



OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CORTE NO PROCESSO DE MAQUINAGEM DE MOLDES

FRANCISCO PEREIRA PINTO NUNES DA SILVA

novembro de 2020

OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CORTE NO PROCESSO DE MAQUINAGEM DE MOLDES

Francisco Pereira Pinto Nunes da Silva
1130381

2019-2020

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica



POLITÉCNICO
DO PORTO

isep

OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DE CORTE NO PROCESSO DE MAQUINAGEM DE MOLDES

Francisco Pereira Pinto Nunes da Silva
1130381

2019-2020

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica



POLITÉCNICO
DO PORTO

isep

JÚRI

Presidente

Doutor Arnaldo Manuel Guedes Pinto

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Orientador

Doutor Francisco José Gomes da Silva

Professor Coordenador, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Coorientador

Mestre José Manuel da Silva Fecheira

Assistente Convidado, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Arguente

Professor Doutor João Paulo Davim Tavares da Silva

Professor Catedrático, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Aveiro

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao Senhor Engenheiro Francisco Silva por me ter permitido trabalhar neste tema e por, desde o início, ajudar e fornecer material para realizar esta dissertação.

Ao Senhor Engenheiro José Fecheira, pelos ensinamentos e esclarecimentos de dúvidas durante a realização dos ensaios.

Ao Vítor Sousa, por toda a ajuda e disponibilidade oferecida durante e depois dos ensaios.

Obrigado também à INOVATOOLS, S.A. (Leiria, Portugal), à Moldit - Indústria de Moldes S.A., TEandM – Tecnologia, Engenharia e Materiais, S.A. e ao Engenheiro Ricardo Alexandre, por fornecerem os materiais necessários à realização deste trabalho.

Aos meus pais, pelo suporte e apoio incondicional.

Ao Miranda, por me ter ajudado na leitura, pela crítica ao meu trabalho e disponibilidade para o fazer, mas, acima de tudo, pela amizade.

À Íris e ao António, por estarem sempre presentes e prontos para me animar nos piores e melhores momentos.

À minha namorada, Catarina, por me dar motivação e ser um exemplo a seguir, por toda a paciência, tempo disponibilizado para ler, reler e criticar este trabalho.

À Angélica, por me ter permitido ganhar curiosidade sobre maquinaria e ao Néilson por todos os ensinamentos e experiência que me transmitiu.

O presente trabalho foi financiado e realizado no âmbito do projeto ON-SURF (ANI | P2020 | POCI-01-0247-FEDER-024521), cofinanciado pelo Portugal 2020 e FEDER, através do COMPETE 2020 - Programa Operacional para a Competitividade e Internacionalização.

PALAVRAS CHAVE

Maquinagem, desgaste de ferramentas, revestimentos CVD, aquisição de forças em maquinagem, aço para moldes

RESUMO

Atualmente, a exigência e rigor exigidos pela indústria, incitam a competitividade entre diferentes fabricantes e prestadores de serviços a conseguirem providenciar os melhores produtos aos melhores preços possíveis, indo de encontro às expectativas do mercado. Neste contexto, a presente dissertação teve como objetivo analisar quais os parâmetros mais indicados para maquinar um bloco de aço W 1.2711 para ferramentas de corte com revestimentos de TiAlN e TiAlSiN.

Em todos os ensaios, houve aquisição em tempo real das forças e momento de maquinagem com auxílio de um dinamómetro rotativo. Nas forças obtidas, observou-se um aumento a partir de metade do comprimento de corte.

Foi efetuada a medição da rugosidade da superfície da peça de trabalho. As ferramentas de topo, mostraram valores semelhantes nas direções transversal e longitudinal. Nas ferramentas esféricas, a rugosidade na direção longitudinal, foi muito superior à da direção transversal.

As formas de desgaste mais predominantes em ambos os revestimentos, foram o desgaste de flanco, abrasivo e adesivo.

KEYWORDS

Machining, tool wear, CVD coatings, acquisition of the machining forces, steel for molds

ABSTRACT

Currently, the demand and rigor required by the industry, incite the competitiveness between different manufacturers and service providers to be able to provide the best products at the best possible prices, while meeting market expectations. In this context, this dissertation aimed to analyze which parameters are most suitable for machining a W 1.2711 steel block with tools coated with TiAlN and TiAlSiN.

In all tests, the machining forces and torque were acquired in real time with the aid of a rotary dynamometer. It was observed an increase in the obtained forces, starting the time half the cut length was achieved.

After each test, the roughness measurement of the workpiece surface was carried out and, it was noticeable that the end-mills, showed very similar values in the transversal and longitudinal directions. In the ball nose tools, the measured roughness in the longitudinal direction was superior to the measured in the transversal direction.

The most prevalent forms of wear in both coatings were abrasive and adhesive wear.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

Termo	Designação
%FSO	<i>Full Scale Output</i>
a_e	Profundidade radial de corte
a_p	Profundidade de corte axial
DC_{ap}	Diâmetro de corte na profundidade de corte a_p
D_m	Diâmetro maquinado
EDS	<i>Energy-dispersive X-ray spectroscopy</i>
f_z	Avanço por dente
f_n	Avanço por rotação
HSS	<i>High Speed Steels</i>
k_c	Força de corte específica
M_c	Momento
n	Velocidade do fuso
P_c	Potência líquida
Q	Taxa de remoção de metal
SEM	<i>Scanning Electron Microscopy</i>
v_c	Velocidade de corte
v_f	Avanço da mesa
$ZEFF$	Número de insertos

Lista de Unidades

Termo	Designação
°C	Grau Célsius
A/cm ²	Ampere por centímetro quadrado
cm ³ /min	Centímetro cúbico por minuto
kHz	QuiloHertz
kW	QuiloWatt
m/min	Metro por minuto
mm/min	Milímetro por minuto
mm/rot	Milímetro por rotação
nm	Nanómetro
Nm	Newton metro
Pa	Pascal
rpm	Rotações por minuto
V	Volt
µm	Micrómetro

Lista de Símbolos

Termo	Designação
Co	Cobalto
Mo	Molibdénio
TaC	Carboneto de tântalo
TiC	Carboneto de titânio
TiAlSiN	Nitreto de titânio-alumínio-silício
TiAlN	Nitreto de titânio alumínio
V	Vanádio
W	Tungsténio

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - CENTRO DE MAQUINAGEM 5 EIXOS HCR-5000S [3].	8
FIGURA 2 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO TIPO DE FRESAGEM CONCORDANTE (À ESQUERDA) E DISCORDANTE (À DIREITA) [11].	10
FIGURA 3 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DO PROCESSO GERAL DE CVD, ADAPTADO DE [41].	22
FIGURA 4 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DO PROCESSO POR PULVERIZAÇÃO CATÓDICA E DO PROCESSO POR EVAPORAÇÃO. À ESQUERDA EVAPORAÇÃO, ADAPTADO DE [45]. À DIREITA PULVERIZAÇÃO CATÓDICA, ADAPTADO DE [46].	23
FIGURA 5 - REPRESENTAÇÃO DE UMA FERRAMENTA REVESTIDA POR MULTICAMADAS. ADAPTADO DE [57].	25
FIGURA 6 - <i>SETUP</i> EXPERIMENTAL.	35
FIGURA 7 - BLOCO DE AÇO APÓS FACEJAMENTO.	36
FIGURA 8 - EXEMPLO DE FRESAS UTILIZADAS NOS ENSAIOS.	37
FIGURA 9 - REPRESENTAÇÃO DA ESTRATÉGIA DE MAQUINAGEM, À ESQUERDA, PONTO DE ENTRADA DA FERRAMENTA E DIREÇÃO INICIAL, À DIREITA, PONTO DE SAÍDA DA FERRAMENTA E DIREÇÃO APÓS REENTRADA NA PEÇA DE TRABALHO.	40
FIGURA 10 - SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS. À ESQUERDA, O DINAMÓMETRO KISTLER 9171A, À DIREITA, O SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS KISTLER 5697A1 E O COMPUTADOR ADQUIRINDO A INFORMAÇÃO.	40
FIGURA 11 - MONTAGEM UTILIZADA PARA A MEDIÇÃO DA RUGOSIDADE. À ESQUERDA, MEDIÇÃO NO SENTIDO TRANSVERSAL, À DIREITA, MEDIÇÃO NO SENTIDO LONGITUDINAL.	41
FIGURA 12 - À ESQUERDA, REFERÊNCIA UTILIZADA PARA A ANÁLISE DAS ARESTAS DAS FRESAS DE TOPO, À DIREITA, REFERÊNCIA UTILIZADA PARA A ANÁLISE DAS ARESTAS DAS FRESAS ESFÉRICAS.	42
FIGURA 13 - RUGOSÍMETRO MAHR - <i>PERTHOMETER M2</i> .	43
FIGURA 14 - FEI QUANTA 400 FEG DO CEMUP [84].	43
FIGURA 15 - MEDIÇÃO DOS REVESTIMENTOS. À ESQUERDA, TIALN, À DIREITA, TIALSIN.	44
FIGURA 16 - COMPARAÇÃO ENTRE AS RUGOSIDADES PARA AS DIFERENTES FRESAS DE TOPO.	47
FIGURA 17 - COMPARAÇÃO ENTRE AS RUGOSIDADES PARA AS DIFERENTES FRESAS ESFÉRICAS.	47
FIGURA 18 - MEDIÇÃO DO DESGASTE DE FLANCO. À ESQUERDA, NUMA FRESA DE TOPO, À DIREITA, NUMA FRESA ESFÉRICA.	48
FIGURA 19 - MEDIÇÃO DO DESGASTE DE FLANCO NAS FERRAMENTAS DE TOPO.	49
FIGURA 20 - MEDIÇÃO DO DESGASTE DE FLANCO NAS FERRAMENTAS ESFÉRICAS.	49
FIGURA 21 - DESGASTE NAS FACES DE SAÍDA DAS FRESAS DE TOPO. À ESQUERDA, FACE DE SAÍDA DE UMA FRESA DE TOPO (500X), À DIREITA, FACE DE SAÍDA DE UMA FRESA DE TOPO (2500X).	50
FIGURA 22 - DESGASTE NAS FACES DE ATAQUE DAS FRESAS DE TOPO. À ESQUERDA, FACE DE ATAQUE DE UMA FRESA DE TOPO (500X), À DIREITA, FACE DE ATAQUE DE UMA FRESA DE TOPO (500X).	50
FIGURA 23 - EXTENSÃO DO DESGASTE DE FLANCO NA FACE DE ATAQUE Nº3 DA FERRAMENTA T01FTS404_1 (220X).	51
FIGURA 24 - DESGASTE NAS FACES DE SAÍDA DAS FRESAS ESFÉRICAS. À ESQUERDA, FACE DE SAÍDA DE UMA FRESA ESFÉRICA (500X), À DIREITA, FACE DE SAÍDA DE UMA FRESA ESFÉRICA (2500X).	51

