



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

Jorge Filipe Da Costa Novais

**ESTUDO DO DESGASTE DE FERRAMENTAS NA  
MAQUINAGEM DE AÇOS INOXIDÁVEIS**

**Dissertação no âmbito do Mestrado em Engenharia Mecânica na Especialidade de  
Produção e Projeto orientada pela Professora Doutora Dulce Maria Esteves  
Rodrigues e apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da  
Universidade de Coimbra**

Julho de 2022



1 2



9 0

FACULDADE DE  
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

# **Estudo do Desgaste de Ferramentas na Maquinagem de Aços Inoxidáveis**

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia  
Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto

## **Study of Tool Wear in Stainless Steel Machining**

**Autor**

**Jorge Filipe da Costa Novais**

**Orientadores**

**Professora Doutora Dulce Maria Esteves Rodrigues**

**Doutor David Gomes Andrade**

**Júri**

<b>Presidente</b>	<b>Professora Doutora Cristina Maria Gonçalves dos Santos</b> <b>Professora Auxiliar da Universidade de Coimbra</b>
<b>Orientador</b>	<b>Professora Doutora Dulce Maria Esteves Rodrigues</b> <b>Professora Associada com Agregação da Universidade de Coimbra</b>
<b>Vogais</b>	<b>Professor Doutor Fernando António Gaspar Simões</b> <b>Professor Coordenador do Instituto Superior de Engenharia de Coimbra</b>



UNIVERSIDADE D  
COIMBRA

Universidade De Coimbra



kristaltek®  
LASER MECÂNICA DE PRECISÃO

Kristaltek

**Coimbra, Julho, 2022**



Dedico este trabalho  
aos meus pais, irmão  
e à minha namorada



## Agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer à empresa KRISTALTEK a oportunidade de realizar este trabalho em ambiente empresarial e o acesso a ferramentas e maquinaria. A todos os seus colaboradores que contribuíram para a realização deste projeto o meu muito obrigado!

Queria agradecer aos meus orientadores da Universidade de Coimbra Professora Doutora Dulce Rodrigues e Doutor David Andrade, ao orientador na empresa Eng.º Gonçalo Costa e ao meu supervisor na empresa Gonçalo Vintena, por todas as ajudas e acompanhamento prestado, pela ajuda na procura de novas soluções para este estudo, e disponibilidade demonstrada. À Universidade de Coimbra e em especial ao Departamento de Engenharia Mecânica por todo o acompanhamento prestado ao longo do meu percurso académico. À minha família em especial aos meus pais, e ao meu irmão um enorme obrigado por me apoiarem sempre e acreditarem em mim e naquilo que faço e por todos os ensinamentos de vida sem dúvida que foram muitos. Com o término desta etapa tão importante surge um enorme sentido de obrigação e responsabilidade para convosco. Espero que possa compensar todo o carinho, esforço, apoio e dedicação que me ofereceram, agora chegou a minha altura de retribuir.

O meu enorme obrigado também à minha namorada por todo o apoio incondicional e ajuda na realização deste trabalho pelas inúmeras trocas de impressões, correções e comentários ao trabalho. Acima de tudo, pelo indeterminável apoio que sempre demonstrou em todas as circunstâncias, e pela paciência e compreensão reveladas ao longo destes anos.

Por fim, mas certamente não por último, queria agradecer também aos OH BOY, vocês sabem..., e a todos os meus amigos pelos bons momentos que passamos ao longo destes anos.



## Resumo

Em consequência da colaboração entre Universidade de Coimbra (UC), nomeadamente o Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) e a empresa *Kristaltek*, foi reconhecida a importância em expandir e aprofundar o estudo acerca do desempenho de certas ferramentas no corte por arranque de apra, em materiais dedicados à indústria automóvel, aeronáutica e militar considerados de maquinabilidade difícil, nomeadamente aços inoxidáveis. Deste modo, foi então desenvolvido este projeto, dedicado ao estudo da maquinabilidade dos aços inoxidáveis austeníticos, no âmbito do Mestrado em Engenharia Mecânica na Especialidade de Produção e Projeto da UC.

De forma a enquadrar e entender melhor o tema, começou por se efetuar uma revisão relativamente aos materiais usados nas ferramentas de corte, tendo ainda em conta os mecanismos de desgaste envolvidos na maquinagem, assim como foi introduzido e explicado o conceito de maquinabilidade. De seguida foi desenvolvida a parte experimental, onde foram estudadas as dimensões do desgaste nas ferramentas ao longo do seu tempo de vida útil, e qual a influência da alteração dos parâmetros de corte.

No final, foi possível concluir para a situação em estudo em concreto, qual é efetivamente o melhor intervalo de valores para os parâmetros de corte em estudo.

Tal como se foi prevendo devido ao estudo desenvolvido antes deste projeto, concluiu-se que o desgaste de flanco é o fator preponderante na inutilização das fresas de topo maciças com revestimento de Nitreto de Alumínio e Titânio (TiAlN), na maquinagem de aço inoxidável austenítico, contudo, a formação de apra aderente e consequente colapso da ferramenta é um problema a ter em conta.

**Palavras-chave:** Fresa de topo, Velocidade de corte, Avanço, Maquinabilidade, Desgaste de Flanco, Vida Útil da Ferramenta.



## Abstract

*As a result of the collaboration between the University of Coimbra (UC), namely the Department of Mechanical Engineering (DEM) and the company Kristaltek, the importance of expanding and deepening the study on the performance of certain tools in chipping cutting, in materials dedicated to the automotive, aeronautical and military industries considered to be difficult to machine, namely stainless steels. Thus, this project was developed, dedicated to the study of the machinability of austenitic stainless steels, within the scope of the Master in Mechanical Engineering in the Specialty of Production and Design at UC.*

*In order to better frame and understand the subject, a review was made of the materials used in cutting tools, taking into account the wear mechanisms involved in machining, as well as the introduction and explanation of the concept of machinability. Then the experimental part was developed, where the dimensions of wear on the tools were studied throughout their useful life, and what is the influence of changing the cutting parameters.*

*In the end, it was possible to conclude, for the situation under study, which is effectively the best range of values for the cut parameters under study.*

*As expected, due to the study carried out before this project, it was concluded that flank wear is the preponderant factor in the machinability of solid end mills coated with Titanium Aluminum Nitride (TiAlN), in the machining of austenitic stainless steel, however, the formation of adhering chip and consequent tool collapse is a problem to be aware of.*

**Keywords:** *End Mill, Stainless Steel, Cutting Parameters, Machinability, Flank Wear, Tool Life.*



---

## Índice

Índice de Figuras .....	viii
Índice de Tabelas .....	x
Siglas .....	xii
1. Introdução .....	1
1.1. Enquadramento do Problema .....	1
1.2. Objetivo .....	2
1.3. Estrutura .....	2
2. Revisão Bibliográfica .....	5
2.1. Ferramentas .....	5
2.1.1. Materiais Usados em Ferramentas de Corte .....	5
2.1.2. Falhas e Desgaste das Ferramentas .....	12
2.1.3. Mecanismos Causadores de Desgaste .....	19
2.1.4. Medição dos Desgastes .....	22
2.2. Matéria Prima .....	25
2.2.1. Aço Inoxidável Austenítico .....	25
2.2.2. Índice de Maquinabilidade .....	26
3. Componente Experimental .....	29
3.1. Enquadramento do Trabalho Experimental .....	29
3.1.1. Procedimento de Maquinagem .....	29
3.1.2. Equipamento de Inspeção .....	31
3.1.3. Material .....	32
3.1.4. Software e Estratégia de Maquinagem .....	33
3.1.5. Parâmetros de Corte .....	33
3.2. Metodologia de Análise .....	34
4. Resultados e Discussão .....	39
5. Conclusões e Trabalhos Futuros .....	48
5.1. Conclusões .....	48
5.2. Trabalhos Futuros .....	50
Referências .....	51

## Índice de Figuras

Figura 2.1. Relação entre dureza e tenacidade dos materiais utilizados em ferramentas de corte (Gabaldo & Prado, 2010) .....	5
Figura 2.2. Exemplo de ferramentas fabricadas em aço rápido ( <i>Aços Nobre</i> , 2022).....	6
Figura 2.3. Classificação das ferramentas de metal duro segundo a norma ISO ( <i>Doccity</i> , 2011) .....	9
Figura 2.4. Fresas De Topo De PCD De Longa Duração ( <i>WAT Tool</i> , 2022) .....	10
Figura 2.5. Representação da evolução da Dureza em função da temperatura em matérias usados em ferramentas de corte (Gabaldo & Prado, 2010).....	11
Figura 2.6. Exemplos de deformação plástica (Vasques, 2015) .....	13
Figura 2.7. Fissuras de origem térmica, transversais na direção normal à aresta de corte (Machado et al., 2009) .....	13
Figura 2.8. Lascamento aresta de corte (Vasques, 2015).....	14
Figura 2.9. Apra aderente em micro maquinagem (Vasques, 2015) .....	15
Figura 2.10. Quebra completa da aresta de corte (Vasques, 2015).....	16
Figura 2.11. Representação desgaste de flanco em fresa de topo maciça ( <i>ISO 8688-2</i> , 1989) .....	17
Figura 2.12. Representação aresta e superfície de folga em fresa de topo maciça (Mitsubishi Materials, 2014).....	17
Figura 2.13. Representação da evolução do desgaste de cratera em fresa de topo maciça ( <i>ISO 8688-2</i> , 1989) .....	18
Figura 2.14. Representação do desgaste de entalhe em fresa de topo maciça ( <i>ISO 8688-2</i> , 1989) .....	19
Figura 2.15. Representação formação gume postiço em ferramenta de corte (Klocke, 2011) .....	20
Figura 2.16. Mecanismos de desgaste das ferramentas em função da temperatura de corte (Klocke, 2011) .....	22
Figura 2.17. Diferentes tipos de Lascamento em fresas de topo, a) Lascamento Uniforme, b) Lascamento Não-Uniforme, c) Lascamento Localizado, ( <i>ISO 8688-2</i> , 1989) .....	22
Figura 2.18. Diferentes Tipos de fissuras em fresas de topo, a) Fissuras Perpendiculares, b) Fissuras Paralelas, c) Fissuras Irregulares ( <i>ISO 8688-2</i> , 1989) .....	23
Figura 2.19. Medição Desgaste de Flanco em fresas de topo ( <i>ISO 8688-2</i> , 1989).....	23
Figura 2.20. Exemplo de gráfico Desgaste de Flanco Vs Tempo de Corte (Machado et al., 2009) .....	25

---

Figura 2.21. Concentrações de Ni-Cr nos diferentes grupos de Aços Inoxidáveis ( <i>Sandvik, 2022</i> ).....	26
Figura 2.22. Maquinabilidade relativa dos vários grupos de aços inoxidáveis ( <i>Sandvik, 2022</i> ).....	28
Figura 3.1. Representação fresagem de topo onde $a_p > a_e$ ( <i>ISO 8688-2, 1989</i> ).....	29
Figura 3.2. Mazak Horizontal Nexus 5000 II ( <i>Exapro, 2021</i> ) .....	30
Figura 3.3. Fresa de Topo Usada Nos Ensaios ( <i>Emuge-Franken, 2020</i> ) .....	31
Figura 3.4. Representação Esquemática Legendada-Ferramenta de Corte ( <i>Emuge-Franken, 2020</i> ).....	31
Figura 3.5. Microscópio e acessórios usados na medição de defeitos e capturação de imagem .....	32
Figura 3.6. Bloco de material antes de ser maquinado .....	32
Figura 3.7. Representação maquinagem trocoidal ( <i>Sandvik, 2022</i> ) .....	33
Figura 3.8. Fixação do chão na torre da máquina.....	35
Figura 4.1. Evolução dos valores de $VB_{Máx}$ obtidos durante os ensaios 1A .....	40
Figura 4.2. Evolução dos valores de $VB_{Máx}$ obtidos durante os ensaios 1A .....	41
Figura 4.3. Evolução dos valores médios obtidos durante os ensaios 1B .....	42
Figura 4.4. Evolução dos valores médios obtidos durante os ensaios 1C .....	43
Figura 4.5. Evolução dos valores médios obtidos durante os ensaios 1D.....	44
Figura 4.6.Fresa usada em 1D .....	45
Figura 4.7.Fresas usadas nos ensaios 1D.....	45
Figura 4.8.Fresa usada em ensaio 1E .....	46
Figura 4.9.Representação quantitativa entre tempo de maquinagem por peça e volume de material removido por ferramenta nos 5 ensaios escolhidos para análise.....	47

## Índice de Tabelas

Tabela 2.1. Composição química para vários de aços rápidos das classes T e M ( <i>CIMM</i> , 2022) .....	7
Tabela 3.1. Composição Química (%pd) AISI 304L (LG STEEL, 2022) .....	32
Tabela 3.2. Parâmetros de corte utilizados nos ensaios .....	37
Tabela 4.1. Parâmetros de corte calculados e/ou introduzidos nos programas usados nos ensaios .....	39



## Siglas

UC – Universidade de Coimbra

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

$a_d$  - Profundidade de defeito

$a_c$  - Largura de corte

AIISI - *American Iron and Steel Institute*

$a_p$  - Profundidade de corte

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

CAD - Desenho Assistido por Computador (*Computer Aided Design*)

CAM - Fabrico Assistido por Computador (*Computer-Aided Manufacturing*)

$c_{fc}$  - Cúbica de faces centradas

$D_c$  - Diâmetro da fresa

$D_{cap}$  - Diâmetro de corte na profundidade de corte efetiva,  $a_p$

DIN - *Deutsches Institut für Normung*

$D_m$  - Largura do canal

EN - Norma Europeia (*European Standard*)

$f_z$  - Avanço por dente

HR<sub>(B)</sub> - *Hardness Rockwell (Scale Symbol)*

HSS - *High Speed Steel*

HV - *Hardness Vickers*

IM - Índice de maquinabilidade

ISO - *International Organization for Standardization*

KB - Largura da cratera

KM - Distância da aresta de corte principal ao centro da cratera

KT - Profundidade máxima da cratera

KT<sub>1</sub> - Desgaste de cratera

KT<sub>2</sub> - Desgaste em forma de escada

$n$  - Velocidade de rotação

---

PCBN - Nitreto de Boro Cubico Policristalino (*Polycrystalline Cubic Boron Nitride*)

PCD - Diamante Policristalino (*Polycrystalline Diamond*)

Q - Taxa de remoção de material

USA - *United States of America*

$VB_{Méd}$  - Desgaste médio de flanco

$VB_1$  - Desgaste de flanco uniforme

$VB_2$  - Desgaste de flanco não uniforme

$VB_{máx}$  -  $VB_3$  - Desgaste máximo de flanco

VC - Desgaste de entalhe na aresta secundária de corte

$V_c$  - Velocidade de corte

$V_f$  - Velocidade de avanço

$V_{fm}$  - Velocidade de avanço periférico

$Z_n$  - Número total de dentes

$\Delta t_{obt}$  - Tempo de vida útil obtido

$\Delta t_{Peça}$  - Tempo de maquinagem por peça



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Enquadramento do Problema

Na atualidade, os processos de maquinagem estão amplamente implementados em indústrias de todas as áreas, principalmente o da metalomecânica. Dentro destes processos destaca-se a fresagem, este pode ser aplicável a praticamente todos os tipos de geometrias, desde furos, roscas, reentrâncias, caixas, etc. Contudo, embora este método de maquinagem pareça simples, devido às elevadas taxas de produção, é na verdade uma operação que envolve muitas variáveis, o que o torna bastante complexo (Amaro, 2017). Ou seja, neste processo, é necessário um rigor acrescido, inicialmente ao nível do planeamento na criação dos documentos CAD, de seguida na preparação (máquina a utilizar, suportes de ferramentas, tipo de refrigeração, etc.), durante o processo (ajuste dos parâmetros/estratégias de maquinagem se necessário) e até após a conclusão do mesmo, com os processos de acabamento e de controlo de qualidade, estes sistemas assim como o autocontrolo por parte dos operadores, são parte integral da garantia que o fabricante tem que os produtos fabricados cumprem os requisitos (Biolub, 2019).

No fabrico de componentes através da fresagem, existem variáveis associadas aos parâmetros de maquinagem, à tipologia das ferramentas, às estratégias de maquinagem e ao tipo de material a maquinar. É a conjugação de todos estes fatores que torna a fresagem um processo complexo e desafiante.

A presente dissertação teve como objetivo reforçar/aprofundar conhecimentos acerca da maquinabilidade de aços inoxidáveis austeníticos procurando a melhoria continua dos seus processos, através da colaboração entre o Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra e a empresa Kristaltek®. O interesse pela maquinagem de aços inoxidáveis, e em particular, dos aços austeníticos, é elevado, devido, não só, ao elevado interesse comercial deste material, mas também, aos desafios que este apresenta no que diz respeito à sua capacidade de ser conformado por corte. Com efeito, estes aços, são materiais

duros e com composição química propicia a promover fenômenos de desgaste das ferramentas, como por exemplo, o desgaste de flanco, de cratera ou de entalhe.

Sendo este um trabalho realizado em ambiente industrial, achou-se por bem abordar a temática no fabrico de uma das referências (de peça) que a empresa produz com bastante regularidade. Desta forma conseguiu-se obter resultados acerca de uma maquinagem realizada num ambiente realista, e não numa situação ideal. Durante o projeto foi extremamente útil e conveniente a grande experiência da empresa e dos seus colaboradores no processo de maquinagem em geral, e em específico no fabrico desta referência de peça.

