100%	Caulino	19	8,2%
		Estanho	127	55,0%
		Estanho e Arsénio	1	0,4%
		Estanho e Ouro	4	1,7%
		Estanho e Tântalo	1	0,4%
		Estanho e Titânio	1	0,4%
		Feldspato	1	0,4%
		Ferro	1	0,4%
		Nióbio e Tântalo	5	2,2%
		Ouro	6	2,6%
		Ouro e Prata	1	0,4%
		Ouro e Volfrâmio	1	0,4%
		Quartzo	2	0,9%
		Quartzo e Feldspato	12	5,2%
		Tântalo	3	1,3%
		Titânio	1	0,4%
		Volfrâmio	20	8,7%
Volfrâmio e Estanho	25	10,8%		

Figura 1 – Percentagem de minérios extraídos em Portugal (Boletim das Minas Vol.50 Nº2, Lisboa 2015)

O aspeto visual da liga no seu estado comercial depende muito da indústria e do produto final. Mas de um modo geral, como podemos ver na Figura 2, o material pode ser fornecido extrudido ou laminado em forma de tubo, folha, barra, varão, granulado para fundição e etc...

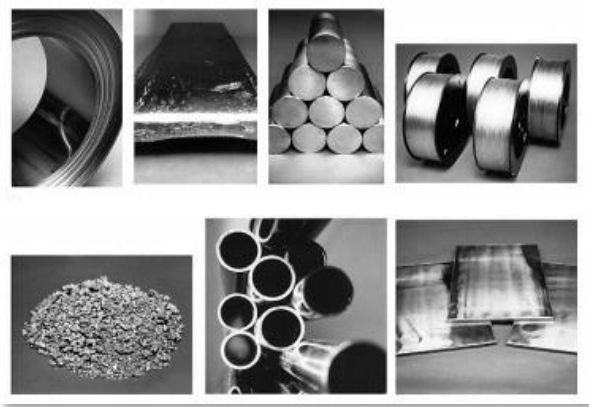
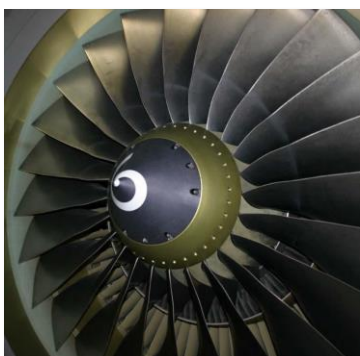


Figura 2 – Variedades de titânio comercializado (Donachie 2000)

Aplicabilidade de titânio é infinita e depende desde a imaginação até viabilidade económica. São várias indústrias que por uma ou outra razão apontam a sua escolha para esse metal, aeronáutica, medicina, automóvel, são os principais consumidores dessa liga.

Na figura 3 a) podemos ver um exemplo de aplicação na indústria aeronáutica, são as pás de turbina que são capazes de atingir velocidades e temperaturas extremas como no exemplo de um motor de avião.



a)



b)

Figura 3 – a) Exemplo de pás de uma turbina (BOYER, RR, 1996.) e b) Prótese de Joelho em Titânio (Breme J. Eisenbareth E.; Biehl V, 2003)

Também por outras razões nas últimas décadas as ligas de titânio tiveram forte evolução nas aplicações medicinais como revela o exemplo da Figura 3 b) da prótese total da articulação do joelho, visto que o material tem boa compatibilidade biológica e é resistente a corrosão. O titânio e suas ligas são materiais de engenharias novos em comparação às outras ligas metálicas, mas apresentam combinações de propriedades extraordinárias.

O metal puro tem baixa densidade dentro da classe dos metais (cerca de 45% menor a do aço), um ponto de fusão elevado (1668 °C) e um módulo de Young (E) de 107 GPa. Sem outros elementos de liga, é utilizado em protetores de motores a jato, carcaças e fuselagens de aviões e equipamentos resistentes à corrosão na indústria naval e petroquímica. Já suas ligas têm grande resistência (Limite de Resistência à Tração podem chegar a 1400 MPa). (Rodrigues, J. & Martins, P. 2010)

## Maquinagem

Já a partir de anos 700 A.C. o homem trabalhava materiais brutos, onde praticamente todas as ferramentas eram executadas em aço e eram manuseadas manualmente. A lenta evolução da humanidade fez com que apenas no século XVII surgiram novas formas de melhorar os processos de fabricação do aço e de siderurgia dos aços, tanto como as ferramentas do processo. (Ferraresi; Edgard Blücher, 1970) Os primeiros metais mais conhecidos foram o cobre e o ouro. Os homens utilizavam tais metais para fabricação de armas e de ferramentas já no fim da pré-história. Estudos mais aprofundados sobre a maquinagem iniciara-se somente no século XIX e em 1900 o americano F.W. Taylor descobriu o aço rápido, determinando um passo marcante no desenvolvimento de maquinagem. Nesta mesma época surgiram as máquinas movidas a vapor, fazendo com que o trabalho do homem fosse extremamente facilitado. Já se podia trabalhar com o esforço mínimo necessário. Logo de seguida surgiram as máquinas movidas a eletricidade. (Machado, 2009)

Por maquinagem compreende-se o processo de subtração mecânica que visa dar forma a uma peça, seja ela metálica ou não, a esse material chamamos de matéria-prima, ou em alguns casos pode chama-se por matéria base. Em alguns dicionários maquinagem



significa ato ou efeito de maquinar, mas na prática isso significa submeter um material bruto a ação de uma máquina ou ferramenta para ser trabalhado. (Ferraresi, 1970)

Existem vários processos de maquinagem, entre eles os mais conhecidos e usados serramento, aplainamento, torneamento, fresagem, furação, electroerosão, entre outros. A maquinagem começou em tempos remotos com processos totalmente manuais ou convencionais e hoje em dia evoluiu muito com o uso das máquinas de alta precisão, como é o caso de CNC (comando numérico computadorizado), que garantem uma precisão até um micrón ( $1 \times 10^{-6}$  m). Hoje em dia a maquinagem esta presente em diversas indústrias como por exemplo indústria automóvel, naval, espacial, eletrónica e eletromecânica entre outros...

## Torneamento

Torneamento é a operação que é realizada num equipamento chamado torno. Trata-se de combinação de movimentos de rotação e de translação, como mostra Figura 4. Várias combinações desses dois movimentos permitem obter peças de geometrias complexas e de graus de exigência muito elevados. Dependendo das geometrias a obter podemos ter peça em rotação e ferramenta em translação (aplica-se maioritariamente ao torneamento convencional), peça estacionária e ferramenta em rotação e translação e podemos também trabalhar peça em rotação e ferramenta em rotação e translação (os dois casos são de torneamento CNC,).

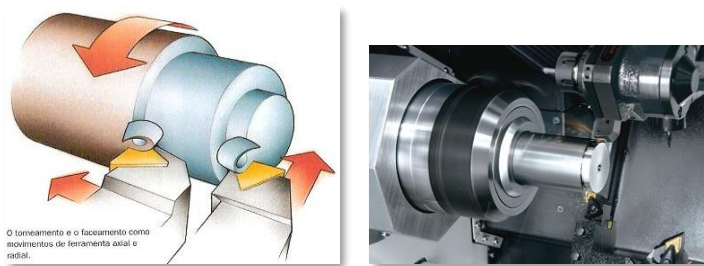


Figura 4 - Torneamento cilíndrico

## As ligas de titânio

Tabela 1 - Propriedades de titânio

<b>Simbolo</b>	Ti
<b>Massa atômica</b>	47,867u
<b>Número atômico</b>	22
<b>Distribuição eletrônica</b>	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^2$
<b>Serie química</b>	metal de transição
<b>Densidade</b>	4507 kg/m <sup>3</sup>
<b>Ponto de fusão</b>	1941 K
<b>Reatividade</b>	pouco reativo em temperatura ambiente. A partir de 450°C, já se torna reativo com várias substâncias; acima de 600°C, torna-se altamente reativo. É uma substância anfótera, reagindo com ácidos e bases.
<b>Condutividade</b>	não é um bom condutor de energia térmica ou elétrica

O titânio, Tabela 1, é um metal que apresenta uma excelente resistência à corrosão, uma elevada relação de resistência/peso e boas propriedades quando é aplicado a altas temperaturas, possuindo ainda uma excelente biocompatibilidade. (Donachie, 1982)

Segundo Antonialli (2009), a crescente utilização das ligas de titânio como um biomaterial pode ainda ser explicada pelo seu baixo módulo de elasticidade (110-120 GPa), a sua não-toxicidade, e talvez a mais importante, a ausência de reação alérgica quando em contato com os tecidos humanos (biocompatibilidade). O metal apresenta em geral uma resistência mecânica comparável à dos aços, mas com aproximadamente 50% da sua densidade. No caso da comparação com as ligas de alumínio, a resistência mecânica das ligas de titânio é cerca de 400% superior, com apenas uma densidade 50% superior. (Oestreich, D., Mosquen, A., Stoffel, D. & Souza, 2011). De entre os diversos tipos, os comercialmente puros (ASTM B, graus 1, 2, ...) com resistência à tração entre 241 e 552 MPa, são mais fáceis de maquinar do que por exemplo a liga Ti-6Al-4V. A dificuldade de maquinagem surge na consequência de adição de diferentes materiais a liga. (Rodrigues, J. & Martins, P. 2010). O titânio apresenta duas formas alotrópicas: uma estrutura cristalina hexagonal compacta (HC) à temperatura ambiente, designada por fase alfa ( $\alpha$ ), que se transforma alotropicamente para cúbica de corpo centrado (ccc) a 882 °C, chamada por fase

beta ( $\beta$ ), que se mantém até aos 1672° C, ocorrendo a essa temperatura a fusão do material (Ezugwu & Wang, 1997).

Os elementos presentes nas ligas de titânio promovem a estabilização da fase  $\alpha$  ou da fase alotrópica  $\beta$ , através da modificação da temperatura de transição. Os que estabilizam a fase  $\alpha$  são designados de  $\alpha$ -estabilizadores, podendo-se indicar como exemplo o alumínio (Al), o oxigénio (O), o azoto (N) e o carbono (C). No caso do alumínio (Al), este endurece a fase  $\alpha$  até à temperatura de 550° C, tendo como principal vantagem a sua baixa densidade. Elementos como o oxigénio (O), o azoto (N) ou o carbono (C) são tidos como impurezas nas ligas comerciais, contudo, o oxigénio é utilizado como “endurecedor”, promovendo diversas combinações de dureza e facilitando o processo de fabricação das ligas. Elementos que diminuem a temperatura de transição são chamados de  $\beta$ -estabilizadores, sendo os mais relevantes o Molibdênio (Mo), o Vanádio (V) e o Nióbio (Nb) (Oestreich, 2011).

Segundo Knoll & Schaeffer (2006) as ligas de titânio podem então ser classificadas em três grupos de acordo com suas propriedades metalúrgicas: Ligas  $\alpha$ , Ligas  $\alpha$ - $\beta$  e Ligas  $\beta$ .

As ligas  $\alpha$  contêm  $\alpha$ -estabilizadores algumas vezes combinados com elementos neutros. Possuem pouca relevância comercial, tendo boas propriedades mecânicas em temperaturas até 300°C, e utilização principal em aplicações onde é exigida resistência à corrosão e à criogenia.

As ligas  $\alpha$ - $\beta$  contêm  $\alpha$ -estabilizadores e  $\beta$ -estabilizadores e são as ligas mais comuns, representando aproximadamente 45% do total da produção de titânio. Estas ligas podem ser tratadas termicamente, e são utilizadas principalmente em aplicações que exigem alta resistência a temperaturas entre 350 e 400°C.

As ligas  $\beta$  contêm  $\beta$ -estabilizadores e são caracterizadas pela sua elevada dureza. Apresentam resistência mecânica equivalente à das ligas  $\alpha$ - $\beta$  à temperatura ambiente e inferior a altas temperaturas. A Tabela 2 apresenta diversas ligas de titânio agrupadas de acordo com as fases existentes.

Tabela 2 - Classificação das ligas de titânio (Knoll & Schaeffer, 2006)

ALFA ( $\alpha$ )	ALFA-BETA ( $\alpha$ - $\beta$ )	BETA ( $\beta$ )
Ti-0,2Pb	Ti-6Al-4V	Ti-13V-11Cr-3Al
Ti-5Al-2,5Sn	Ti-8Mn	Ti-Al-8V-5Fe
Ti-8Al-Mo-V	Ti-7Al-4Mo	
Ti-6Al-2Co-Ta-Mo	Ti-4Al-3Mo-V	
Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	Ti-3Al-2,5V	

Para material comercial mais utilizado (Ti6Al-4V), a Tabela 3 apresenta a composição química da liga  $\alpha$ - $\beta$  de titânio.

Tabela 3 - Composição química da liga Ti-6Al-4V segundo a norma ASTM B 381-71 (Knoll & Schaeffer, 2006)

ELEMENTOS (% EM PESO)	Al	V	Fe	C	N	H	C	Outros	Ti
Teor	5.50 – 6.75	3.50 – 4.50	< 0.40	< 0.20	< 0.05	< 0.125	< 0.10	< 0.40	Restante

Por fim, é de salientar que a norma ASTM F-136 apresenta os principais requisitos em termos de composição química das ligas a serem utilizadas em implantes: a liga Ti-6Al-4V com 5.5 a 6.5 % de alumínio e 3.5 a 4.5% de vanádio, a liga de Ti-13V-11Cr-3Al com 13% de vanádio e a liga de Ti-13Nb-13Zr com 13% de nióbio e 13% de Zircônio. (Srivastav, 2011;)

Já a Norma ASTM F-67 divide o titânio puro para emprego em implantes em vários classes, com base na composição química, conforme apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Composição química das ligas de titânio puro (em percentagem) (ASTM International, 2021)

ASTM No.	Fe max	O max	N max	C max	H max	Pd	Al	Bal
	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	wt%	Ti
Grade 1	0.20	0.18	0.03	0.08	0.015	-	-	Ti
Grade 2	0.30	0.25	0.03	0.08	0.015	-	-	Ti
Grade 4	0.50	0.40	0.05	0.08	0.015	-	-	Ti
Grade 5	0.40	0.20	0.05	0.08	0.015	-	5.5-6.75	Ti
Grade 7	0.30	0.25	0.03	0.08	0.015	0,12-0.25	-	Ti
Grade 9	0.25	0.15	0.03	0.08	0.015	-	2,5-3,50	Ti
Grade 12	0.30	0.25	0.03	0.08	0.015	-	-	Ti
Grade 23	0.25	0.13	0.03	0.08	0.0125	-	5.5-6.50	Ti

O material em causa tem alta reatividade química com outros materiais em temperaturas elevadas, exigindo o desenvolvimento de técnicas não convencionais de refino, fusão e fundição, conseqüentemente, elevando o preço das ligas. Em contrapartida, a resistência à corrosão em temperaturas normais é excepcionalmente alta, tornando as ligas virtualmente imunes ao ar, ambientes marinhos e diversos ambientes industriais.

## Maquinabilidade das ligas de titânio

Maquinabilidade de um material é a facilidade ou dificuldade de um material ser trabalhado ou transformado por processo de maquinagem e é avaliado por seguintes critérios: forças de corte, forma da apara, temperatura de corte, acabamento superficial, vida de ferramenta de corte. (Davim, 2015)

O Donachie (2000) nas suas avaliações de maquinabilidade de titânio elaborou uma lista de propriedades que classificam esse material como difícil de maquinabilidade que incluem vários critérios:

- Por existir uma temperatura bastante alta concentrada na ferramenta considera o titânio como um metal de **baixa condutibilidade térmica**;

- **Encruamento** do material é um efeito que acontece por ausência de aresta postíça de corte originando um aumento de calor na ferramenta que juntamente com as forças produzidas resulta num colapso da ferramenta;
- A alteração no acabamento superficial que as vezes resulta na deflexão da peça é a consequência do **baixo modulo de elasticidade** do material;
- A presença de pequenas porções de material na ferramenta é devido a **elevada afinidade química**, que faz com que há uma forte adesão de apara;
- No processo de retificação de titânio verificam-se danos superficiais tornando assim o material **suscetível a danos superficiais**.

É possível avaliar o material como a sua maquinabilidade. Donachie (2000) elaborou uma tabela para poder avaliar o índice de maquinabilidade dos materiais onde considerou como padrão o aço de corte relativamente fácil AISI B-1112, e tomou a sua maquinabilidade como 100% maquinavel, dai os materiais com índice superior a 100% são considerados de elevada maquinabilidade e materiais com valor do índice abaixo do valor padrão consideram-se de difícil maquinabilidade. Na Tabela 5 podemos ver uma lista de materiais comuns e os respetivos índices.

*Tabela 5 – Índice de maquinabilidade dos materiais (Donachie 2000)*

Material	Índice de Maquinabilidade
Liga de Alumínio 2017	300
AISI B-1112	100
Aço 4340	45
Titânio puro	40
Ti-5Al-2.5Sn	30
Ti-6Al-4V	22
Ti-6Al-6V-2Sn	20

Da Tabela 5 facilmente podemos verificar que as ligas de titânio com os seus índices de maquinabilidade de 20-40% são 60-80% mais difíceis de maquinar comparado com o metal padrão. A maquinabilidade de um material é um termo que engloba uma grande quantidade de parâmetros e alguns deles não dependem das propriedades do material ou parâmetros operacionais. Na Tabela 6 podemos ver a lista de fatores que por razões diversas afetam a maquinabilidade de material.

Tabela 6 – Fatores que afetam a maquinabilidade (Adaptado de Davim J P, 2008)

Fatores que afetam a maquinabilidade			
Material	Ferramentas de corte	Condições de corte	Máquina
Dureza	Tipo de ferramenta	Avanço	Capacidade de máquina
Resistência a tração	Material da ferramenta	Velocidade de corte	Características da máquina
Composição química	Geometria da ferramenta	Profundidade de corte	
Encruamento	Tipo de corte	Lubrificação	
Microestrutura			
Rigidez			
Perfil da peça			

## Formação e tipos de aparas

O processo de torneamento resume-se a remoção de volume de material bruto em forma de limalha ou aparas de forma a obter a geometria desejada. Esse volume removido tem geometrias específicas que dependem de vários fatores e é possível tirar conclusões acerca da qualidade do processo de torneamento. Na figura 5 podemos ver um diagrama de processos que influenciam a geometria da aparas.



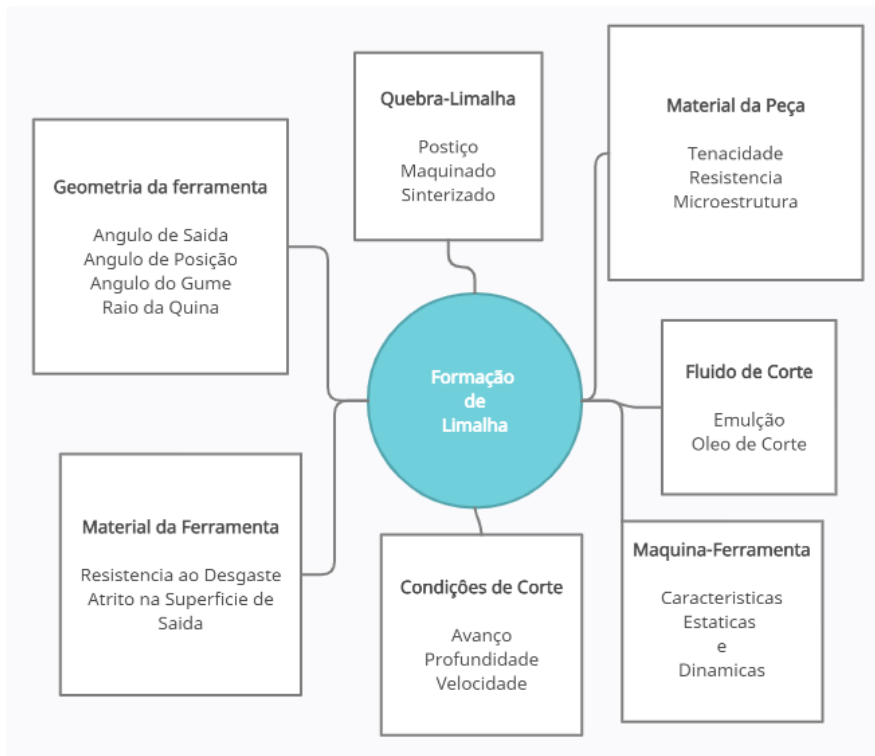


Figura 5 Fatores que influenciam a geometria da apar (Machado, 2009)

Nas Figuras 6 e 7 podemos observar diferentes tipos de limalha que é formada durante o processo de torneamento como a influências de avanço e velocidade de corte na geometria da apar.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
FITA		HÉLICE					OUTROS		
FITA	EMARANHADO	HÉLICE PLANA	HÉLICE OBLÍQUA	HÉLICE LONGA	HÉLICE CURTA	HÉLICE ESPIRAL	ESPIRAL	VÍRGULA	ARRANCADOS
desfavorável		médio			favorável		médio		

Figura 6 - Tipos de apar (Machado, 2009)

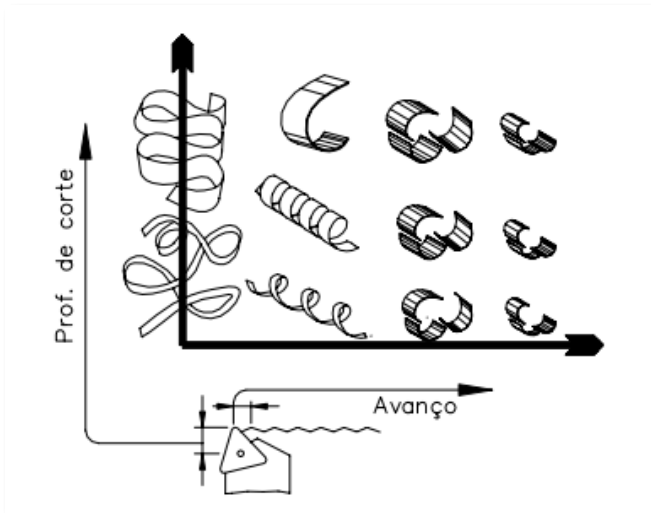


Figura 7 - Formação da aparagem (Machado, 2009)

Analisando diferentes tipos de limalha podemos já tirar algumas conclusões de prós e contras de alguns deles. Mas antes disso, devemos perceber o processo de formação de limalha.