FIGURA 25 - DESGASTE NAS FACES DE ATAQUE DAS FRESAS ESFÉRICAS. À ESQUERDA, FACE DE ATAQUE DE UMA FRESA ESFÉRICAS (220X), À DIREITA, FACE DE ATAQUE DE UMA FRESA ESFÉRICAS (2500X).	52
FIGURA 26 - DESGASTE NAS FACES DE SAÍDA DE UMA FRESA DE TOPO E ESFÉRICA REVESTIDAS COM TIALN. À ESQUERDA, FACE DE SAÍDA DE UMA FRESA DE TOPO (3100X), À DIREITA, FACE DE SAÍDA DE UMA FRESA ESFÉRICA (2500X).	52
FIGURA 27 - DESGASTE NAS FACES DE ATAQUE DE UMA FRESA DE TOPO E ESFÉRICA REVESTIDAS COM TIALN. À ESQUERDA, FACE DE ATAQUE DE UMA FRESA DE TOPO (2000X), À DIREITA, FACE DE ATAQUE DE UMA FRESA ESFÉRICA (5000X).	53
FIGURA 28 - DESGASTE NAS FACES DE SAÍDA DE UMA FRESA DE TOPO E ESFÉRICA REVESTIDAS COM TIALSIN. À ESQUERDA, FACE DE SAÍDA DE UMA FRESA DE TOPO (5000X), À DIREITA, FACE DE SAÍDA DE UMA FRESA ESFÉRICA (220X).	53
FIGURA 29 - DESGASTE NAS FACES DE ATAQUE DE UMA FRESA DE TOPO E ESFÉRICA REVESTIDAS COM TIALSIN. À ESQUERDA, FACE DE ATAQUE DE UMA FRESA DE TOPO (2000X), À DIREITA, FACE DE ATAQUE DE UMA FRESA ESFÉRICA (500X).	54
FIGURA 30 - FACE DE ATAQUE DE UMA FERRAMENTA DE TOPO REVESTIDA COM TIALN (Z1 – SUBSTRATO; Z2 – REVESTIMENTO; Z3 – MATERIAL ADERIDO).	54
FIGURA 31 - ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO DAS ZONAS IDENTIFICADAS NA FIGURA 30 ((A) - Z1; (B) - Z2; (C) – Z3).	55
FIGURA 32 - MECANISMOS DE DESGASTE NA FACE DE SAÍDA NUMA FERRAMENTA DE TOPO.	56
FIGURA 33 - MECANISMOS DE DESGASTE NA FACE DE SAÍDA DE UMA FERRAMENTA ESFÉRICA.	56
FIGURA 34 - FACE DE ATAQUE DE DUAS FERRAMENTAS DE CORTE, COM INDICAÇÃO A VERMELHO DA ZONA DE DESGASTE REDUZIDO.	58

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - OPERAÇÕES DE FRESAGEM [4-9].	9
TABELA 2 - PARÂMETROS DE FRESAGEM [12].	10
TABELA 3 - ESTUDO DE DIFERENTES AUTORES NA INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DE CORTE EM DIFERENTES CENÁRIOS.	11
TABELA 4 - CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE UMA FRESA [18-19,21,23-25].	13
TABELA 5 - TIPOS DIFERENTES DE FRESAS [26-30].	14
TABELA 6 - GRUPOS DE DESEMPENHO DOS AÇOS RÁPIDOS. ADAPTADO DE [31].	15
TABELA 7 - MATERIAIS POSSÍVEIS DE MAQUINAR PELOS DIFERENTES CARBONETOS SINTERIZADOS E RESPECTIVAS APLICAÇÕES [32,36], ADAPTADO DE [32].	18
TABELA 8 - DIFERENTES ESTUDOS DE ANÁLISE DE REVESTIMENTOS E A SUA DURABILIDADE.	25
TABELA 9 - EXEMPLO DE FERRAMENTAS DESGASTADAS E RESPECTIVA DESCRIÇÃO DO DESGASTE.	27
TABELA 10 - DIFERENTES ESTUDOS DE DESGASTE DE FERRAMENTAS.	29
TABELA 11 - PARÂMETROS UTILIZADOS NA DEPOSIÇÃO DOS REVESTIMENTOS.	37
TABELA 12 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA (% EM MASSA) DO AÇO W 1.2711.	38
TABELA 13 - PARÂMETROS UTILIZADOS PARA OS ENSAIOS.	39
TABELA 14 - FORÇAS MÁXIMAS E MOMENTOS MÁXIMOS OBTIDOS PARA OS ENSAIOS DAS FERRAMENTAS.	44
TABELA 15 - REPRESENTAÇÃO DAS FORÇAS EM X.	45
TABELA 16 - REPRESENTAÇÃO DAS FORÇAS EM Y.	45
TABELA 17 - REPRESENTAÇÃO DAS FORÇAS EM Z.	46
TABELA 18 - REPRESENTAÇÃO DO MOMENTO.	46
TABELA 19 - RESULTADOS DAS MEDIÇÕES DE RUGOSIDADE.	46
TABELA 20 - MÉDIA DOS VALORES OBTIDOS PARA O DESGASTE DE FLANCO NOS DIFERENTES ENSAIOS.	48
TABELA 21 - INFORMAÇÃO DO DINAMÓMETRO KISTLER 9171A.	73

ÍNDICE

RESUMO.....	XI
ABSTRACT.....	XIII
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.....	XV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XVII
ÍNDICE DE TABELAS.....	XIX
1 INTRODUÇÃO	3
1.1 Contextualização	3
1.2 Objetivos.....	3
1.3 Metodologia	4
1.4 Estrutura da dissertação.....	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1 Processos de maquinagem.....	7
2.1.1 Fresagem	7
2.2 Ferramentas para fresagem	12
2.2.1 Geometria das ferramentas	12
2.2.2 Materiais para ferramentas.....	15
2.2.3 Revestimentos para ferramentas.....	21
2.3 Desgaste em ferramentas de fresagem	27
2.3.1 Tipologias de desgaste.....	27
2.3.2 Metodologias de caracterização	32
3 DESENVOLVIMENTO	35
3.1 Materiais e métodos	36
3.1.1 Materiais.....	36
3.1.2 Métodos.....	38
3.1.2.1 Preparação das amostras	38
3.1.2.2 Análise da espessura dos revestimentos.....	38
3.1.2.3 Ensaio de maquinagem.....	39
3.1.2.4 Análise das forças de corte.....	40
3.1.2.5 Análise das rugosidades	40
3.1.2.6 Análise do desgaste das ferramentas.....	41
3.1.3 Equipamento de caracterização do desgaste	43

3.2	Resultados	44
3.2.1	Espessura do revestimento	44
3.2.2	Forças de corte	44
3.2.3	Rugosidade Superficial	46
3.2.4	Análise do desgaste	48
3.2.5	Mecanismo de desgaste	54
3.2.6	Influência do substrato no desgaste	56
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	61
4.1	CONCLUSÕES	61
4.2	PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS	62
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	65
6	ANEXOS.....	73
6.1	ANEXO 1	73

INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

1.2 Objetivos

1.3 Metodologia

1.4 Estrutura da dissertação

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Na indústria, a inovação e desenvolvimento de novos produtos é essencial para manter a competitividade com a concorrência e garantir quota de mercado.