## **1.2. Objetivo**

O presente trabalho teve como objetivo principal avaliar a degradação de ferramentas de corte na fresagem de um aço inoxidável austenítico. Mais concretamente, fresas de topo maciças, de metal duro, revestidas com Nitreto de Alumínio e Titânio (TiAlN), foram utilizadas em operações de corte realizadas com fluido de refrigeração, procurando melhorar a eficiência geral da maquinagem, uma vez que se trata do fabrico de uma peça já comercializada pela empresa. No estudo fizeram-se variar os parâmetros de corte, velocidade de corte ( $V_c$ ) e avanço por dente ( $f_z$ ), tendo sido realizados vários ensaios para cada valor de parâmetros de corte de forma a obter um valor médio credível para o tempo de vida útil da ferramenta. Para além disso, foi registada e documentada em imagem, a evolução do desgaste de flanco em todas as ferramentas usadas, para melhor perceber qual a real influência da alteração dos parâmetros de corte sobre a evolução deste fenómeno.

## **1.3. Estrutura**

Esta dissertação está dividida em 5 capítulos, aos quais acrescem anexos e referências bibliográficas. Os 2 primeiros capítulos correspondem à contextualização necessária para o enquadramento do problema, no capítulo 3 é descrita a componente experimental do trabalho

efetuado e, no capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados obtidos. No capítulo 5 são sumariadas as conclusões principais e propostos temas para trabalhos futuros.

De seguida é feita uma descrição mais detalhada dos temas abordados em cada capítulo:

No **Capítulo 1** é elaborada uma breve contextualização do tema, são descritos os objetivos do trabalho e é apresentada a estrutura da dissertação, capítulo a capítulo.

O **Capítulo 2** contém informação sobre os diferentes materiais utilizados na produção de ferramentas de corte, identificando os prós e contras associados à utilização de cada um deles, e ainda, a sua área de aplicação. É apresentada a teoria subjacente aos diferentes tipos de desgaste das ferramentas de corte e os critérios que ajudam a definir e estimar a vida útil das mesmas. É feita uma introdução aos aços inoxidáveis, em específico, aos aços austeníticos. É ainda introduzido e explicado um conceito muito importante para a realização deste trabalho, o índice de maquinabilidade.

O **Capítulo 3** inicia-se com a introdução à componente experimental. É neste capítulo que são identificados os equipamentos utilizados, as ferramentas, o *software* e a estratégia de maquinagem implementada para a execução da investigação.

O **Capítulo 4** é onde são apresentados e discutidos os resultados obtidos, através de gráficos e tabelas, para uma melhor compreensão do trabalho realizado. Os resultados são comparados entre si e, são ainda assinalados e quantificados percentualmente os avanços ou recuos na eficiência da maquinagem.

No **Capítulo 5**, e último, são sumariadas as conclusões do trabalho efetuado tendo em conta os resultados obtidos e a informação presente na revisão bibliográfica. São também propostos temas para trabalhos futuros.

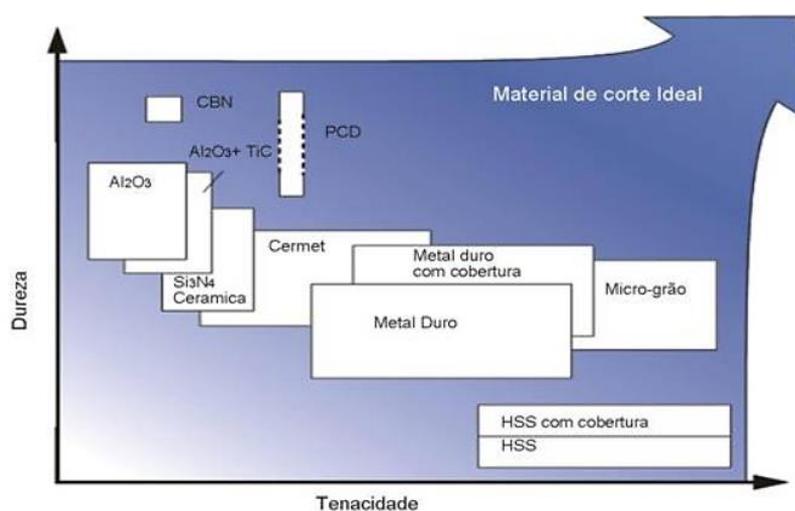


## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Ferramentas

#### 2.1.1. Materiais Usados em Ferramentas de Corte

Um material, para poder ser utilizado no fabrico de ferramentas de corte, deve cumprir requisitos muito específicos. Com efeito, este tipo de processo mecânico requer que as ferramentas sejam dotadas de elevada dureza e tenacidade, (Sandvik, 2022), propriedades estas normalmente antagónicas. Ou seja, enquanto, a dureza é normalmente associada a materiais frágeis e pouco tenazes, a tenacidade é associada a materiais macios e com módulo de elasticidade acima da média, na ordem dos 200 GPa. Por exemplo, tal como é representado na Figura 2.1, materiais como os aços rápidos (HSS) são bastante tenazes, enquanto que, os cerâmicos, no geral, são materiais extremamente duros e frágeis. Contudo, a figura mostra também que existem materiais com propriedades intermédias, o mais próximo possível das ideais, como é o caso dos metais duros, ou ainda, dos metais duros revestidos.



**Figura 2.1.** Relação entre dureza e tenacidade dos materiais utilizados em ferramentas de corte (Gabaldo & Prado, 2010)

As características da ferramenta de corte, nomeadamente o material que as constitui, influenciam diretamente a vida útil da mesma, assim como a escolha da máquina de corte e, dos tempos de maquinagem, entre outros fatores.

Apesar de não existir uma classificação geral dos materiais para ferramentas mais utilizados nas operações de maquinagem (FERRARESI, 1997), tendo em conta as suas características químicas, estes podem ser agrupados da seguinte forma (DINIZ et al., 2008): Aços-rápidos, Carbonetos Sinterizados, *Cermets*, Cerâmicos e Ultraduros, tal como está representado na Figura 2.1.

#### 2.1.1.1. Aços Rápidos

Os aços rápidos, são usualmente identificados com recurso à sigla HSS (do inglês “*high speed steel*”).

O primeiro aço rápido foi desenvolvido por Frederick Taylor e Maunsel White, em meados de 1890. O objetivo do trabalho realizado por estes investigadores era melhorar a resistência dos aços ferramentas a temperaturas muito mais elevadas do que as utilizadas pelas indústrias da época. O resultado foi mais do que positivo, causou uma verdadeira revolução nos processos de corte e maquinagem, conduzindo a aumentos importantes de produtividade, (*Heavy Duty*, 2022). Comparativamente com os aços carbono de baixa e média liga, os aços rápidos conseguem manter resistência mecânica elevada, mesmo com o aumento da temperatura, aliando a versatilidade na produção de ferramentas com geometria complexa que os caracteriza como é possível visualizar na Figura 2.2.



**Figura 2.2.** Exemplo de ferramentas fabricadas em aço rápido (*Aços Nobre*, 2022)

Existem duas classificações possíveis para os aços rápidos. Aços rápidos ao **molibdénio (grupo M)** com carbono na faixa de 0.75 a 1.52% e molibdénio entre 4.50 e 11.0%, e aços rápidos ao **tungsténio (grupo T)**, com teores similares de carbono, mas altos teores de tungsténio, entre 11,75 e 21 % (CIMA, 2022). Na Tabela 2.1 estão representados alguns exemplos de aços rápidos das classes M e T, com a respetiva composição química.

Composição dos Aços Rápidos - Classes M e T									
Designação	Composição [%]								
AISI	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	W	V	Co
<b>Aços rápidos Molibdénio</b>									
M1	0,78-0,88	0,15-0,40	0,20-0,50	3,50-4,00	0,30 máx	8,20-9,20	1,40-2,10	1,00-1,35	...
M2	0,78-1,05	0,15-0,40	0,20-0,45	3,75-4,50	0,30 máx	4,50-5,50	5,50-6,75	1,75-2,20	...
M4	1,25-1,40	0,15-0,40	0,20-0,45	3,75-4,75	0,30 máx	4,25-5,50	5,25-6,50	3,75-4,50	...
M35	0,82-0,88	0,15-0,40	0,20-0,45	3,75-4,50	0,30 máx	4,50-5,50	5,50-6,75	1,75-2,20	4,50-5,50
M42	1,05-1,15	0,15-0,40	0,15-0,65	3,50-4,25	0,30 máx	9,00-10	1,15-1,85	0,95-1,35	7,75-8,75
M62	1,25-1,35	0,15-0,40	0,15-0,40	3,50-4,00	0,30 máx	10,00-11	5,75-6,50	1,80-2,10	...
<b>Aços rápidos Tungsténio</b>									
T1	0,65-0,80	0,10-0,40	0,20-0,40	3,75-4,50	0,30 máx	...	17,2-18,7	0,90-1,30	...
T15	1,50-1,60	0,10-0,40	0,15-0,40	3,75-5,00	0,30 máx	1,00 máx	11,75-13	4,50-5,25	4,75-5,25

**Tabela 2.1.** Composição química para vários de aços rápidos das classes T e M (CIMA, 2022)

Os aços rápidos, tal como referido anteriormente, são materiais que possibilitam a utilização de velocidades de corte elevadas, pois apresentam boa tenacidade e elevada dureza, mesmo a temperaturas na gama 550-600°C. Contudo, quando comparados com outros tipos de materiais, que irão ser apresentados mais à frente, estes estão nitidamente abaixo, no que diz respeito aos valores de dureza.

### 2.1.1.2. Carbonetos Sinterizados

Os carbonetos sinterizados vulgarmente designados por “metal duro”, são obtidos a partir de carbonetos de metais refratários, tais como o tungsténio, o molibdénio, o titânio, o nióbio, o tântalo ou o crómio. Mais concretamente, os metais duros são compostos por duas fases: a fase dura e frágil, formada por carbonetos (WC, TiC, TiCN), e a fase ligante (Co, Ni, Fe). Ambas as fases podem ser modificadas com o objetivo de obter ferramentas com as propriedades finais desejadas. A quantidade de ligante está diretamente relacionada com as

propriedades das ferramentas de corte, ou seja, quanto maior a quantidade de ligante menor a dureza das ferramentas e maior a resistência à fratura (Torres & Schaeffer, 2009).

As ferramentas em metal duro, são as mais usadas na indústria, devido às combinações de dureza a frio e a quente, resistência ao desgaste e tenacidade, possíveis de obter pela variação da sua composição química.

Segundo a ISO (*International Organization for Standardization*), os carbonetos sinterizados ou metal duro dividem-se em três grandes grupos, tal como se descreve de seguida e se mostra na Figura 2.3:

- **Grupo P:** adequados à maquinagem de metais e ligas ferrosas que apresentam aparas contínuas e dúcteis;
- **Grupo M:** grupo de transição, adequa-se à maquinagem de metais e ligas ferrosas que apresentam aparas contínuas ou descontínuas;
- **Grupo K:** adequados à maquinagem de metais e ligas ferrosas que apresentam aparas fragmentadas e inclusões não metálicas na constituição da liga.

Para além destes grupos, existe ainda o grupo dos **carbonetos sinterizados revestidos**, que consistem num substrato com a tenacidade, adequada à aplicação pretendida, em geral à base de WC (carboneto de Tungsténio) e Co (Cobalto), desta forma é possível a obtenção de uma ferramenta com matriz de metal duro, tenaz o suficiente para resistir a pequenas vibrações sem colapsar, e por outro lado obter um revestimento bastante resistente ao desgaste, a temperaturas elevadas e acima de tudo à corrosão (DINIZ et al., 2008) .

O revestimento das ferramentas produzidas com carbonetos sinterizados têm assumido cada vez maior importância, pois permite garantir um desempenho superior das ferramentas de corte, quando comparado com o desempenho das ferramentas não revestidas. As ferramentas de corte revestidas representam atualmente cerca de 80 a 90% de todas as ferramentas de corte (Sandvik, 2022).

Grupo de Maquinagem	Sub-Grupo de Maquinagem	Propriedades		Grupo de Maquinagem	Sub-Grupo de Maquinagem	Propriedades		Grupo de Maquinagem	Sub-Grupo de Maquinagem	Propriedades	
		Tenacidade	Resistência ao desgaste			Tenacidade	Resistência ao desgaste			Tenacidade	Resistência ao desgaste
<b>M</b>	M10	-	+	<b>P</b>	P10	-	+	<b>K</b>	K10	-	+
	M20	↕	↕		P20	↕	↕		K20	↕	↕
	M30	↕	↕		P30	↕	↕		K30	↕	↕
	M40	↕	↕		P40	↕	↕		K40	↕	↕
	M40	+	-		P50	+	-		K40	+	-

Figura 2.3. Classificação das ferramentas de metal duro segundo a norma ISO (Doccity, 2011)

### 2.1.1.3. Cermets

Cermets são materiais compósitos que combinam as propriedades atrativas dos cerâmicos (cer), como a resistência elevada a altas temperaturas, e as dos metais (met), como a capacidade de se deformar plasticamente. Este grupo de materiais é constituído por TiC, TiN e, geralmente, Ni como elemento de ligação. Podem apresentar também na sua constituição outros elementos, tais como Al, Co, Mo, ou compostos, tais como Mo<sub>2</sub>C, TaC, NbC, WC, AlN, TaN, entre outros. Tal como se mostra na Figura 2.1, as propriedades dos Cermets estão num domínio intermédio entre as dos metais duros e dos cerâmicos (Coelho & Silva, 2018).

As ferramentas construídas neste tipo de material são maioritariamente aplicadas em operações de acabamento de peças em aço, com velocidades de corte elevadas e avanços reduzidos. Tem como principais características a dureza elevada a altas temperaturas e a grande estabilidade química, com pouca tendência à ocorrência de fenómenos de difusão, entre a ferramenta de corte e a peça. A difusão constitui um mecanismo causador de desgaste que é agravado pelo aumento da temperatura (Sandvik, 2022).

### 2.1.1.4. Cerâmicos

Os cerâmicos são utilizados na fabricação de ferramentas de maquinagem desde os anos 50, porém, só a partir da década de 80, é que um volume considerável destas

ferramentas passou a fazer parte da rotina das empresas de maquinagem, com o desenvolvimento de novas ligas e tecnologias (*Macea-Cerâmicas Técnicas, 2022*).

Os cerâmicos são materiais refratários, capazes de suportar altas temperaturas sem perder resistência mecânica, possuem elevada resistência ao desgaste, assim como elevada dureza, características estas que os tornam adequados a ser utilizados em operações de maquinagem. Adicionalmente, os cerâmicos apresentam também baixa condutividade térmica, boa estabilidade química e térmica, e ainda, elevada resistência à compressão e reduzida resistência à tração, sofrendo rotura para níveis de carga reduzidos (Coelho & Silva, 2018).

#### 2.1.1.5. Ultraduros

Os materiais ultraduros são caracterizados, tal como o nome indica, por durezas extremamente elevadas (superiores a 3000 HV), resultantes das fortes ligações covalentes características das suas estruturas e da simetria da sua rede cristalina (*Metalopédia, 2022*).

Este tipo de material é utilizado na fabricação de ferramentas de corte quando se requer “super-acabamento” dos componentes maquinados (CLARK & SEM, 1998).

Os materiais ultraduros mais significativos são o Nitreto Cúbico de Boro Policristalino (PCBN). e o Diamante Sintético Policristalino (PCD). Tanto o PCD (Figura 2.4), como o PCBN, podem ser encontrados sob a forma de camadas muito espessas, com 0,5 a 1,0 mm de espessura, sinterizadas sobre placas de metal duro, cortadas e brasadas, geralmente em insertos, também de metal duro, ou então, mais raramente, usadas como insertos inteiros.



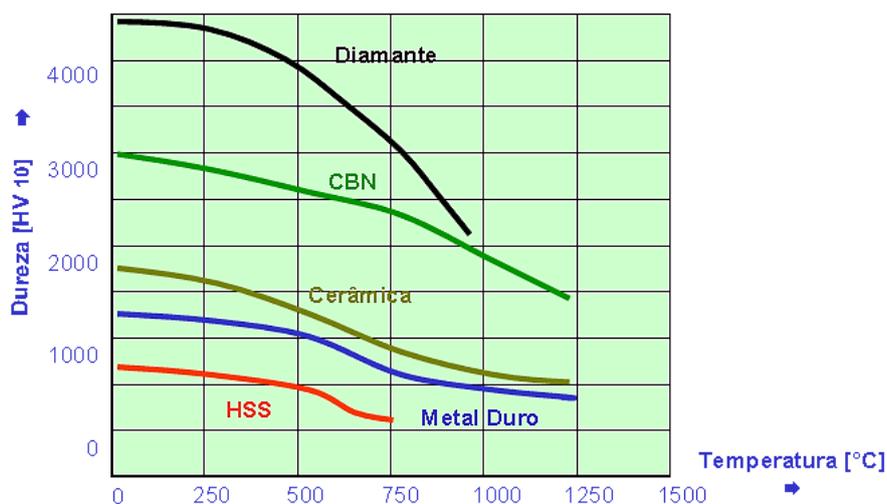
**Figura 2.4.** Fresas De Topo De PCD De Longa Duração (*WAT Tool, 2022*)

O desenvolvimento do processo de obtenção do diamante e do CBN, a alta temperatura e pressão, permite já a produção de monocristais sintéticos com dimensões da ordem de 8 mm. Assim, é possível encontrar no mercado ferramentas constituídas por monocristais de diamante, com arestas de 8 mm de comprimento e 2 mm de espessura.