- Uma pequena porção de material, que ainda faz parte do bloco em bruto é recalcada contra a superfície de saída de ferramenta, originando dessa forma deformações plásticas e elásticas no material (Figura 8);
- Deformação plástica é aumentada progressivamente até que as tensões de corte se tornam suficientemente grandes de modo a iniciar o corte e deslizamento de material recalcado na matéria bruta (Figura 9);
- A penetração contínua de ferramenta cria uma rutura parcial ou completa de limalha, acompanhado o plano de corte da Figura 10 e dependendo da ductilidade do material e condições de maquinagem;
- Devido ao movimento relativo entre a peça e ferramenta inicia-se o escorregamento da porção do material deformado e cortada sobre a superfície de saída de ferramenta. Enquanto isso, nova porção do material está-se formando e cortando que irá também escorregar sobre a superfície de saída de ferramenta e assim sucessivamente (Figura 11). (Shaw, 1984)

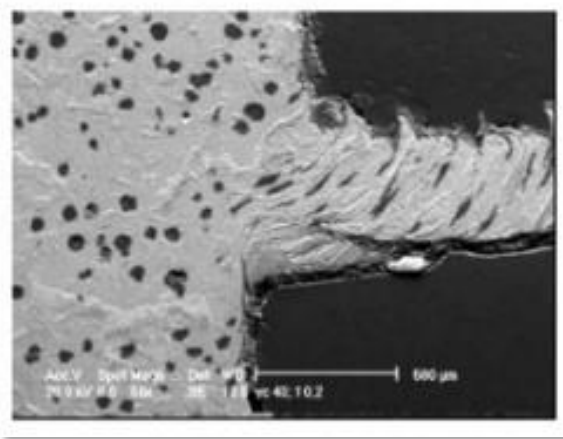


Figura 8 - Formação de apra vista no microscópio (Caraguzel, 2014)

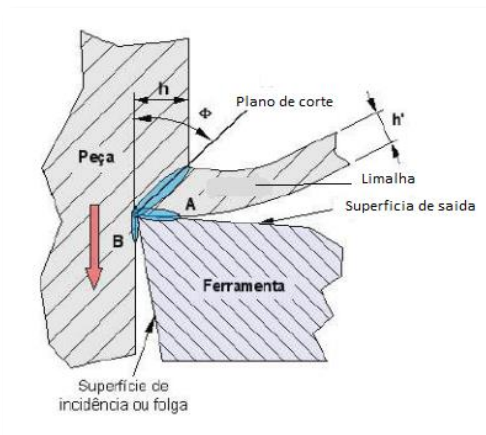


Figura 9 - Diagrama de corte (Caraguzel, 2014)

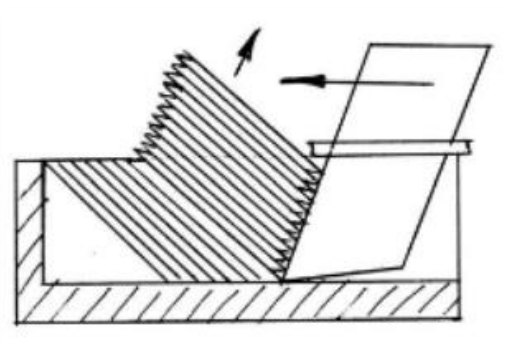


Figura 10 - Movimentos da ferramenta e apra (Caraguzel, 2014)

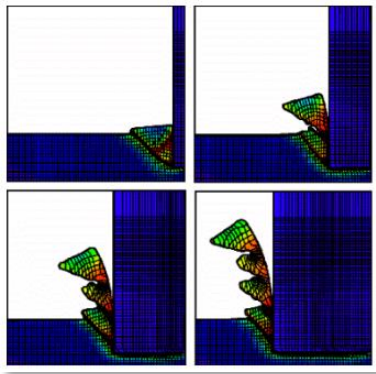


Figura 11 - Análise de forças de corte (Caraguzel, 2014)

Segundo Groover (2015) maioritariamente no processo de torneamento podemos classificar aapara em quatro tipos como mostra a Figura 12:

- **Descontínua**, surge na maquinagem de materiais frágeis e velocidades baixas, deixa um acabamento irregular;
- **Contínua regular**, normalmente em materiais dúcteis maquinados em altas velocidades e baixos velocidades de avanço e profundidade, em geral deixa um bom acabamento superficial;
- **Contínua irregular**, é uma característica de maquinagem de materiais dúcteis a baixas velocidades, gera a formação de aresta postiça e a superfície áspera;
- **Serrilhada**, maquinagem em altas velocidades de ligas de titânio e superligas.

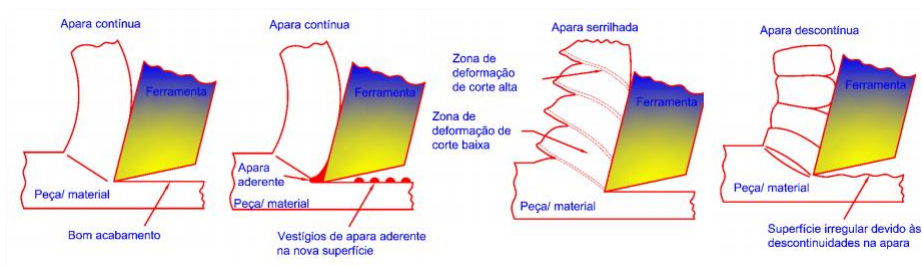


Figura 12 - Tipos de apara (Groover, 2015)

Não é segredo nenhum que para diferentes tipos de materiais e parâmetros de maquinagem podemos ter tipos de apara distintos. A velocidades de corte baixas e aumentando o avanço garantimos a fragmentação da apara em qualquer tipo de material a maquinar. A maneira de controlar a forma da apara é através da geometria das ferramentas, visto que os parâmetros de corte devem satisfazer a vertente económica da maquinagem. Considerando a maquinagem de titânio e as suas ligas, geralmente durante o processo

surgem as aparas serrilhadas devido a instabilidade no processo de corte para certas gamas de velocidades. Nos materiais com baixa condutividade térmica com o aumento de temperatura junto a zona de corte ocorre a diminuição da resistência mecânica e a deformação do material devido ao movimento da ferramenta contra a peça resultando assim as elevadas tensões. Por consequência do fenômeno anteriormente falado e do aumento da temperatura a dureza do material diminuí drasticamente e favorece o deslizamento do material pela ferramenta de corte. Devido ao fato de o processo ser contínuo o plano de tensão sofre uma rotação e se afasta do plano normal de corte. Com o aumento da rotação continuamente resulta uma força maior que por sua vez faz quebrar a aparta. Todo este processo contínuo resulta na formação de aparta serrilhada. (Machado, 2009)

Segundo Sun, Brandt e Dargusch (2009) apenas nas ligas de fase  $\alpha+\beta$  e  $\beta$  de acordo com a sua microestrutura se verifica a formação de aparta serrilhada. Já no titânio puro esse fenômeno mesmo para velocidades de corte elevadas não se presencia.

O estudo de Abele e Frohlich (2009) de maquinabilidade de vários metais inclusive a liga de Ti-6Al-7Nb concluíram a presença da aparta tubular com o dentado em forma de serra no corte transversal. Com os resultados dos estudos concluíram que essa característica é própria desta liga. Figura 13 apresenta as formas de aparta em diferentes ligas vistas no microscópio.

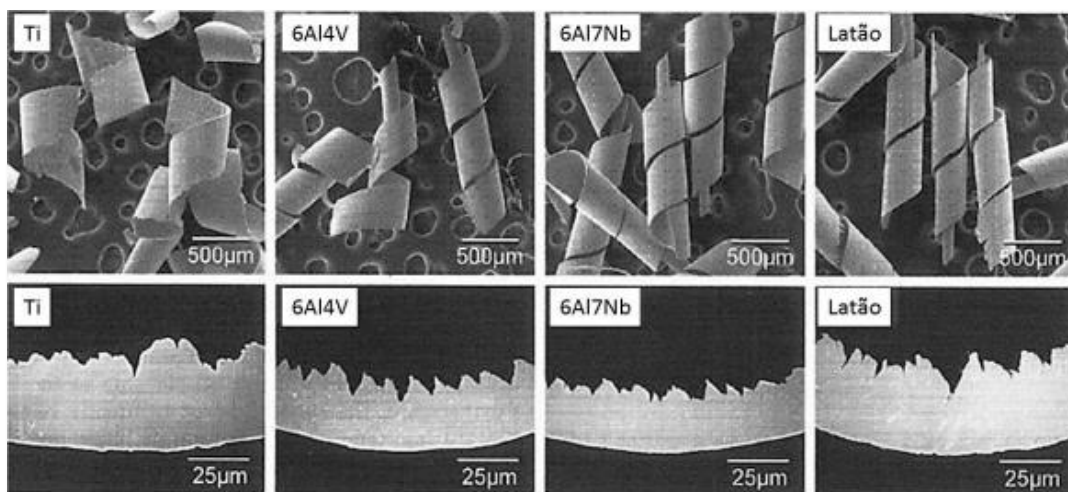


Figura 13 - Formas das aparas obtidas em função do material utilizado, vista exterior (em cima) e corte transversal (em baixo) de Ti CP, Ti-6Al-4V, Ti-6Al-7Nb e Latão para  $V_c=56$  m/min,  $f=0,02$  mm/rot e  $a_p=0,4$  mm (Abele & Frohlich, 2009)

## Parâmetros de corte

Segundo Farraresi (1970) os movimentos que influenciam diretamente a remoção do material ou formação de limalha são (Figura 14):

- O movimento de corte é o movimento entre a peça e ferramenta, com o avanço igual a zero a ferramenta retira uma única limalha durante uma volta da peça;
- O movimento de avanço é o movimento entre a peça e a ferramenta, estando associado ao movimento de corte origina a remoção contínua de limalha durante o movimento de rotação da bucha;
- Movimento resultante do movimento simultâneo de corte e de avanço é chamado o movimento efetivo de corte.

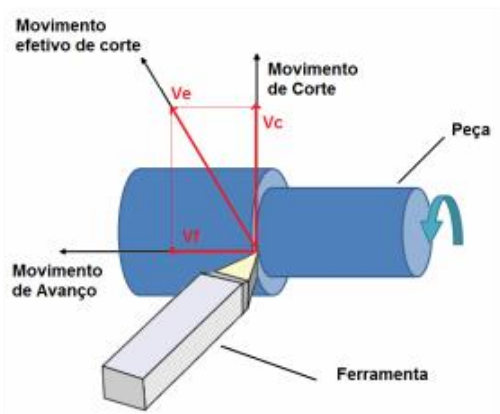


Figura 14 - Diagrama de movimentos no torneamento (Machado, 2009)

A adequação da seleção dos parâmetros referidos anteriormente para diferentes tipos de matérias irá refletir na qualidade e no custo da peça.

Depois de vários ensaios de investigação na maquiagem de titânio, os investigadores Donachie, (2000) e Larson, (2014) acabaram de chegar a uma conclusão de que para maquiagem de titânio os principais parâmetros que devem ser considerados são:

- Baixa temperatura na zona de contacto da peça com a ferramenta. As baixas velocidades de corte aumentam a vida útil da ferramenta;
- Aumentar a dissipação de calor utilizando o fluido de corte;

- O metal deve ser maquinado com velocidades de avanço altas, mas dentro dos limites estabelecidos pelo fabricante das ferramentas de corte;
- Maquinagem contínua sem interromper o avanço durante o contacto da ferramenta com a peça;
- O estado das ferramentas. Essas devem ser sempre afiadas para poder ter o máximo potencial de corte.

Na maquinagem, as velocidades de corte, avanço e de rotação da árvore variam de liga para liga. Por vezes a diferença de velocidade de corte para titânio puro ou ligas de menor dureza em comparação com as ligas de dureza maior podem chegar a ser valores de 1:10. (Donachie, 2000)

Segundo Shaw (1984) velocidades de avanço na maquinagem de titânio abaixo dos 60 m/min aumentam a vida útil da ferramenta.

Já o Donachie (2000) chegou a valores recomendados para a maquinagem de titânio nas suas diferentes composições. Valores estes estão tabelados como podem ver na Tabela 7.

Tabela 7 – Parâmetros de torneamento recomendados. (Donachie, 2000)

Material	Titânio Puro (99% Ti)		Fase $\alpha$ (Ti-6Al-2Nb-1Ta-0.80Mo)			Fase $\alpha+\beta$ (Ti-6Al-4V)			Fase $\beta$ (Ti-10V-2Fe-3Al)		
Dureza (HB)	100-160		300-320			320-360			360-450		
Largura de corte (mm)	1	4	1	4	7,5	1	4	7,5	1	4	16
Velocidade de Corte (m/min)	160	135	65	55	52	50	45	35	35	25	10
Velocidade de Avanço (mm/rot)	0,15	0,25	0,12	0,21	0,25	0,12	0,21	0,25	0,11	0,22	0,35
Material da Ferramenta	K30	K20	K30	K20	K20	K30	K20	K20	K30	K20	K20

## Ferramentas de corte

A importância dos parâmetros de corte discutidos anteriormente é apenas uma parte do processo de maquinagem. A outra vertente de investigação na área é o estudo de materiais e revestimentos usados no processo de fabrico de ferramentas para maquinagem.

As ferramentas de carbonetos sinterizados são as que têm a maior empregabilidade na indústria de maquinagem devido ao facto de existência de técnicas desenvolvidas para o revestimento e garantir a melhoria das suas propriedades mecânicas.

Segundo o Paulo Vancovsky (2016), CVD e PVD são duas técnicas desenvolvidas para o revestimento de ferramentas de corte. *Chemical Vapor Deposition* (CVD) é uma

técnica que usa os gases em estado de vapor e o filme depositado a partir das reações químicas sobre a superfície de substrato como mostrado na Figura 15. Os benefícios da deposição química vaporizada maioritariamente são devido a possibilidade de trabalhar com a ferramenta em temperaturas elevadas (~1200°C). Já o processo *Physical Vapor Deposition* (PVD) apresentado na Figura 16 é feito através de vaporização de material sólido por calor e recondensação do vapor sobre a superfície do substrato para formar o filme fino sólido. As principais vantagens desse processo são a elevada dureza e propriedades antiaderentes. Em comparação com as ferramentas apenas com tratamento térmico, a dureza do revestimento PVD pode ser até 10x maior. (Revista Industrial Heating, 2016).

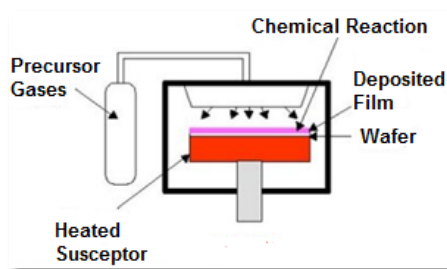


Figura 15 - Processo de CVD (Revista IH, 2016)

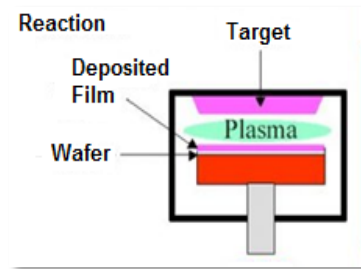


Figura 16 - Processo PVD (Revista IH, 2016)

As ferramentas de carbonetos revestidos com  $TiB_2$ ,  $TiC$ ,  $TiN-TiC$ ,  $TiCN$ ,  $TiN-Ti(C,N)-TiC$ ,  $Al_2O_3-TiC$ ,  $Al_2O_3$ ,  $HfN$  apresentam maiores taxas de desgaste comparado com as ferramentas sem revestimento. Tendo isso em conta, o uso dessas ferramentas não é aconselhado para a maquinagem de titânio (Wang, Nakashima, Larson 2016).

Também, segundo o Wang (1997) as ferramentas de aço rápido M1, M2, M7, M10 são as ferramentas mais usuais para a maquinagem de titânio. No entanto, os aços de grau T5, T15, M33, M40 apresentaram melhores resultados em comparação com as anteriormente referidas. Os casos acima descritos são geralmente usados na maior parte de indústrias visto que tem uma boa relação qualidade-preço, mas quando falamos em trabalhos específicos de um grau de exigência elevado, a melhor escolha para a maquinagem de titânio passa por ferramentas de grau K, visto que os incertos de carbonetos de tungstênio ( $WC-Co$ ) revestidas com  $TiAlN$  apresentam a maior resistência ao desgaste e melhor estabilidade química.

Os fatores descritos anteriormente não são os únicos responsáveis por qualidade na maquinagem. O acabamento superficial é tão importante como qualquer fator que influencia o processo. Segundo Donachie e Matthew (2015) os materiais *ultraduros* como PCD (diamante policristalino) e CBN (nitreto cúbico de boro) apresentam não apenas as taxas de



desgaste inferiores como acabamento superficial melhor e concluíram nos seus estudos que tanto PCD como CBN quando revestidos com  $TiB_2$  apresentam bons resultados quando são utilizados em operações de acabamento. Os custos dessas ferramentas fazem com que a escolha das mesmas acontece em trabalhos muito específicos.

Shaw (1984) nos seus estudos concluiu que a geometria da ferramenta de corte é um fator tão importante como anteriores descritos neste subcapítulo. A geometria influencia não apenas a caracterização da maquinagem como também a vida útil da ferramenta. Após a experiência sugeriu que as ferramentas de carboneto de tungsténio tivessem tanto um elevado ângulo de saída (entre 10 e 15 graus) como um ângulo de ataque negativo elevado.

### Forças de corte

Para conseguir uma otimização adequada da maquinagem é indispensável conhecer as forças que surgem na consequência de contacto entre a peça e ferramenta. Consoante o resultado das medições experimentais podemos conhecer bem o comportamento da ferramenta e do material a maquinar para fazer um estudo de otimização e a adequação dos parâmetros que devemos usar durante o processo de maquinagem para conseguir tanto melhores resultados para o fabrico de determinados produtos como a escolha de máquinas pelos parâmetros mínimos que satisfazem a necessidade de produção.

Os esforços que surgem no processo de maquinagem apresentam influencia direta na conceção de ferramentas de corte e no seu desgaste, análise térmica, caracterização da apara, previsão da rugosidade e do acabamento superficial, entre outros...

As experiências para as medições das forças resultantes do processo são feitas com dinamómetros através de projecção de sistema de coordenadas das direções das forças que surgem no processo de torneamento para o sistema de coordenadas cartesiano:

- $F_x$ (Força direção x) representa a  $F_a$  (Força de penetramento)
- $F_y$ (Força direção y) representa a  $F_f$  (Força de avanço)
- $F_z$ (Força direção z) representa a  $F_c$  (Força de corte)

Nos dias de hoje, com a evolução dos equipamentos de maquinagem, os dinamómetros já fazem parte (opção de compra) do equipamento para conseguir ter uma perceção do processo em tempo real e entender o comportamento das ferramentas e da

maquina. O conhecimento insuficiente dos processos e a pressa de entrega de peças dentro dos prazos fazem com que muitas das vezes os limites do potencial máximo são ultrapassados. Na consequência disso, a ausência dos equipamentos de medição de forças nas máquinas com uma idade mais avançada resulta nos danos e reparações desnecessárias nos equipamentos e ferramentas de maquinagem

O titânio, por ser um material de baixo índice de maquinabilidade geralmente apresenta forças resultantes de corte altas. Os estudos de vários investigadores na área de maquinagem desse metal relacionaram as forças de corte obtidas com o aumento de resistência mecânica e da dureza de material.

Nas suas experiências o Sun, Brandt e Dargusch (2009) analisaram o comportamento de liga de titânio Ti-6Al-7Nb no que diz respeito as forças de corte que surgem no processo de torneamento. As conclusões tiradas da experiência mostram que as forças de corte aumentam com o aumento de avanço num intervalo de 0,122-0,149 mm/rot como mostra a Figura 17.

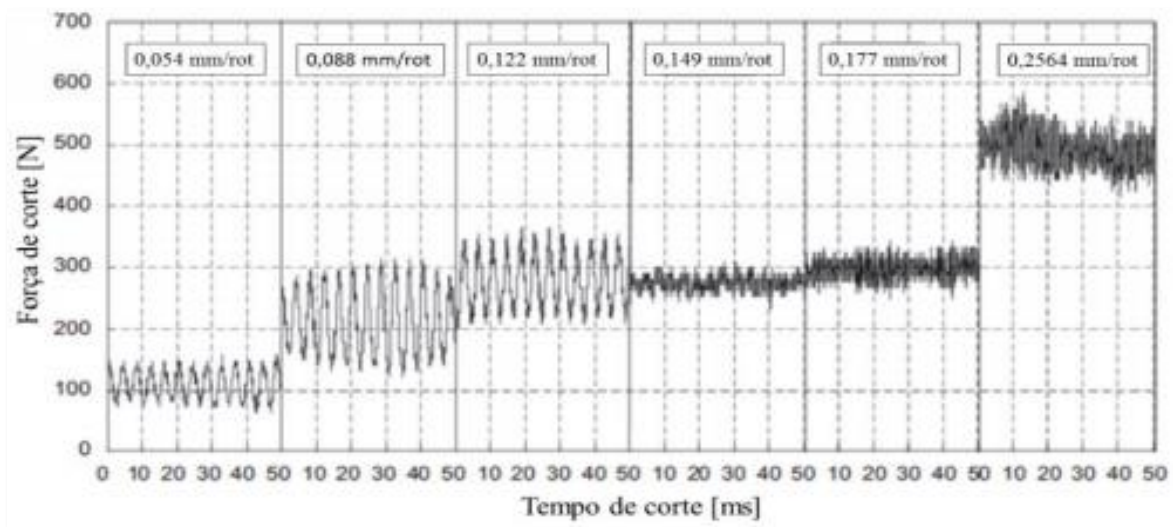


Figura 17 - Força de corte em função do avanço (Sun, Brandt, Dargusch, 2009)

A procura das condições otimizadas de maquinagem é um processo constante e abrangente. As empresas de produção de ferramentas de corte investem e criam instituições para poder acompanhar a competitividade perante a concorrência para conseguir obter melhores resultados que por consequência trazem benefícios monetários e satisfação dos clientes.