A elevada procura de moldes com um alto tempo de vida útil e baixo custo, obriga a que os fabricantes tenham de conseguir reduzir os seus custos de produção e garantir, ao mesmo tempo, que conseguem atingir a sua margem de lucro financeiro/económico e fornecer produtos com a qualidade exigida pelos seus clientes.

A produção dos moldes é geralmente efetuada por processos de maquinagem, principalmente fresagem. Neste processo de fabrico, há inúmeras oportunidades para otimizar os processos, desde o estudo do desgaste das ferramentas, quais os parâmetros mais indicados para potenciar o seu tempo de vida e a garantia da qualidade dimensional e geométrica exigida.

Este projeto, visa a realização de um estudo durante a maquinagem de um bloco de aço, utilizando ferramentas de topo e esféricas, revestidas com TiAlN e TiAlSiN, com posterior análise das superfícies de corte, tipologia de desgaste das ferramentas, rugosidade superficial deixada no bloco de aço e as forças e momento resultantes. Com isto, pretende-se averiguar quais os parâmetros mais adequados à maquinagem de moldes.

Por motivos relacionados com o surto de COVID-19, não foi possível ter acesso às instalações do ISEP para realizar mais ensaios, o que iria permitir obter um conjunto variado de resultados.

1.2 Objetivos

Este projeto teve como objetivo estudar e analisar ferramentas esféricas e de topo revestidas com TiAlN e TiAlSiN, cedidas pela empresa Inovatools e revestidas pela empresa TEandM, maquinando um bloco de aço W 1.2711, fornecido pela Moldit.

Para este projeto, os objetivos estipulados são:

- Analisar quais os parâmetros de corte mais indicados para maquinar o bloco de aço para as diferentes ferramentas, dentro de uma pré-seleção realizada com base em indicações do fabricante;
- Identificar quais as tipologias de desgaste que se encontram nas diferentes ferramentas com auxílio da técnica de caracterização por Microscopia Eletrónica

de Varrimento, análise da rugosidade da peça de trabalho após a maquinagem, estabelecendo relações entre o desgaste associado às diferentes geometrias e esforços de maquinagem.

1.3 Metodologia

Neste trabalho, foi seguida a seguinte metodologia:

- Pesquisa bibliográfica sobre processos de maquinagem, mais concretamente fresagem;
- Estudo de ferramentas para fresagem, com foco na geometria, materiais e revestimentos;
- Estudo do desgaste em ferramentas de fresagem, tipologias de desgaste e metodologias de caracterização;
- Análise do local de trabalho e planeamento da estratégia de corte a utilizar;
- Preparação do centro de maquinagem para os ensaios serem efetuados;
- Medição da rugosidade obtida na peça de trabalho após cada ensaio;
- Análise SEM das ferramentas utilizadas nos ensaios;
- Aquisição das forças e momento durante os ensaios;
- Elaboração do presente relatório.

1.4 Estrutura da dissertação

Esta dissertação, está dividida em quatro partes, uma parte introdutória onde se indica qual o tema e objetivos do trabalho realizado, uma revisão bibliográfica onde se pretende aprofundar alguns temas mais específicos que são fundamentais para o entendimento deste tema, o desenvolvimento, onde é efetuada uma descrição mais detalhada dos ensaios realizados, e o tratamento dos resultados obtidos. Por fim, nas conclusões, pretende-se sumarizar os pontos mais relevantes da análise dos resultados e indicar propostas para trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 2.1 Processos de maquinagem
- 2.2 Ferramentas para fresagem
- 2.3 Desgaste em ferramentas de fresagem

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Processos de maquinagem

Os processos de fabrico fazem parte do nosso quotidiano, direta ou indiretamente. Tudo que possuímos teve de ser fabricado de algum modo e, atualmente, os processos de fabrico são estudados para se tentar obter o melhor proveito de cada um deles em variados níveis, seja a nível de otimização energética, a nível de produtividade ou de qualidade.

Neste capítulo, irá ser abordado o processo de fresagem. Irá ser efetuada uma descrição e dissecação deste processo de fabrico, para melhor compreensão do leitor.

2.1.1 Fresagem

A fresagem é um dos processos mais flexíveis de remoção de material por arranque de aparas. Permite obter um grande leque de geometrias e formas complexas e, por sua vez, é uma solução muitas vezes encontrada para problemas de peças com alto rigor geométrico e dimensional.

O aparecimento de máquinas de 5 e 4 eixos, trouxe à indústria a possibilidade de maquinar peças numa só operação. Deste modo, evitou-se a remoção da peça e fixação em posições diferentes para atingir ângulos e posições que outrora não poderiam ser atingidos de outra forma. Foi também possível diminuir o tempo de maquinagem e, por sua vez, otimizar os custos.

Cada vez mais, a monitorização é fundamental para otimizar um processo de maquinagem e conseguir prever como certos parâmetros vão influenciar o processo de maquinagem. A aquisição das forças de corte e a utilização de *softwares* que permitem realizar simulações, são exemplos em que a indústria tem cada vez mais apostado para verificar formas e métodos de melhorar os seus processos e reduzir custos [1-2].

Na Figura 1, pode observar-se um exemplo de um centro de maquinagem de 5 eixos.



Figura 1 - Centro de maquinagem 5 eixos HCR-5000S [3].



A fresagem pode ser dividida em diversas operações, na Tabela 1, estão representadas as operações que podem ser encontradas num processo de fresagem.

O processo de corte pode ser efetuado de duas maneiras distintas: numa fresagem concordante, ou numa fresagem convencional ou discordante (Figura 2). A seleção de uma destas estratégias vai influenciar positivamente ou negativamente as condições de corte, sendo preferida uma estratégia onde inicialmente se obtenha uma apara mais espessa e mais fina à saída da ferramenta.

Na fresagem convencional, existe muita vibração, a boa fixação da peça é fundamental, pois a tendência é esta ser empurrada no sentido ascendente, o desgaste da ferramenta é muito rápido e a qualidade superficial pode ser comprometida pela apara ser arrastada ao longo da superfície da peça de trabalho [10].

Quando se trata da fresagem discordante, a vibração é muito menor e o desgaste das ferramentas é menor (em comparação com a fresagem convencional). A força exercida é no sentido descendente, por conseguinte, o sistema de fixação não necessita de ser muito complexo. A qualidade superficial é boa, pois a facilidade de saída da apara da zona de corte é alta [10]. O tipo de fresagem mais utilizado é o concordante, pelos motivos descritos.

Tabela 1 - Operações de fresagem [4-9].

Representação da operação	Descrição
	Facejamento – É das operações mais comuns em fresagem.
	Fresagem de cantos a 90° - É um processo semelhante ao facejamento, onde são maquinadas duas faces em simultâneo.
	Fresagem de perfis – É dos processos mais complexos e já envolve, no mínimo, as etapas de desbaste, semi acabamento e acabamento. Poderá ser necessária a realização de um super acabamento. Envolve grande planeamento da estratégia de maquinagem, devido à complexidade.
	Fresagem de canais – É uma operação onde normalmente é indicado utilizar ferramentas de facejar e de disco. Os canais podem ser efetuados de várias formas, sendo, para isso, necessária a seleção de uma ferramenta adequada à aplicação.

Como para qualquer processo de maquinagem, a definição dos parâmetros é fundamental para estabelecer o compromisso ideal entre a qualidade pretendida, o tempo de operação e o tempo de vida das ferramentas, é importante entender todos os fatores que poderão influenciar esta mesma operação.

Na Tabela 2, é possível verificar alguns parâmetros fundamentais para qualquer processo de fresagem.