Este produto sintético tem a vantagem de possuir consistência no tamanho, forma e performance, não encontradas nos diamantes naturais (Coelho & Silva, 2018)

As ferramentas policristalinas de diamante e de CBN (PCD e PCBN, respetivamente) são obtidas através de metalurgia do pó. A tenacidade destes materiais policristalinos, PCD e PCBN, é bem superior à dos monocristais e, portanto, o seu campo de aplicação é maior, apesar da maior dureza e resistência ao desgaste dos monocristais. A tenacidade dos policristais pode ainda ser aumentada, aumentando o tamanho de grão, pois, inversamente ao que acontece com os metais duros, nos policristais, a resistência ao desgaste cresce com o aumento do tamanho de grão (CLARK & SEM, 1998). Sendo assim, apenas quando se exige maior integridade e precisão da aresta, como no caso de maquinagem de “super-acabamento”, é que os materiais monocristalinos se tornam preferíveis para a fabricação de ferramentas de corte.

A título ilustrativo, na Figura 2.5 mostra-se a evolução da dureza, com o aumento da temperatura, para todos os materiais descritos nesta secção do texto.



**Figura 2.5.** Representação da evolução da Dureza em função da temperatura em matérias usados em ferramentas de corte (Gabaldo & Prado, 2010)

## **2.1.2. Falhas e Desgaste das Ferramentas**

As ferramentas de corte são solicitadas térmica e mecanicamente durante as operações de maquinagem. Devido à severidade das solicitações a que estão sujeitas, uma série de avarias e desgastes, de naturezas distintas, podem ocorrer nas ferramentas de corte, ao longo da sua utilização, que podem obrigar a reparações (afiamento) ou mesmo à inutilização e substituição das mesmas (Kratochvil, 2004).

Os produtos maquinados têm características muito específicas, tais como requisitos de acabamento superficial e precisão dimensional que devem obedecer a tolerâncias pré-estabelecidas. Estes requisitos devem ser alcançados, sem prejuízo da produtividade, aliada a um baixo custo, os quais são condicionados pelos fenómenos de ruína das ferramentas durante o processo de maquinagem (Coelho & Silva, 2018).

O estudo desses fenómenos pode levar a um maior controlo do desgaste das ferramentas, assim como à prevenção de avarias, as quais podem exigir a substituição imediata da ferramenta.

### **2.1.2.1. Falhas**

As formas mais comuns de falhas das ferramentas de corte são a deformação plástica da aresta de corte, o lascamento, as fissuras térmicas e mecânicas, e ainda, a quebra da ponta ou aresta de corte. Em alguma literatura, a formação de apara aderente é também catalogada como avaria.

#### **2.1.2.1.1. Deformação Plástica**

Ocorre quando o material da ferramenta perde resistência, devido às altas temperaturas desenvolvidas durante o processo de corte, e deforma plasticamente, tal como se exemplifica na Figura 2.6. As avarias por deformação plástica, apesar de serem mais comuns em ferramentas com baixa resistência mecânica e elevada tenacidade, podem ocorrer em quase todos os tipos de materiais, incluindo os metais duros e Cermets. Contudo, para estes

materiais, apenas sob temperaturas e esforços bem superiores aos necessários para desencadear este fenómeno nas ferramentas de aço rápido, por exemplo (Sandvik, 2022).

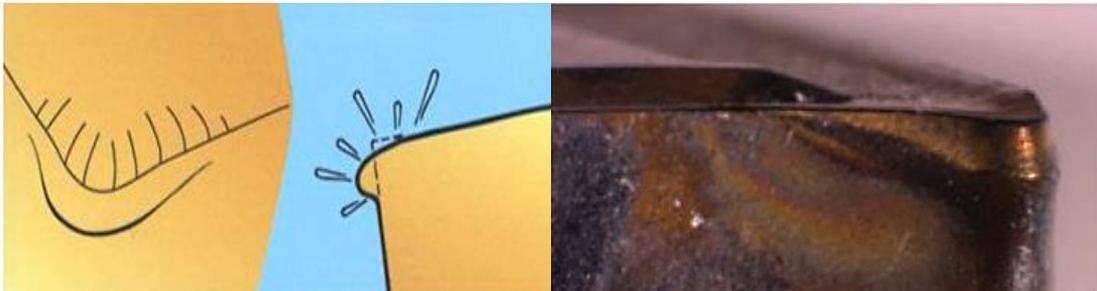


Figura 2.6. Exemplos de deformação plástica (Vasques, 2015)

#### 2.1.2.1.2. Fissuras

Em operações de corte interrompido, o gume da ferramenta é submetido a cargas térmicas e mecânicas cíclicas. Estas solicitações cíclicas, em conjunto com as tensões de tração residuais induzidas na superfície de ferramenta pelos ciclos de aquecimento-arrefecimento, podem levar ao surgimento de fissuras transversais e longitudinais ao gume, tais como as que se mostram na Figura 2.7. Este tipo de avaria, bastante frequente em ferramentas de metal duro, ocorre preferencialmente em ferramentas produzidas em materiais com tenacidade reduzida. Se as fissuras se formarem em grande número, podem causar a fratura de pequenas porções da aresta de corte.(Sandvik, 2022).

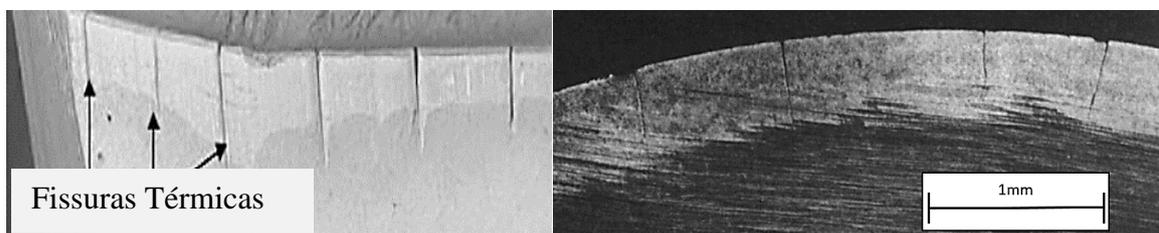
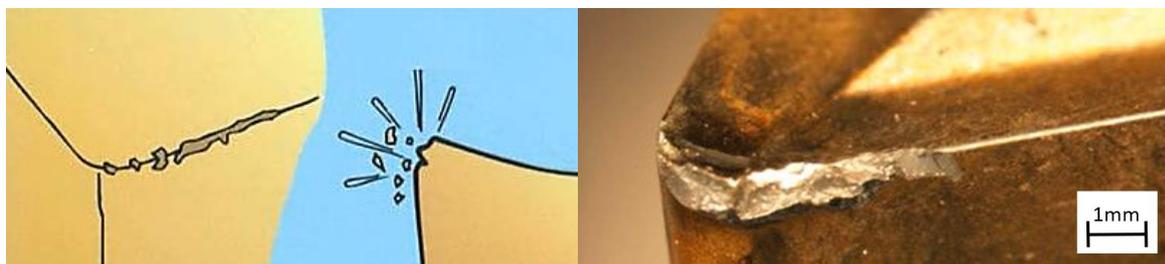


Figura 2.7. Fissuras de origem térmica, transversais na direção normal à aresta de corte (Machado et al., 2009)

### **2.1.2.1.3. Lascamento**

O lascamento é uma falha acidental ou prematura, que resulta da quebra de pequenos fragmentos do gume da ferramenta durante a operação de corte, tal como se exemplifica na Figura 2.8. Pode ser causado quando o limite de resistência do material da ferramenta é excedido em áreas localizadas devido a vibrações, devido a variações microestruturais na peça ou devido à quebra do gume postiço (apara aderente na aresta de corte), em casos extremos, o fenómeno de lascamento pode progredir rapidamente causando o colapso total da ferramenta (Sandvik, 2022). Por vezes, o simples facto de o ângulo do canto da ferramenta ser muito pequeno, pode desencadear o lascamento.

Para prevenir o lascamento da ferramenta são tidas em conta algumas variáveis importantes, como por exemplo, a dureza e a tenacidade do material no qual é fabricada a ferramenta, a geometria da aresta de corte, ou os parâmetros de corte.



**Figura 2.8.** Lascamento aresta de corte (Vasques, 2015)

### **2.1.2.1.4. Apara Aderente**

Durante o processo de corte, em resultado do contacto entre a peça e a ferramenta, podem ocorrer três tipos de reações: adesão, difusão e abrasão.

Para determinadas condições de corte e, principalmente, na maquinagem de materiais dúcteis, a aparta formada durante o corte pode ficar retida em camadas sucessivas, na face de ataque da ferramenta (mecanismo de adesão) e, posteriormente, endurecer por deformação plástica. Esta porção de material “soldado” à ferramenta, que se mostra na Figura 2.9, é designado por aparta aderente.

À medida que o processo de corte se desenrola, a dimensão da apara aderente aumenta, até se dar a sua separação da ferramenta. Esta separação é seguida da formação de uma nova apara aderente, num processo cíclico e autodestrutivo, uma vez que cada porção de apara que se separa, leva consigo pequenos fragmentos da ferramenta, contribuindo para a degradação progressiva da mesma (Vasques, 2015).

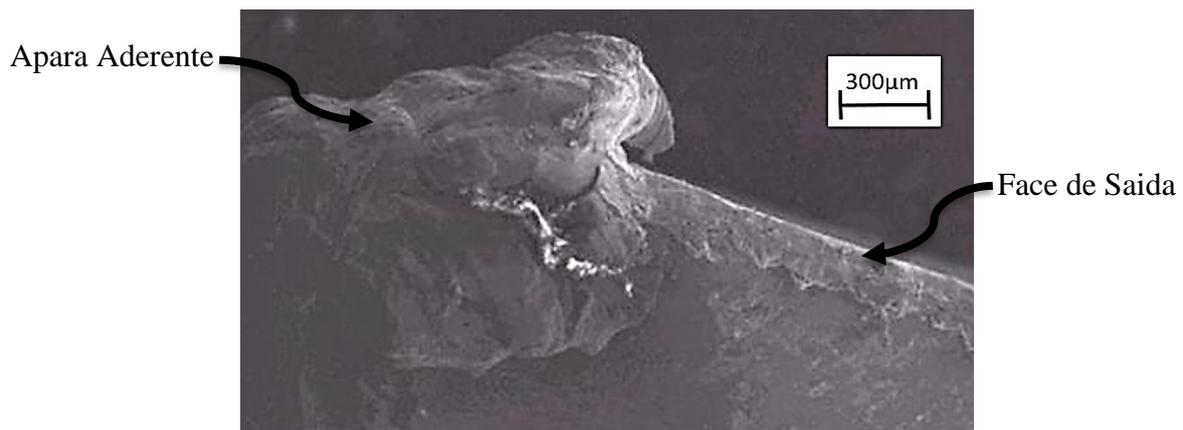
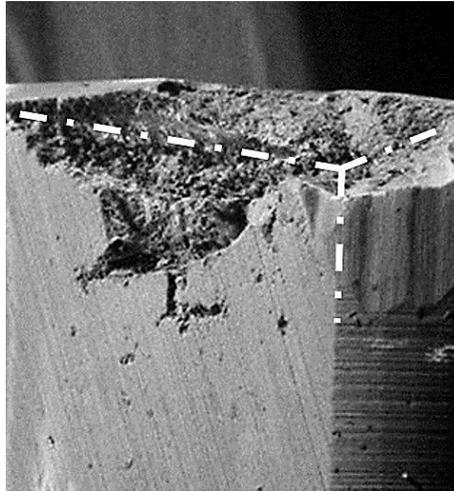


Figura 2.9. Apara aderente em micro maquinação (Vasques, 2015)

#### **2.1.2.1.5. Fratura**

A quebra da aresta de corte pode ocorrer para qualquer material de ferramenta, independentemente da sua tenacidade. Tem como origem a formação de fissuras, já referida anteriormente, e pode implicar a perda completa da aresta de corte, tal como se mostra na Figura 2.10.

A quebra da aresta de corte pode ser agravada pelo uso de material ferramenta demasiado frágil, pela paragem instantânea do movimento de corte ou pela utilização de uma ferramenta com raio de ponta pequeno, entre outros fatores (Vasques, 2015).



**Figura 2.10.** Quebra completa da aresta de corte (Vasques, 2015)

No **Anexo 1** disponibiliza-se um resumo com ilustrações das diferentes falhas, das suas possíveis causas e implicações, para diferentes processos de fresagem.

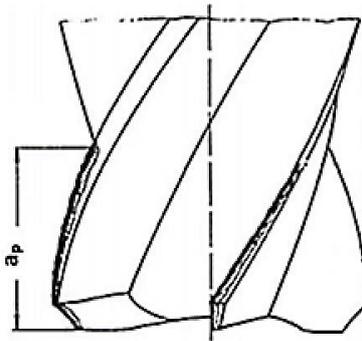
#### **2.1.2.2. Tipos de Desgaste**

De um modo geral, todas as ferramentas de corte sofrem desgaste durante a maquinagem, fenómeno este que condiciona a sua vida útil. Os mecanismos de desgaste podem ser de diversos tipos, usualmente identificados como desgaste de flanco, de cratera e de entalhe (Sandvik, 2022).

##### **2.1.2.2.1. Desgaste de Flanco**

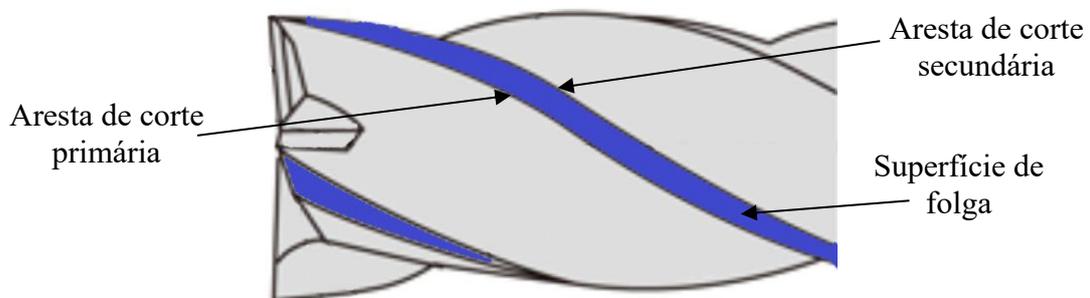
O desgaste de flanco, exemplificado na Figura 2.11, ocorre nas superfícies de folga da ferramenta, ou seja, nas superfícies que não estão em contacto direto com a peça, mas sim com alguma da aparas proveniente da maquinagem, uma vez que o material é cortado na sua generalidade pela aresta de corte primária e o restante pela aresta de corte secundária. Estas superfícies, situam-se entre a aresta de corte primária/principal e a aresta de corte secundária, tal como mostra a Figura 2.12, podendo atingir uma delas ou ambas. Quando atinge a aresta de corte principal, resulta num aumento das temperaturas e das forças de corte, podendo

causar vibrações, tanto na ferramenta, como na peça. Quando atinge a aresta de corte secundária, da qual dependem o controlo dimensional e a qualidade do acabamento superficial da peça, um desgaste excessivo resulta em peças com má qualidade superficial e tolerâncias dimensionais incorretas (Amorim, 2002).



**Figura 2.11.** Representação desgaste de flanco em fresa de topo maciça (ISO 8688-2, 1989)

O desgaste de flanco, em condições normais de maquinagem, é o tipo de desgaste que apresenta maior risco de danos para a peça, uma vez que quando este se verifica, dá-se um aumento da potência de corte necessário para maquinar. Devido ao facto de constituir o maior risco de danos para a peça, o desgaste de flanco é por norma o mais usado na determinação de critérios de fim de vida da ferramenta. É habitualmente caracterizado pelo desgaste de flanco máximo ( $VB_{Máx}$ ), e, por vezes, pelo desgaste de flanco médio ( $VB_{Méd}$ ), que, tal como os nomes indicam, representam o valor máximo e médio de desgaste de flanco (ISO 8688-2, 1989).



**Figura 2.12.** Representação aresta e superfície de folga em fresa de topo maciça (Mitsubishi Materials, 2014)

### 2.1.2.2.2. Desgaste de Cratera

O desgaste de cratera é causado pelo atrito entre a ferramenta e a aparta, ocorrendo na superfície de saída da ferramenta. Este tipo de desgaste em condições normais, não condiciona a rugosidade ou as tolerâncias das peças, mas influencia o ângulo de saída da ferramenta e o comprimento de contacto aparta-peça. Uma vez que o desgaste está associado às elevadas temperaturas geradas na interface aparta-ferramenta, ocorrendo devido à combinação de mecanismos denominados de difusão e adesão, a profundidade e a largura da cratera formada estão relacionadas com a velocidade de corte e com o avanço utilizados durante o processo de corte, (FERRARESI, 1997). Contudo, a Figura 2.13, mostra que, inicialmente, o desgaste de cratera é isolado (a), de seguida pode passar a coincidir com a aresta de corte (b), tornando-se bastante mais preocupante, e desta forma resultando num acabamento superficial deficiente. (DINIZ et al., 2008).