Os estudos das ferramentas de corte são uma parte invisível se olharmos de ponto de vista do consumidor. A investigação na área oferece ao consumidor uma facilidade de obtenção de melhores resultados usando simples fórmulas de cálculo para poder ter melhores condições de maquinagem. Os parâmetros de trabalho das ferramentas estudados no presente capítulo podem ser facilmente determinados a partir das equações oferecidas pelos fornecedores.

Para cada tipo de material a maquinar, segundo o catálogo Sandvik (2021) podemos calcular todos os parâmetros necessários para um torneamento adequado as necessidades. Cálculos esses são feitos pelas seguintes fórmulas apresentadas no Anexo 1

Para a indústria ou utilizador as fórmulas referidas no anexo é uma ferramenta auxiliar para conseguir ter um trabalho otimizado de torneamento.

De ponto de vista do operador de uma máquina esses cálculos não representam nem uma pequena parte dos estudos que têm por trás para chegar a esses resultados.

## Acabamento superficial

O fator muito importante na maquinagem de peças em qualquer tipo de materiais é o acabamento superficial e a precisão dimensional. Em algumas indústrias onde o titânio é aplicado, esse fator é indispensável, visto que a necessidade de superfície pelo trabalho realizado das peças maquinadas é essencial e pode até ser um fator decisivo na escolha de fornecedor ou executor dos produtos maquinados. De um modo geral existem três parâmetros, apresentados na Figura 18, que conseguem descrever um perfil de uma superfície.

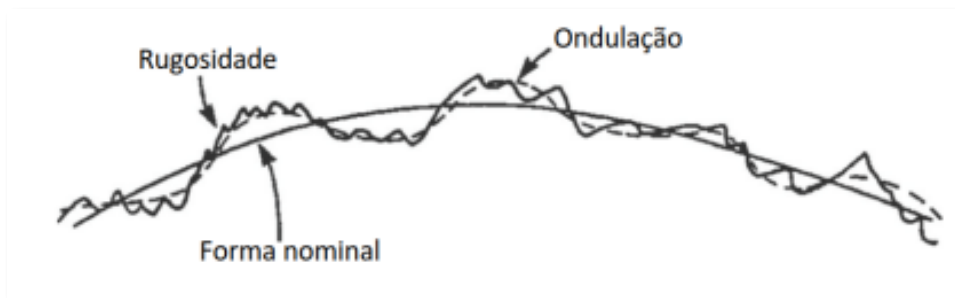


Figura 18 - Forma, ondulação e rugosidade de uma superfície (Stephenson, Agapiou, 2015)

O termo que representa e avalia o acabamento superficial é a rugosidade. Esse parâmetro é importante não apenas para o funcionamento de peças como para perceber o estado do processo de maquinagem. Através dele conseguimos perceber e controlar o processo para detetar eventuais falhas ou poder corrigir e melhorar todo o processo. A ferramenta de auxílio a medição desse parâmetro é o rugosímetro. Farias, Delijaicov e Batalha (2011) nos seus estudos de avanços na maquinagem de titânio têm demonstrado que em condições de corte com avanços elevados a profundidades grandes e com uso de ferramentas bastante desgastadas os danos superficiais aumentam drasticamente.

Tal como é possível medir a rugosidade com o auxílio de equipamento também é possível determinar esse valor com cálculos usando os parâmetros de corte e as equações 1 e 2, tendo como rugosidade média aritmética o  $Ra$  e amplitude máxima de rugosidade  $Rt$ .

$$Rt = \frac{f^2}{8r_e} \times 1000 \quad (1)$$

$$Ra = \frac{f^2}{32r_e} \times 1000 \quad (2)$$

Onde  $f$  é a velocidade de avanço em [mm/rot] e  $r$  é o raio da ponta de ferramenta, em [mm].

Por norma o acabamento superficial está diretamente relacionado com precisão dimensional que é um parâmetro importante durante a concepção do projeto. Por essa razão, a determinação do intervalo de tolerância (IT) pode ser determinada através da seguinte equação (3):

$$IT \approx 30 \times Ra \quad (3)$$

O titânio, por ser um material de aplicabilidade específica exige um cuidado extra na investigação e otimização de parâmetros e processos. A preocupação de obter as superfícies e dimensões de qualidade elevada leva a indústria a um investimento elevado ao encontro da procura dos melhores resultados científicos.

Numa experiência do Singh e Sharma (2017) foi usado o método do Box e Behnken (1960) para descrever o comportamento superficial de liga de titânio comercialmente puro Ti-CP Gr.4 (UPM, 2020) perante as condições de corte. É um material que tem uma boa rigidez e elevada resistência a corrosão e fadiga. Na Tabela 8 e 9 são apresentados a sua composição química e as propriedades mecânicas respetivamente. Para a sua experiência para além do provete de metal foi utilizada a ferramenta de corte TNMG 160404-SF 1105 (Sandvik, 2018) e os parâmetros recomendados pelo catálogo do fornecedor que podemos consultar na Tabela 10

Tabela 8-Composição química do Ti-CP Gr. 4(UPM, 2020)

Ti	Fe	O	C	N	Al	Cu	Outros
99,45%	0,399%	<0,050%	0,014%	<0,050%	0,008%	0,011%	<0,056

Tabela 9-Propriedades mecânicas do Ti-CP Gr. 4(UPM, 2020)

Propriedades	Valor	Desvio padrão
Limite de resistência a tração ( $\sigma$ ) [MPa]	681,63	12,16
Limite de escoamento ( $\sigma - 0,2\%$ deformação) [MPa]	616,68	26,96
Dureza [HRC]	22	2,38

Tabela 10-- Parâmetros de corte iniciais recomendados para ferramenta TNMG 160404-SF 1105 para maquinagem de titânio (Sandvik, 2018)

Parametros de corte	Limites de trabalho	Valor inicial recomendado
f [mm/rot.]	0,08-0,22	0,12
vc [m/min]	65-80	80
vp [mm]	0,15-1,50	0,40

O método BDD (Box-Behnken Design) é um método estatístico experimental e é um dos mais eficientes para ensaios experimentais em relação ao número de ensaios requeridos. BDD é um projeto de três níveis incompletos fatoriais obtidos pela combinação de projetos fatoriais blocados  $2^k$  onde os pontos experimentais são escolhidos para permitir a estimação eficiente dos coeficientes de um modelo de segunda ordem. (Box, 2005) Tal como outros projetos, BDD permite a análise dos efeitos principais e quadráticos, assim como as iterações entre os fatores controláveis do experimento em relação á resposta do sistema. Na Figura 19 podemos ver a representação gráfica de um projeto BDD.

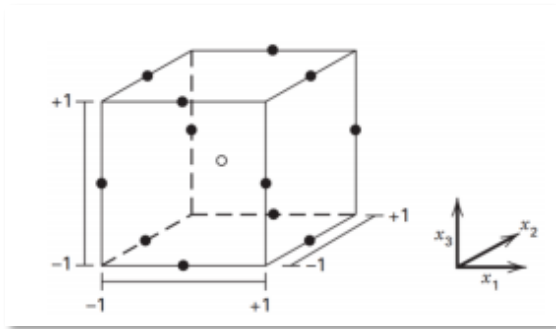


Figura 19 - Representação de um projeto Box-Behnken de três fatores (Box, 2005)

Para determinar o número total de ensaios ( $N$ ) necessários para o projeto Box-Behnken Design é usada a equação (4) onde  $n_c$  é o número de réplicas do ponto central

$$N = 2k(k - 1) + n_c \quad (4)$$

Para um teste com três fatores e três níveis normalmente são feitas 15 experiências. Em 12 deles a combinação experimental conjuga o nível máximo e o mínimo de dois fatores, enquanto o terceiro fator é mantido no nível médio. Os restantes três ensaios referem-se às réplicas do ponto central para verificar a repetibilidade do teste. (Box, 2005)

Os Singh e Sharma (2017) para fazer um ensaio mais preciso incluíram na sua experiência para além dos parâmetros de corte o fator de lubrificação, que por sua vez influencia bastante acabamentos superficiais na maquinagem de titânio. Sobre a influência de lubrificação e refrigeração na maquinagem falaremos no próximo capítulo. Chegaram a matriz de valores e resultados apresentados na Tabela 11.

Tabela 11-Matriz de experiência e resultados (Singh, Sharma, 2017)

Amostra	Fatores controláveis			Resultados			
	vc [m/min]	f [mm/rot]	vp [mm]	Seco		MQL	
				Ra	Rt	Ra	Rt
1	80	0,08	0,35	0,58	2,87	1,32	6,43
2	240	0,22	0,35	3,80	15,73	3,90	14,98
3	160	0,15	0,35	1,54	7,29	1,88	7,59
4	240	0,15	0,50	1,70	7,42	1,42	6,44
5	160	0,15	0,35	1,58	7,03	1,40	5,97
6	80	0,22	0,35	3,95	14,62	3,57	13,83
7	160	0,15	0,35	1,68	6,83	1,83	7,54
8	240	0,08	0,35	0,49	2,64	0,69	3,28
9	160	0,22	0,20	3,68	14,54	4,64	17,25
10	80	0,15	0,50	1,88	7,73	2,06	7,77
11	160	0,08	0,50	0,64	3,40	0,62	3,76
12	80	0,15	0,20	1,92	7,64	1,85	6,47
13	160	0,08	0,20	0,47	2,67	0,71	3,06
14	240	0,15	0,20	1,72	7,29	2,16	8,28
15	160	0,22	0,50	3,90	16,03	4,32	16,56

A conclusão da experiência para obter os resultados desejados passa por usar as técnicas específicas de análise analítica. No que diz respeito ao cálculo estatístico os autores utilizaram o sistema chamado ANOVA que examina a influência dos efeitos principais, quadráticos e de interação entre os fatores. A contribuição de cada parâmetro de corte sobre as rugosidades Ra e Rt foi verificada por meio de análise de variância, sendo adotado intervalo de confiança de 95%. Para cada fator da Tabela 10 são calculados os graus de liberdade (GL), soma quadrática (SQ), valor da estatística F e valor P. Sob tal intervalo de confiança, o valor é considerado estatisticamente significativo se o seu valor P for menor ou igual a 0,05. Na matriz de resultados apresentados na Tabela 11 para além dos GL, SQ, F, Valor P estão presentes também o desvio padrão amostra (s), coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e determinação ajustado ( $R_{aj}^2$ ) e percentual de contribuição (%) de cada fator controlável sobre a variável de resposta correspondente.

Tabela 12-Tabela de resultados ANOVA para torneamento de Ti-CP Gr.4(Singh, Sharma, 2017)

Fator	$R_a$					$R_z$				
	GL	SQ	F	Valor P	%	GL	SQ	F	Valor P	%
$v_c$	1	0,0049	0,09	0,761	0,01	1	0,22	0,31	0,581	0,02
$f$	1	68,4450	1313,24	< 0,001	91,48	1	919,01	1313,19	< 0,001	91,23
$a_p$	1	0,0002	< 0,01	0,958	< 0,01	1	1,47	2,10	0,159	0,15
<i>fluido</i>	2	0,2770	2,66	0,088	0,37	2	0,98	0,70	0,506	0,10
$v_c \times v_c$	1	0,0009	0,34	0,563	< 0,01	1	0,30	0,01	0,930	0,03
$f \times f$	1	3,5359	69,64	< 0,001	4,73	1	53,82	78,51	< 0,001	5,34
$a_p \times a_p$	1	0,1549	2,97	0,096	0,21	1	1,62	2,32	0,139	0,16
$v_c \times f$	1	0,1295	2,48	0,127	0,17	1	3,27	4,68	<b>0,040</b>	0,32
$v_c \times a_p$	1	0,1672	3,21	0,084	0,22	1	1,63	2,32	0,139	0,16
$v_c \times \textit{fluido}$	2	0,4028	3,86	<b>0,033</b>	0,54	2	1,56	1,12	0,342	0,16
$f \times a_p$	1	0,0058	0,11	0,742	0,01	1	< 0,01	< 0,01	0,984	< 0,01
$f \times \textit{fluido}$	2	0,1115	1,07	0,357	0,15	2	3,24	2,31	0,118	0,32
$a_p \times \textit{fluido}$	2	0,1809	1,74	0,195	0,24	2	1,34	0,96	0,397	0,13
Falta de ajuste	21	1,0925	0,99	0,554	1,46	21	15,87	1,50	0,323	1,58
Erro puro	6	0,3147			0,42	6	3,03			0,30
Total	44	74,8237			100,0	44	1007,35			100,0
		$s = 0,23$	$R^2 = 0,9812$	$R_{aj}^2 = 0,9694$			$s = 0,84$	$R^2 = 0,9812$	$R_{aj}^2 = 0,9694$	

Para compreender melhor a análise da experiência a mesma foi dividida em duas partes correspondentes a torneamento a seco e com a utilização de técnica MQL.

Conforme indicam os valores da Tabela 12, na maquinagem a seco o avanço tem forte influência no acabamento superficial da peça e deve ser mantido baixo para a obtenção o menor valor de rugosidade, sendo que os valores mais favoráveis de  $R_a$  surgem com aumento de velocidade de corte e diminuição de avanço. A minimização da rugosidade no torneamento com MQL passa pela adoção de  $V_c$  e  $V_p$  a nível alto. Assim sendo o efeito de  $V_c$  e  $V_p$  para acabamento na maquinagem com MQL é semelhante a maquinagem a seco. Alta velocidade de corte gera temperaturas altas que tendem a promover amolecimento do material que por sua vez diminui a resistência mecânica e forças de corte do mesmo. Em relação a profundidade de corte, o maior nível de  $V_p$  ajuda a ultrapassar a camada encruada do material e a maquinagem é feita na camada com a resistência mecânica inferior da superfície da peça diminuindo assim os esforços de corte. Além disso, o aumento de  $V_p$  faz diminuir a força de profundidade que torna o corte mais estável contrariando a vibrações e garantindo assim um acabamento superficial melhorado. (Singh, Sharma, 2017)



## Maquinagem sustentável

EFM (*Environmentally Friendly Machinning*) ou simplesmente Maquinagem Sustentável é um termo que surgiu na consequência da procura demanda dos recursos devido ao aumento população mundial e os impactos ambientais associados.

“Desenvolvimento que atenda às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atender as suas próprias necessidades” foi com esse ditado que em 2014 a Organização das Nações Unidas definiu o aumento de escassez dos materiais usados para a produção de bens de utilização e desenvolveu vários programas e projetos de investigação para reduzir o consumo ou reciclar os produtos para reutilização.

Neste contexto, o principal objetivo da produção sustentável é gerar produtos com o uso de processos que venham minimizar impactos ambientais negativos, sejam seguros para os funcionários, consumidores e comunidade, conservem a energia e recursos naturais e sejam economicamente viáveis. (Dixit, 2012) A Figura 20 mostra os fatores que afetam a fabricação sustentável e os seus níveis desejados.



Figura 20 - Fatores que afetam a fabricação sustentável e os seus níveis desejados (Fratila, 2013)

Tal como dito anteriormente o objetivo da EFM é o desenvolvimento de estratégias e técnicas de fabricação de produtos que satisfazem balanço entre viabilidade económica e impacto ambiental passando pela análise concecional de utilização para qual o produto é destinado, tempo de vida do produto ate o descarte no fim de vida. Análise essa deve incluir três fatores mais importantes: redução de resíduos, diminuição de processos e materiais perigosos e redução da energia consumida para produção dos bens. (Dixit, 2012)

Gupta e Laubscher (2016) definiram que o alcance para a maquinagem sustentada passa por:

- Criar ou desenvolver as condições de maquinagem eficientes com o mínimo de consumo de energia;
- Manter a eficiência dos recursos a custa de seleção de materiais, geometrias e revestimentos adequados das ferramentas para reduzir as falhas e melhorar os acabamentos das peças;
- Adoção de processos de maquinagem híbridos para reduzir tempos de maquinagem, desperdícios de materiais causados pelos erros de maquinagem e criação de cadeias subsequentes de maquinagem de peças;
- Emprego dos processos de lubrificação e refrigeração eficientes como por exemplo técnica MQL (Mínima Quantidade de Lubrificante) e refrigeração criogenia para reduzir o consumo de fluidos minimizando assim os impactos ambientais.

#### Lubrificação e refrigeração na maquinagem

O uso da lubrificação e refrigeração é um aspeto crucial na maquinagem para garantir uma boa funcionalidade da peça, acabamento e precisão dimensional, aumento a vida útil da ferramenta e redução as forças de corte. As funções principais de uso de líquido de emulsão são a lubrificação em velocidades de corte baixas e refrigerar em altas velocidades de corte, remoção de apra na zona de corte, proteção dos componentes de máquina a da peça contra a oxidação. Com baixas  $V_c$  a refrigeração não é tão importante como em  $V_c$  altas visto que as temperaturas de corte não são elevadas, mas a lubrificação é fundamental para redução de atrito e formação de aresta postiça de corte. Em contrapartida, a temperatura de maquinagem aumenta com  $V_c$  altas e o fluido favorece a transferência de calor na zona de corte e nestas condições ocorre a redução de calor da peça e ferramenta na zona de corte. O uso de método

de lubrificação evita os problemas associados aos altos gradientes térmicos na maquinagem como aumento de desgaste da ferramenta e prováveis distorções na peça. (Machado, 2015). De um modo geral existe uma vasta gama de possibilidades contidas na Tabela 13 para conseguir uma boa lubrificação da ferramenta. É necessário conhecer bem o material a maquinar para adaptar a técnica mais apropriada para o processo.

Tabela 13-Principais métodos de lubrificação no uso da EFM (Gupta, Laubscher, 2016)

Método	Descrição
Usinagem a seco	Minimiza a poluição ambiental, o risco à saúde do trabalhador e o choque térmico em corte interrompido. Porém, a ausência de fluido limita a $v_c$ empregada e pode resultar em alta temperatura, desgaste rápido da ferramenta e degradação da integridade da superfície da peça.
Mínima quantidade de lubrificante (MQL)	Baseia-se na aplicação de pequena quantidade de fluido na zona de corte, permitindo reduzir a temperatura e rugosidade da peça, além do custo do fluido. Sua desvantagem é que pode ser perigosa à saúde pela geração de névoa. O uso de óleos vegetais é melhor que os óleos minerais em termos de custo, saúde, segurança e meio ambiente.
Refrigeração criogênica	O fluido, normalmente nitrogênio líquido, é aplicado à zona de corte a baixas pressão e temperatura, sendo eficiente em manter a temperatura de corte bem abaixo da temperatura de amolecimento do material da ferramenta. Essa técnica aumenta a vida da ferramenta, não causa poluição ambiental e possibilita aumentar a produtividade.
Ar gelado	Gás refrigerado comprimido com pequena quantidade de óleo é direcionado à zona de corte. A mistura ar/óleo melhora seu desempenho.
Mínima quantidade de lubrificante refrigerado (MQCL)	Técnica híbrida que combina MQL com refrigeração criogênica ou ar gelado para promover ação lubrificante e refrigerante na zona de corte. A combinação dos métodos tende a melhorar o desempenho em relação aos sistemas em separado, principalmente quanto à remoção de calor do processo e problemas associados a isso, mas o investimento inicial é alto.
Lubrificantes sólidos	Grafite e dissulfeto de molibdênio ( $\text{MoS}_2$ ) são os materiais mais comuns usados em forma de pó seco, cujo desempenho é melhor a alta $v_c$ . A eliminação da poluição ambiental e a capacidade de diminuir a temperatura de usinagem têm encorajado seu uso.