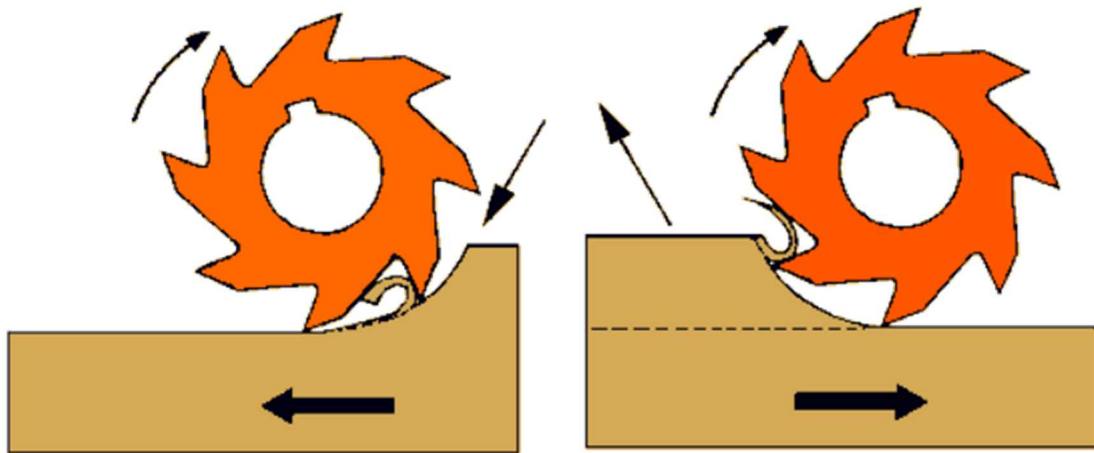


Figura 2 - Representação esquemática do tipo de fresagem concordante (à esquerda) e discordante (à direita) [11].

Tabela 2 - Parâmetros de fresagem [12].

Parâmetros	Equação
Avanço da mesa (mm/min)	$v_f = f_z * n * ZEFF$ (4)
Velocidade de corte (m/min)	$v_c = \frac{\pi * DC_{ap} * n}{1000}$ (5)
Velocidade do fuso (rpm)	$n = \frac{v_c * 1000}{\pi * DC_{ap}}$ (6)
Avanço por dente (mm)	$f_z = \frac{v_f}{\pi * ZEFF}$ (7)
Avanço por rotação (mm/rot)	$f_n = \frac{v_f}{n}$ (8)
Taxa de remoção de metal (cm ³ /min)	$Q = \frac{a_p * a_e * v_f}{1000}$ (9)
Potência líquida (kW)	$P_c = \frac{a_e * a_p * v_f * k_c}{60 * 10^6}$ (10)
Momento (Nm)	$M_c = \frac{P_c * 30 * 10^3}{\pi * n}$ (11)

A influência da velocidade de corte é estudada por muitos autores na influência que terá no tempo de vida das ferramentas e na qualidade superficial na peça de trabalho. Na Tabela 3, pode observar-se um resumo de dois estudos realizados por autores que verificam a influência da velocidade de corte em situações diferentes.

Tabela 3 - Estudo de diferentes autores na influência da velocidade de corte em diferentes cenários.

Autor / Autores	Análise e conclusões
Influência da velocidade de corte nas forças de corte e mecanismos de desgaste no facejamento de Inconel 718 com ferramentas de corte de nitreto de silício [13].	<p>Os autores utilizaram uma ferramenta com insertos de nitreto de silício (grau CC6060) e uma fresa KSSR160RN12CF09 com 160 mm de diâmetro.</p> <p>As velocidades de corte variaram entre 600, 100, 1400, 1800, 2600 e 3000 m/min e as forças foram adquiridas por um dinamômetro da Kistler 9257A.</p> <p>Deste estudo foi concluído o seguinte:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Para velocidades de corte de 600 e 1400 m/min, a falha predominante foi o desgaste tipo entalhe. No entanto, em velocidades superiores, compreendidas entre 1800 e 3000 m/min, o modo de desgaste mais observado foi o desgaste adesivo; • Para obter um melhor tempo de vida da ferramenta, verificou-se que, para este material, a fresagem discordante é o tipo de fresagem mais indicado, no entanto, a qualidade superficial é comprometida; • Com o aumento da velocidade de corte, as forças resultantes, tendem a aumentar. Para uma fresagem concordante e em velocidades de corte entre 600 e 1400 m/min, a força resultante é maior do que na fresagem discordante. No entanto, para velocidades de corte superiores, 1800 a 3000 m /min, a fresagem concordante apresenta as menores forças resultantes; • Verificou-se que para velocidades de corte inferiores a 1000 m/min, a ferramenta não é adequada para a maquinagem deste material devido ao desgaste tipo entalhe ser muito elevado.
Estudo das forças de corte, desgaste em ferramentas de nitreto de boro cúbico para diferentes velocidades de corte na maquinagem de AISI H13 [14]	<p>Neste estudo, os autores utilizaram uma ferramenta com insertos de nitreto de boro cúbico (SNGN 090308S-01020 CBN100) e uma fresa Seco R220.74-0063-09-6 com 63 mm de diâmetro.</p> <p>As velocidades de corte variaram entre 200 e 1200 m/min.</p> <p>As conclusões retiradas deste estudo, foram as seguintes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Com o aumento da velocidade de corte, as forças em X, Y e Z, diminuem numa fase inicial e aumentam com o aumento da velocidade de corte; • O valor mais baixo das forças resultantes, foi verificado a uma velocidade de corte de 800 m/min, tal como o maior tempo de vida das ferramentas.

2.2 Ferramentas para fresagem

As ferramentas utilizadas para fresagem são muito complexas e alvo de contínuo desenvolvimento por parte dos seus fabricantes. Existem diversas áreas em que um fabricante pode focar-se no que diz respeito a este desenvolvimento, tais como a geometria das ferramentas, materiais para ferramentas e revestimento das ferramentas. Neste capítulo, serão abordados estes tópicos.

2.2.1 Geometria das ferramentas

A seleção apropriada da geometria das ferramentas a utilizar num processo de fresagem é fundamental para atingir precisão geométrica e dimensional, de acordo com os requisitos do cliente. A geometria das ferramentas também irá influenciar as forças de corte durante as operações de maquinagem [15].

Existem duas normas que podem ser utilizadas para definir a geometria de uma ferramenta de corte, a ISO 3002/1:1982, que tem o intuito de definir termos gerais da superfície da peça de trabalho, elementos da ferramenta, superfícies da ferramenta, arestas de corte, o movimento da peça de trabalho e referenciar os sistemas de planos que irão ser usados para definir os vários ângulos e o corte de apara [16], e a norma americana ANSI/ASME B94.50-1975, que define conceitos semelhantes à norma ISO 3002/1:1982 [17].

Na Tabela 4, podem observar-se algumas características geométricas a ter em consideração para o processo de corte.

Existem vários tipos de ferramentas disponíveis que permitem maquinar um grande número de superfícies diferentes. Na Tabela 5, estão representados vários tipos de fresas que podem ser encontradas no mercado.

Tabela 4 - Características geométricas de uma fresa [18-19,21,23-25].

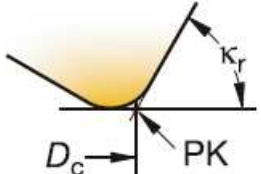
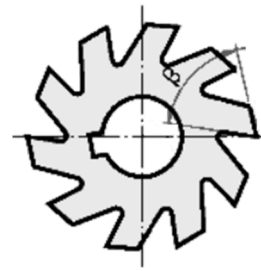
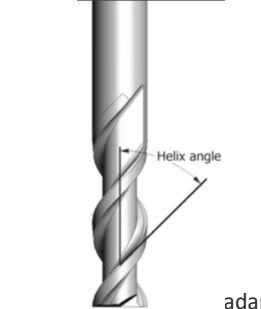
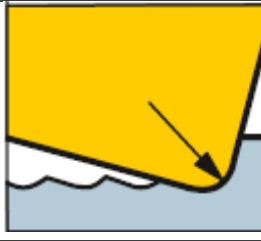
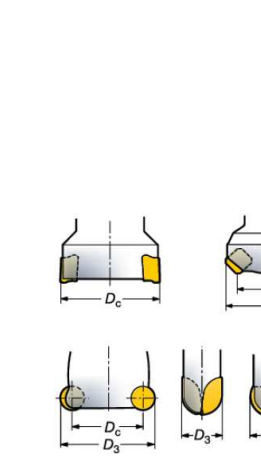
Representação esquemática	Descrição
	<p>Ângulo de posição, K_r (°) - Define a direção da força.</p>
 <p style="text-align: right;">adaptado de [20]</p>	<p>Ângulo de cunha, β (°) – Confere maior ou menor resistência à rotura da ferramenta.</p>
 <p style="text-align: right;">adaptado de [22]</p>	<p>Ângulo de hélice, λ (°) – A rugosidade superficial e a extração da aparas melhoram com o aumento deste ângulo, porventura, o tempo de vida diminui.</p>
 <p style="text-align: right;">[18]</p>	<p>Raio de canto, r_c (mm) – O raio de canto terá de ser definido de acordo com o tipo de qualidade superficial desejado. Quanto maior for este valor, o acabamento superficial será pior.</p>
 <p style="text-align: right;">[18]</p>	<p>Diâmetro da fresa, D_c (mm) – É uma característica a definir de acordo com a peça a maquinar, normalmente 20-50% maior que a largura de corte. Se for selecionado um diâmetro maior indevidamente, poderá haver zonas em que não haja remoção de material, levando a que mais passagens sejam necessárias para remover este excesso de material (aumento do tempo de maquinagem). No entanto, numa seleção onde o diâmetro seja inferior, será possível remover material em zonas da peça que com uma fresa de diâmetro superior não seria possível. Porém, o percurso de maquinagem será maior e, por conseguinte, o tempo de operação também.</p>

Tabela 5 - Tipos diferentes de fresas [26-30].