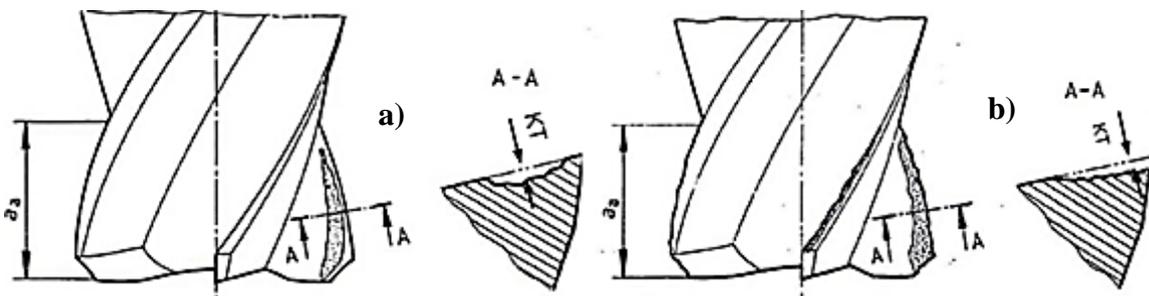
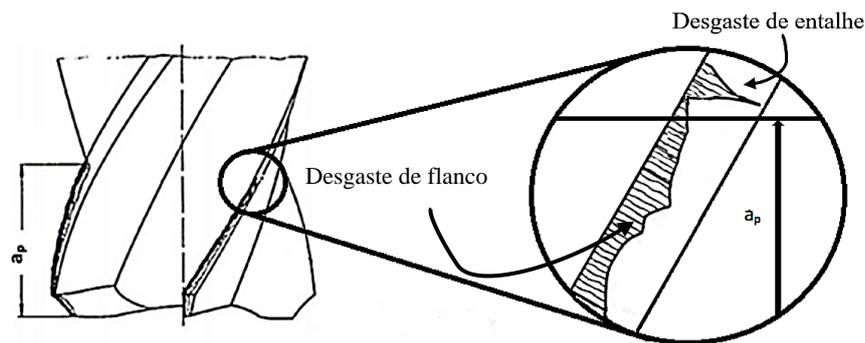


Figura 2.13. Representação da evolução do desgaste de cratera em fresa de topo maciça (ISO 8688-2, 1989)

### 2.1.2.2.3. Desgaste de Entalhe

O desgaste de entalhe surge na extremidade da região de contacto da aparta com a ferramenta, sendo causado pelo atrito na lateral da aparta. Ocorre entre a superfície de folga da peça e da ferramenta e na face de saída e no flanco da ferramenta. Geralmente acontece na maquinagem de materiais resistentes a altas temperaturas, como por exemplo aços inoxidáveis Austeníticos e Duplex. Tal como se mostra na Figura 2.14, o desgaste de entalhe ocorre já fora da zona de maquinagem, definida pela profundidade de corte  $a_p$ .



**Figura 2.14.** Representação do desgaste de entalhe em fresa de topo maciça (ISO 8688-2, 1989)

No **Anexo 2**, estão reunidas as causas, as possíveis soluções e as implicações que cada tipo de desgaste pode acarretar.

### **2.1.3. Mecanismos Causadores de Desgaste**

Durante o processo de maquinagem, as ferramentas de corte sofrem sempre algum tipo de alteração na sua geometria, independente da sua dureza ou resistência ao desgaste. Estas alterações estão normalmente relacionadas com um, ou mais, dos mecanismos de desgaste, passíveis de ocorrerem nos processos de maquinagem. São eles: abrasão, adesão, difusão e oxidação.

#### **2.1.3.1. Abrasão**

O mecanismo de desgaste por abrasão envolve a perda de material em virtude da criação de pequenos sulcos ou cortes, causados pela ação conjugada de partículas de elevada dureza e da temperatura de corte, a qual reduz a dureza da ferramenta. Assim, quanto maior a dureza da ferramenta a quente, maior a sua resistência ao desgaste por abrasão. As partículas de elevada dureza, normalmente, carbonetos e carbonitretos, podem fazer parte da constituição do material a maquinar, ou mais frequentemente, fazer parte da composição da própria ferramenta, sendo arrancadas através do mecanismo de desgaste por adesão, por exemplo (Amorim, 2002).

### 2.1.3.2. Adesão

Para que o mecanismo de desgaste por adesão ocorra é necessário que haja afinidade química entre o material da peça e o material da ferramenta. Além disso, a temperatura, o tempo e a pressão de contacto, na interface ferramenta-peça, devem ser elevados, contribuindo de forma acentuada para a perda de material de ferramenta por arrasto com a avara.

Para materiais que apresentam encruamento acentuado, a adesão leva à formação do gume postiço, que acontece quando a avara aderente se acumula na aresta de corte e altera as condições com que a ferramenta vai maquinar. Por norma, no caso das fresas de topo, dá-se um aumento do diâmetro de corte da ferramenta, que influencia negativamente a qualidade superficial e as tolerâncias dimensionais da peça maquinada, como pretende demonstrar a Figura 2.15 (Amorim, 2002).

Este mecanismo de desgaste pode ser minimizado pelo uso de fluídos de corte adequados (principalmente com efeito lubrificante) e/ou pelo uso de materiais de ferramenta com baixo coeficiente de atrito. Uma vez que o processo de perda de material através do mecanismo de adesão se desenrola ao nível microestrutural, é vantajoso usar ferramentas com grão refinado (Machado et al., 2009).



**Figura 2.15.** Representação formação gume postiço em ferramenta de corte (Klocke, 2011)

### **2.1.3.3. Difusão**

O mecanismo de desgaste que envolve a transferência de átomos de um material para outro tem o nome de difusão. Este mecanismo atua tanto na superfície de saída, como na superfície de folga. O aumento da velocidade de corte e do avanço promovem o aumento da taxa de desgaste.

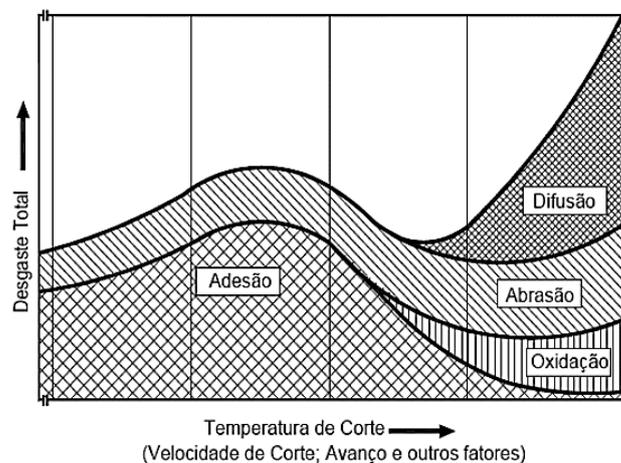
A difusão é responsável, principalmente, pelo desgaste de cratera. Com efeito, quando são utilizadas velocidades de corte elevadas (Trent & Wright, 2000), é na superfície de saída da ferramenta onde se reúnem as condições necessárias para a difusão, isto é, temperaturas suficientemente elevadas, assim como tempos de contacto apara-ferramenta longos. Estas condições são reunidas devido à velocidade de saída da apara ser nula na zona de aderência.

Tal como apontado anteriormente, o desgaste por difusão é extremamente dependente da temperatura, da solubilidade dos elementos envolvidos e do tempo de contacto. Desta forma, uma vez que nos processos de maquinagem, as velocidades relativas ferramenta-peça e ferramenta-apara são normalmente elevadas, e os tempos de contacto são muito reduzidos, a difusão, como mecanismo de desgaste, é, usualmente desprezável.

### **2.1.3.4. Oxidação**

Na maioria dos metais, as altas temperaturas e a presença de ar e água, nos fluidos de corte, geram oxidação. O tungsténio e o cobalto, durante o corte, formam pequenas camadas de óxidos porosos, sobre a ferramenta, que são facilmente removidos devido ao atrito com o material a cortar, gerando desgaste. O desgaste gerado pela oxidação forma-se essencialmente nas extremidades da região de contacto apara-ferramenta, usualmente em contacto com o ar, constituindo uma das mais plausíveis explicações para o surgimento do desgaste de entalhe.

A análise da Figura 2.16 permite concluir que para temperaturas de corte reduzidas apenas ocorre abrasão e adesão, sendo que este último mecanismo de desgaste está presente de forma bastante mais acentuada. Para temperaturas de corte mais elevadas, os mecanismos de difusão e oxidação tornam-se predominantes, sendo a influência da adesão sobre o desgaste reduzida de forma drástica. É ainda de destacar também que o desgaste total da ferramenta aumenta muito com o aumento da temperatura de corte (Machado et al., 2009).

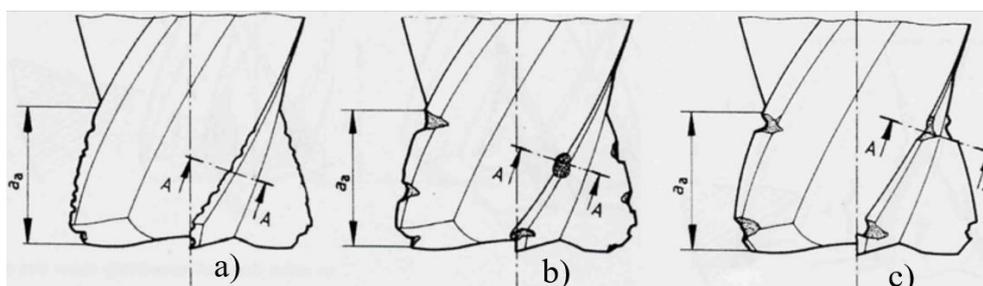


**Figura 2.16.** Mecanismos de desgaste das ferramentas em função da temperatura de corte (Klocke, 2011)

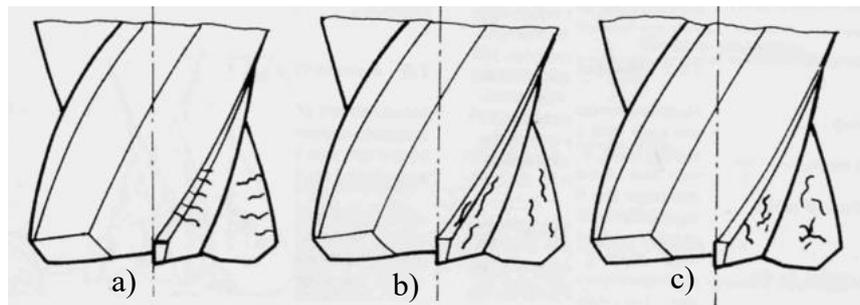
### 2.1.4. Medição dos Desgastes

A Norma ISO 8688 (1989) sugere analisar todos os fenômenos de desgastes passíveis de terem contribuído para a ruína da ferramenta e, adotar como critério de vida, aquele que for considerado o mais influente. Assim, é necessário determinar um critério de vida para as ferramentas de corte e, seguidamente, analisar a influência dos parâmetros de maquinagem no mecanismo de dano identificado.

Tal como já referido anteriormente, nas fresas de topo podem existir 3 tipos de desgaste: desgaste de flanco, de cratera, e de entalhe. Além destes tipos de desgaste, a norma considera ainda as avarias por lascamento, exemplificadas na Figura 2.17, e as fissuras, exemplificadas na Figura 2.18, sendo  $a_a$  o mesmo que  $a_p$ , profundidade de corte.

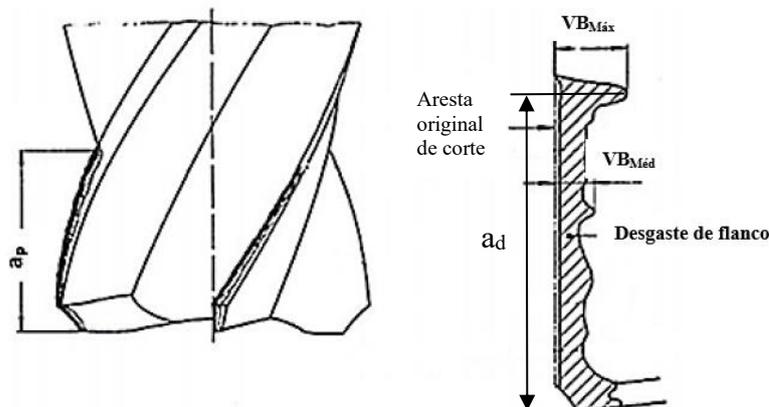


**Figura 2.17.** Diferentes tipos de Lascamento em fresas de topo, a) Lascamento Uniforme, b) Lascamento Não-Uniforme, c) Lascamento Localizado, (ISO 8688-2, 1989)



**Figura 2.18.** Diferentes Tipos de fissuras em fresas de topo, a) Fissuras Perpendiculares, b) Fissuras Paralelas, c) Fissuras Irregulares (ISO 8688-2, 1989)

De acordo com a norma, aquando da medição do desgaste, devem ser tidos cuidados e considerações específicos. A medição do Desgaste de Flanco (VB), por exemplo, deve ser realizada paralelamente à superfície de desgaste, numa direção perpendicular à aresta de corte original, tal como se mostra na Figura 2.19 (ISO 8688-2, 1989).



**Figura 2.19.** Medição Desgaste de Flanco em fresas de topo (ISO 8688-2, 1989)

Embora o desgaste de flanco, por norma, apresente dimensão uniforme, poderá haver variações do seu valor noutras partes do flanco, dependendo do perfil da ferramenta e do lascamento existente. Os valores obtidos nas medições do desgaste de flanco devem, portanto, ser relacionados com a posição ao longo das arestas de corte ou área em que a medição é feita (profundidade de defeito ( $a_d$ )) (ISO 8688-2, 1989).

A norma ISO 8688-2 define também que o valor do desgaste de flanco correspondente ao fim de vida das ferramentas é de 0,3 mm, quando o desgaste é uniforme. Este valor de desgaste é representado por  $VB_{Méd}$ , sendo avaliado como a média dos valores de desgaste

determinados para as diferentes arestas. Ou então, quando o desgaste é localizado, o valor limite, designado por  $VB_{Máx}$ , deve ser considerado, sendo este limite igual a 0,5mm para qualquer lâmina. Ou seja, caso alguma das dimensões do desgaste registadas na ferramenta ultrapasse este valor, deve assumir-se que a ferramenta chegou ao fim da sua vida útil.

O desgaste de cratera (KT1) deve ser avaliado medindo a profundidade da cratera, sendo essa medição efetuada perpendicularmente à face original da ferramenta. Como a profundidade da cratera pode variar ao longo do seu comprimento, a posição na qual foi efetuada a medição da profundidade, em relação à aresta de corte original, deve ser registada, juntamente com a posição da seção considerada para medição em relação a algum ponto de referência na face da ferramenta.

O desgaste da face (KT2) deve ser medido como a distância entre a aresta desgastada e a aresta de corte original, numa direção perpendicular à face original, tal como se mostra na Figura 2.13.

Tendo em conta os problemas que cada tipo de desgaste pode acarretar, no presente trabalho optou-se por monitorizar o tempo de vida da ferramenta, através da medição do desgaste de flanco. De acordo com a literatura, este é o tipo de desgaste que mais pode influenciar a maquinagem, devido, não só, à sua influência sobre a precisão das peças e à geração de vibrações indesejadas, mas também, devido à formação de rebarbas nas peças.

Durante o tempo de corte da ferramenta, a evolução do desgaste, e em particular, do desgaste de flanco, não é linear, como se mostra na Figura 2.20. De acordo com a figura, o desgaste de flanco inicia-se de forma rápida e, de seguida, progride de forma uniforme e mais estável, a uma taxa constante, até se iniciar uma terceira fase, durante a qual a taxa de desgaste aumenta de forma abrupta, culminando na falha total da ferramenta. O início desta terceira fase deve ser detetado e tido em consideração como critério para a troca de ferramenta. Caso o início desta fase não seja detetado, a integridade da ferramenta pode ficar comprometida de forma irreversível. Se a fase de falha total não for identificada atempadamente, a ferramenta defeituosa pode mesmo causar defeitos nas peças ou danificar a máquina de corte.