O método mais usado nas indústrias de maquinagem de titânio é a MQL visto que o material é de difícil maquinabilidade e gera temperaturas elevadas. Para maquinagem de próteses é necessário ter um especial cuidado e atenção. A existência de íons de cloreto no líquido de emulsão favorece a oxidação do material. (Gupta, Laubscher, 2016)

Principal objetivo de uso da técnica de mínima quantidade de lubrificante é reduzir o consumo de fluido de corte e conseqüentemente minimizar o impacto ambiental, bem

como reduzir os custos de processos e sociais. Este princípio é baseado em uso de uma pequena quantidade de líquido de corte que se mistura com um fluxo de ar comprimido e é apontado junto a zona de contacto da ferramenta com a peça. A aplicação de líquido pode ser externa e interna como mostra a Figura 21. Desta forma ocorre a redução de atrito entre duas partes, bem como a diminuição de forças de corte e temperatura, e por consequência o aumento de qualidade de acabamento superficial. (Fratila, 2013)

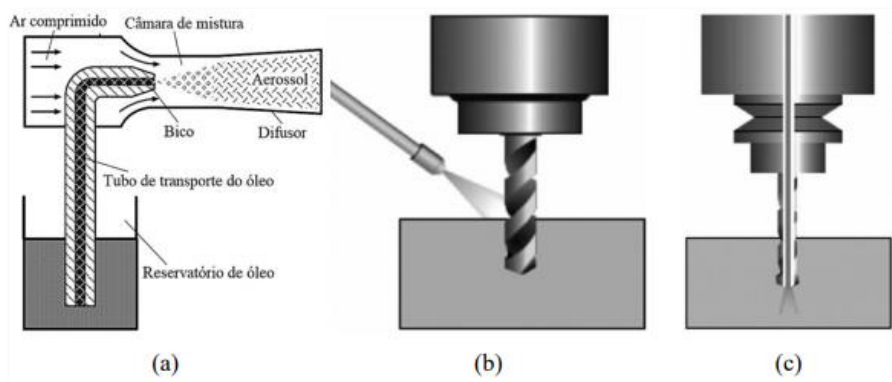


Figura 21 - Sistema MQL. a) princípio de funcionamento; b) aplicação externa; c) aplicação interna. (Stephenson, Agapiou, 2015)

Segundo Dhar, Kamruzzaman e Ahmed (2006) em maquinagem uma liga de aço AISI 4340 com ferramenta de metal duro não revestida, concluíram que rugosidade superficial, bem como a taxa de desgaste foram bastante inferiores com o método MQL em comparação com a maquinagem a seco e emulsão, como mostra a Figura 22.

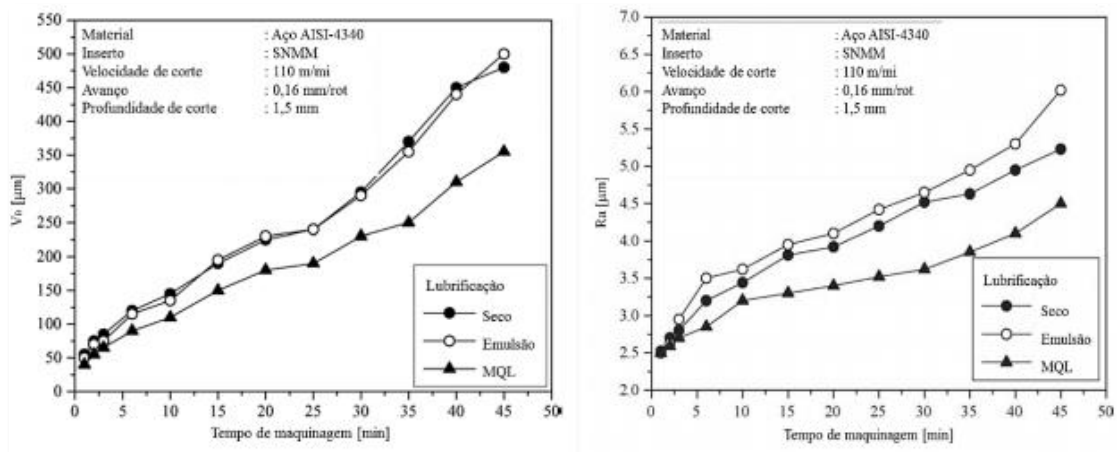


Figura 22 - Comparação de maquinagem a ar seco, liquido abundante e MQL para a) desgaste da ferramenta; b) rugosidade superficial. (Dhar, Kamruzzaman, Ahmed, 2006)

## Vida útil e desgaste das ferramentas de corte

Segundo Davim (2008), “a vida útil de uma ferramenta de corte é definida como o tempo de corte efetivo das suas arestas em trabalho, antes que seja necessário afiá-la ou substituí-la”. Qualquer equipamento ou um bem de utilização tem um determinado tempo de funcionamento e é necessário avaliar e estudar bem as razões pelas quais em determinados casos o uso desses bens e equipamentos deixa de ser possível. O desgaste de uma ferramenta é um fenómeno que depende das condições de uso, do material a maquinar, o material da própria ferramenta, características da máquina e uso ou não de fluido de corte. No Anexo 2 podemos observar vários tipos de desgaste e danos em ferramentas de corte.

Segundo Hartung, Kramer, Turkovich (1982) para além de fenómenos identificados no paragrafo anterior existem mais fatores a ter em conta na avaliação do desgaste de ferramenta, fatores esses são: a reação química, o lascar, o fraturar, a fadiga, a deformação plástica, a abrasão, a difusão sendo que os últimos dois são muito comuns na maquinagem de titânio.

No início da década 1900 o engenheiro americano F.W. Taylor desenvolveu o modelo de vida útil de uma ferramenta que incluía fatores relevantes de corte. O mesmo observou que o aumento da profundidade de corte tinha um efeito mínimo na vida da ferramenta, mas que o efeito de avanço era ligeiramente maior. No entanto o maior impacto

que afetava a durabilidade era feito pela velocidade de corte. Na Figura 23 podemos ver os efeitos de desgaste de cada um dos fenômenos de corte.

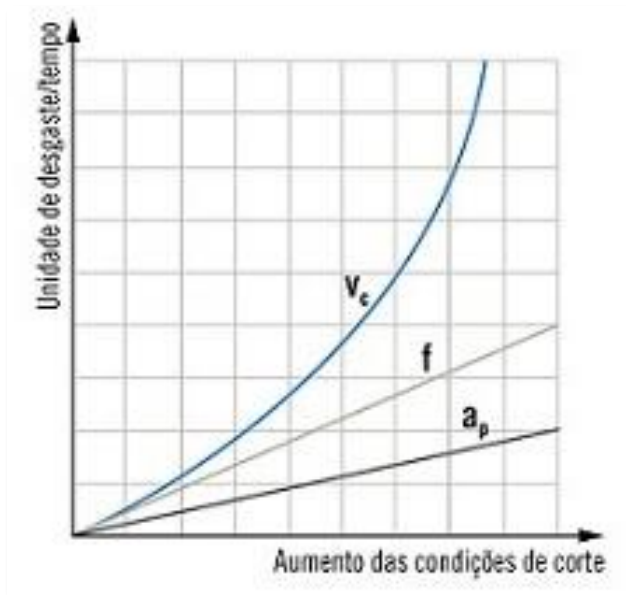


Figura 23 - Efeitos de  $V_c$  (velocidade de corte),  $f$  (velocidade de avanço) e  $a_p$  (profundidade de corte) para vida útil de ferramenta (revistaferramental.com, 2021)

Após as experiências e gráficos o Taylor desenvolveu a equação (5) para o cálculo de vida útil de ferramentas de corte:

$$T \times V_c^x = K \quad (5)$$

Onde  $x$  e  $K$  são constantes,  $T$  é a vida útil da ferramenta em minutos e  $V_c$  é a velocidade de corte em metros por minuto. As constantes da equação são determinadas experimentalmente para duas velocidades de corte diferentes com avanço e profundidade constantes. Para além disso o Taylor observou que tipicamente a durabilidade da ferramenta tem três fases representadas na Figura 24.

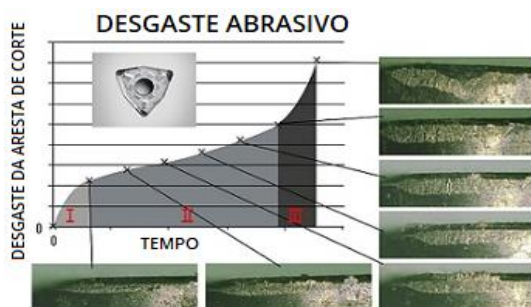


Figura 24 - Tres fases da durabilidade de ferramenta de corte. Gráfico analítico. (revistaferramental.com, 2021)

Em maior parte dos casos ocorre uma aceleração no início da operação, estabiliza, mas aumenta ligeiramente na segunda fase e sobe exponencialmente numa terceira fase até ao fim de vida da ferramenta.

Para um estudo comparativo de durabilidade entre as ferramentas CBN, K10 e PCD o Pramanik (2013) submeteu as ao torneamento de titânio durante 30 minutos e concluiu que as ferramentas de nitreto cúbico de boro apresentam grande desgaste na face de saída e de ataque. Carbonetos de tungsténio tiveram um desgaste 5 minutos após iniciar o corte em velocidade de corte baixa. Já as ferramentas de diamante policristalino tiveram um desgaste inferior comparado com as duas anteriores.

A presente secção demonstrou que inúmeros fatores apresentados na Figura 25 afetam o tempo de vida de ferramenta de corte. Por vezes era impossível conseguir ter o melhor resultado em todos eles devido a impossibilidade combinação de todos os fatores em diferentes tipos de material, máquina e ferramenta.

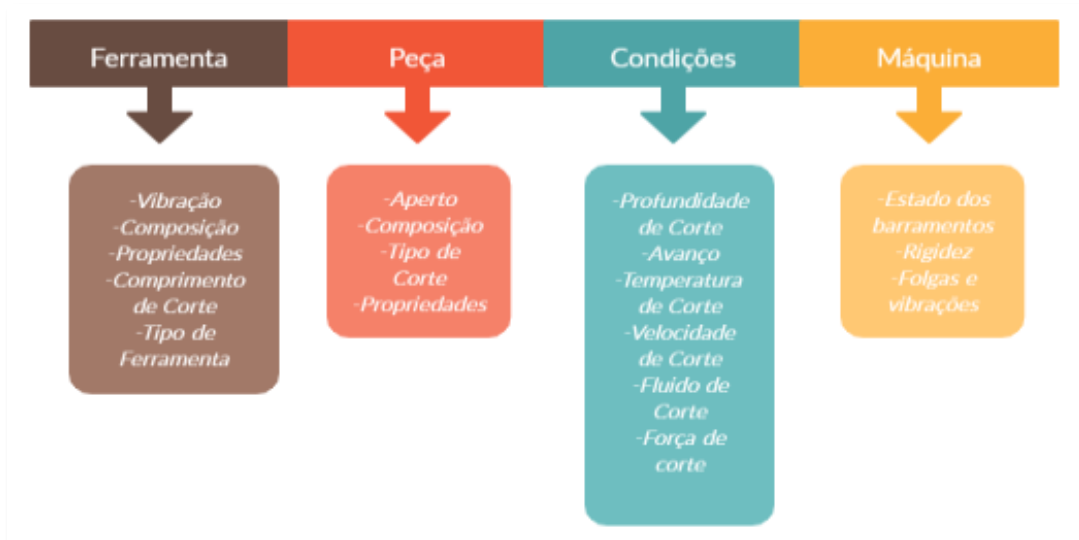


Figura 25 - Fatores que afetam a vida útil das ferramentas de corte (Adaptado do Davim, 2008)

## CAPITULO III – Materiais e Metodologias

No presente capítulo são descritos e apresentados as condições e meios utilizados no processo de maquinagem. A forma e propriedades dos materiais a utilizar, meios de maquinagem e de medição, planeamento e procedimento dos ensaios, são os aspetos principais a abordar neste capítulo. Todo o trabalho prático foi elaborado nas instalações de Universidade de Aveiro. A maquinagem dos provetes foi feita com meios do laboratório de tecnologia mecânica do Departamento de Engenharia Mecânica, as medições foram efetuadas no Laboratório de Tribologia de Universidade de Aveiro.

### Plano de ensaios e ligas de titânio a utilizar

Provetes das ligas

Para os ensaios experimentais utilizamos duas ligas de titânio com diferentes composições químicas.

Liga Ti-6Al-7Nb tem como os elementos estabilizadores o Al (alumínio) e Nb (nióbio). Porém, para garantir as suas propriedades funcionais descritas na Tabela 14 a liga contém mais alguns elementos para além dos estabilizadores que estão representados na Tabela 15

Tabela 14 - Propriedades mecânicas de Ti-6Al-7Nb.

Ti-6Al-7Nb					
Propriedades	Fase	Tensão nominal máxima [Mpa]	Tensão limite de Elasticidade [Mpa]	Alongamento apos ruptura [%]	Modulo de Elasticidade [Gpa]
Valores	$\alpha + \beta$	900-1050	880-950	8 - 15 %	114

Tabela 15 - Propriedades químicas de Ti-6Al-7Nb.

Elemento	Al	C	Fe	H	N	Nb	O	Ti
Valor máximo (%)	6,02	0,013	0,16	0,003	0,005	6,9	0,178	resto
Valor mínimo (%)	5,94	0,013	0,15	0,003	0,005	6,83	0,169	resto

Os elementos estabilizadores da liga Ti-13Nb-13Zr, tal como os símbolos indicam são o Nb (nióbio) e Zr (zircónio). A Tabela 16 e 17 mostram as suas propriedades mecânicas e químicas respetivamente.



Tabela 16 - Propriedades mecânicas de Ti-13Nb-13Zr.

Ti-13Nb-13Zr					
Propriedades	Fase	Tensão nominal máxima [Mpa]	Tensão limite de Elasticidade [Mpa]	Alongamento apos ruptura [%]	Modulo de Elasticidade [Gpa]
Valores	Póxima da $\beta$	973-1037	693-806	10 - 16 %	79-84

Tabela 17 - Propriedades químicas de Ti-13Nb-13Zr.

Elemento	Nb	Zr	Fe	C	N	O	H	Ti
Valor máximo (%)	14,00	14,00	0,25	0,08	0,05	0,15	0,04	resto
Valor mínimo (%)	12,50	12,50	0,05	0,04	0,013	0,11	0,011	resto

Devido a sua empregabilidade da área de medicina e aeronáutica as duas ligas apresentam uma resistência cerca quatro vezes superior à do titânio comercialmente puro.

O material foi disponibilizado em forma de varão com o diâmetro igual a 12 mm Para realização dos ensaios é necessário cortar e facejar um provete com o comprimento de 150 mm de cada varão. Procedemos a marcação dos mesmos para não confundir durante os ensaios. O número “13” no topo do provete corresponde a liga Ti-13Nb-13Zr e o número “67” a liga Ti-6Al-7Nb respetivamente.

## Maquina-ferramenta

Para efetuar os ensaios de corte recorreremos a utilização de torno CNC Kingsbury MPH 50 disponibilizado pelo DEM. Uma máquina com comando numérico computadorizado oferece melhores condições de trabalho e uma precisão dimensional que corresponde as necessidades dos ensaios efetuados. A ferramenta de corte foi fornecida pela empresa sueca “Secotools”,. O incerto rômico CNMG120408-MF1 TS2000 devido ao ângulo de saída nulo oferece o maior número de arestas de corte que diminua o investimento em pastilhas e aumenta a resistência da mesma. O ângulo de inclinação negativo faz a aparta escorrer para o lado da peça ainda não maquinado que ajuda a preservar a qualidade de acabamento e melhorar a rugosidade superficial. Em todos os testes realizados foi utilizada a mesma pastilha de metal duro com revestimento de classe de materiais S12, apropriada para titânio em fase  $\alpha + \beta$  e aços resistentes ao calor (Secotools, 2021).

## Parâmetros de corte

Os parâmetros escolhidos foram baseados na informação fornecida pelo fabricante de ferramentas. Para o material a ensaiar foram definidos a velocidade de corte ( $v_c$ ), avanço ( $f$ ) e profundidade ( $a_p$ ). Tendo em conta a qualidade de acabamento superficial e a vida útil de ferramenta recorreremos a uma gama de valores mais convenientes para chegar aos resultados desejados. Todos os parâmetros definidos para os ensaios das duas ligas de titânio encontram-se nas tabelas 18.

As tabelas foram adaptadas com a informação fornecida pelo site oficial da Secotools e com a posterior consulta ao técnico e fornecedor das ferramentas dessa marca. Decidiu-se manter o valor de profundidade de corte fixo porque o produtor da ferramenta tem esse valor como o valor de entrada para obter a gama de velocidades de corte e de avanço, como também para não alargar o tempo dos ensaios.

Tabela 18 - Parâmetros de corte para ensaio (adaptado Secotools)

Liga Ti-6Al-7Nb (2 amostragens)				Liga Ti-13Nb-13Zr (2 amostragens)			
vc [m/min]	f [mm/rot]	ap [mm]	Lubrificação	vc [m/min]	f [mm/rot]	ap [mm]	Lubrificação
42	0,035	0,5	Seco	42	0,035	0,5	Seco
	0,035	0,5	MQL		0,035	0,5	MQL
	0,077	0,5	Seco		0,077	0,5	Seco
	0,077	0,5	MQL		0,077	0,5	MQL
65	0,035	0,5	Seco	65	0,035	0,5	Seco
	0,035	0,5	MQL		0,035	0,5	MQL
	0,077	0,5	Seco		0,077	0,5	Seco
	0,077	0,5	MQL		0,077	0,5	MQL
84	0,035	0,5	Seco	84	0,035	0,5	Seco
	0,035	0,5	MQL		0,035	0,5	MQL
	0,077	0,5	Seco		0,077	0,5	Seco
	0,077	0,5	MQL		0,077	0,5	MQL

#### Plano de ensaios

Na presente seção é abordada toda a estratégia adotada para ensaios realizados. Os parâmetros de maquinagem foram otimizadas de acordo com as necessidades de estudo das forças de corte, rugosidades e qualidade da apara obtida. No final dos ensaios foi analisado o estado da ferramenta de corte para fazer um estudo de vida útil da pastilha. Cada conjunto de parâmetros da tabela 18 foi executado em duas pistas de 10 mm ao longo dos 20 mm como mostra a Figura 26 para verificar a repetibilidade da operação e tirar um valor médio das duas medições.

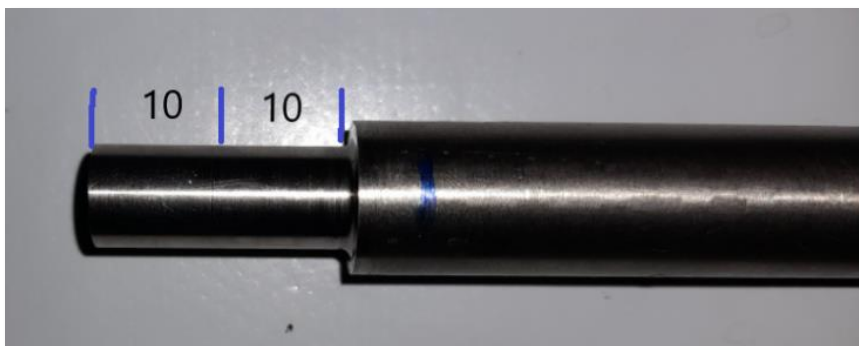


Figura 26 - Pistas dos provetes maquinadas

Para cada pista de 20 mm foram realizados 4 ensaios com diferentes parâmetros para evitar o desperdício de matéria-prima. Com o valor de  $a_p = 0.5\text{mm}$  fixo conseguimos fazer 4 passagens e reduzir o diâmetro do provete de 12mm para 8mm. Devido ao valor do diâmetro do provete ser reduzido não foi possível aproveitar o contraponto da máquina para garantir uma melhor estabilidade do processo e evitar as vibrações. Porém, pela norma ISO 3685/1993 que exige o uso de contraponto nos casos em que o rácio entre comprimento do provete em flexão e o diâmetro for maior do que 10, no nosso caso não se verifica.

Com o auxílio do técnico das oficinas de Universidade de Aveiro elaborou-se um programa geral de código G de forma podermos alterar apenas os parâmetros necessários para otimizar o tempo de maquinagem e o *setup* da máquina. O programa foi feito pela lógica demonstrada na Figura 27, a ferramenta aproximava-se lentamente a baixas rotações da arvore para uma zona de segurança, de seguida a rotação do *spinner* atinge a velocidade de rotação e o avanço igual aos valores tabelados para os ensaios e inicia-se o corte com o valor de penetração fixo igual a 0.5mm. Após a primeira pista de 10mm terminar com o comando de *stop* intermédio o operador retirava a apara obtida do processo e dava o seguimento ao programa para a próxima pista de 10mm para terminar assim um ensaio. Durante o processo de torneamento das pistas de 10mm o dinamómetro piezoelétrico com o amplificador do sinal estava a medir os valores das forças de corte para o processo em causa.

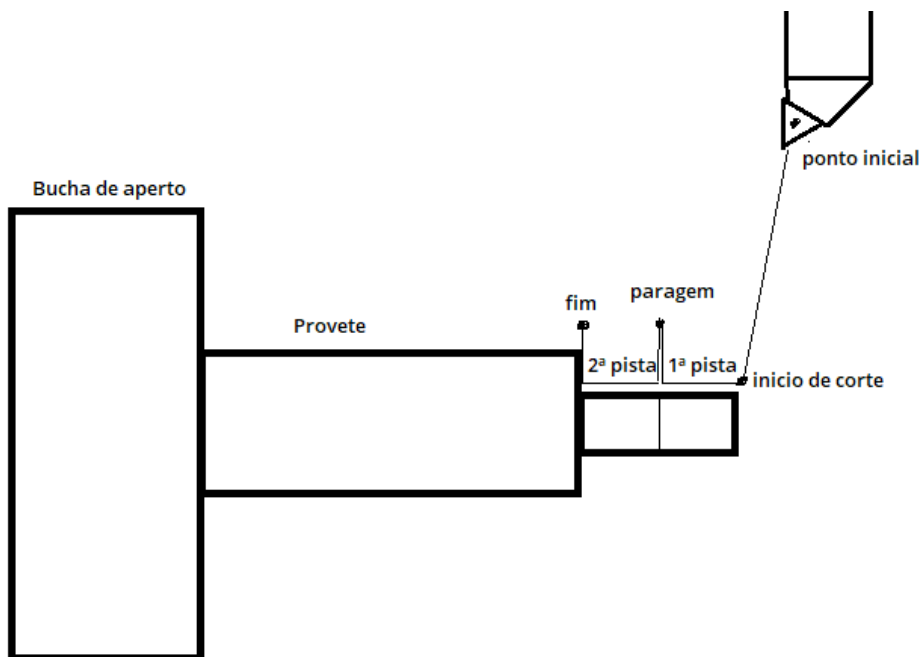


Figura 27 - Diagrama de corte

No final de cada ensaio o provete é retirado da bucha para efetuar a medição dos valores das rugosidades como também o estado da pastilha. O provete e o inserto era posto na máquina para dar seguimento ao próximo ensaio após o registo dos valores obtidos das medições e análises dos mesmos. Para evitar possíveis erros e mistura dos resultados os testes com a emulsão foram feitos após terminar todos os testes a seco. Para ambos os testes usamos os cantos das pastilhas novos. Nestas condições conseguimos uma melhor análise do desgaste da ferramenta de corte em duas condições em separado.