Representação	Descrição
	Fresa de disco
	Esféricas
	Perfis
	Fresa de topo
	Ripa

2.2.2 Materiais para ferramentas

O processo de maquinagem pode ser muito exigente e, como tal, é necessário que o material das ferramentas seja capaz de suportar os esforços ao longo do processo.

É necessário que a ferramenta seja capaz de garantir as seguintes propriedades para suportar o esforço durante um processo de maquinagem [31]:

- Dureza;
- Resistência à flexão e tenacidade;
- Resistência a altas temperaturas;
- Resistência à oxidação;
- Baixa propensão à difusão e adesão;
- Resistência à abrasão;
- Comportamento de desgaste reproduzível.

Os materiais utilizados para ferramentas de corte são:

- Aços de ferramenta;
- Carbonetos sinterizados (metal duro);
- *Cermets*;
- Cerâmicos;
- Ultraduros.

Aços rápidos

Os aços mais utilizados em ferramentas para maquinagem são os aços rápidos. Estes são ligas de aço que contêm tungsténio, molibdénio, vanádio, cobalto e crómio como principais elementos de liga. Têm resistência à flexão e boa tenacidade. Estes aços são denominados pelas letras HSS (*High Speed Steel*) e estão divididos em quatro grupos de desempenho de acordo com a norma DIN EN 10027a (Tabela 6).

Tabela 6 - Grupos de desempenho dos aços rápidos. Adaptado de [31].

Grupo	Composição	Denominação	Para o aço em		Operação	
			Carga média <850 N/mm ²	Alta carga >850 N/mm ²	Desbaste	Acabamento
I	18% W	HS18-0-1	+	-	-	-
		HS18-1-2-5	-	-	+	-
II	12% W	HS12-1-4-5	-	-	(+)	+
		HS10-4-3-10	-	-	(+)	+
III	6% W + 5% Mo	HS6-5-2	-	+	-	-
		HS6-5-3	-	-	(+)	+
		HS6-5-2-5	-	-	+	-
IV	2% W + 9% Mo	HS2-9-1	+	-	-	-
		HS2-9-2	-	+	-	-
		HS2-10-1-8	-	-	+	-

Como se pode verificar pela observação da Tabela 6, o Grupo I é aquele que contém maior quantidade de tungstênio. O aço HS18-1-2-5, que contém cobalto, irá apresentar boa dureza, indicando que ferramentas contendo este material, irão ser boas para desbaste de aços rápidos, ferros fundidos, metais não ferrosos e materiais não metálicos [31-32].

O material HS12-1-4-5 do segundo grupo, contendo 12% de tungstênio, tem grande resistência ao desgaste por abrasão devido ao elevado conteúdo de vanádio. Pode ser utilizado para maquinar aços tratados de liga Cr-Ni e metais não ferrosos [31].

Os grupos II e III possuem alta tenacidade e resistência à temperatura. São utilizados para ferramentas de acabamento e desbaste, especialmente ferramentas de fresagem.

Estes aços podem ser ligados ou não ligados. Os aços ligados são utilizados na produção de ferramentas de corte, sendo classificados de acordo com a norma DIN EN ISO 4957 [31].

Existem vantagens dos aços ligados em relação aos não ligados. Os aços ligados garantem maior resistência ao desgaste e à retenção da dureza a altas temperaturas (presença de cromo, tungstênio, molibdênio e ligas de vanádio). A sua velocidade crítica de arrefecimento é menor, permitindo obter uma melhor têmpera. Os aços ligados podem ser usados em temperaturas de corte até 200 °C. São principalmente utilizados na maquinagem de aços com parâmetros pouco exigentes e são mais económicos que os aços rápidos (contém menos elementos de liga) [31,33].

Carbonetos sinterizados (metal duro)

Atualmente, as ferramentas de carbonetos sinterizados, são amplamente utilizadas na indústria, pois garantem uma boa versatilidade nas suas propriedades mecânicas, desde a resistência ao desgaste e tenacidade e as diferentes combinações de dureza a frio e a quente.

Este material é, geralmente, constituído por um carboneto muito duro, com grande resistência ao desgaste (usualmente o carboneto de tungsténio, podendo este, ser utilizado juntamente com outros carbonetos para conferir dureza a quente e resistência ao desgaste) e um elemento ligante (irá ligar as partículas duras e será fundamental para a tenacidade do material), garantindo, deste modo, maior resistência da aresta de corte à deformação plástica [31,34-35].

Os carbonetos sinterizados WC-Co são dos mais comuns de encontrar no mercado. A afinidade química entre o aço e o carbono presente no carboneto de tungsténio leva a um desgaste rápido por difusão, para combater isto, poderá ser adicionado TiC ou TaC para retardar o efeito da difusão química [31,34].

Estes materiais são divididos em seis grupos diferentes, onde a cor distingue cada grupo, com base nos materiais mais indicados para maquinagem. Esta diversidade nas classes, é possível devido às diversas modificações que são possíveis de realizar nos carbonetos e nas suas condições de fabrico [31,34-35].

- P (azul) – Maquinagem de metais e ligas ferrosas com aparas longas e maleáveis;
- M (amarelo) – Classes de baixa liga para o corte de metais e ligas ferrosas com aparas longa ou curta, ferros fundidos e metais não ferrosos;
- K (vermelho) – Classes de baixa liga de carboneto de tungsténio para ferros fundidos de aparas curta e materiais não metálicos [32,35];
- N (verde) – Utilizado na maquinagem de metais não ferrosos;
- S (laranja) – Maquinagem de ligas resistentes ao calor e titânio;
- H (cinzento) – Utilizado na maquinagem de aços temperados e endurecidos.

Na tabela seguinte (Tabela 7), podem verificar-se exemplos de materiais que podem ser maquinados e aplicações dos diferentes tipos de carbonetos sinterizados.

Tabela 7 - Materiais possíveis de maquinar pelos diferentes carbonetos sinterizados e respetivas aplicações [32,36], adaptado de [32].

Classes	Designação	Materiais a maquinar	Exemplo de aplicações
P	P01	Aço, aço fundido	Maquinagem de eixos, tubos e construções soldadas.
	P10	Aço, aço fundido	
	P20	Aço, aço fundido Ferro fundido maleável com apara longa	
	P30	Aço, aço fundido Ferro fundido maleável com apara longa	
	P40	Aço, aço fundido com inclusões de areia e cavidades	
	P50	Aço, aço fundido com média/baixa resistência à tração com inclusões de areia e cavidades	
M	M10	Aço, aço fundido, aço Hadfield Ferro fundido nodular, ferro fundido ligado	Maquinagem de eixos para bombas, turbinas a vapor e de água, parafusos, porcas e equipamentos da indústria alimentar.
	M20	Aço, aço fundido, aço Hadfield ou austenítico Ferro fundido nodular	
	M30	Aço, aço fundido, aço austenítico Ferro fundido cinzento, ligas de alta resistência à temperatura	
	M40	Aço suave, aço de baixa resistência à tração Metais não ferrosos e ligas leves	
K	K01	Ferro fundido nodular Ligas de alumínio-silício, aço endurecido, plásticos abrasivos, cerâmicas	Fabrico de blocos de motor, engrenagens e cilindros para compressores.
	K10	Ferro fundido maleável com apara curta, aço endurecido, ligas de alumínio-silício, ligas de cobre, plásticos, vidros, borracha dura	

	K20	Metais não ferrosos, ferro fundido nodular de dureza até 220 Brinell	
	K30	Ferro fundido nodular de baixa dureza, aço de baixa tensão, madeira comprimida	
	K40	Madeira dura e suave Metais não ferrosos	
N	N10	Ligas de alumínio e ligas de alumínio fundidas	Maquinagem de blocos de motor e caixas de transmissão.
	N20	Ligas de magnésio fundido	
	N30	Ligas de cobre, ligas de cobre de alta resistência	
	N40	Ligas de zinco	
S	S10	Ligas à base de ferro	Fabrico de motores e peças estruturais para a indústria aeronáutica.
	S20	Ligas de níquel	
	S30	Ligas de cobalto	
	S40	Ligas de titânio	
	S50	Tungsténio	
	S60	Molibdénio	
H	H10	Aços extra duros	Maquinagem de caixas de transmissão e caixas de engrenagem.
	H20	Ferro fundido	
	H30	Estelite	
	H40	Ligas Ferro-Tic®	

Cermets

Os *cermets* são um composto constituído por um material cerâmico contido numa matriz metálica (matriz essa que mantém a estrutura do material). A sua designação provém da junção das palavras cerâmica e metal. Este pode ser subdividido em metais duros e óxidos de *cermets* [32,34].