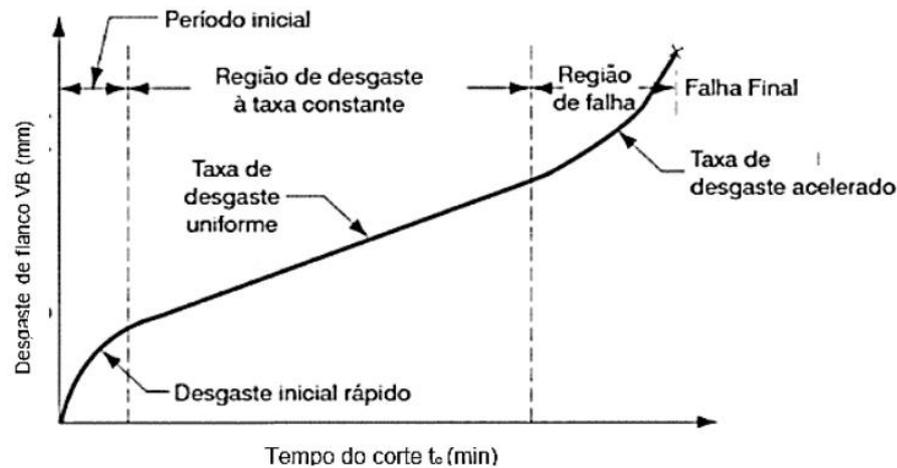


Figura 2.20. Exemplo de gráfico Desgaste de Flanco Vs Tempo de Corte (Machado et al., 2009)

## 2.2. Matéria Prima

### 2.2.1. Aço Inoxidável Austenítico

Os aços inoxidáveis são ligas metálicas bastante resistentes à corrosão e ao calor, compostas geralmente por ferro, cromo, carbono e níquel, devendo apresentar pelo menos 12% de cromo na sua composição. Este elemento, que quando entra em contacto com o oxigénio, forma uma película protetora sobre a superfície do aço, é o responsável pela resistência à corrosão deste tipo de material.

Os aços inoxidáveis podem ser divididos em cinco famílias, com base na sua estrutura cristalina/microestrutura: ferríticos, martensíticos, austeníticos, duplex e endurecíveis por precipitação. Na Figura 2.21 estão representados quatro diferentes tipos de aço inoxidável, tendo em conta as concentrações de Ni e Cr.

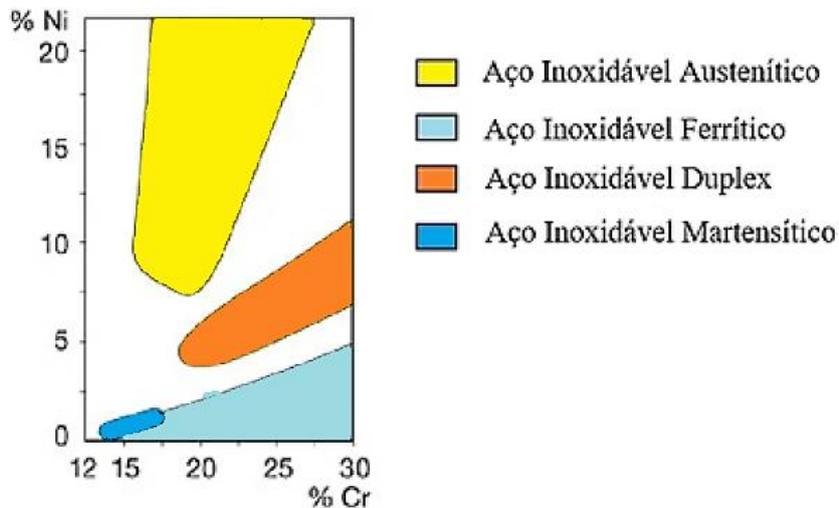


Figura 2.21. Concentrações de Ni-Cr nos diferentes grupos de Aços Inoxidáveis (Sandvik, 2022)

Os aços inoxidáveis austeníticos, em particular, apresentam resistência superior à corrosão, quando comparados com os aços ferrítico e martensítico. Para além disso, são eficazes para trabalhos a frio, são dotados de ótimas propriedades mecânicas, apresentam boa dureza, uma boa tenacidade e ainda uma excelente soldabilidade (Aço plano, 2022). Este tipo de aço é usado com frequência em elementos arquitetónicos, que precisam ser resistentes contra a oxidação e corrosão. Os aços austeníticos são encontrados também nas indústrias alimentícias, farmacêuticas, químicas, petroquímicas, aeroespaciais e de equipamentos hospitalares (Aço plano, 2022).

### 2.2.2. Índice de Maquinabilidade

Maquinabilidade é a facilidade com que um metal pode ser cortado (maquinado), permitindo a retirada do material com acabamento satisfatório e a baixo custo. Materiais com boa maquinabilidade requerem a utilização de forças de corte reduzidas, podendo ser maquinados rapidamente e sem desgaste agressivo das ferramentas (Degarmo et al., 2003).

A maquinabilidade pode ser difícil de prever, uma vez que a maquinagem envolve muitas variáveis. Desta forma, a condição do material a maquinar, ou seja, o seu estado de corrosão ou oxidação no momento de ser maquinado, assim como as propriedades físicas do

mesmo, constituem dois conjuntos de fatores que podem influenciar a maquinabilidade dos materiais (Kalpakjian & Schmid, 2003).

Os fatores que normalmente melhoram o desempenho mecânico de um material geralmente degradam a sua maquinabilidade, quer seja pela elevada dureza, que implica elevadas temperaturas e potência de corte, ou pela elevada tenacidade do material a maquirar desencadeando condições de corte propícias ao desenvolvimento do mecanismo de adesão (Cubberly et al., 1989).

A maquinabilidade é frequentemente avaliada através de testes concebidos e ajustados às necessidades de um processo específico. Os métodos comuns para aferição da maquinabilidade incluem a avaliação da vida útil da ferramenta, da qualidade do acabamento superficial, da temperatura de corte, das forças exercidas na ferramenta e do consumo de energia (Schneider, 2009).

De acordo com o *American Iron and Steel Institute* (AISI) o metal utilizado como padrão para determinar o Índice de Maquinabilidade (IM) é o aço B1112, sendo escolhido arbitrariamente, ao qual é atribuído o índice 100, quando maquirado usando uma ferramenta de *HSS* a uma velocidade de corte de 55 m/min. O índice de maquinabilidade pode ser estabelecido para diversos materiais através da determinação da vida útil novamente de uma ferramenta de *HSS* quando utilizada numa operação de maquiragem realizada com as mesmas condições de trabalho (velocidade de corte de 55 m/min), ou seja, não é possível determinar o IM usando uma ferramenta de metal duro, por exemplo (Relvas, 2007).

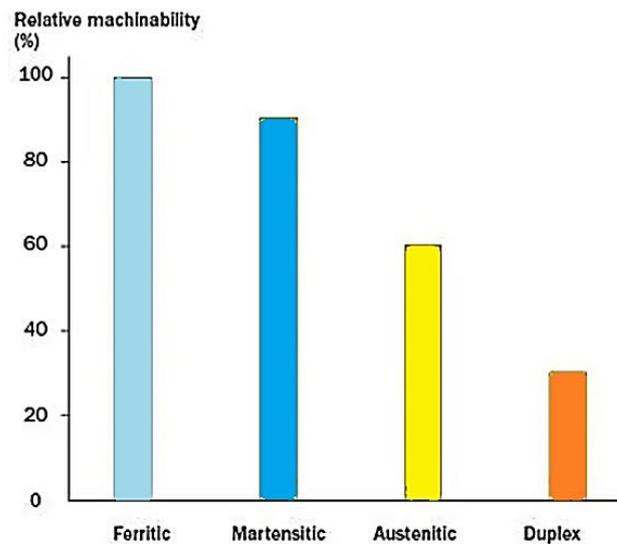
O índice de maquinabilidade é calculado pela equação (2.1), onde  $VC_{20-Material\ Ensaiado}$ , representa a velocidade de corte para uma determinada vida útil da ferramenta, neste caso, de 20 minutos, e  $VC_{20-Padrão}$ , representa a velocidade de corte do material padrão (B1112) para o mesmo tempo de vida útil da ferramenta.

$$IM = \frac{VC_{20-Material\ Ensaiado}}{VC_{20-Padrão}} \quad (2.1)$$

Os aços inoxidáveis genericamente, têm baixa maquinabilidade, em comparação com o aço carbono corrente, devido principalmente à sua baixa condutividade térmica e alta ductilidade. Estas características conduzem à formação de aparas longas e flexíveis durante o corte, as quais podem aderir à face de ataque da ferramenta, formando apara aderente. Este

fenómeno, especialmente nos aços austeníticos e duplex, é agravado devido às elevadas forças de corte, arestas postiças, temperaturas elevadas e superfícies endurecidas.

No gráfico da Figura 2.22 é comparada a maquinabilidade dos diferentes tipos de aços inoxidáveis.



**Figura 2.22.** Maquinabilidade relativa dos vários grupos de aços inoxidáveis (Sandvik, 2022)

## 3. Componente Experimental

### 3.1. Enquadramento do Trabalho Experimental

No âmbito desta dissertação foram realizados ensaios que consistiram em maquinar um bloco retangular de aço inoxidável austenítico, tal como se esquematiza na Figura 3.1. No decurso dos ensaios foram efetuadas inspeções periódicas às ferramentas de corte, a intervalos de tempo pré-definidos, de modo a aferir a progressão dos fenómenos de desgaste, em função dos parâmetros de corte. O objetivo do estudo foi a otimização da taxa de remoção de material por ferramenta e, deste modo, a maximização da produtividade do processo de maquinagem.

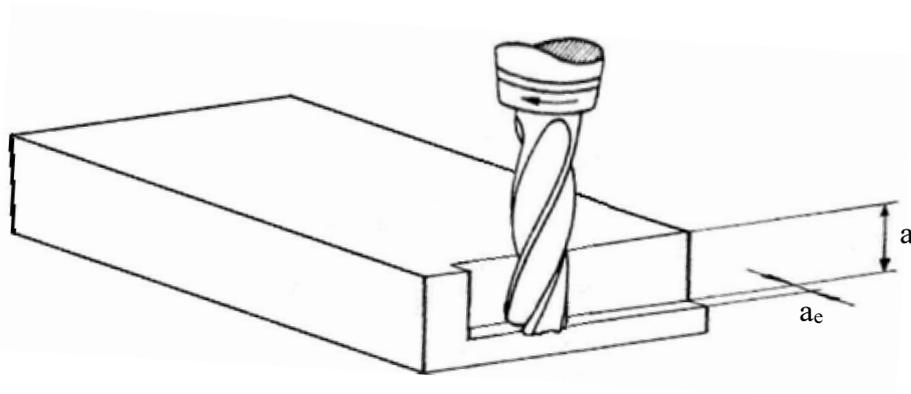


Figura 3.1. Representação fresagem de topo onde  $a_p > a_e$  (ISO 8688-2, 1989)

#### 3.1.1. Procedimento de Maquinagem

Neste item são descritos as ferramentas e equipamentos, assim como software, utilizado na realização deste trabalho.

### 3.1.1.1. Equipamento de Corte

Para a realização dos ensaios foi utilizado um centro de maquinagem da marca Mazak (Figura 3.2), modelo Nexus 5000 II, fabricado em 2006, o qual utiliza uma linguagem de programação própria desenvolvida pela marca, o Mazatrol. Este é um centro de maquinagem horizontal, de 4 eixos, com capacidade de troca de paletes, para minimizar o tempo de paragem na máquina, aquando da troca de peças. Tem um curso de 730 mm, 740mm e 730mm nos eixos X, Y e Z, respetivamente. A árvore utiliza um cone do tipo ISO 40, encaixe SK40, de acordo com norma DIN 69871. É dotado ainda de um armazém com capacidade para 40 ferramentas, um motor de 30 kW (40.2 CV), e capacidade para imprimir velocidades de rotação de 35 até 18000 rpm. Estas características fazem estes centros muito versáteis e aplicáveis a praticamente todo tipo de trabalho. Relativamente às paletes, estas possuem uma dimensão de 500 mm x 500 mm e uma capacidade de carga máxima de 700 kg (*Mazak EU, 2006*).



**Figura 3.2.** Mazak Horizontal Nexus 5000 II (*Exapro, 2021*)

### 3.1.1.2. Ferramenta de corte

A ferramenta em estudo foi uma fresa de topo da marca *Emuge Franken* (Figura 3.3). Tal como se mostra na figura, a ferramenta fabricada em metal duro, da série TiNox-Cut, para uso específico em maquinagem trocoidal, permite lubrificação interna. Sendo o material a maquinar de difícil maquinabilidade, a ferramenta é provida de um revestimento de TiAlN para maior vida útil. As dimensões da ferramenta são apresentadas na Figura 3.4. Tal como se mostra na figura, a ferramenta conta ainda com um tipo de acoplamento Weldon, 5 lâminas de corte e um ângulo de hélice variável entre 38° e 42°, (*Emuge-Franken, 2020*).



Figura 3.3. Fresa de Topo Usada Nos Ensaios (*Emuge-Franken, 2020*)

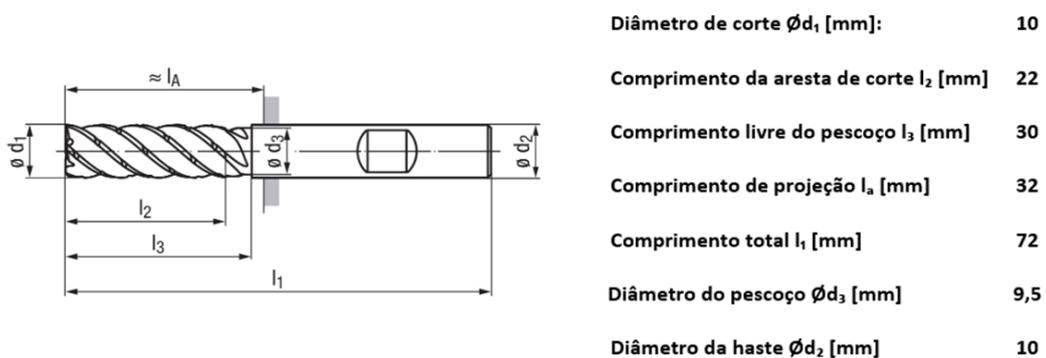


Figura 3.4. Representação Esquemática Legendada-Ferramenta de Corte (*Emuge-Franken, 2020*)

### 3.1.2. Equipamento de Inspeção

Neste projeto, para efetuar a inspeção das ferramentas, foi utilizado um microscópio de medição da marca Mitutoyo série MF que se mostra na Figura 3.5. Este equipamento tem a capacidade de observação ocular de alta ampliação, até 2000x.



**Figura 3.5.** Microscópio e acessórios usados na medição de defeitos e captura de imagem

### 3.1.3. Material

O material usado nos ensaios foi o aço inoxidável austenítico 304L. Na tabela 3.3 apresenta-se a sua composição química. O bloco de material a maquinar, que se mostra na Figura 3.6, tem dimensões de 131x60x15 (mm).

C	Si	S	P	Mn	Cr	Ni
0,03%	0,97%	0,03%	0,04%	1,70%	19,00%	10,00%

**Tabela 3.1.** Composição Química (%pd) AISI 304L (LG STEEL, 2022)



**Figura 3.6.** Bloco de material antes de ser maquinado

### 3.1.4. Software e Estratégia de Maquinagem

O sistema CAD, no qual as peças foram modeladas, foi o *SolidWorks* 2022. Depois da utilização do *SolidWorks*, foi usado como software CAM, o *hyperMILL* 2022.

A estratégia de maquinagem utilizada foi a trocoidal, conforme ilustrado na Figura 3.7.

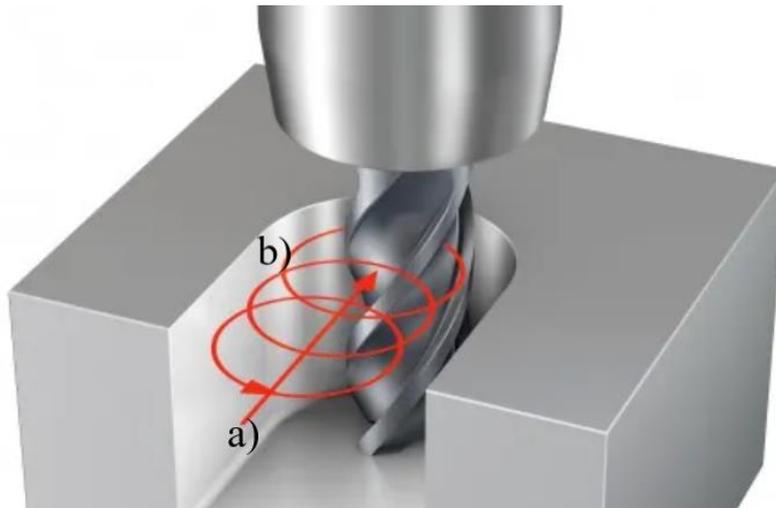


Figura 3.7. Representação maquinagem trocoidal (Sandvik, 2022)

### 3.1.5. Parâmetros de Corte

Na fresagem, assim como noutros processos de maquinagem, os parâmetros de corte têm um papel preponderante no que diz respeito à eficiência e rapidez da operação.