## Metodologia para avaliação

### Medição da rugosidade superficial

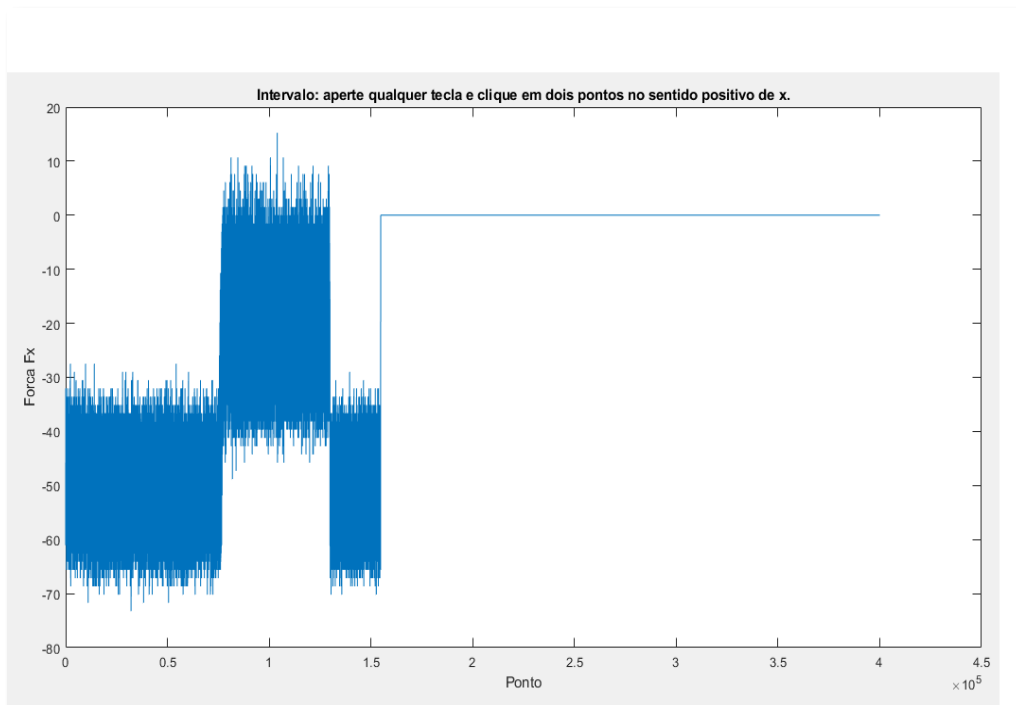
O equipamento de auxílio no estudo das superfícies é chamado de rugosímetro. Para os nossos ensaios recorreremos ao equipamento fornecido pela Universidade de Aveiro. Hommel Tester T1000E da Figura 38 é um rugosímetro de agulha de diamante percorre uma distância fixa pela superfície em análise e transmite todos os movimentos feitos com a ponta da agulha para um recetor de sinal que posteriormente devolve vários valores que apresentam a qualidade de superfície obtida. De todos os valores fornecidos necessitamos dos parâmetros ( $R_a$ ) Rugosidade média e ( $R_t$ ) Amplitude total da rugosidade. Foram feitas duas medições, simétricas ao eixo do provete maquinado após cada ensaio. As medições dos provetes foram feitas a temperatura ambiente após cada ensaio na máquina de seguida soprada com o ar comprimido para eliminar qualquer sujidade impossibilitando assim cometer erros de medição.

## Forças de corte

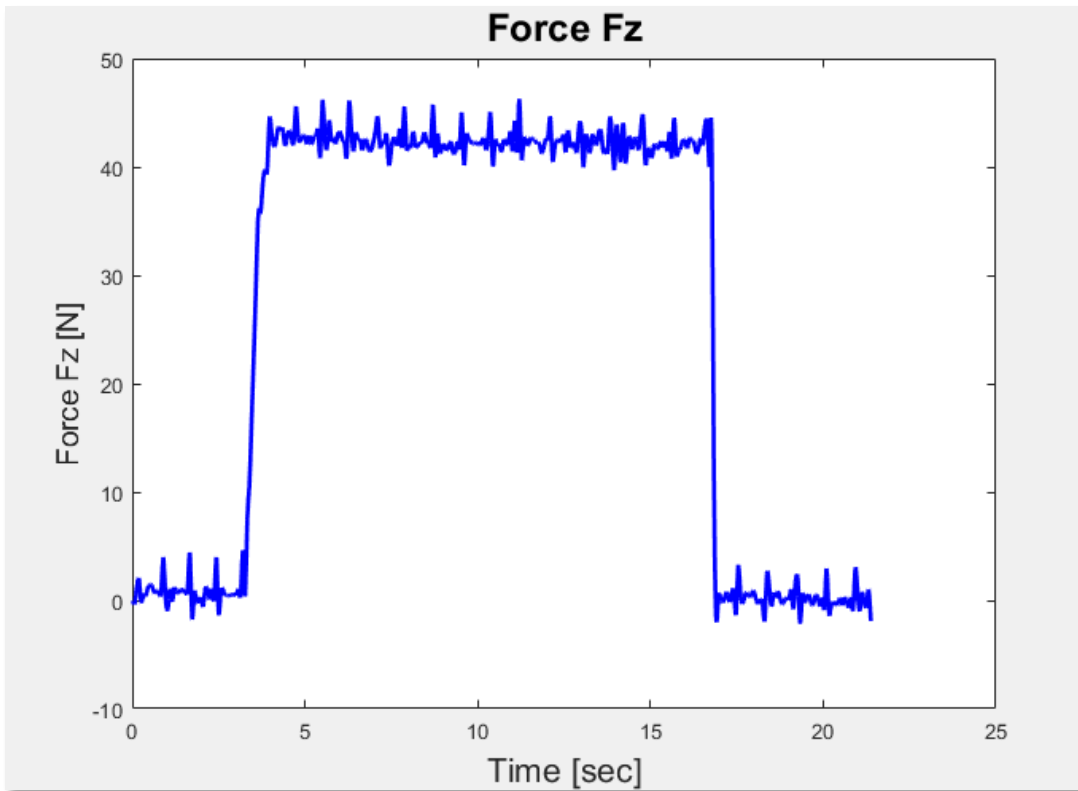
Como foi descrito anteriormente, para medir as forças de corte utiliza-se o dinamômetro piezoelétrico que consegue medir as três forças exercidas durante a operação de maquinagem. O equipamento da marca Kistler 9121 com o amplificador do sinal 5019B, ligado ao computador com o *software* Dynoware consegue representar todos os movimentos durante a maquinagem em gráfico e tabela de forças exercidas durante o processo.

Para aquisição de sinal foi definida a frequência de amostragem de 150 Hz com o tempo de aquisição igual a 50 segundos definidos manualmente.

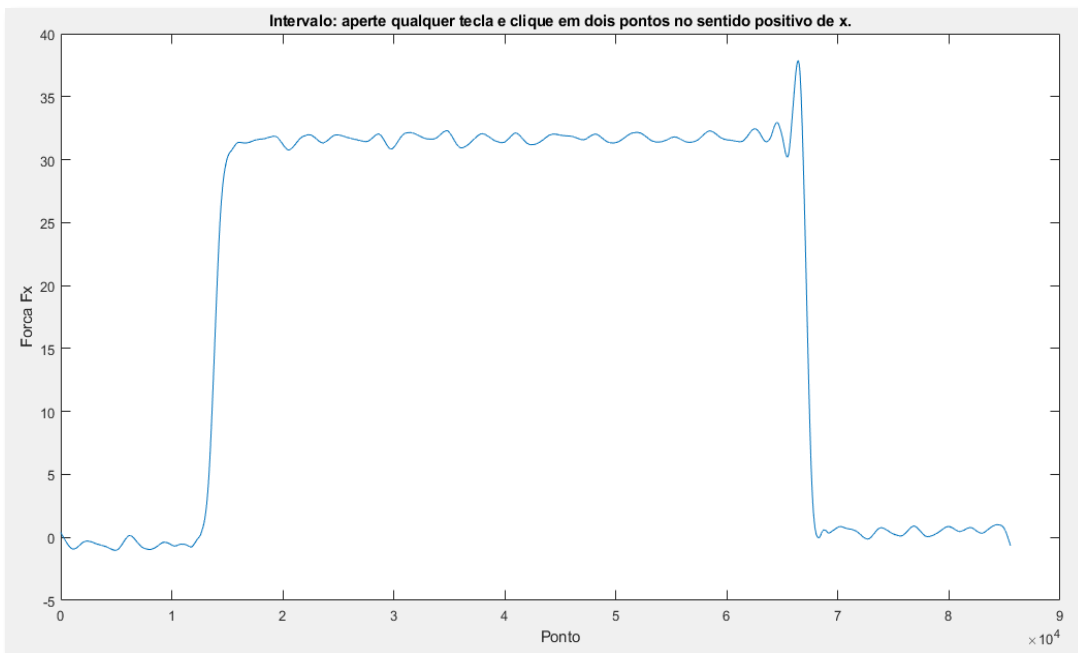
O ruído é um parâmetro inerente ao processo de aquisição de sinal. Faz com que os sinais adquiridos são influenciados por uma gama de frequência vindos do ambiente que nos rodeia e que não são do interesse da análise. Para “retificar” os sinais adquiridos foi usado um programa desenvolvido no MATLAB da MathWorks pelos alunos do laboratório de tribologia da UA. Programa este permite aplicar os filtros para conseguir eliminar o ruído e retificar os valores dos sinais das forças. Na Figura 28 podemos observar o sinal obtido na medição a), aplicação de filtro até 8º refinamento b) e o 10º refinamento c) onde conseguimos ter uma visão melhor dos valores das forças resultantes do processo.



a)



b)



c)

Figura 28 - Gráfico das forças, a) sinal obtido na medição, b) filtro de 8º refinamento, c) 10º refinamento

Caracterização da apara.

Apara resultante do processo de maquinagem depende de uma vasta gama de fatores. Porém, os que têm um peso mais significativo na qualidade de apara são tipo de material a maquinar, ferramenta e parâmetros de corte e tipo de lubrificação usado no processo. Todos estes fatores foram descritos no capítulo 2 da presente dissertação. Para a análise querente da apara foi consultada a norma ISO 3685/1993. Esta forma qualifica a apara quanto a sua forma e tipo, sendo dividida em várias categorias representadas na Figura 29.




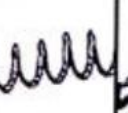


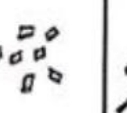
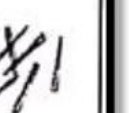





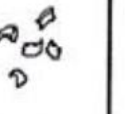
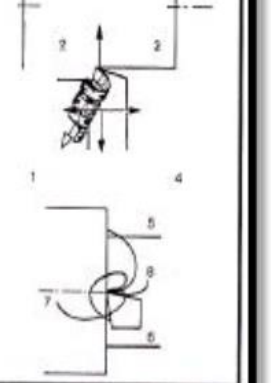



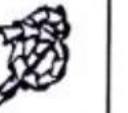
1. Em fita	2. Tubular	3. Espiral	4. Helicoidal em gume	5. Helicoidal Cônica	6. Em arco	7. Em lasca	8. Em agulha
							
1.1. Longa	2.1. Longa	3.1. Plana	4.1. Longa	5.1. Longa	6.1. Ligada		
							
1.2. Curta	2.2. Curta	3.2. Cônica	4.2. Curta	5.2. Curta	6.2. Fragmento		
							
1.3. Enrolada	2.3. Enrolada		4.3. Enrolada	5.3. Enrolada			

Figura 29 - Classificação da apara segundo a norma ISO 3685

Vasta gama de parâmetros usados nos ensaios das ligas Ti6Al7Nb e Ti13Nb13Zr ira gerar um leque de diferentes tipos de apara, quais posteriormente iremos analisar segundo a norma ISO acima descrita. Para além da norma iremos também analisar a apara no microscópio para ver a sua estrutura e forma. O objetivo é verificar a presença ou não da forma serrilhada da apara que é muito comum nesses tipos de materiais.



## Desgaste de ferramenta de corte

A norma ISO 3685 disponibiliza meios de avaliação do estado da ferramenta de corte. Geralmente o desgaste é avaliado na face de saída e na face de ataque da ferramenta. A face de saída não é regular ao longo de todo o comprimento de aresta, sendo quantificada em três parâmetros:  $VB_c$ ,  $V_b$  e  $V_{b\ max}$  representados na Figura 30. O  $VB_c$  é medido junto ao raio de curvatura da pastilha, os  $V_b$  e  $V_{b\ max}$  são o desgaste médio e máximo, respectivamente. O desgaste na face de ataque, que representa a profundidade máxima da cratera é medido o valor  $KT$  correspondente. Geralmente na prática nos estudos acadêmicos, a medição de desgaste da ferramenta é realizada através de obtenção de valor  $V_{b\ max}$  visto que é um valor relativamente fácil de medir ao microscópio, já o valor  $KT$  é difícil de quantificar visto que é uma medição em profundidade.

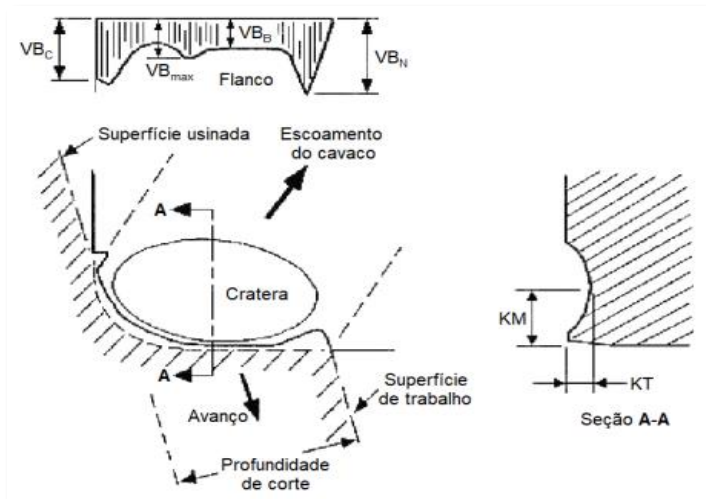


Figura 30 - Medição das faces de saída e de ataque das ferramentas de corte ISO 3685

A medição da ferramenta de corte foi feita para todo o conjunto de parâmetros descritos nas Tabelas 17 e 18. Após cada passagem da ferramenta no provete em cada conjunto de parâmetros era realizada a medição do seu desgaste na face de saída para avaliar a influência dos parâmetros de corte no estado da pastilha. Para isso foi utilizado o microscópio Leica EZ4W do Laboratório de Tribologia. Ao finalizar as medições do desgaste de ferramenta de corte no microscópio onde foi usado um *zoom* de 35X e retirar os valores necessários para análise recorreu-se ao modelo de Taylor para calcular a vida útil de ferramenta através da Equação 5 onde usamos como o parâmetro de entrada a velocidade de corte do processo de maquinagem.

## CAPITULO IV – Resultados e Discussão

### Forças de corte resultantes

Nas Tabelas 19 e 20 podemos observar os valores das forças associadas ao processo de maquinagem nas três direções, onde  $F_x$  é a força medida na direção de penetração,  $F_y$  é o valor da força na direção de corte e por sua vez o valor  $F_z$  representa a força medida na direção de avanço.

Tabela 19 - Forças de corte resultantes para a liga Ti-6Al-7Nb a) a seco e b) com emulsão.

Forças de corte liga Ti-6Al-7Nb (SECO)					
Vc [m/min]	fr[mm/rot]	ap[mm]	Fx[N](ap)	Fy[N](c)	Fz[N](f)
42	0,035	0,5	55,09	39,82	50,62
42	0,077	0,5	81,06	52,89	97,01
65	0,035	0,5	78,16	49,83	60,87
65	0,077	0,5	74,66	54,64	103,08
84	0,035	0,5	80,49	54,90	57,91
84	0,077	0,5	110,20	80,09	101,22

a)

Forças de corte liga Ti-6Al-7Nb (EMULÇÃO)					
Vc [m/min]	fr[mm/rot]	ap[mm]	Fx[N](ap)	Fy[N](c)	Fz[N](f)
42	0,035	0,5	81,28	57,37	60,74
42	0,077	0,5	101,18	66,66	100,86
65	0,035	0,5	82,30	62,39	62,04
65	0,077	0,5	90,41	62,76	94,09
84	0,035	0,5	92,51	61,45	59,50
84	0,077	0,5	106,48	79,18	99,13

b)

Tabela 20 – Forças de corte resultantes para a liga Ti-13Nb-13Zr a) a seco e b) com emulsão.

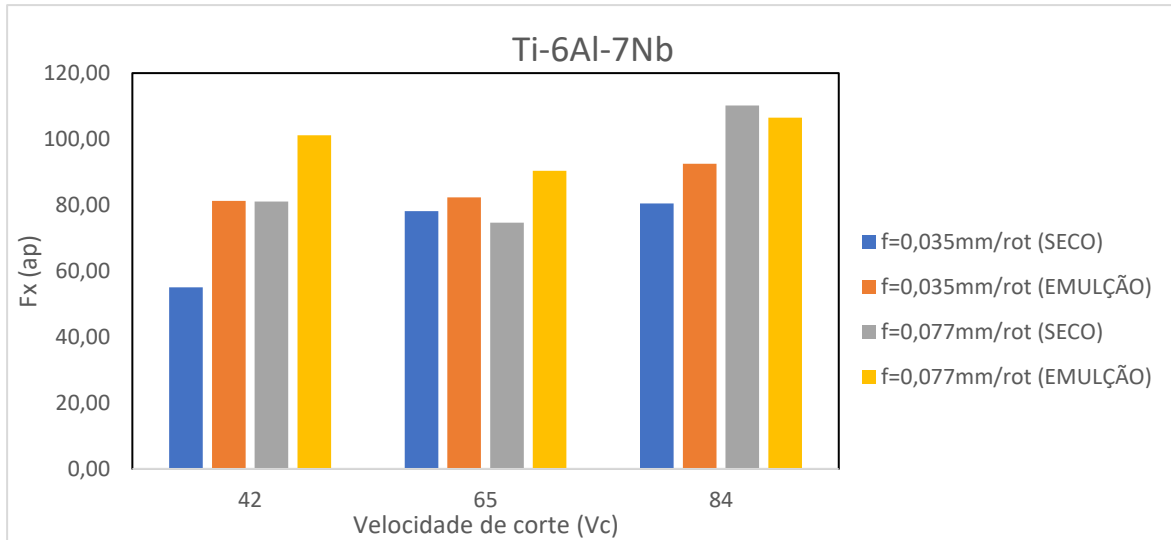
Forças de corte liga Ti-13Nb-13Zr (SECO)					
Vc [m/min]	fr[mm/rot]	ap[mm]	Fx[N](ap)	Fy[N](c)	Fz[N](f)
42	0,035	0,5	40,11	32,55	42,60
42	0,077	0,5	51,10	39,29	70,05
65	0,035	0,5	56,08	35,34	50,73
65	0,077	0,5	70,25	54,16	90,17
84	0,035	0,5	54,24	39,74	52,36
84	0,077	0,5	84,06	66,89	92,66

a)

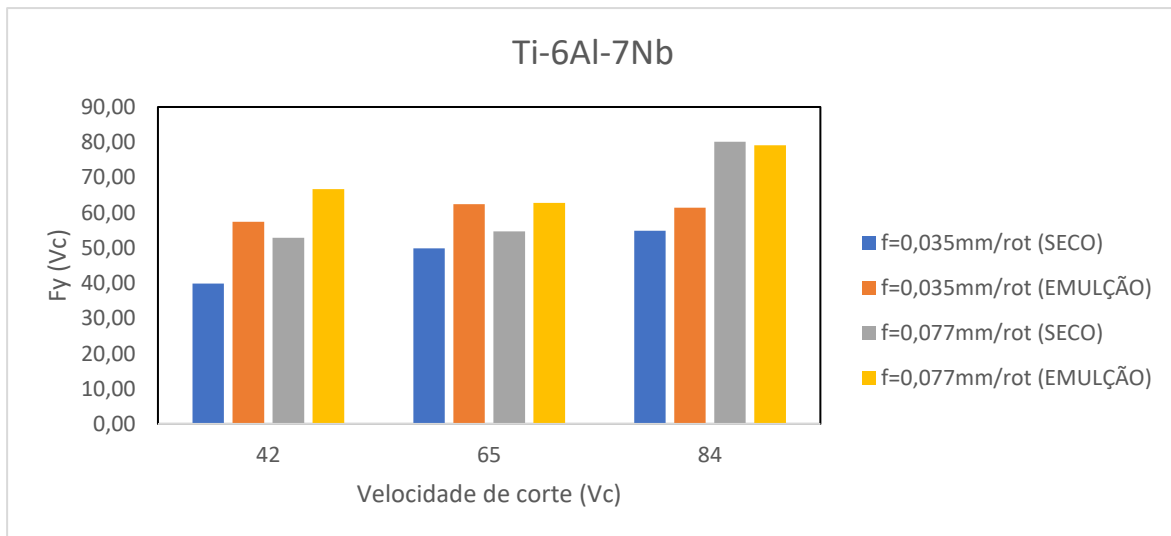
Forças de corte liga Ti-13Nb-13Zr (EMULÇÃO)					
Vc [m/min]	fr[mm/rot]	ap[mm]	Fx[N](ap)	Fy[N](c)	Fz[N](f)
42	0,035	0,5	53,39	40,68	44,23
42	0,077	0,5	63,36	48,58	70,31
65	0,035	0,5	56,98	45,07	48,10
65	0,077	0,5	72,34	54,11	78,93
84	0,035	0,5	60,02	44,47	47,32
84	0,077	0,5	81,47	68,23	83,96

b)