Os metais duros são formados por um ou mais compostos de carbonetos ligados numa matriz metálica. Os mais comuns têm por base o carboneto de tungsténio (WC), carboneto de titânio (TiC) e carboneto de crómio (Cr_3C_2). Carboneto de tântalo (TaC) e outros carbonetos são também utilizados, porém, não tão usualmente. Os principais elementos de liga são o cobalto e o níquel. Os carbonetos de cerâmica são o componente principal dos metais duros, normalmente variando em conteúdo entre 80% a 95% da massa total [34].

Estes metais são obtidos por processos muito específicos de sinterização ou compactação, podendo ainda ser executados processos secundários adicionais para

conferir forma. São utilizados para maquinagem de acabamentos em aços, aços inoxidáveis e ferros fundidos [32,34].

No que diz respeito aos óxidos de cermet, alguns destes compósitos podem utilizar óxido de alumínio (Al_2O_3) ou óxido de magnésio (MgO) como fase particulada. Normalmente o crómio é utilizado como material ligante na matriz metálica. No entanto, outros metais também podem ser utilizados. As proporções destas duas fases podem variar significativamente, sendo possível o material ligante existir em maior proporção [32,34].

Cerâmicos

Os materiais de ferramentas de corte de cerâmica, podem ser subdivididos em óxidos cerâmicos e não óxidos.

Nos óxidos cerâmicos, existe uma distinção que é efetuada entre os materiais que apenas contêm óxidos (para além do Al_2O_3), cerâmicas mistas, onde se pode encontrar Al_2O_3 e materiais metálicos duros como carboneto de titânio (TiC) ou carbonitreto de titânio ($TiCN$) e cerâmicas reforçadas com whisker, onde o carboneto de silício (SiC) é integrado na matriz de Al_2O_3 .

Os materiais cerâmicos que têm como base Al_2O_3 , são caracterizados por possuírem excelentes propriedades de resistência ao desgaste. No entanto, a sua baixa ductilidade faz com que tenha uma baixa capacidade de absorver plasticamente os efeitos dos impactos e, a sua baixa resistência a mudanças de temperatura faz com que não seja aconselhável a utilização de fluido de corte nos processos de maquinagem [21,31,34,37].

No que diz respeito às ferramentas de óxidos de cerâmica, a presença de materiais duros na matriz, limita o crescimento dos grãos de óxido de alumínio. Por esta razão, possuem boas propriedades de tenacidade e resistência ao desgaste. Em comparação com os materiais de corte puramente de cerâmica, estes são mais duros (podendo a dureza ser melhorada com a adição de dióxido de zircónio (ZrO_2)) e melhor resistência a choques térmicos, devido à sua elevada condutividade térmica [31,34,37].

Relativamente às ferramentas cerâmicas reforçadas com whisker, o seu objetivo é melhorar as propriedades de dureza da ferramenta. Este material consegue efetuar uma distribuição dos esforços mecânicos eficazmente e, a sua condutividade térmica permite uma rápida dissipação do calor. A combinação destes fatores, aumenta o limite de fadiga do material e a resistência a choques térmicos, deste modo, é possível trabalhar com esta material em processos de corte com utilização de fluidos de corte. Em comparação com as cerâmicas mistas, estas ferramentas podem ter uma tenacidade até 60% superior [31,34,37].

Ultraduros

Os materiais e ferramentas ultraduros, são maioritariamente constituídos pelo nitreto de boro cúbico (CBN) e diamante sintético policristalino (PCD).

O nitreto de boro cúbico, é caracterizado pela sua elevada condutividade térmica, estabilidade química, resistência à oxidação, dureza a frio e a quente superior à dos cerâmicos, e tenacidade superior a grande parte dos carbonetos. É utilizado na maquinagem de aços rápidos, ligas de cobalto e níquel, ferro fundido branco muito duro e aços ferramenta temperados [35].

Relativamente ao diamante sintético policristalino, é o material que confere o menor desgaste e maior tempo de vida às ferramentas, quando o fator de desgaste mais evidente é a abrasão. É utilizado para a maquinagem de ligas de alumínio, no corte de materiais abrasivos, carbonetos de tungsténio e materiais cerâmicos [31,32].

2.2.3 Revestimentos para ferramentas

Os revestimentos com aplicação nas ferramentas, poderão ter como objetivos diversos fins, como por exemplo, conferir uma melhor proteção à oxidação, endurecer a superfície da ferramenta ou garantir um aumento da resistência ao desgaste [38].

Existem vários processos de revestimento que são utilizados de acordo com a aplicação requerida, podendo ser efetuados quimicamente ou fisicamente através dos seguintes processos [39]:

CVD – chemical vapour deposition;

PVD – physical vapour deposition.

Processos CVD

Os processos CVD, baseiam-se em reações químicas que ocorrem numa fase gasosa em condições de vácuo (10³ -10⁵ Pa) e a temperaturas diferentes, que podem dividir este processo em três tipos [31]:

HT-CVD – Alta temperatura, entre 900-1100 °C;

MT-CVD – Média temperatura, entre 700-900 °C;

PA – Ativo por plasma, entre 450-650 °C.

Os materiais mais comuns de obter nestes processos são materiais duros, com ligações metálicas, como o TiC e o TiCN [31,33,50].

Na Figura 3, pode-se observar um esquema representativo do processo geral de revestimento por CVD.

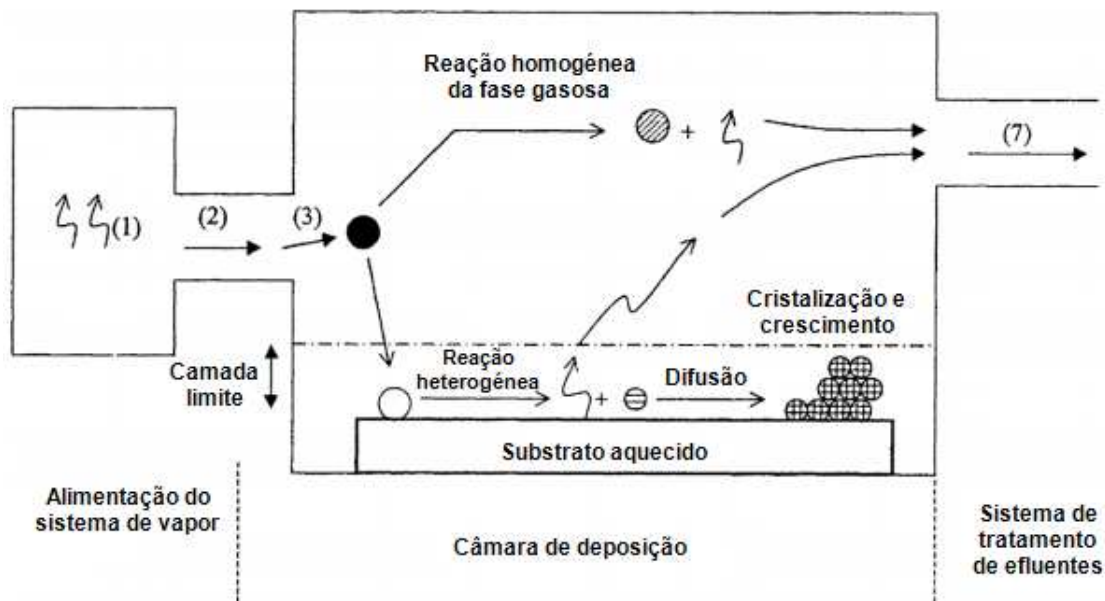


Figura 3 - Esquema representativo do processo geral de CVD, adaptado de [41].

O método de alta temperatura, é caracterizado por garantir um alto nível de adesão ao substrato, num processo que garante repetibilidade [33,39]. Neste processo, o material do revestimento é formado através de uma reação química, podendo ser utilizada uma mistura gasosa de metano (CH_4) ou azoto (N_2), por via da transferência do material na fase gasosa diretamente para as ferramentas. Os produtos da reação, irão depositar-se na superfície dos substratos, evitando um aspeto baço. Por esta razão, substratos de geometrias complexas podem ser revestidos através deste processo. Carbonetos sinterizados revestidos através deste processo, possuem alta resistência ao desgaste, devido à espessura do filme de revestimento que pode atingir os 6 μm nas ferramentas para fresagem [31-32,42].