Os parâmetros de corte responsáveis pelo movimento da ferramenta são a velocidade de rotação ( $n$ [rpm]) e a velocidade de avanço ( $V_f$ [mm/min]). A velocidade de rotação (expressa em rpm), pode ser calculada a partir do valor da velocidade de corte ( $V_c$ [m/min]) e do diâmetro de corte ( $D_{cap}$ [mm]), utilizando a relação:

$$n = \frac{1000 * V_c}{\pi * D_{cap}} \quad (3.1)$$

A velocidade de avanço (expressa em mm/min), que caracteriza o movimento da ferramenta em relação à peça e depende do avanço por dente ( $f_z$ [mm/dente]), do número de dentes da fresa ( $Z_n$ ) e da velocidade de rotação ( $n$ ), pode ser calculada através da equação:

$$V_f = f_z * n * Z_n \quad (3.2)$$

Além das duas equações apresentadas anteriormente, temos também a equação

$$Q = \frac{a_p * a_e * V_f}{1000} \quad (3.3)$$

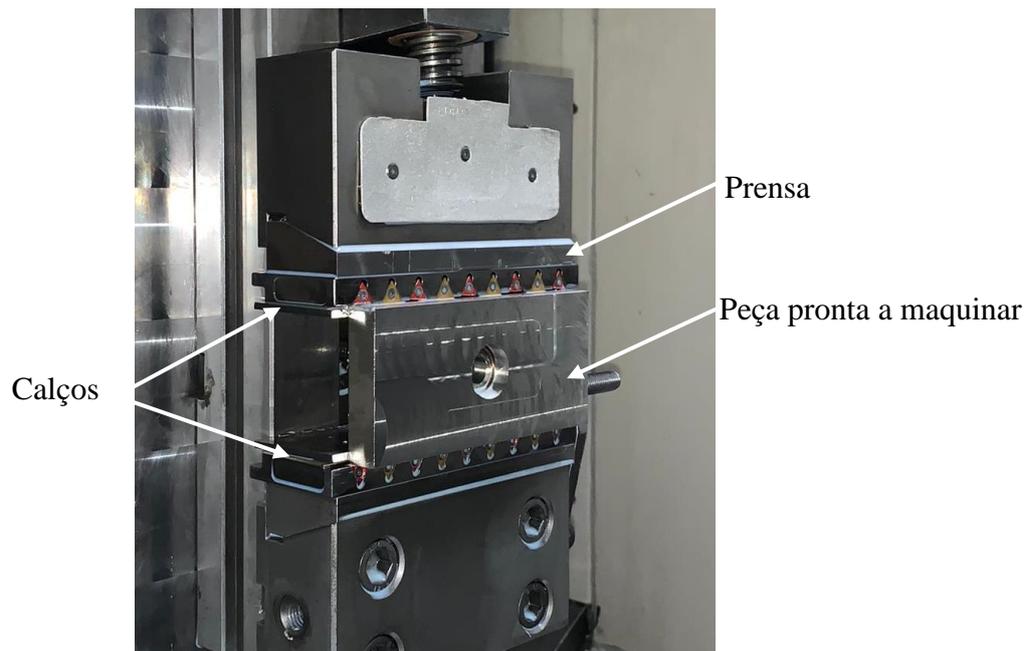
que permite calcular a taxa de remoção de material ( $Q$ ), ou seja, o volume de material removido por unidade de tempo ( $\text{cm}^3/\text{min}$ ), em função da profundidade de corte( $a_p$ ), da largura de corte( $a_e$ ) e da velocidade de avanço ( $V_f$ ). Este parâmetro é de elevada importância para o presente trabalho, uma vez que é através dele que é levado a cabo o processo de comparação do rendimento entre ferramentas. Isso foi realizado, relacionando a taxa de remoção de material com o tempo de vida útil obtido em cada ensaio, através da expressão

$$Q_f = Q * \Delta t_{obt} \quad (3.4)$$

em que  $Q_f$  representa a quantidade de material removido por ferramenta, em  $\text{cm}^3$ .

### 3.2. Metodologia de Análise

Na Figura 3.8 mostra-se o dispositivo de fixação do bloco a maquinar, o qual é constituído por uma prensa mecânica manual colocada na torre de uma das paletes da máquina, e um par de calços que permitem apertar a peça de forma segura, sempre no mesmo local.



**Figura 3.8.** Fixação do chaço na torre da máquina

Neste trabalho procedeu-se à inspeção de todas as ferramentas utilizadas com o intuito de detetar o início e a progressão dos fenómenos de desgaste e avaria. Nas medições efetuadas foram tidas em conta apenas algumas das indicações presentes na norma ISO 8688-2, uma vez que, no caso de estudo em análise, foi considerada a maquinagem de uma peça inteira e não apenas a maquinagem de uma face. É de salientar que, nos casos onde ocorreu o colapso total de ferramentas, foi colocada uma ferramenta usada para finalizar a peça, de forma a garantir que todas as fresas estão sujeitas aos mesmos esforços.

De acordo com a norma ISO 8688, a excentricidade não pode ser superior a  $50 \mu\text{m}$ . Contudo, de modo a garantir maior rigor na análise, foi assegurado que nenhuma das ferramentas foi utilizada com excentricidade superior a  $35 \mu\text{m}$ .

Segundo a norma, para a análise do problema em estudo, os parâmetros de corte a ter em conta são a velocidade de corte ( $V_c$ ) e avanço por dente ( $f_z$ ). Desta forma, estes parâmetros foram variados de forma paramétrica, tendo como referência os valores usuais utilizados pela empresa ( $V_c=204 \text{ m/min}$ ). Na Tabela 3.2 mostram-se os conjuntos de parâmetros testados no âmbito deste trabalho. Uma vez que na norma nada está explícito acerca dos valores que devem ser variados, juntamente com o supervisor da empresa estes foram arbitrados. Como se mostra na Tabela, foram testadas velocidades 10 % e 15 % abaixo do valor de referência (ensaios 1B e 1C, respetivamente). Num quarto ensaio (1D), foi ainda

testado um aumento da velocidade de rotação, em 10 %, relativamente ao valor de referência. Cada um dos ensaios foi repetido 5 vezes, sendo que os resultados apresentados nos gráficos e tabelas, no capítulo de Análise de Resultados, correspondem à média dos resultados referentes aos ensaios realizados com o mesmo conjunto de parâmetros. Com o auxílio das equações (3.1), (3.2) e (3.3) foram calculados os valores a introduzir no programa a usar, presentes na Tabela 4.1, assim como o valor da taxa de remoção de material.

Tal como já referido anteriormente, o registo foi feito em intervalos de tempo pré-definidos, desde o início até ao final do tempo de vida útil da ferramenta. O tempo arbitrado entre medições foi de 25 min de maquinagem. Inicialmente, foi feito um teste sem efetuar medições em intervalos de tempo iguais, para se perceber efetivamente qual seria o intervalo de tempo aproximado que as ferramentas iriam manter um funcionamento dentro dos requisitos. Através desse tempo obtido, dividiu-se o mesmo em intervalos que perfizessem um mínimo de 7 medições durante a vida útil, tal como é requerido pela norma ISO 8688-2, chegando então ao tempo de 25 min por intervalo. Contudo, caso seja detetado um aumento considerável do ruído aquando da maquinagem ou um aumento das vibrações provocadas, a ferramenta é retirada e analisada e é medido o seu desgaste, antes de completar o intervalo de tempo de medição de 25 minutos.

Como critério para definir o fim de vida útil das ferramentas foi usado o desgaste de flanco máximo,  $VB_{Máx}$ . É ainda de referir que todos os ensaios foram realizados com fluido refrigerante, sempre com a mesma relação água/óleo.

Inicialmente, os ensaios foram efetuados utilizando os valores de velocidade de corte e avanço por dente usados até então pela empresa. Posteriormente, estes foram alterados de acordo com os valores presentes na Tabela 3.2.

---

Ensaio	$V_c$ [m/min]	$f_z$ [mm/dente]	$a_{em\acute{a}x}$ [mm]	$a_p$ [mm]
1A	204	0,0769	0,8	9
1B	184 (-10%)	0,0769	0,8	9
1C	173 (-15%)	0,0769	0,8	9
1D	224 (+10%)	0,0769	0,8	9
1E	173 (-15%)	0,0822 (+7%)	0,8	9

**Tabela 3.2.** Parâmetros de corte utilizados nos ensaios



## 4. Resultados e Discussão

A Tabela 4.1 contém os valores dos parâmetros de corte já calculados para introduzir no programa, assim como o valor da taxa de remoção de material (Q), que será necessário para podermos comparar os diferentes resultados obtidos durante os ensaios.

Ensaio	n [rpm]	Vf [mm/min]	$a_{e\text{ máx}}$ [mm]	$a_p$ [mm]	Q [cm <sup>3</sup> /min]
1A	6500	2500	0,8	9	18
1B	5850	2249	0,8	9	16,2
1C	5525	2124	0,8	9	15,3
1D	7150	2749	0,8	9	19,8
1E	5525	2300	0,8	9	16,3

**Tabela 4.1.** Parâmetros de corte calculados e/ou introduzidos nos programas usados nos ensaios

Para o estudo do desgaste de flanco máximo das ferramentas foram realizados 5 tipos de ensaios, tal como discriminado na Tabela 3.2. Para cada um dos conjuntos de ensaios, foram realizados 5 ensaios com as mesmas variáveis. Depois de determinados os tempos de vida útil das ferramentas em cada um deles, foram calculados valores médios com base nos tempos obtidos. Os ensaios cuja vida útil da ferramenta se encontravam mais próximos desses valores médios foram selecionados para análise.

Nos ensaios 1A, foram utilizados os parâmetros padrão, utilizados usualmente pela empresa.

Na Figura 4.1 mostra-se a evolução do desgaste de flanco máximo,  $VB_{Máx}$ , em função do tempo, para as diferentes lâminas da ferramenta. De acordo com a figura, o valor para a vida útil da ferramenta neste ensaio foi de 216 min. De realçar, que este valor servirá de referência para os restantes ensaios, pois, qualquer aumento ou diminuição do tempo de vida útil, conjugado com a taxa de remoção de material, relativamente a este valor de referência,

servirá de indicador para avaliar a evolução da eficiência da maquinagem em função dos parâmetros de corte.

A evolução das curvas no gráfico representa a evolução que seria de esperar, na maioria das lâminas, segundo a literatura, para a vida útil da ferramenta em função do tempo. Ou seja, inicialmente, o desgaste evolui de forma mais acentuada, de seguida, existe um período de tempo durante o qual a taxa de desgaste é constante e uniforme, e, por fim, numa terceira fase, o desgaste apresenta uma evolução exponencial, culminando no fim do tempo de vida útil da ferramenta. Contudo, pela análise do gráfico é perceptível a existência de alguma variação do valor de  $VB_{Máx}$  entre as diferentes lâminas da ferramenta. Esta variação pode dever-se ao facto da existência de alguma excentricidade, no conjunto ferramenta-cone, ou mesmo na própria árvore da máquina. Poderá ainda estar associado ao afiamento menos aprimorado de alguma das lâminas da ferramenta que, no limite, não conseguirá “cortar” de forma tão eficaz.

Nos ensaios 1A, os parâmetros usados foram  $V_{C1A} = 204$  m/min e  $f_{z1A} = 0,0769$  mm/dente. Com base nestes valores, foi calculada uma taxa de remoção de material,  $Q_{1A}$ , de  $18 \text{ cm}^3/\text{min}$ . Os valores de  $a_{eMáx}$  e  $a_p$  usados foram de 0.8mm e 9 mm, respetivamente, sendo estes mantidos constantes ao longo de todo o trabalho realizado.

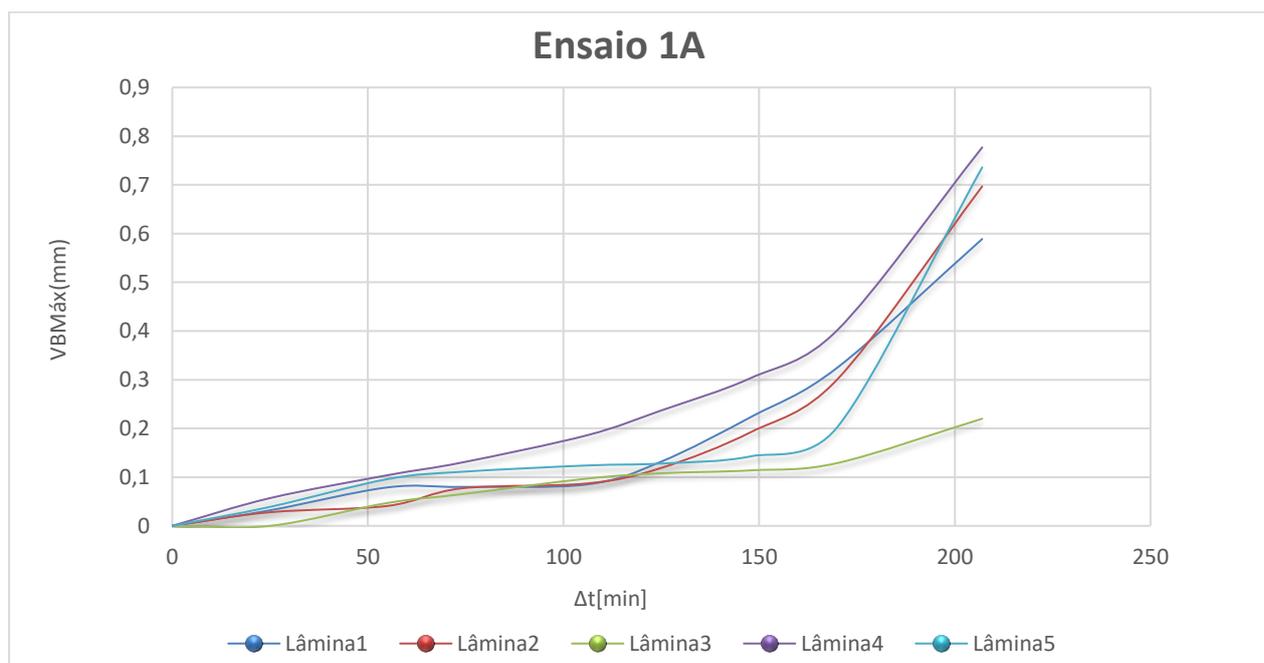
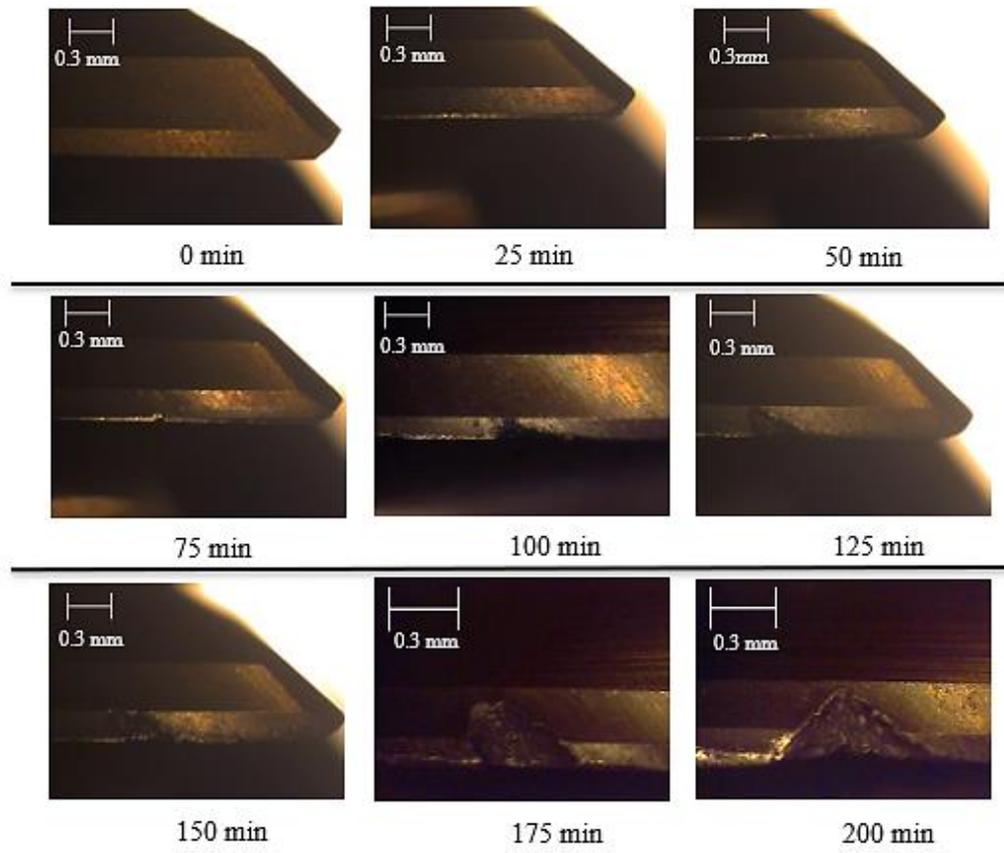


Figura 4.1. Evolução dos valores de  $VB_{Máx}$  obtidos durante os ensaios 1A

Na Figura 4.2 mostram-se imagens que ilustram a evolução da dimensão do desgaste de flanco em função do tempo. Nas imagens, é ainda perfeitamente visível que a partir de 150 min, existe um grande aumento da severidade do desgaste.