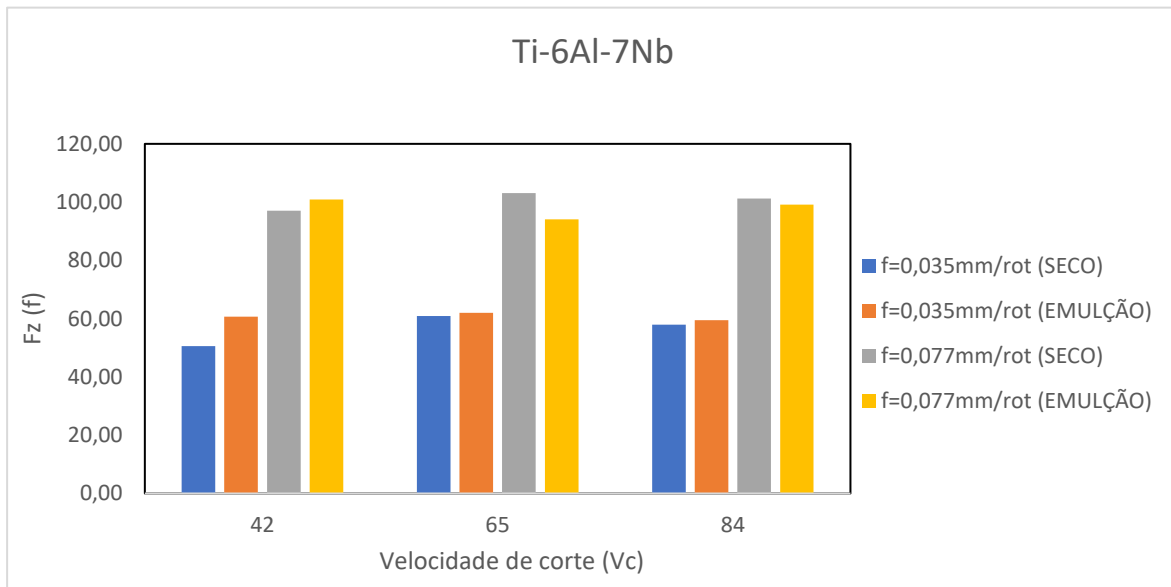
Para uma melhor compreensão e análise dos resultados foram construídos gráficos apresentados nas Figuras 31 e 32 com os valores de cada resultante das forças representados nas tabelas anteriores. Gráficos estes foram construídos de modo que seja mais fácil averiguar a avaliação dos valores das forças para diferentes condições de corte.



a)

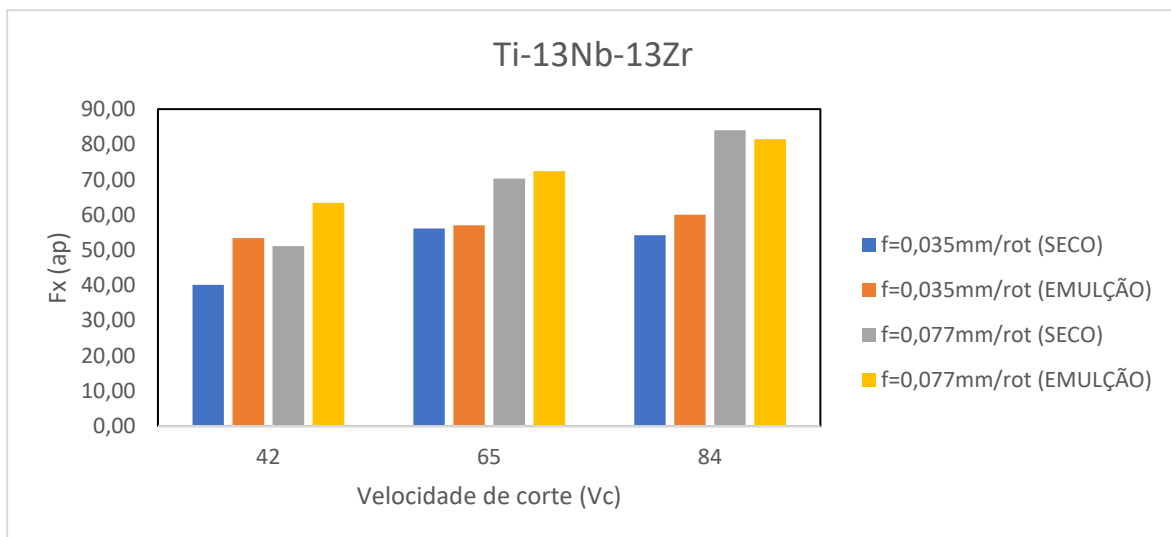


b)

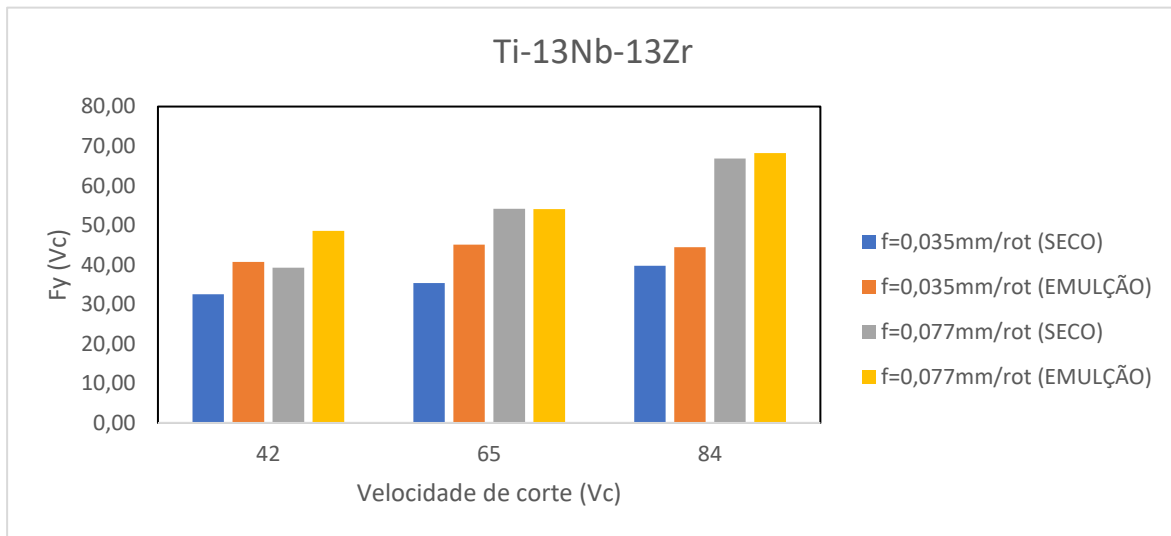


c)

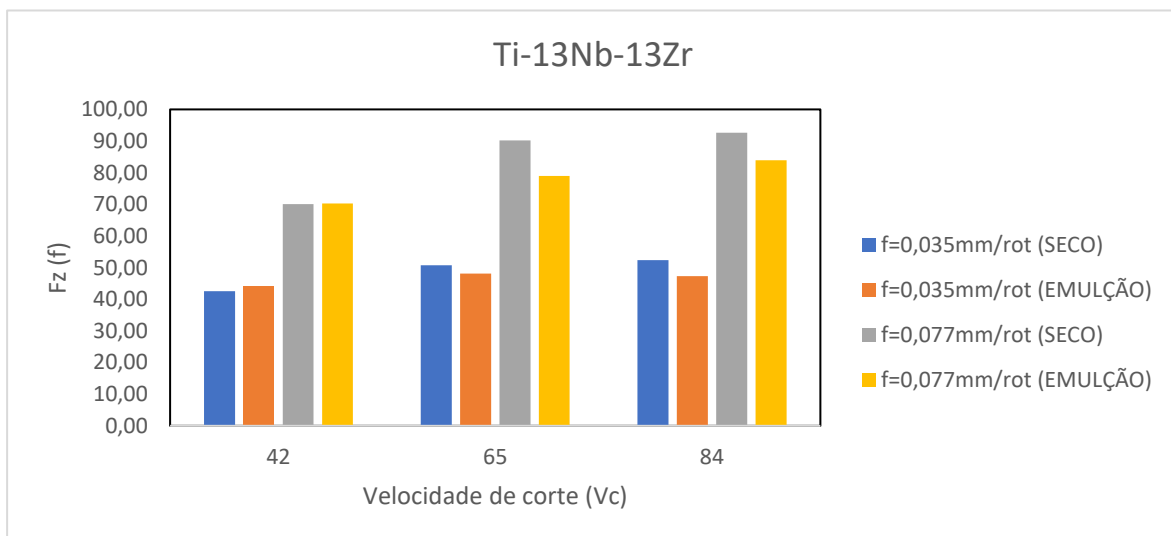
Figura 31 - Forças resultantes das diferentes condições de corte a) Fx b) Fy c) Fz.



a)



b)

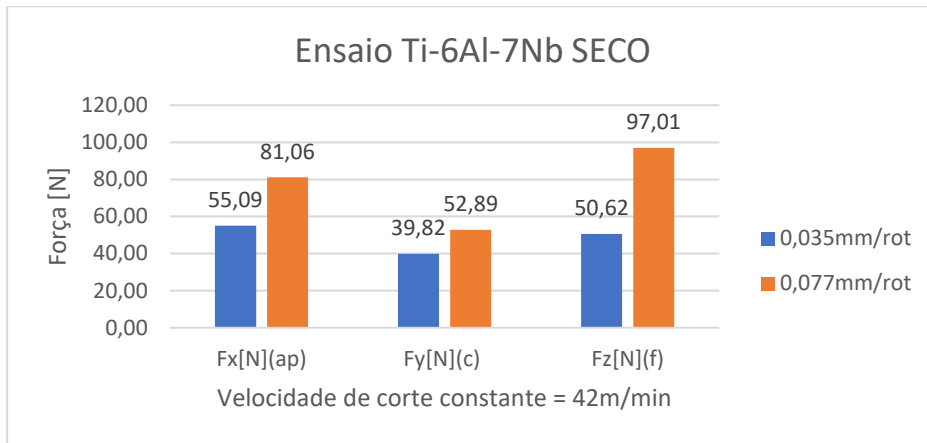


c)

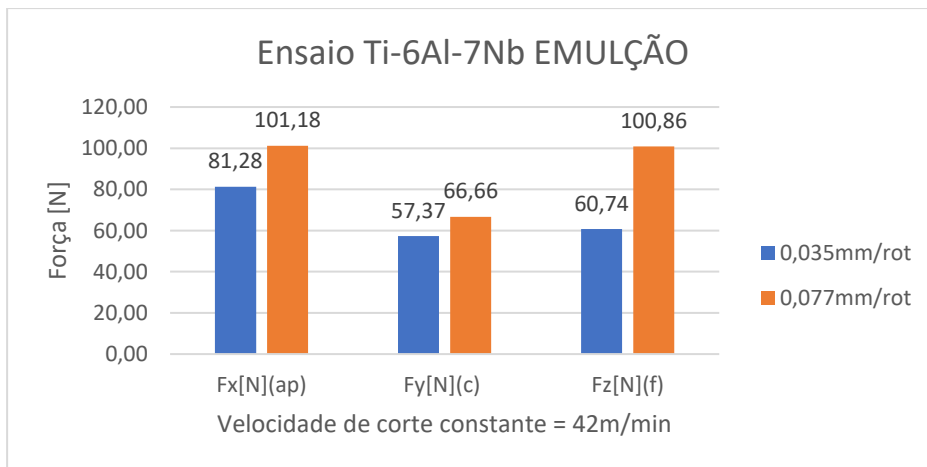
Figura 32 - Forças resultantes das diferentes condições de corte a) Fx b) Fy c) Fz.

Da Figura 33 para a liga Ti-6Al-7Nb, para uma velocidade de corte constante igual a 42m/min conseguimos ver que ao passar de um avanço igual a 0,035mm/rot para 0,077mm/rot temos o aumento das forças de corte em todas a direções e principalmente na Fz (Figura 33.a), onde o valor da força resultante aumenta quase para o dobro, de 50,62N para 97,01N nos ensaios a seco. O mesmo não acontece nos ensaios com emulsão onde a força de avanço aumenta 40,1N e passa de 60,74N para 100,86N (Figura 33.b). Os valores

das forças  $F_x$  e  $F_y$  também tiveram um aumento, que por sua vez comprovam a influência do avanço nas alterações das forças de corte.  $F_x$  teve um aumento de 55,09N para 81,06N a seco comparado com 81,28N para 101,18N com emulsão (Figura 33.a) enquanto  $F_y$  teve a subida da força de corte de 39,82N para 52,89N em ambiente seco e 57,35N para 66,66N com emulsão (Figura 33.b).



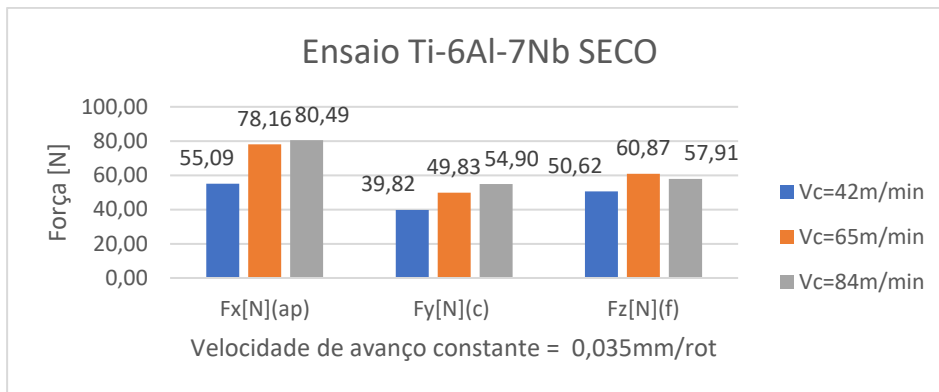
a)



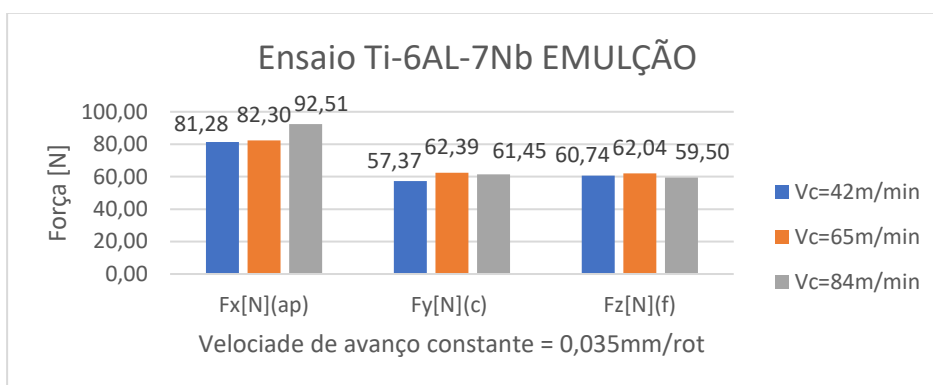
b)

Figura 33 - Forças de corte para  $V_c$  constante

Para valores de velocidades de corte iguais a 65 m/min e 84 m/min o comportamento das forças de corte é semelhante a 42 m/min como se pode observado na Figura 31.



a)

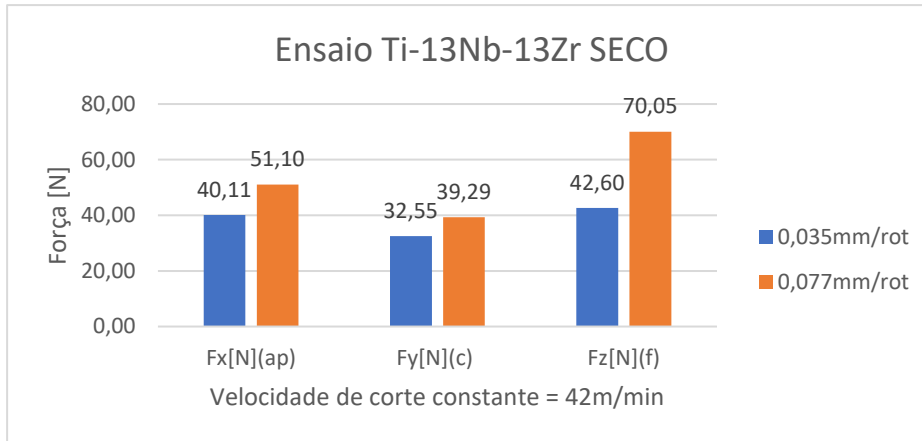


b)

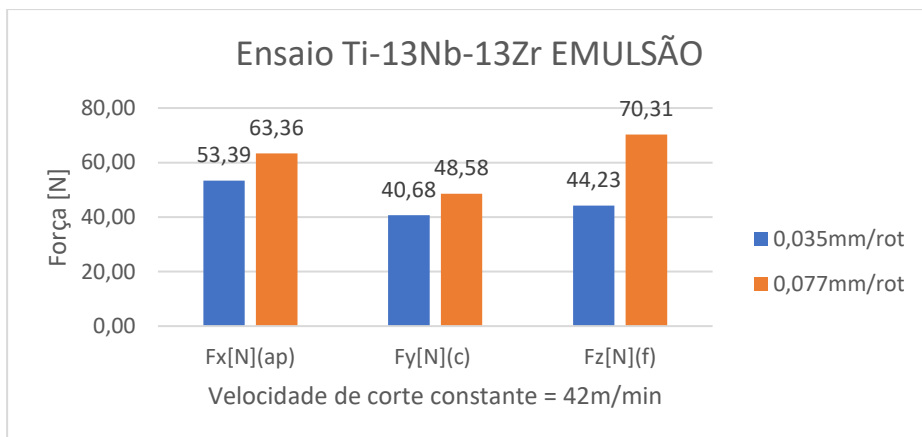
Figura 34 - Forças de corte com velocidade de avanço constante

A informação representada na Figura 34 é suficiente para tirar as conclusões de que o aumento de velocidade de corte também leva ao aumento das forças de corte. Assim temos, para uma velocidade de avanço constante igual a 0,035mm/rot forças resultantes em velocidades de corte altas maiores de que velocidade de corte baixas. Principalmente para as forças Fx na direção de penetração. Se para uma velocidade de corte igual a 42m/min temos  $F_x = 55,09\text{N}$ , para a  $V_c=84\text{m/min}$  resulta uma Força  $F_x$  igual a 80,49N, em ambiente de trabalho a seco (Figura 34.a). Se analisarmos a Figura 34.b podemos observar uma estabilidade do processo com o uso de emulsão no processo de maquinagem, porém as forças resultantes são maiores. Esse fato deve-se a diminuição de temperatura no processo. No trabalho a seco o aumento de temperatura na zona de corte origina a diminuição de dureza do material que por sua vez diminui as forças de corte.

O comportamento da liga Ti-13Nb-13Zr é semelhante à Ti-6Al-13Nb, porém as forças resultantes do processo de maquinagem são menores devido ao valor de tensão de cedência mais baixo. Assim, para a liga em causa, na Figura 35 temos os valores das forças resultantes.



a)



b)

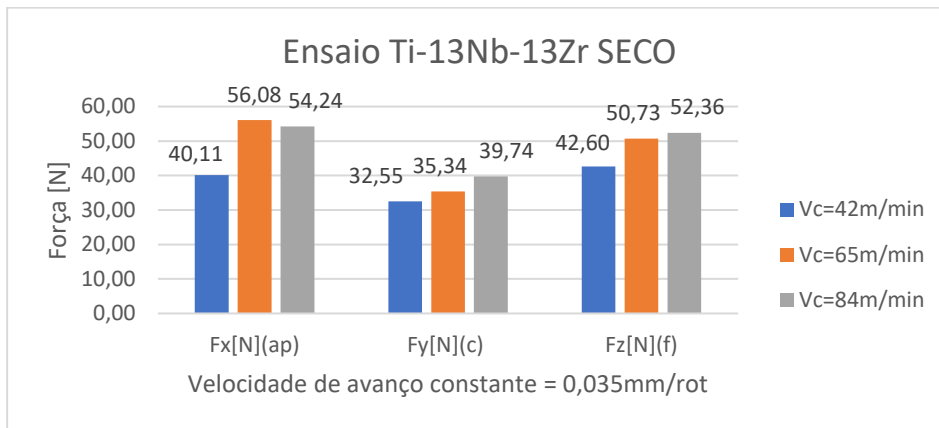
Figura 35 - Forças de corte para Vc constante

Como podemos observar, para a liga Ti-13Nb-13Zr as forças são menores e a diferença das mesmas para velocidades de avanço diferentes é mais pequena comparado com a liga Ti-6Al-7Nb devido ao valor de tensão de cedência mais baixo e melhor condutibilidade térmica que origina um aquecimento maior que por sua vez diminua a dureza do material. Como para a liga Ti-6Al-7Nb, a liga em causa com a variação de velocidade de avanço e

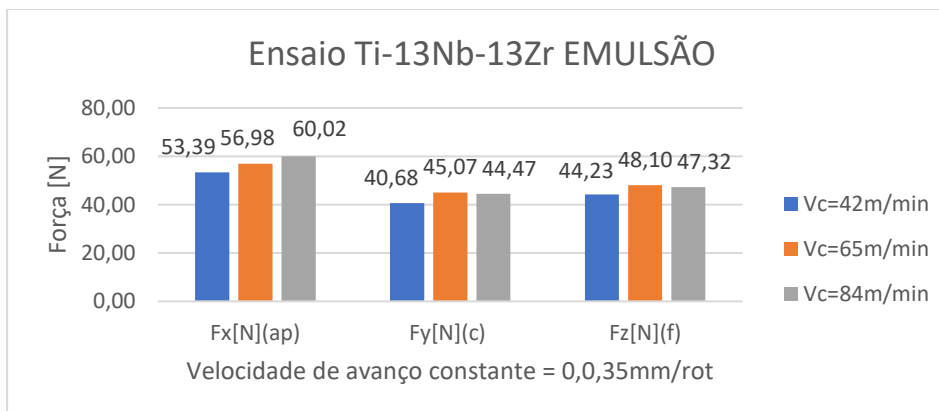


velocidade de corte constante tem um aumento de  $F_x$  na direção de avanço que com um avanço igual 0,035mm/rot origina uma força de corte  $F_x=42,60N$  e alterando o avanço para 0,077mm/rot obtém-se um valor de  $F_x$  igual a 70,05N para trabalho em ambiente seco (Figura 35 .a). No caso de emulsão temos então na Figura 35.b  $F_x=44,23N$  para um avanço de 0,035mm/rot e  $F_x=70,31N$  com o  $f=0,077mm/rot$ . Como se pode ver, para a liga Ti-13Nb-13Zr em ensaios com pistas curtas é difícil obter uma variação de forças nos trabalhos a seco e com emulsão visto que o tempo de maquinagem é curto para conseguir atingir temperatura suficiente de material para conseguir ver a diferença notável nos dois casos.