No entanto, é possível verificar que a tenacidade do revestimento é menor em comparação com a do substrato não revestido. Na interface, é também possível ocorrer a formação de fases frágeis [31,42].

No processo MT-CVD, na reação química, é utilizado acetonitrilo ($\text{CH}_3\text{-CN}$). O revestimento de titânio, zircónio e háfnio, pode ser efetuado com altas taxas de deposição [31-32]. Em relação ao processo HT-CVD, apresenta as seguintes vantagens:

- As tensões térmicas no substrato são menores, devido à temperatura a que é efetuado o revestimento;
- É menos provável serem formadas fases frágeis.

No processo de CVD de ativação por plasma, é utilizada energia elétrica para formar uma descarga (plasma). Deste modo, é transferida a energia para a mistura gasosa [42].

As propriedades dos carbonetos sinterizados permanecem praticamente inalteradas devido à redução da temperatura durante o revestimento, permitindo resistências à

flexão cerca de 30% mais altas do que os carbonetos sinterizados com revestimento pelo processo HT-CVD [31]. As propriedades dos carbonetos sinterizados com este tipo de revestimento, têm um bom desempenho na maquinagem de aços resistentes [31-32].

Processos PVD

No processo PVD, ocorre a deposição de um filme fino onde o revestimento cresce átomo a átomo no substrato. O PVD envolve a vaporização do material de uma fonte sólida ou líquida, sendo este transportado em forma de vapor através de um ambiente gasoso (ou plasma) de baixa pressão ou vácuo até ao substrato, onde irá condensar. Neste processo, conseguem-se depositar filmes finos com camadas de espessuras de alguns nanómetros até vários micrómetros. Também é possível obter revestimentos multicamada [43-45].

O PVD permite depositar filmes de elementos e ligas, por via de processos de deposição reativa. Nestes processos, os compostos são formados devido à reação do material a depositar com o gás existente no meio ambiente, como por exemplo, o azoto (permite formar TiN), ou com um material previamente depositado, por exemplo, o TiC [43,45-47]. Este processo causa uma alteração nas propriedades da superfície e da zona de transição entre o substrato e o material depositado. Por outro lado, as propriedades dos filmes podem ser afetadas pelas propriedades do substrato. O processo de deposição atômica pode ser realizado num ambiente de vácuo, gasoso, plasma ou eletrolítico. O ambiente de vácuo na câmara de deposição permite reduzir a contaminação gasosa no processo de deposição a um nível praticamente nulo [40,44].

Os processos de PVD mais utilizados são: por evaporação, deposição por pulverização catódica e revestimento iónico. Na Figura 4, pode visualizar-se um esquema representativo do processo por pulverização catódica e do processo por evaporação.

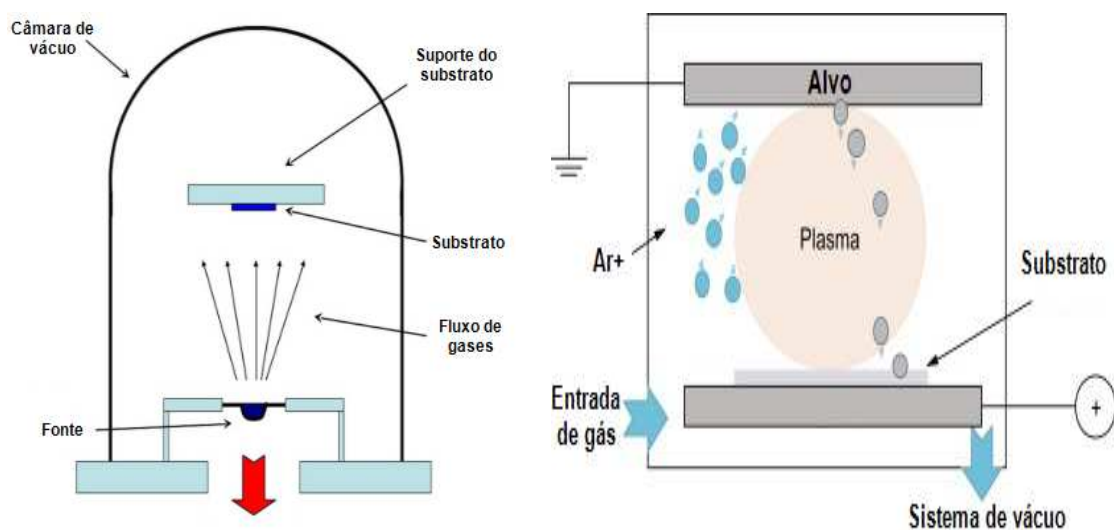


Figura 4 - Esquema representativo do processo por pulverização catódica e do processo por evaporação. À esquerda evaporação, adaptado de [45]. à direita pulverização catódica, adaptado de [46].

À esquerda evaporação, adaptado de [48]. à direita pulverização catódica, adaptado de [49].

A deposição por pulverização catódica é um processo de vaporização não térmica em que os átomos da superfície são fisicamente ejetados de uma superfície sólida, por transferência de momento de uma partícula com as dimensões de um átomo, normalmente é um gás gasoso, acelerado por plasma. O plasma utilizado na pulverização catódica pode ser confinado perto da superfície da pulverização catódica, ou, preencher a região entre a fonte e o substrato. A fonte de pulverização catódica pode ser um elemento, liga, ou um composto [43,50].

No processo de deposição por pulverização catódica, é utilizado um arco de alta corrente e baixa tensão que irá vaporizar o eletrodo catódico ou anódico e permitir a deposição do material no substrato. Este processo é utilizado para revestimentos duros e decorativos [43,46,51].

No processo de evaporação, o alvo, que contém o material a ser depositado, vai atuar como uma fonte de evaporação, funcionando deste modo como um cátodo. Neste processo, é utilizado alto vácuo, utiliza baixa energia atômica e caracteriza-se por produzir filmes finos de revestimento [43-45,52].

No que diz respeito ao processo por revestimento iônico, é efetuado um bombardeamento contínuo ou alternado do filme a ser depositado por partículas energéticas de dimensões atômicas, permitindo, deste modo, o controle das propriedades do filme a ser depositado [43,51].

Os íons formados na deposição por pulverização catódica, são úteis neste processo. O revestimento iônico pode ser realizado num ambiente de plasma, onde os íons serão removidos do plasma, ou, em vácuo onde os íons são formados num compartimento diferente [43,51].

Nos revestimentos de ferramentas, a utilização de uma camada ou multicamadas de revestimento, pode ser fulcral para a obtenção de um melhor desempenho das ferramentas.

A utilização de multicamadas no revestimento de uma ferramenta, foi um dos melhores feitos neste campo, veio oferecer maior tempo de vida, desempenho na maquinaria e revestimentos mais espessos [53-55].

A seleção dos materiais a utilizar nas multicamadas é crítica, pois é necessário analisar a compatibilidade entre os materiais, tal como a sua sequência de deposição [54,56].

Na Figura 5, pode verificar-se um exemplo de um esquema de uma ferramenta revestida com multicamadas, pelo processo PVD.

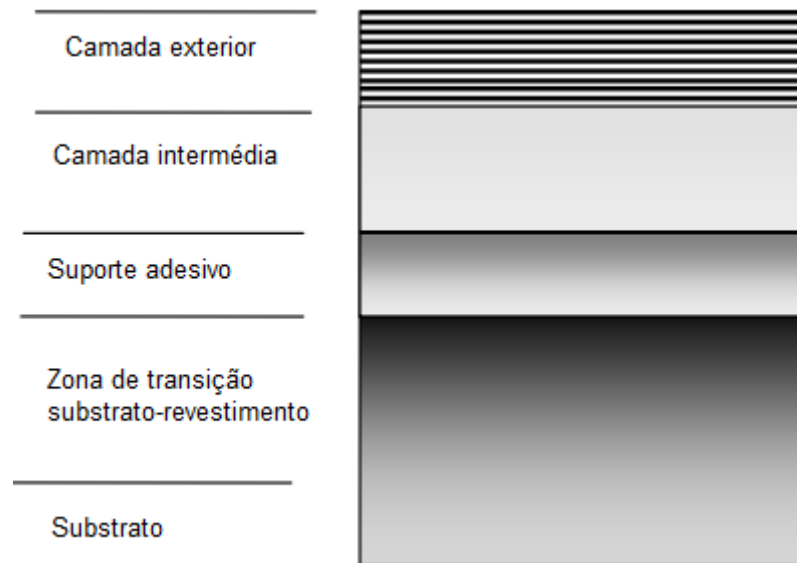


Figura 5 - Representação de uma ferramenta revestida por multicamadas. Adaptado de [57].