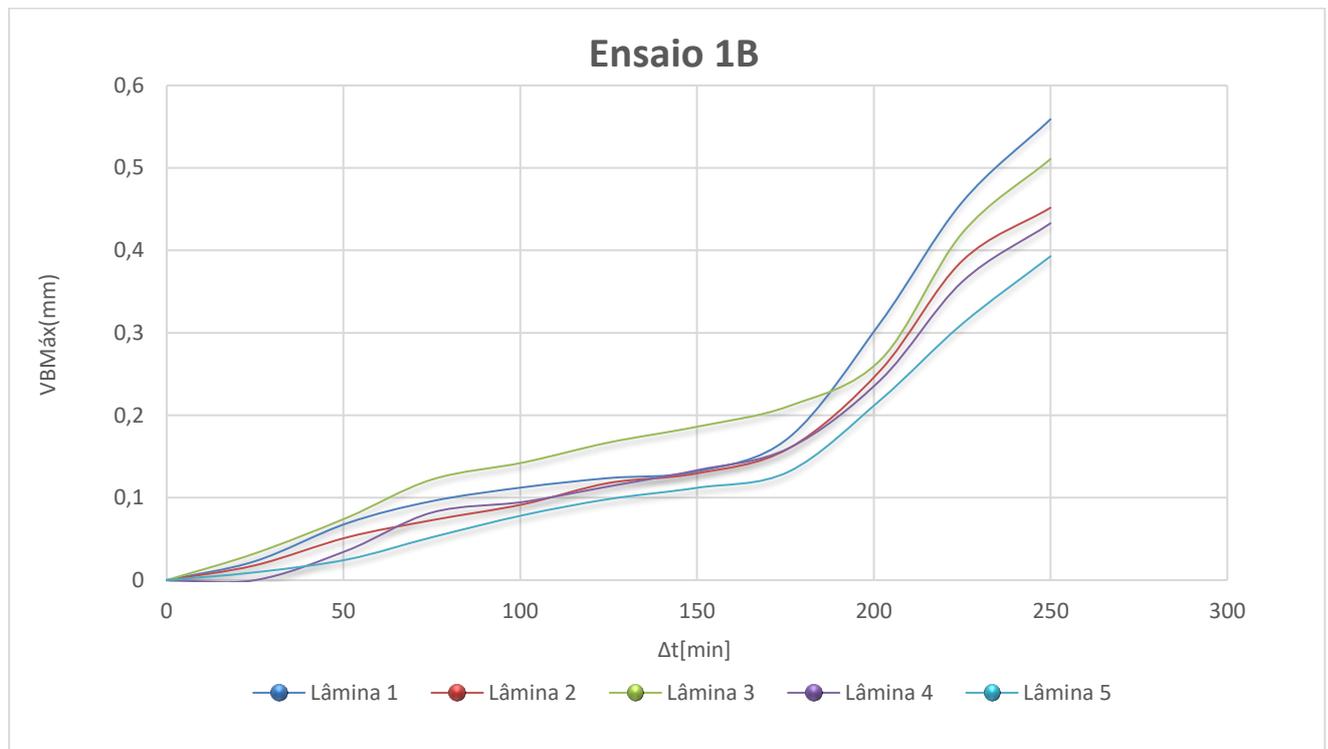
**Figura 4.2.** Evolução dos valores de  $VB_{Máx}$  obtidos durante os ensaios 1A

Nos ensaios 1B, atendendo a que os parâmetros utilizados foram  $V_{C1B} = 184$  m/min e  $f_z = 0,0769$  mm/dente, foi determinado o valor de  $Q_{1B} = 16,2$  cm<sup>3</sup>/min.

A Figura 4.3 representa a evolução de  $VB_{Máx}$ , em função do tempo, para o ensaio escolhido. O valor de vida útil obtido neste ensaio foi de 250 min, valor este que é bastante superior ao determinado para o ensaio 1A, contudo, contrariamente, à grande maioria de análises disponíveis para consulta, não os podemos comparar diretamente, para isto recorreremos à equação (3.4).

Depois de efetuar os cálculos chegamos a uma melhoria que ronda os 4%, onde  $Q_{F-1A} = 3888$  cm<sup>3</sup>/ferramenta e  $Q_{F-1B} = 4048,79$  cm<sup>3</sup>/ferramenta. Este valor de 4%, não é capaz de traduzir uma possível melhoria. Uma vez que, à medição da dimensão dos desgastes,

estão associados possíveis erros, desta forma, para efeitos de comparação, os resultados obtidos em 1B foram idênticos aos obtidos em 1A.



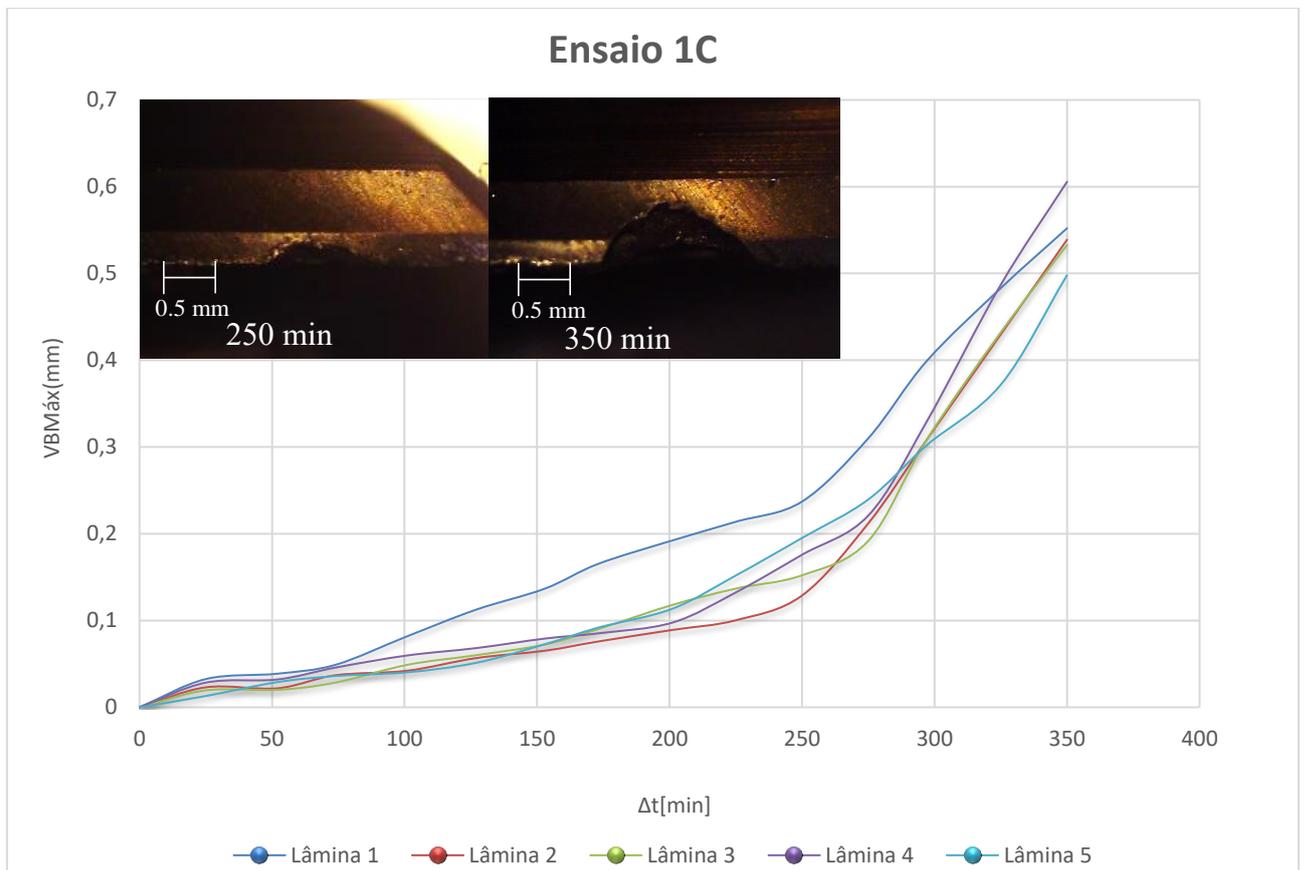
**Figura 4.3.** Evolução dos valores médios obtidos durante os ensaios 1B

No ensaio 1C escolhido, o tempo de vida útil da ferramenta obtido,  $\Delta t_{\text{obt}}$ , foi de 350 min. Neste conjunto de ensaios os parâmetros usados foram  $V_{C1C}=173$  m/min, e  $f_z=0,0769$  mm/dente, com um valor de  $Q_{1C}=15,3\text{cm}^3/\text{min}$ .

Recorrendo novamente à equação (3.4) obtemos um valor de  $Q_{f-1C}=5078$   $\text{cm}^3/\text{ferramenta}$ . Este é um resultado bastante interessante e positivo, pois representa uma melhoria na ordem de 30% comparativamente com os ensaios 1A.

Na Figura 4.4, estão representadas as curvas da evolução da dimensão do  $VB_{\text{Máx}}$  referente ao ensaio escolhido em 1C. É ainda possível visualizar e comparar a aparência visual do desgaste da lâmina mais danificada (Lâmina 4) nos tempos de 250 min e 350 min.

Pela análise da figura, é possível perceber que apenas a partir sensivelmente dos 250 min de maquinagem, a dimensão do desgaste aumenta consideravelmente. Até lá, a ferramenta consegue manter-se afiada e praticamente intacta.



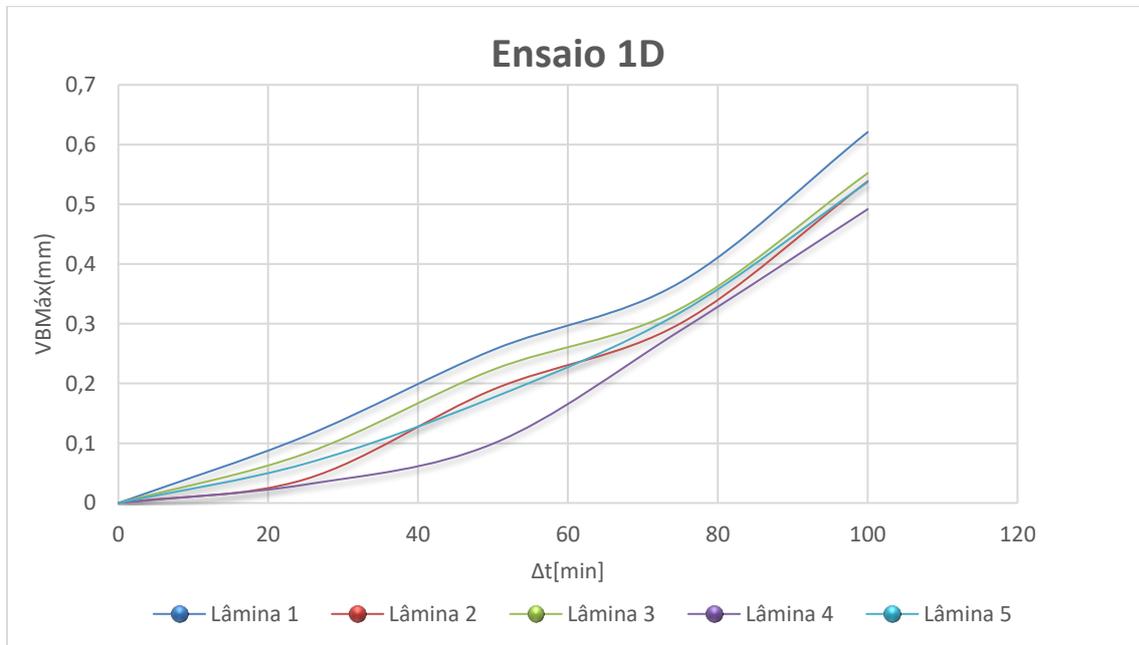
**Figura 4.4.** Evolução dos valores médios obtidos durante os ensaios 1C

Nos ensaios 1D, foram utilizados como parâmetros de corte,  $V_{C1D} = 224$  m/min e  $f_z = 0,0769$  mm/dente, culminando num valor de  $Q_{1D} = 19,8 \text{ cm}^3/\text{min}$ .

Neste lote de ensaios, ficou claro que o tempo de vida útil baixou imenso, ocorrendo muito mais facilmente o colapso da ferramenta antes de se alcançar o fim de vida ditado pelo desgaste de flanco máximo. O tempo de vida útil obtido no ensaio escolhido foi  $\Delta t_{\text{obt}} = 99$  min.

A Figura 4.5, mostra a evolução do desgaste das diferentes lâminas da ferramenta utilizada no ensaio escolhido em 1D. Através da análise desta, é possível constatar que a fase de transição, normalmente caracterizada por uma taxa de desgaste constante é praticamente inexistente. A velocidade é demasiado elevada, daí decorrem condições de corte

extremamente exigentes sujeitando a ferramenta de forma violenta, aos mecanismos de desgaste.



**Figura 4.5.** Evolução dos valores médios obtidos durante os ensaios 1D

Na Figura 4.6 está representada a fresa usada no ensaio analisado em 1D, através desta, é possível perceber que a ferramenta foi sujeita a condições de corte extremamente agressivas. O revestimento encontra-se com uma tonalidade azulada, dando a entender que durante a maquinagem a ferramenta esteve sujeita a elevadas temperaturas de corte.

Apesar de não se verificar pela imagem, a fresa usada neste ensaio apresentava-se completamente revestida de apara aderente, esta foi retirada manualmente depois do ensaio para poder ser analisado mais em detalhe o verdadeiro estado da ferramenta.



**Figura 4.6.**Fresa usada em 1D

O fim de vida de todas as ferramentas nos ensaios 1D, foi ditado pela quebra precoce das mesmas, devido à acumulação excessiva de apara aderente, causando um grande aumento na força de corte, que culmina no colapso total das ferramentas. Na Figura 4.7, estão representadas as 5 fresas usadas nos ensaios 1D, que como é possível constatar, colapsaram.



**Figura 4.7.**Fresas usadas nos ensaios 1D

Depois dos ensaios com variação de velocidade de corte, decidiu-se alterar o avanço por dente. Para isso, no ensaio 1E foram usados os seguintes parâmetros:  $V_{C1E}=173$  m/min, e  $f_{z1E}=0,0822$  mm/dente, mais 7% do que  $f_z$  utilizado nos restantes ensaios, sendo o valor de  $Q_{1E}=16,3\text{cm}^3/\text{min}$ .

Os ensaios 1E foram os que apresentaram melhores resultados, tendo-se registado um tempo de vida útil médio de 445min e um valor de  $Q_{f-1E} = 7189,44 \text{ cm}^3/\text{ferramenta}$ . Estes resultados apresentam uma melhoria de quase 85% comparativamente com os ensaios realizados com os parâmetros iniciais.

Na Figura 4.8 está representada a ferramenta usada no ensaio analisado em 1E. É possível perceber que o revestimento conseguiu suportar as condições de corte a que esteve sujeito, estando apenas um pouco deteriorado nas superfícies de saída devido ao contacto com a avara.



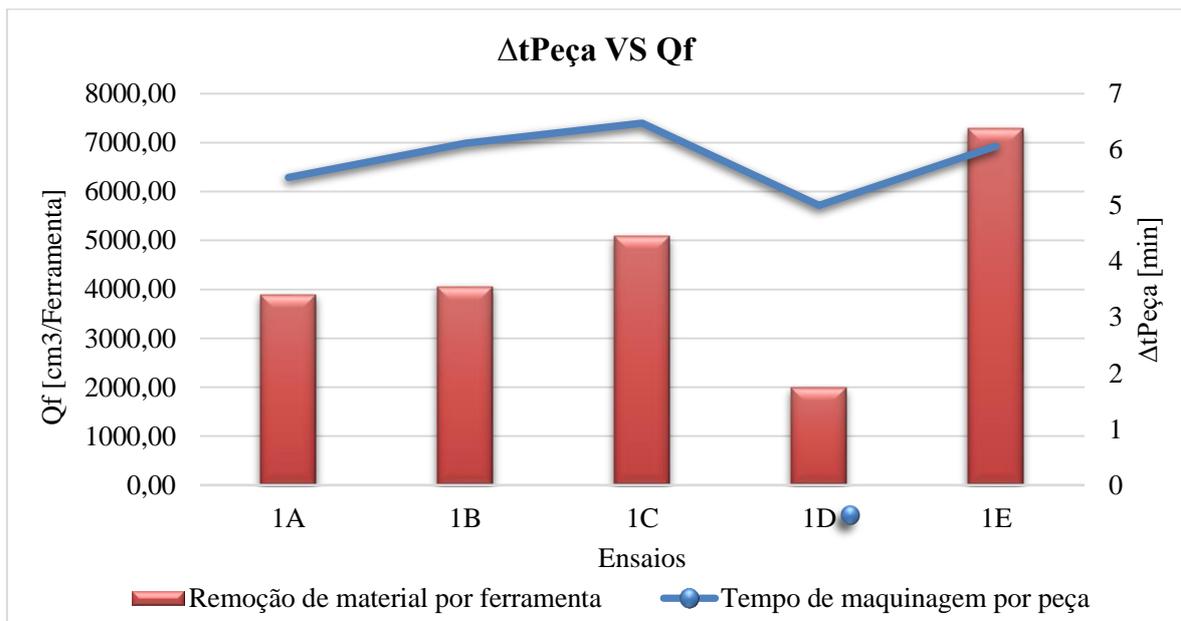
**Figura 4.8.**Fresa usada em ensaio 1E

Na Figura 4.9 estão representados os valores de tempo de maquinagem por peça, assim como a quantidade de material removido por ferramenta em cada um dos cinco ensaios escolhidos para análise.

Para os ensaios 1A, o tempo de maquinagem por peça é de 5min e 30s, no caso dos ensaios 1B, este valor é de 6min e 17s, para os ensaios 1C o tempo é de 6min e 27s, nos ensaios 1D o tempo de maquinagem por peça é de 5min e 2s, já no que diz respeito aos ensaios 1E o tempo é de 6min e 5s.