Para análise de forças com avanço constante recorremos a Figura 36 onde podemos analisar a variação das forças de corte alterando a velocidade de corte com o avanço constante igual a 0,035 mm/rot.



a)



b)

Figura 36 - Forsas de corte com avanço concstante

A semelhança com a liga Ti-6Al-7Nb o material em estudo tem os valores das forças mais baixo devido as suas propriedades mecânicas. Para um avanço constante igual 0,035mm/rot a força  $F_x$  na direção de penetração tem valores  $F_x=40,11\text{N}$  para  $V_c=42\text{m/min}$ ,  $F_x=56,08\text{N}$  para  $V_c=65\text{m/min}$  e  $F_x=54,24\text{N}$  para  $V_c=84\text{m/min}$  em ambiente de trabalho seco (Figura 36.a), no caso de ambiente líquido apresentado graficamente na Figura 36.b temos forças de corte  $F_x$  iguais a 53,39N, 56,98N, 60,03N para velocidades de corte 42m/min, 65m/min e 84m/min respectivamente. Mais uma vez podemos observar um aumento de forças de corte em ambiente lubrificado devido a temperaturas de trabalho mais baixas como uma estabilidade de processo de maquinagem.

Na análise das forças não se verificou apenas o aumento de forças de corte perante a subida de velocidade de avanço como também o fator de avanço ser uma influência bastante forte nas forças de corte resultantes do processo em comparação, por exemplo a variação de velocidade de corte trabalhando com avanço constante. Este fenómeno acontece tanto para Ti-6Al-7Nb como para Ti-13Nb-12Zr, mas com valores menores na liga com estabilizador de zircónio.

O uso de emulsão na maquinagem das duas ligas fez aumentar as forças em ambas por atuar como um refrigerador da zona de corte. Sem o líquido a dureza da camada exterior sofre um aumento de temperatura que torna a superfície “macia” que resulta na diminuição das forças de corte, porém a falta de uso de líquidos na maquinagem traz o problema de desgaste da ferramenta.

## Apara resultante do corte

Nas tabelas 21 e 22 onde estão representadas as aparas resultantes de processo de torneamento das ligas de titânio podemos encontrar as fotografias das mesmas. A avaliação das aparas ocorre num processo visual, por comparar as fotografias tiradas nos ensaios com a Figura 29.

Tabela 21 - Apara resultante de corte de liga Ti-6Al-7Nb.





















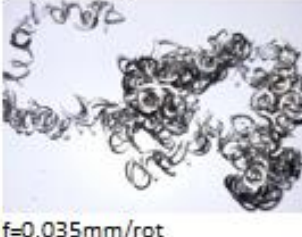



Ti-6Al-7Nb		
Vc	SECO	EMULÇÃO
42	 f=0,035mm/rot	 f=0,035mm/rot
	 f=0,077mm/rot	 f=0,077mm/rot
65	 f=0,035mm/rot	 f=0,035mm/rot
	 f=0,077mm/rot	 f=0,077mm/rot
84	 f=0,035mm/rot	 f=0,035mm/rot
	 f=0,077mm/rot	 f=0,077mm/rot

Tabela 22 - Aparas resultante de corte de liga Ti-13Nb-13Zr.

Ti-13Nb-13Zr		
Vc	SECO	EMULÇÃO
42	 f=0,035 mm/rot	 f=0,035mm/rot
	 f=0,077mm/rot	 f=0,077mm/rot
65	 f=0,035mm/rot	 f=0,035mm/rot
	 f=0,077mm/rot	 f=0,077mm/rot
84	 f=0,035mm/rot	 f=0,035mm/rot
	 f=0,077mm/rot	 f=0,077mm/rot

Para além das fotografias “grosseiras” da apara, uma análise microscópica também pode trazer informação acerca de comportamento do material perante as condições de maquinação. Nas Tabelas 23 e 24 podemos observar as aparas com um *zoom* de 35x para tirar algumas conclusões.

Tabela 23 - Apara de liga Ti-6Al-7Nb vista no microscópio.



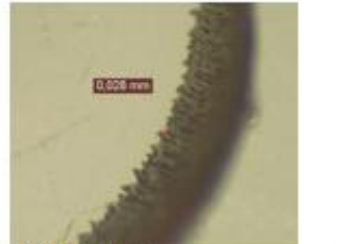

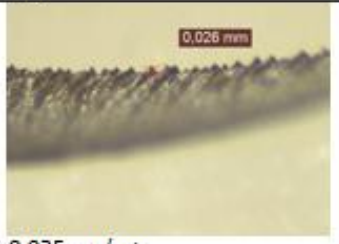


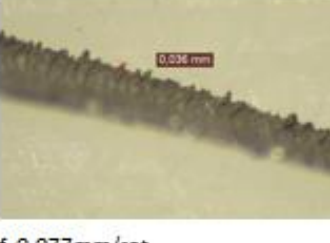
Ti-6Al-7Nb		
Vc	SECO	EMULÇÃO
42	 <p>0.023 mm f=0,035mm/rot</p>	 <p>500 µm f=0,035mm/rot</p>
84	 <p>0.026 mm f=0,077mm/rot</p>	 <p>0.039 mm f=0,077mm/rot</p>

Tabela 24 - Apara da liga Ti-13Nb-13Zr vista no microscópio.

Ti-13Nb-13Zr		
Vc	SECO	EMULÇÃO
42	 <p>0.026 mm f=0,035mm/rot</p>	 <p>0.022 mm f=0,035mm/rot</p>
84	 <p>0.050 mm f=0,077mm/rot</p>	 <p>0.036 mm f=0,077mm/rot</p>

Na Tabela 21 podemos observar as imagens da apra obtida do ensaio de corte de liga Ti-6Al-7Nb. Podemos desde já concluir que a existência ou não da emulsão não transmite a influência na qualidade de apra visto que as aparas da coluna esquerda são semelhantes as da coluna direita. Mas no que diz respeito a variação de velocidade de avanço podemos observar uma diferença entre avanços igual a 0,035mm/rot e 0,077mm/rot. Assim, da Figura 29 para velocidade de corte 42m/min e avanço 0,035mm/rot resulta uma apra helicoidal em gume enrolada (4.3) e para avanço igual a 0,077mm/rot a apra do mesmo material é helicoidal em gume longo (4.1). De mesmo modo para  $V_c=65$  e  $f=0,035$ mm/rot apra resultante é de classe 4.3 e para o avanço igual a 0,077mm/rot a velocidade constante resulta uma apra de classe mista entre 2.3 e 4.3. Apenas para a velocidade de corte 84m/min a classe da apra resultante é 4.3 independentemente da velocidade de avanço.

Já a liga Ti-13Nb-13Zr da Tabela 22 tem um comportamento ligeiramente diferente onde apenas o uso de emulsão fez a ligeira alteração de apra com velocidade de corte 42m/min e avanço igual a 0,077mm/rot o aspeto da apra passou de classe 4.2 para 2.1. Restantes parâmetros dos ensaios da liga mantiveram-se inalterados correspondendo a classe 4.3 da Figura 29.

Análise microscópica das aparas resultantes demonstra a característica específica do titânio. Nas Tabelas 23 e 24 podemos observar as imagens obtidas no microscópio onde podemos provar a existência da forma da apra serrilhada.

Das tabelas concluímos não apenas a forma da apra como também o fato de existência de ligeiras alterações com o uso de emulsão na maquinagem. Também podemos constatar que para velocidades mais elevadas de corte a forma serrilhada aumenta.

Segundo a norma ISO 3685/1993 e análise microscópica das aparas obtidas nos ensaios de corte verificou-se o fenómeno característico da apra de titânio em forma serrilhada. Maioritariamente a apra é de classe 4, helicoidal em gume, longa.

## Rugosidade superficial

Rugosidade superficial também é um parâmetro de importância elevada na análise de maquinabilidade de titânio. As respectivas medições de Ra e Rt estão presentes nas Tabelas 25 e 26 deste subcapítulo.

Tabela 25 - Valores das rugosidades Ra e Rt em condições de corte a) seco e b) emulsão da liga Ti-6Al-7Nb.

Rugosidade superficial liga Ti-6Al-7Nb (SECO)				
Vc [m/min]	fr[mm/rot]	ap[mm]	Ra [ $\mu$ m]	Rt [ $\mu$ m]
42	0,035	0,5	0,39	3,19
42	0,077	0,5	0,49	3,87
65	0,035	0,5	0,42	3,47
65	0,077	0,5	0,52	4,04
84	0,035	0,5	0,48	3,57
84	0,077	0,5	0,56	4,28

a)

Rugosidade superficial liga Ti-6Al-7Nb (EMULÇÃO)				
Vc [m/min]	fr[mm/rot]	ap[mm]	Ra [ $\mu$ m]	Rt [ $\mu$ m]
42	0,035	0,5	0,24	2,42
42	0,077	0,5	0,32	2,95
65	0,035	0,5	0,32	2,70
65	0,077	0,5	0,36	3,28
84	0,035	0,5	0,35	3,17
84	0,077	0,5	0,44	3,51

b)

Tabela 26 - Valores das rugosidades Ra e Rt em condições de corte a) seco e b) emulsão da liga Ti-13Nb-13Zr.

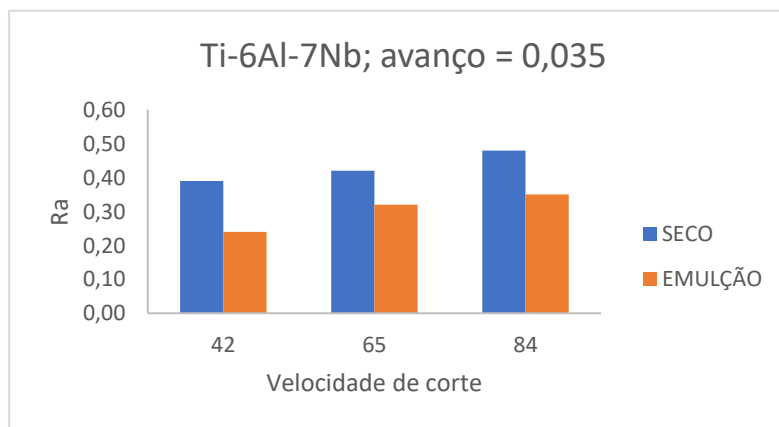
Rugosidade superficial liga Ti-13Nb-13Zr (SECO)				
Vc [m/min]	fr[mm/rot]	ap[mm]	Ra [ $\mu$ m]	Rt [ $\mu$ m]
42	0,035	0,5	0,37	3,63
42	0,077	0,5	0,42	3,72
65	0,035	0,5	0,40	3,62
65	0,077	0,5	0,46	3,79
84	0,035	0,5	0,43	3,81
84	0,077	0,5	0,53	3,85

a)

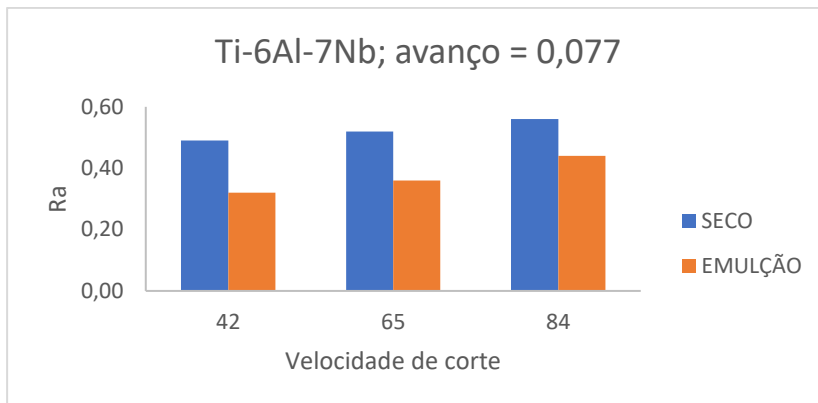
Rugosidade superficial liga Ti-13Nb-13Zr (EMULÇÃO)				
Vc [m/min]	fr[mm/rot]	ap[mm]	Ra [ $\mu$ m]	Rt [ $\mu$ m]
42	0,035	0,5	0,22	2,36
42	0,077	0,5	0,33	2,51
65	0,035	0,5	0,32	2,67
65	0,077	0,5	0,38	3,01
84	0,035	0,5	0,38	3,02
84	0,077	0,5	0,46	3,23

b)

Para uma melhor compreensão dos resultados obtidos nos ensaios as tabelas foram transformadas em gráficos. Figuras 37 e 38 apresentam valores de Ra e Rt para a liga Ti-6Al-7Nb e as Figuras 39 e 40 para a liga Ti-13Nb-3Zr, respectivamente.

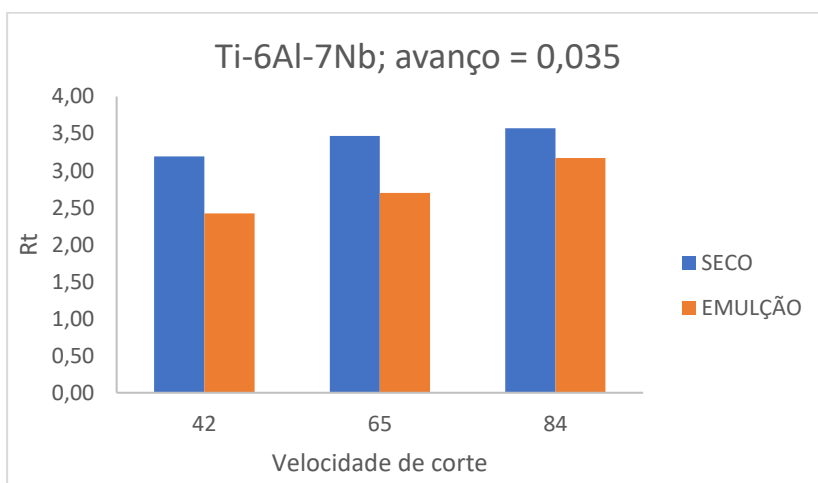


a)

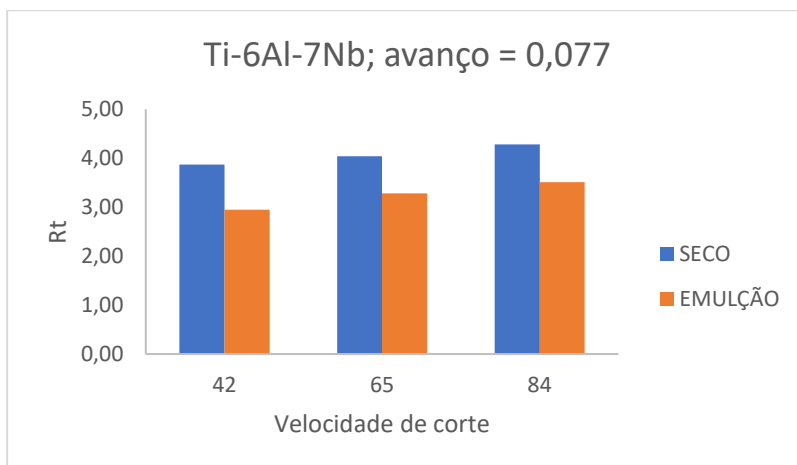


b)

Figura 37 - Valores de Ra para a liga Ti-6Al-7Nb para avanços a) 0,035mm/rot e b) 0,077mm/rot



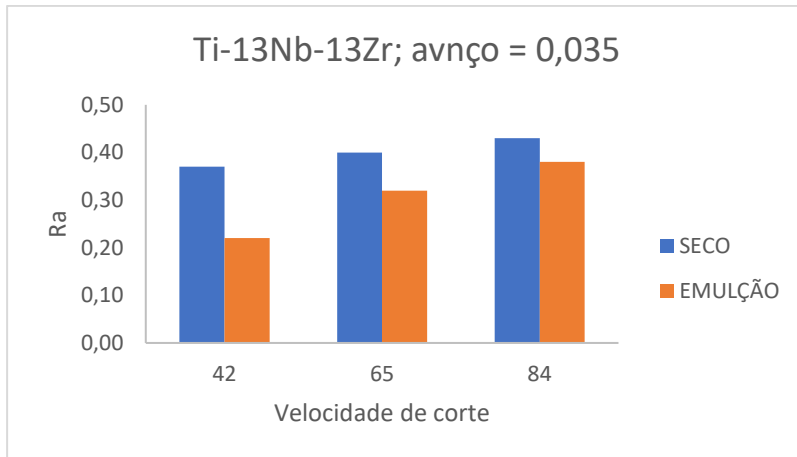
a)



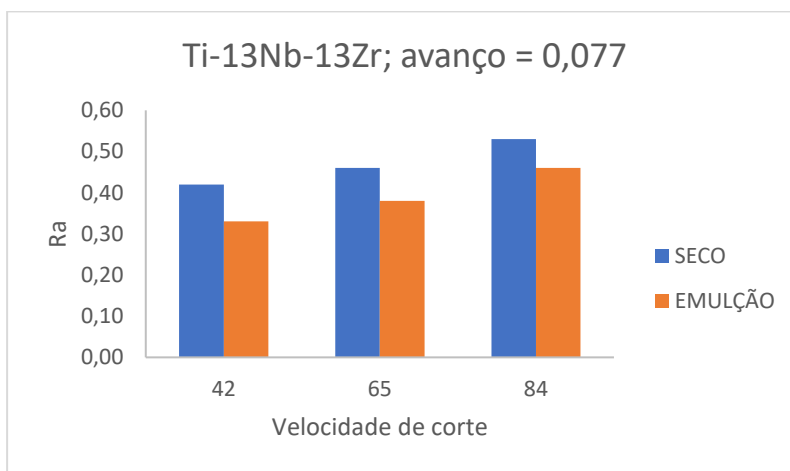
b)

Figura 38 - Valores de Rt para a liga Ti-6Al-7Nb para avanços a) 0,035mm/rot e b) 0,077mm/rot



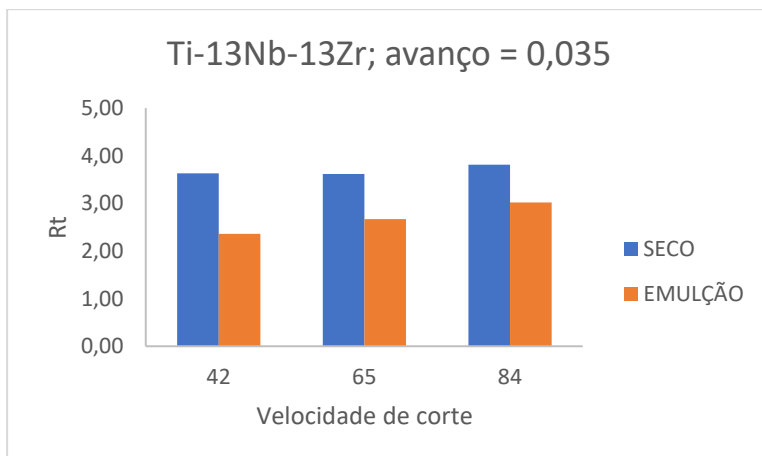


a)

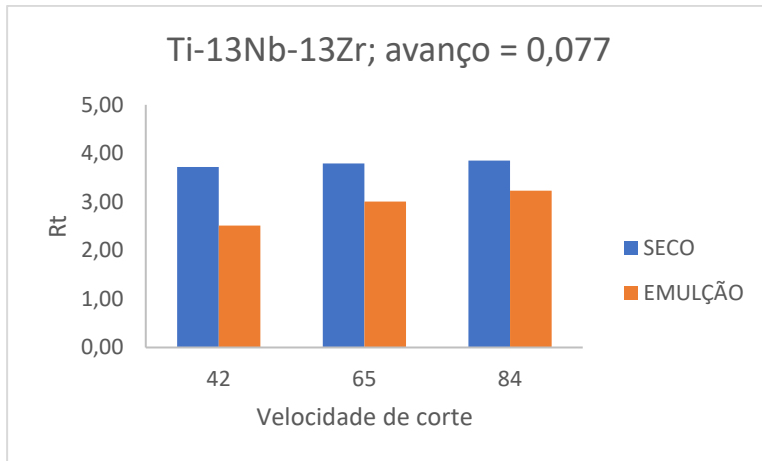


b)

Figura 39 - Valores de Ra para a liga Ti-13Nb-13Zr para avanços a) 0,035mm/rot e b) 0,077mm/rot



a)



b)

Figura 40 - Valores de Rt para a liga Ti-13Nb-13Zr para avanços a) 0,035mm/rot e b) 0,077mm/rot

Relativamente à rugosidade os valores de rugosidade média aritmética (Ra) e amplitude máxima de rugosidade (Rt). Daqui conseguimos entender o comportamento do acabamento superficial perante as variações de velocidade de corte e presença ou não de lubrificação. É notável que há uma variação de valor de Ra com o aumento de velocidade de avanço. Isso acontece em caso de ambiente de trabalho seco como com o uso de emulsão. Também se compararmos os valores de Ra com o avanço constante reparamos que o valor medido de rugosidade média aritmética aumenta com o aumento de velocidade de corte.

O uso de líquido de refrigeração faz diminuir toda a gama de valor de Ra independentemente da velocidade de avanço. Esse fenómeno acontece devido a diminuição de temperatura na zona de corte e o escorregamento de apara acontece de uma forma fluida e constante. O aumento de temperatura na zona de corte diminui a dureza de material e aumenta a ductilidade, isso faz com que o material fica mais “pastoso” e cria matéria empostçada na superfície da peça maquinada. Tal como Ra, os valores de Rt têm um comportamento semelhante. Se olharmos para Figura 38 conseguimos encontrar uma tendência de subida de valores tanto para aumento de velocidade de avanço como de corte.

A semelhança de análise dos valores Ra conseguimos provar que o uso de emulsão favorece a qualidade de acabamento superficial diminuindo assim toda a gama de valores de Rt.

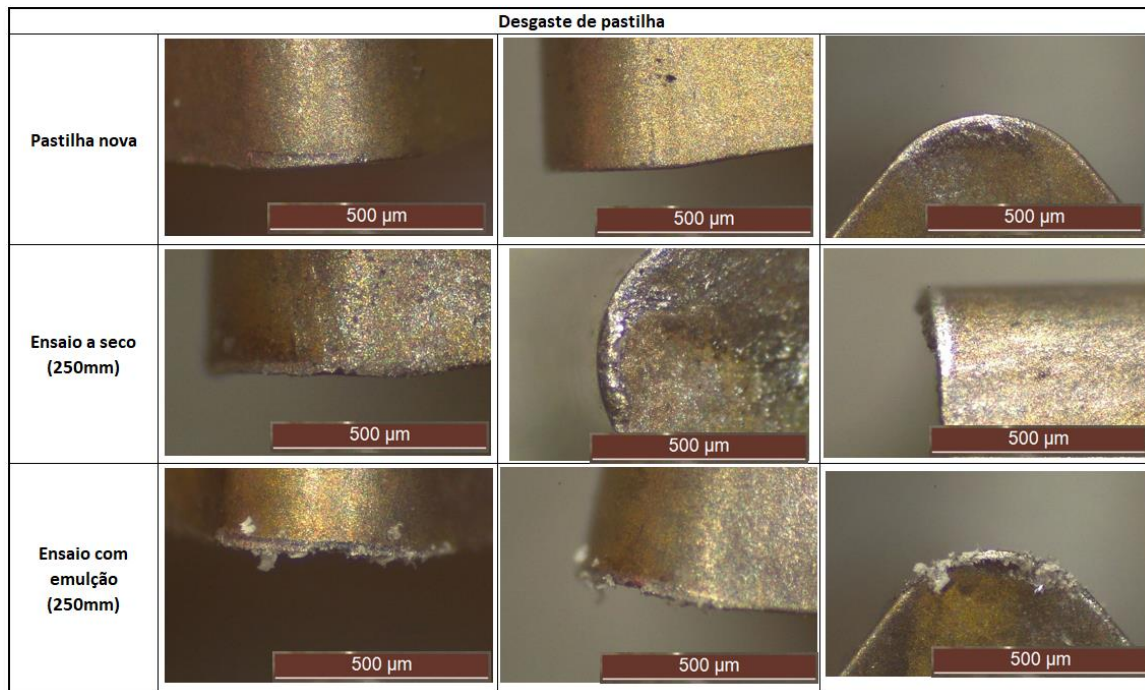
Para liga Ti-13Nb-13Zr os valores de rugosidade média aritméticas estão representadas no Figura 39 onde podemos ver valores de Ra bastante semelhantes a liga Ti-6Al-7Nb.

Na Figura 40, os valores de Rt também obedecem a mesma tendência da liga Ti-6Al-7Nb e aumentam com a subida de velocidades de corte e avanço, porém com valores mais baixos comparados. Conseguimos concluir que para a qualidade de superfície a liga Ti-13Nb-13Zr tem um comportamento mais favorável comparada a liga Ti-6Al-7Nb, para as mesmas condições de maquinagem.

## Desgaste de ferramenta de corte

Para análise analítica de desgaste da ferramenta de corte recorreremos ao microscópio de Laboratório de Tribologia do DEM. A Tabela 27 representa fotografias tiradas ao fim de análise de maquinabilidade de titânio a seco e com emulsão. No total foi maquinado 250 mm para cada condição.

Tabela 27 - Resultados de desgaste de ferramenta de corte



Ao longo dos ensaios de corte o inserto da ferramenta de corte foi submetido a análise microscópica para avaliação do estado das arestas de corte. Para ensaios a seco e com o uso de emulsão foram utilizados cantos novos da pastilha. Ao fim de ensaio a seco e com emulsão foram tiradas imagens no microscópio para observar o estado da ferramenta. As imagens para análise estão na Tabela 27.

Como se pode ver nas imagens de ensaio a seco ao fim de 164,08 segundos de torneamento no ângulo de ataque já se nota o desgaste frontal e aresta postiça na face de ataque. Já nos ensaios com emulsão o mesmo não acontece e ao fim de tempo semelhante a do ensaio a seco apenas é visível o desgaste natural de pastilha após algum tempo de trabalho, sem fissuras e arestas postiças.

Em relação a vida útil de ferramenta de corte, como não houve um desgaste significativo da pastilha não há possibilidade usar a Equação de Taylor (5) para determinar a vida útil de ferramenta de corte.

Durante os ensaios a pastilha fornecida pela “Secotools” sofreu algum desgaste. Ao percorrer uma distância total de 250mm na maquinagem em ambiente seco o incerto demonstrou desgaste superficial com algumas fissuras e aresta postiça. Os testes demonstram que a mesma distância percorrida pela ferramenta de corte mas com emulsão eliminou por completo estes dois efeitos.

O significado da presente análise de desgaste deu entender que para as mesmas condições de maquinagem o uso de emulsão é mais favorável para aspeto económico.

## **CAPITULO V – Conclusões**

A metodologia usada para ensaios permitiu chegar a resultados interessantes na avaliação de maquinabilidade das ligas Ti-6Al-7Nb e Ti-13Nb-13Zr e chegar a conclusões muito importantes.

Análise geral de maquinabilidade das duas ligas em causa demonstra que o Ti-13Nb-13Zr é um material de melhor maquinabilidade comparado a liga Ti-6Al-7Nb. Forças de corte e acabamento superficial medidos demonstram que nas situações de aplicabilidade semelhante das duas ligas a escolha da liga Ti-13Nb-13Zr é uma solução bastante adequada perante resultados demonstrados. Outro aspeto a considerar é o uso de emulsão na maquinagem visto que o mesmo traz vantagens na durabilidade de ferramenta de corte, diminuição de forças de corte e melhorias nos acabamentos superficiais.

No que diz respeito a acabamento superficial e valores medidos de rugosidade provou-se que tanto o Ra como Rt reagem ao aumento de velocidade de corte e avanço. Para as condições de corte iguais a liga Ti-13Nb-13Zr apresenta melhores resultados obtendo valores de rugosidade média aritmética (Ra) e amplitude máxima de rugosidade (Rt) menores comparando com a liga Ti-6Al-7Nb. Tanto para uma liga como para a outra o efeito de uso de emulsão demonstra melhores resultados com a diminuição de valores obtidos das rugosidades;

## Trabalhos futuros

Vista a vantagem da liga Ti-13Nb-13Zr perante Ti-6Al-7Nb seria interessante fazer um estudo de maquinabilidade dessa liga mais pormenorizada, como por exemplo:

- i. Expandir a gama de parâmetros de corte nos ensaios experimentais;
- ii. Testar o comportamento da liga com o uso de MQL;
- iii. Usar ferramentas de corte com vários revestimentos e ir a procura de pastilhas mais adequadas para a liga em causa;

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Abele, E. & Frohlich, B., High Speed Milling of Titanium Alloys. Advances in Production Engineering & Management, Volume 3, (2008).

Antonialli, A., Uma Contribuição ao Fresamento Frontal da Liga de Titânio Ti-6Al-4V. (2009), Universidade Estadual de Campinas: Tese de Mestrado

BREME, J.; EISENBARTH, E.; BIEHL, V. - Titanium and its alloys for medical applications. Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications. 16 (2003). 423-451

Box, G. E. P., Hunter, J. S. e Hunter, W. G. Statistics for Experimenters: Design, Innovation, and Discovery. John Wiley & Sons, Hoboken, 2nd edition, 2005.

DAVIM, J. P. - Princípios da Maquinagem. Portugal: Publindústria, 2008

DHAR, N. R.; KAMRUZZAMAN, M.; AHMED, Mahiuddin - Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in turning AISI-4340 steel. Journal of Materials Processing Technology. . ISSN 09240136. 172:2 (2006) 299–304. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.09.022.

Dixit, U. S., Sarma, D. K. e Davim, J. P. Environmentally Friendly Machining. Springer, New York, 2012.

Dornfeld, D., Yuan, C., Diaz, N., Zhang, T. e Vijayaraghavan, A. Introduction to Green Manufacturing, Green Manufacturing – Fundamentals and Applications. Springer, New York, p. 1-23, 2013.

DONACHIE, MJ - Titanium and Titanium alloys: source book: a collection of outstanding articles from the technical literature. 1982).

DONACHIE, Matthew J. - Titanium: A Technical Guide, 2nd Edition [Em linha] [Consult. 25 fev. 2015]. Disponível em WWW:.. ISBN 161503062X.

Ezugwu, E. & Wang, Z., Titanium alloys and their machinability - a review. Journal of Materials Processing Technology, Volume 68(3), (1997) 262-274.

Farias, A., Delijaicov, S. & Batalha, G., Avanços na usinagem de ligas de titânio. (2011), Brasil, 6º Congresso Brasileiro de Engenharia e Fabricação.

Fratila, D. Sustainable Manufacturing Through Environmentally Friendly Machining, Green Manufacturing Processes and Systems. Springer, Berlin, p. 1-21, 2013.

FERRARESI, D. Usinagem dos Metais. São Paulo: Ed. Edgard Blücher, 1970.

Gupta, K. e Laubscher, R. F. Sustainable machining of titanium alloys: A critical review, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, vol. 231, p. 2543-2560, 2016.



GROOVER, MP Mikell P. MP - Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems, 2015

GROOVER, MP Mikell P. MP - Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems [Em linha]. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2010 [Consult. 9 abr. 2015]. ISBN 0470467002.

HARTUNG, PD; KRAMER, BM; TURKOVICH, BF Von - Tool wear in titanium machining. CIRP Annals-Manufacturing Technology. (1982) 75-80.

ASTM International url:<https://astm.org/> - Consult: 26/10/2021; 09:56

Mundo educação url:<https://mundoeducacao.uol.com.br/quimica/titanio.htm> - Consult: 10/04/2021; 10:32

Fonte Usinagem Brasil -  
<https://www.revistaferramental.com.br/?cod=artigo/modelos-matemiticos-cálculo-vida-util-ferramenta/> - Consult: 13/09/2021; 17:43

Júnior, J., Considerações atuais sobre aspetos importantes relacionados à osseointegração. (2009), Universidade Veiga de Almeida: Tese de Mestrado.

KARAGUZEL, U. et al. - Increasing tool life in machining of difficult-to-cut materials using nonconventional turning processes. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. . ISSN 0268-3768. 77:9-12 (2014) 1993–2004. doi: 10.1007/s00170-014-6588-7.

Knoll, P. & Schaeffer, L., Análise Microestrutural da Liga de Titânio  $\alpha+\beta$ , Ti-6Al-4V, Forjada a Quente. (2006), 17º CBECIMat, Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais.

MACHADO, ÁR et al. - Teoria da usinagem dos materiais. São Paulo: Editora Blucher. (2009) 50-55

Machado, A. R., Abrão, A. M., Coelho, R. T. e da Silva, M. B. Teoria da Usinagem dos Materiais. Blücher, São Paulo, 3 edição, 2015.

Markopoulos A.P. (2013) Cutting Mechanics and Analytical Modeling. In: Finite Element Method in Machining Processes. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology. Springer, London

Oestreich, D., Mosquen, A., Stoffel, D. & Souza, A., Revisão da literatura sobre a usinabilidade do titânio e suas ligas. (2011), 6º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, s.n.

Rodrigues, J. & Martins, P., Tecnologia Mecânica - Tecnologia da deformação plástica. (2010), Escolar Editora ed. Lisboa: Vol. I (Fundamentos teóricos).

Relvas, C., Concepção e estudo de próteses de anca anatomicamente adaptadas por obtenção in situ da geometria do canal femoral. (2007), Universidade de Aveiro : Tese de Doutorado.

Revista Industrial Heating, 2016- Paulo Vencovsky

Srivastav, A., An Overview of Metallic Biomaterials for Bone Support and Replacement. (2011), [Online] Available at:

SANDVIK COROMANT CATALOG - Turning tools

SHAW, MC - Metal cutting principles, 1984. Clarendon Press, Oxford. 1984

SUN, S.; BRANDT, M.; DARGUSCH, M. S. - Characteristics of cutting forces and chip formation in machining of titanium alloys. . International Journal of Machine Tools and Manufacture. ISSN 08906955. 49:7-8 (2009) 561–568. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2009.02.008.

STEPHENSON, David A.; AGAPIOU, John S. - Metal Cutting Theory and Practice [Em linha] [Consult. 2 mar. 2015]. Disponível em WWW:. ISBN 0824758889. Singh, G. R. e Sharma, V. S. Analyzing machining parameters for commercially pure titanium (Grade 2), cooled using minimum quantity lubrication assisted by a Ranque-Hilsch vortex tube, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 88, p. 2921-2928, 2017.

Tecnologia de Fabrico de J. Paulo Davim, A. Festas e A. Completo 2015

UPM - <https://www.upmet.com/sites/default/files/datasheets/cp-grade-4.pdf>- United Performance Metal Consult: 20/10/2021

WANG, Zhigang; NAKASHIMA, Shogo; LARSON, Mark - Energy Efficient Machining of Titanium Alloys by Controlling Cutting Temperature and Vibration. Procedia CIRP. . ISSN 22128271. 17:2014) 523–528. doi: 10.1016/j.procir.2014.01.134.

Yang, X. & Liu, C., Machining titanium and its alloys. Machining Science and Technology: An International Journal, Volume 3(1), (1999).












# ANEXOS

## ANEXO 1 – Equações para cálculo de parâmetros de corte (SANDVIK 2021)

Valores métricos	Valores imperiais
Velocidade de corte $v_c$ (m/min) $v_c = \frac{D_m \times \pi \times n}{1000}$	Velocidade de corte $v_c$ (pés/min) $v_c = \frac{D_m \times \pi \times n}{12}$
Velocidade do fuso $n$ (rpm) $n = \frac{v_c \times 1000}{\pi \times D_m}$	Velocidade do fuso $n$ (rpm) $n = \frac{v_c \times 12}{\pi \times D_m}$
Taxa de remoção de metal $Q$ (cm <sup>3</sup> /min) $Q = v_c \times a_p \times f_n$	Taxa de remoção de metal $Q$ (pol <sup>3</sup> /min) $Q = v_c \times a_p \times f_n \times 12$
Potência líquida $P_c$ (kW) $P_c = \frac{v_c \times a_p \times f_n \times k_c}{60 \times 10^3}$	Potência líquida $P_c$ (HP) $P_c = \frac{v_c \times a_p \times f_n \times k_c}{33 \times 10^3}$
Tempo de usinagem $T_c$ (min) $T_c = \frac{l_m}{f_n \times n}$	Tempo de usinagem $T_c$ (min) $T_c = \frac{l_m}{f_n \times n}$

Símbolo	Designação/definição	Unidade, métrica (imperial)
$D_m$	Diâmetro usinado	mm (polegadas)
$f_n$	Avanço por rotação	mm/r (pol./r)
$a_p$	Profundidade de corte	mm (polegadas)
$v_c$	Velocidade de corte	m/min (pés/min)
$n$	Velocidade do fuso	rpm
$P_c$	Potência líquida	kW (HP)
$Q$	Taxa de remoção de metal	cm <sup>3</sup> /min (pol <sup>3</sup> /min)
$h_m$	Espessura média dos cavacos	mm (pol.)
$h_{ex}$	Espessura máxima do cavaco	mm (pol.)
$T_c$	Tempo de contato	min
$l_m$	Comprimento usinado	mm (pol.)
$k_c$	Força de corte específica	N/mm <sup>2</sup> (N/pol <sup>2</sup> )
KAPR	Ângulo de posição	grau
PSIR	Ângulo de ataque	grau

## ANEXO 2 – Tipos de desgaste de ferramenta (Mitsubishi Tools 2021)

Forma do Dano da Ferramenta	Causa	Sugestão de Solução
Desgaste Frontal 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Classe é muito tenaz.</li> <li>• Velocidade de corte é muito alta.</li> <li>• Ângulo de folga é muito pequeno.</li> <li>• Avanço é extremamente baixo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Classe com alta resistência ao desgaste.</li> <li>• Reduzir a velocidade de corte.</li> <li>• Aumentar ângulo de folga.</li> <li>• Aumentar o avanço.</li> </ul>
Craterização 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Classe é muito tenaz.</li> <li>• Velocidade de corte é muito alta.</li> <li>• Avanço é muito alto.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Classe com alta resistência ao desgaste.</li> <li>• Reduzir a velocidade de corte.</li> <li>• Diminuir o avanço.</li> </ul>
Micro Lasca 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Classe é muito dura.</li> <li>• O avanço é muito alto.</li> <li>• É necessário uma aresta de corte mais resistente.</li> <li>• É necessário maior rigidez de suporte e fixação.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Classe com alta tenacidade.</li> <li>• Diminuir o avanço.</li> <li>• Aumente a preparação da aresta (Troque o honed por chanfros)</li> <li>• Use um tamanho de haste maior.</li> </ul>
Quebras 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Classe é muito dura.</li> <li>• Avanço é muito alto.</li> <li>• É necessário uma aresta de corte mais resistente.</li> <li>• É necessário maior rigidez de suporte e fixação.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Classe com alta tenacidade.</li> <li>• Diminuir o avanço.</li> <li>• Aumente a preparação da aresta. (Troque o honed por chanfros)</li> <li>• Use um tamanho de haste maior.</li> </ul>
Deformação Plástica 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Classe é muito tenaz.</li> <li>• Velocidade de corte é muito alta.</li> <li>• Profundidade de corte e avanço são muito grandes.</li> <li>• Temperatura de usinagem é muito alta.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Classe com alta resistência ao desgaste.</li> <li>• Reduzir a velocidade de corte.</li> <li>• Diminua profundidade de corte e avanço.</li> <li>• Classe com alta condutividade térmica.</li> </ul>
Aresta Postiça 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidade de corte é baixa.</li> <li>• Geometria pouco positiva.</li> <li>• Classe não aplicável</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumente a velocidade de corte. (Para aço 1045, velocidade de corte 80m/min.)</li> <li>• Aumente o ângulo de folga</li> <li>• Classe com baixa afinidade. (Classe de cobertura e cermet)</li> </ul>
Trincas Térmicas 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dilatação ou contração devido à temperatura da usinagem.</li> <li>• Classe é muito dura. *Especialmente em fresamento.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Usinagem sem refrigeração. (Para usinagem com refrigeração, inunde a peça usinada com líquido refrigerante)</li> <li>• Classe com alta tenacidade.</li> </ul>
Entalhe 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Superfícies duras ou não usinadas, peças coquilhadas e camada endurecida pela usinagem.</li> <li>• Fricção causada pela forma pontiaguda do cavaco. (Causada por pequenas vibrações).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Classe com alta resistência ao desgaste.</li> <li>• Aumente o ângulo de ataque para melhorar a geometria de corte.</li> </ul>
Lascamento 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aresta postiça e adesão.</li> <li>• Evacuação de cavacos ruim.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumente o ângulo de ataque para melhorar a geometria de corte.</li> <li>• Aumente o bolsão de cavacos.</li> </ul>
Quebra do Desgaste Frontal *Dano característico de CBN E PCD 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dano devido a falta de resistência de uma aresta de corte curva.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aumente a preparação da aresta.</li> <li>• Classe com alta tenacidade.</li> </ul>
Quebra da Craterização *Dano característico de CBN E PCD 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Classe é muito tenaz.</li> <li>• Esforço de usinagem é muito alto e causa alta temperatura de usinagem.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diminua a preparação da aresta.</li> <li>• Classe com alta tenacidade ao desgaste.</li> </ul>