Os valores da quantidade de material removido por ferramenta, já anteriormente revelados no texto, são a variável que se pretende maximizar. Contudo, é necessário garantir que efetivamente o valor de  $Q$  obtido, não compromete o tempo de maquinagem de tal forma que esta deixa de ser eficiente. Para isso, analisando a Figura 4.9, percebemos que existe um aumento do tempo de maquinagem por peça de 1A para 1E em 10%. E, uma vez que o tempo

de maquinagem por peça da ferramenta em estudo, apenas corresponde a 6% do tempo de maquinagem total da peça, este, por sua vez, apenas irá sofrer um aumento em 0,6%, depois de adotados os parâmetros usados nos ensaios 1E em detrimento dos usados em 1A.



**Figura 4.9.** Representação quantitativa entre tempo de maquinagem por peça e volume de material removido por ferramenta nos 5 ensaios escolhidos para análise

## 5. Conclusões e Trabalhos Futuros

### 5.1. Conclusões

No final deste trabalho é possível estabelecer algumas conclusões que certamente serão úteis para trabalhos futuros, assim como uma ajuda na obtenção de uma maquinagem mais eficiente.

O ponto chave neste tipo de maquinagem, nomeadamente nas operações de desbaste, passa por prolongar ao máximo o tempo de vida do revestimento da ferramenta, conjugando os diferentes mecanismos de desgaste, entre adesão, com maior probabilidade de ocorrer a baixas temperaturas de corte, e os restantes que são predominantes em temperaturas de corte mais elevadas, difusão, abrasão e oxidação, como é possível perceber pela análise da Figura 2.16. Pois, após o revestimento ser ultrapassado/destruído, a matriz de metal duro da ferramenta fica completamente exposta às condições de corte, às quais não foi concebida para resistir, dando-se então um enorme aumento da pressão de corte, uma vez que deixa de haver lâmina para conseguir cortar o material, podendo levar ao colapso total da ferramenta.

Analisando novamente a Figura 2.16, percebemos que o mecanismo de adesão, é mais propício de ocorrer a temperaturas de corte mais baixas, com velocidade de corte e avanço mais reduzidos, comparativamente com outros tipos de mecanismos de desgaste. Contudo este facto apenas é efetivamente verdadeiro enquanto a ferramenta está em condições perfeitas ou quase perfeitas, ou seja, quando o revestimento ainda se encontra intacto. Depois da matriz de metal duro estar exposta às condições de corte, e a lâmina da ferramenta deixar de estar afiada, o aumento da adesão é instantâneo. Uma vez que, quanto maior a velocidade de corte, maior a temperatura de corte, maior o desgaste devido a difusão, abrasão e oxidação, logo há um aumento da dimensão do desgaste, que por sua vez aumenta a área de contacto entre a apara e a superfície de saída da ferramenta, promovendo a formação de apara aderente, os canais de escoamento deixam de cumprir a sua função pois encontram-se bloqueados com a apara aderente, esta acaba por quebrar e “arrasta” consigo pequenos fragmentos da ferramenta. Este ciclo repete-se até que a ferramenta colapse totalmente

devido à enorme força de corte, ou então até que o operador detete o problema e substitua a ferramenta.

Toda esta explicação vai ao encontro ao que acabou por ocorrer durante os ensaios 1D. Onde o problema de apara aderente foi muito evidente, apesar da velocidade de corte ser a mais elevada entre todos os ensaios. Este facto está em conformidade com o discutido anteriormente, ou seja, todo o processo de minimização da taxa de desgaste passa por estabelecer um compromisso entre os vários mecanismos de desgaste, pois, caso um deles esteja presente de forma mais acentuada, indiretamente, irão ser criadas condições para que se desenvolvam os restantes.

No que diz respeito aos resultados obtidos durante os testes, houve uma enorme melhoria relativamente aos ensaios iniciais. Comparando a quantidade de material removido por ferramenta entre os ensaios 1A e os ensaios 1E,  $Q_{f-1A}$  e  $Q_{f-1E}$ , respetivamente, houve uma melhoria de cerca de 85%, sem comprometer de forma alarmante o tempo total de maquinagem da peça.

Para uma melhor compreensão dos valores obtidos, foi feita uma pequena aplicação dos resultados tendo em conta a quantidade de peças que estão a ser produzidas pela Kristaltek, onde a encomenda é de 700 peças.

Com os parâmetros iniciais, 1A, cada fresa tem a capacidade de maquinar em média,  $216\text{min}/5:30\text{min} \approx 39$  peças. Já no caso das fresas com parâmetros 1E, cada ferramenta é capaz de maquinar em média  $445\text{min}/6:05\text{min} \approx 73$  peças. Sendo assim, utilizando parâmetros iniciais, são necessárias  $700/39 \approx 18$  ferramentas com um custo total de 1 164 €, enquanto que usando os parâmetros de 1E, são necessárias  $700/73 \approx 10$  ferramentas para maquinar a encomenda completa, com um custo de 621€.

É possível perceber então, claramente, que o problema relacionado com formação de apara aderente conseguiu ser ultrapassado, desta forma os mecanismos de desgaste foram controlados.

É ainda de salientar que, a existência de um revestimento de qualidade, como o presente na ferramenta analisada, é uma enorme mais valia para prolongar a vida útil da ferramenta.

## 5.2. Trabalhos Futuros

Relativamente a trabalhos futuros que sejam considerados pertinentes após a elaboração deste trabalho:

- Procurar aplicar os conceitos e metodologia usados neste trabalho, efetuando uma comparação direta entre ferramentas de diferentes fabricantes, ou seja, usar ferramentas que contenham as mesmas características, e testá-las na prática de modo a perceber qual a influência de determinadas diferenças que possam existir entre elas;
- Estudo das forças e temperaturas de corte associadas à maquinagem, para desta forma ser possível chegar de forma mais direta aos parâmetros de corte ideais;
- Implementação de um mecanismo responsável pela leitura de vibrações, formando assim um novo critério para o fim de vida da ferramenta;
- Aprofundar o estudo da real influência dos diferentes tipos e concentrações do fluido de corte na maquinagem.

Uma vez que um dos objetivos deste trabalho recaiu sobre procurar otimizar o processo de maquinagem, algumas sugestões para trabalhos futuros ligados ao desenho/projeto passam por:

- Criação de um sistema de purificação de óleo, como por exemplo um *skimmer*;
- Melhoramento/criação de um sistema de remoção de apra, que procure evitar paragem e derrames de apra no chão de fábrica.

---

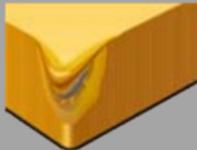
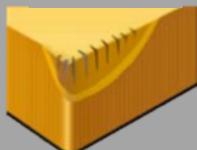
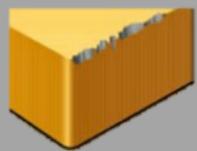
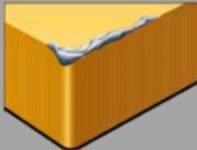
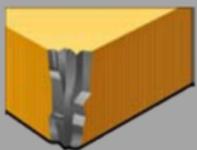
## Referências

- Açoplano. (2022). <http://www.acoplano.com.br/blog/o-que-e-aco-inoxidavel-austenitico/>
- Aços Nobre. (2022). <https://acosnobre.com.br/>
- Amaro, P. (2017). *Maquinabilidade dos Aços Inoxidáveis: Estudo Experimental da Degradação da Ferramenta no corte do Aço Inoxidável Duplex.*
- Amorim, H. (2002). *Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro.*
- Biolub. (2019, May 7). *Tudo o que você precisa saber sobre usinagem.*
- CIMM. (2022). [https://www.cimm.com.br/portal/material\\_didatico/6365-acos-rapidos-identificados-pelas-letras-t-e-m](https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6365-acos-rapidos-identificados-pelas-letras-t-e-m)
- CLARK, I. E., & SEM, P. K. (1998). *Advances in the Development of Ultrahard Cutting Tool Material* (Industrial Diamond Review, Ed.).
- Coelho, R., & Silva, E. (2018). *UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO-USP ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS-EESC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO NÚCLEO DE MANUFATURA AVANÇADA- NUMA.*
- Cubberly, W. H., Bakerjian, Ramon., & Society of Manufacturing Engineers. (1989). *Tool and manufacturing engineers handbook.*
- Degarmo, E. P., J T. Black, & Kohser, R. A. (2003). *Materials and Process in Manufacturing. Materials and Process in Manufacturing, 383.* [http://users.ensc.concordia.ca/home/a/a\\_naras/case\\_study/case\\_study,solutions\\_manual\\_materials\\_processing\\_in\\_manufacturing\\_by\\_demargo\\_mp1\\_and\\_mp2.pdf](http://users.ensc.concordia.ca/home/a/a_naras/case_study/case_study,solutions_manual_materials_processing_in_manufacturing_by_demargo_mp1_and_mp2.pdf)
- DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., & COPPINI, N. L. (2008). *Tecnologia de Usinagem dos materiais* (Ed. Artliber, Ed.; 7th ed.).

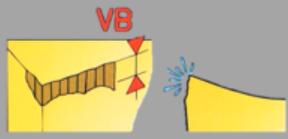
- Docsity.* (2011). <https://www.docsity.com/pt/classificacao-das-pastilhas-de-metal-duro-segundo-a-norma-iso/4810836/>
- Emuge-Franken.* (2020). <https://www.emuge-franken-group.com/de/en/milling-technology/end-mill-cutters/solid-carbide-end-mill-tinox-cut-trochoid/p/H300719>
- Exapro.* (2021). <https://www.exapro.com/mazak-hc-nexus-5000-p220506049/>
- FERRARESI. (1997). *Fundamentos da usinagem de metais* (E. Blücher, Ed.).
- Gabaldo, S., & Prado, J. (2010). Ferramentas de corte. In *Usinagem sem segredos*. <http://usinagemsemsegredos.blogspot.com/2010/>
- Heavy Duty.* (2022). <https://www.heavyduty.com.br/quem-somos>
- ISO 8688-2. (1989). <https://www.iso.org/standard/16092.html>
- Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2003). *Manufacturing processes for engineering materials*. 954.
- Klocke, F. (2011). *Manufacturing Processes I*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-11979-8>
- Kratochvil, R. (2004). *Fresamento de acabamento em altas velocidades de corte para eletrodos de grafite industrial*. <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/86800>
- Macea-Cerâmicas Técnicas.* (2022). <https://www.macea.com.br/>
- Machado, Á. R., Abrão, A. M., Coelho, R. T., & Silva, M. B. (2009). *Teoria da Usinagem dos Materiais* (Edgard Blucher Ltda, Ed.; 1.<sup>a</sup> ed. São Paulo).
- Mitsubishi Materials. (2014). *GENERAL CATALOGUE C006EURO*.
- Mazak* *EU.* (2006). [https://www.mazakeu.com/?\\_ga=2.129227524.90316849.1655204531-1020546312.1650981592&\\_gl=1\\*18t8sxt\\*\\_ga\\*MTAyMDU0NjMxMi4xNjUwOTgxNTky\\*\\_ga\\_ZF0DHYY48F\\*MTY1NTIwNDUzMS4xLjAuMTY1NTIwNDUzMS4w](https://www.mazakeu.com/?_ga=2.129227524.90316849.1655204531-1020546312.1650981592&_gl=1*18t8sxt*_ga*MTAyMDU0NjMxMi4xNjUwOTgxNTky*_ga_ZF0DHYY48F*MTY1NTIwNDUzMS4xLjAuMTY1NTIwNDUzMS4w)

- 
- Metalopédia*. (2022). <https://sites.google.com/a/catim.pt/metalopedia/materiais-para-ferramentas-de-corte/ultra-duros>
- Relvas, C. (2007). *concepção e estudo de próteses de anca anatomicamente adaptadas por obtenção in situ da geometria do canal femoral*. Universidade de Aveiro.
- Sandvik*. (2022). <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/pages/cutter-path-and-chip-formation.aspx>
- Schneider, G. (2009). *Machinability of Metals* (American Machinist., Ed.).
- Torres, S., & Schaeffer, L. (2009). *MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL ESTUDO DA MOAGEM DE ALTA ENERGIA E SINTERIZAÇÃO DE METAL DURO WC-NI Dissertação de Mestrado*.
- Trent, E. M. (Edward M., & Wright, P. Kenneth. (2000). *Metal cutting*. 446.
- Vasques, D. (2015). *AVARIAS E DESGATES DA FERRAMENTA*. <https://slideplayer.com.br/slide/3693295/>
- WAT Tool*. (2022). <https://www.watcuttingtools.com/customized-cutting-tools/pcd-diamond-tools/long-life-pcd-end-mills-diamond-cutting-tools.html>

**Anexo 1** Avarias Ferramentas de Corte

Avarias	Implicações	Causa	Solução
<p>Deformação Plástica</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Deformação plástica da aresta;</li> <li>-Depressão ou impressão do flanco;</li> <li>-Origina uma saída de aparas imperfeita;</li> <li>-Causa mau acabamento superficial;</li> <li>-Pode originar a quebra da aresta de corte e consequentemente da ferramenta.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Avanços elevados;</li> <li>-Levando a grandes esforços de maquinagem;</li> <li>-E temperaturas altas;</li> <li>-Ocorre por norma quando a ferramenta tem baixa resistência à deformação e média/boa tenacidade.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Reduzir a velocidade de corte;</li> <li>-Reduzir o avanço por dente(<math>f_z</math>);</li> <li>-Utilizar refrigeração;</li> <li>-Selecionar um material para ferramenta mais resistente ao desgaste.</li> </ul>
<p>Fissuras</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Pequenas fissuras perpendiculares à aresta de corte causam microlascamento e mau acabamento superficial.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Variação involuntária da espessura de corte(<math>a_p</math>);</li> <li>-Acesso irregular do fluido de corte;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Utilizar fluido de corte em abundância ou maquinar sem o mesmo (usar ar comprimido);</li> <li>-Reduzir a velocidade de corte;</li> <li>-Reduzir o avanço por dente(<math>f_z</math>);</li> </ul>
<p>Lascamento</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>-A parte da aresta de corte que não está em uso é danificada pelo martelamento da avara;</li> <li>-Pequenas fraturas na aresta de corte (microlascamento) causando um mau acabamento superficial da peça e desgaste excessivo de flanco.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Choque térmico elevado;</li> <li>-Material da Ferramenta/Revestimento demasiado quebradiço para a aplicação em questão, em geral cerâmica ou metal duro;</li> <li>-Existência de Avara Aderente (quando esta se solta, leva consigo pedaços da ferramenta).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Aumentar a velocidade de corte e reduzir o avanço;</li> <li>-Selecionar um quebra-apara mais resistente;</li> <li>-Selecionar uma classe de materiais para ferramenta mais tenaz;</li> <li>-Procurar minimizar as vibrações do sistema.</li> </ul>
<p>Avara Aderente</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Implica um acabamento superficial irregular e microlascamento da aresta de corte quando a avara aderente é removida.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Temperatura da zona de corte muito baixa;</li> <li>-Material muito dúctil (material peça);</li> <li>-Baixa velocidade de corte;</li> <li>-Baixo avanço por dente(<math>f_z</math>);</li> <li>-Geometria de corte negativa.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Aumentar a velocidade de corte;</li> <li>-Aumentar o avanço por dente (<math>f_z</math>);</li> <li>-Selecionar uma geometria positiva;</li> <li>-Usar névoa de óleo ou fluido de corte.</li> </ul>
<p>Quebra</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Quebra da aresta de corte, ou até mesmo da ferramenta, pode danificar ainda a peça, o sistema de fixação, e até a própria máquina.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Uso de material de corte quebradiço;</li> <li>-Ocorrência de corte interrompido;</li> <li>-Paragem do corte sem a retirada prévia da ferramenta;</li> <li>-Raio de ponta demasiado pequeno.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Reduzir a taxa de avanço e a profundidade de maquinagem;</li> <li>-Selecionar uma classe de materiais para ferramenta mais tenaz;</li> <li>-Selecionar um quebra-apara mais resistente;</li> <li>-Selecionar uma ferramenta mais robusta.</li> </ul>

## Anexo 2 Tipos de Desgaste em Ferramentas de Corte

Desgaste	Implicações	Causa	Solução
<p>Flanco</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Desgaste rápido resultando num mau acabamento superficial ou peça fora de tolerância.</li> <li>-Vibrações;</li> <li>-Aumento de temperatura;</li> <li>-Formação de rebarbas na peça;</li> <li>-Ruído excessivo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Classe do material é muito tenaz;</li> <li>-Velocidade de corte é muito alta;</li> <li>-Ângulo de folga muito pequeno;</li> <li>-Avanço 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>
<p>Cratera</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Desgaste excessivo causa o enfraquecimento da aresta;</li> <li>-A quebra da aresta de corte na borda resulta num acabamento superficial deficiente.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Classe do material é muito tenaz;</li> <li>-Velocidade de corte é muito alta;</li> <li>-Avanço 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>
<p>Entalhe</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Mau acabamento superficial;</li> <li>-Risco de quebra da aresta.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Superfícies duras ou não maquinadas, peças coquilhadas e camada endurecida pela maquinagem;</li> <li>-Fricção causada pela forma pontiaguda da apana (Causada por pequenas vibrações).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Classe com alta resistência ao desgaste;</li> <li>-Aumentar o ângulo de ataque para melhorar a geometria de corte.</li> </ul>

Trekst