As transições formadas entre as camadas de materiais, levam a um aumento da resistência. Na formação de fissuras ao longo do revestimento, a transição ao longo das camadas individuais dos revestimentos presentes nas multicamadas, irá permitir dissipação de energia, minimizando a propagação das fendas no revestimento, podendo mesmo evitar a propagação das mesmas [40,53-54,56,58].

As multicamadas também permitem potenciar diversas propriedades no revestimento, tais como a alta dureza a quente e alta estabilidade térmica [31,40,54].

Vários autores estudam formas de melhorar a resistência ao desgaste de revestimentos, tal como se pode observar em [59-60], onde são testados revestimentos diferentes para melhorar a resistência ao desgaste de moldes utilizados para a injeção de plásticos reforçados com fibra de vidro.

Na Tabela 8, podem verificar-se três estudos que visam a análise de revestimentos e a sua durabilidade.

Tabela 8 - Diferentes estudos de análise de revestimentos e a sua durabilidade.

Autor / Autores	Análise e conclusões
Estudo do desgaste de ferramentas de carboneto sinterizado revestidas com TiAlN (PVD) e TiCN/Al ₂ O ₃ /TiN (CVD) na maquinagem da liga	Os autores, utilizaram insertos do tipo RDHT revestidos por processos PVD (inserto PH7930) e CVD (inserto PH5740) e o carboneto de tungsténio foi utilizado como substrato. Foram utilizados parâmetros recomendados pelo fabricante. O desgaste foi avaliado através de ensaios SEM, de rugosidade e de vibrações. As conclusões dos autores foram as seguintes: <ul style="list-style-type: none"> • Não se verificou influência significativa da variação de parâmetros na qualidade superficial do material

GX2CrNiMoN26-7-4 de aço inoxidável duplex [61].	<p>maquinado, independentemente do revestimento utilizado;</p> <ul style="list-style-type: none"> • Com o aumento do comprimento de corte, os revestimentos degradaram-se mais, no entanto não se verificou grande influência na qualidade superficial do material maquinado; • Verificou-se que após a deterioração dos revestimentos PVD e CVD, o substrato degradou-se muito na área de contacto com a superfície da peça de trabalho, o que permitiu concluir que a maior permanência do revestimento durante a maquinagem, resulta em melhor qualidade superficial do material maquinado; • O substrato utilizado no processo CVD, deteriorou-se mais facilmente que o utilizado no processo PVD, no entanto, não apresentou consequências na qualidade superficial do material maquinado.
Comportamento do desgaste à micro abrasão de revestimentos nano-estruturados de TiAlCrSiN [62].	<p>Neste estudo, os autores utilizaram uma ferramenta de aço AISI P20 como substrato.</p> <p>Foi medida a dureza Vickers, a resistência ao desgaste foi analisada com um tribómetro de esfera rotativa. O substrato e topografia foram analisadas por técnicas de profilometria e microscopia de força atômica e, a adesão do filme ao substrato foi realizado através de testes de raspagem.</p> <p>Neste estudo, foi concluído o seguinte:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Em comparação com o substrato não revestido, a resistência ao desgaste aumentou em 50%; • Os revestimentos TiAlCrSiN baseados em duas camadas (CrN + TiAlCrSiN nano-estruturado), apresentaram melhor adesão ao substrato.
Resistência ao desgaste de revestimentos TiAlSiN [63].	<p>Neste estudo, foi utilizado um substrato de aço AISI P20 e, a rugosidade, espessura do revestimento, morfologia, estrutura e composição química, dureza e adesão do filme ao substrato foram analisadas.</p> <p>Os autores concluíram o seguinte:</p> <ul style="list-style-type: none"> • A monocamada de TiAlSiN apresenta boa adesão ao substrato e boa resistência ao desgaste abrasivo; • Em ambiente industrial, a ferramenta revestida com TiAlSiN durou 25 vezes mais tempo que o substrato não revestido; • Os parâmetros utilizados no processo do revestimento, influenciaram negativamente a

morfologia do revestimento e o seu comportamento ao desgaste;

- A dureza medida do revestimento, foi menor à verificada na literatura.

2.3 Desgaste em ferramentas de fresagem


2.3.1 Tipologias de desgaste

O desgaste das ferramentas leva à falha da ferramenta, num mecanismo complicado e depende do material e geometria da mesma, material a maquinar, parâmetros de corte, fluidos de corte e características da máquina-ferramenta. A falha da ferramenta, pode ocorrer por [64-68]:

- Difusão – ocorre quando a temperatura gerada nas interfaces ferramenta-peça e apara-ferramenta, promove a interpenetração de átomos no estado sólido na superfície contrária;
- Adesão – ocorre devido à ligação localizada entre a apara e a ferramenta em contacto, levando à transferência de material entre ambas as superfícies ou a perda de qualquer uma das superfícies;
- Abrasão – este tipo de desgaste ocorre quando zonas duras da apara ao passar na face da ferramenta, removem material por abrasão mecânica;
- Oxidação – é um tipo de desgaste que ocorre quando existe transferência de iões entre a ferramenta e a peça de trabalho, levando à oxidação da superfície da ferramenta.

Na Tabela 9, é possível verificar diferentes tipos de ferramentas desgastadas e uma descrição relativa a cada um dos tipos de desgaste.

Tabela 9 - Exemplo de ferramentas desgastadas e respetiva descrição do desgaste.

Ferramenta desgastada	Tipo de desgaste
 <p>[69]</p>	<p>Desgaste de flanco – O desgaste do flanco permite ter uma previsão do estado da ferramenta e ocorre geralmente no flanco principal por ação abrasiva da peça de trabalho, ou partículas do material de corte removidas por adesão [37,70]. Este tipo de desgaste vai depender da diferença de dureza entre a ferramenta de corte e a peça de trabalho [37].</p>

Este tipo de desgaste aumenta a tendência da ferramenta a vibrar e posição da ferramenta em relação à peça de trabalho [64].



[69]

Craterizações – É um tipo de desgaste que ocorre na face da ferramenta na maquinagem de materiais dúcteis [64]. Aumenta com a velocidade de corte, não influencia a rugosidade superficial, é um indicativo do fim de vida da ferramenta, e também enfraquece a resistência da ferramenta. Pode aumentar o ângulo de ataque e reduzir a força de corte [37,64].



[69]

Aresta postiça – A formação da aresta postiça ocorre rapidamente durante o processo de corte. Durante a maquinagem, a apanha flui ao longo da ferramenta e, por conseguinte, pequenas partículas de metal (provenientes da apanha) aderem à ferramenta de corte, podendo alterar a geometria da ferramenta [64,71].

Vários destes fragmentos acumulados, irão aderir à superfície da peça maquinada, provocando um mau acabamento superficial [37].

No entanto, quando em condições estáveis e em que não se verifique o desenvolvimento da aresta postiça, poderá proteger a ferramenta do desgaste [37].



[69]

Desgaste tipo entalhe – Ocorre localmente na área da aresta de corte principal, onde entra em contacto com a superfície da peça de trabalho. É provocado por camadas de superfície dura e rebarbas endurecidas [64].



[69]

Deformação plástica – Este tipo de desgaste, pode ser observado quando a ferramenta de corte está a uma alta temperatura e não consegue suportar a compressão na aresta de corte [37].



[69]

Trincas térmicas – As trincas térmicas ocorrem na aresta de corte devido ao choque térmico provocado entre intervalos de operações de corte [64].



[69]

Quebra da aresta – A quebra da aresta da ferramenta de corte, é provocada pelo alto avanço e parametrização incorreta, provocando uma má qualidade superficial [72].

Na Tabela 10, podem verificar-se alguns estudos em que é analisado o desgaste de ferramentas por diferentes autores.

Tabela 10 - Diferentes estudos de desgaste de ferramentas.

Autor / Autores	Análise e conclusões
Estudo dos parâmetros de corte no tempo de vida e tipologias de desgaste em ferramentas CBN no facejamento a alta velocidade de aço AISI H13 endurecido [73].	Os autores, utilizaram uma fresa Seco R220.74-0063-09-6 com 125 mm e insertos SNGN 090308 S-01020 CBN100 e, o material foi maquinado entre 400 e 1600 m/min. As conclusões dos autores foram as seguintes: <ul style="list-style-type: none"> • Aos 400 m/min, verificou-se um desgaste adesivo e abrasivo nos flancos; • Aos 1600 m/min, observou-se um grande desgaste na face de ataque; • Na generalidade dos ensaios, o aumento da velocidade de corte, traduziu-se numa diminuição do tempo de vida das ferramentas.
Análise das forças de corte e desgaste de ferramentas de nitreto de silício	Os autores tornearam ferro fundido cinzento e analisaram o desgaste utilizando uma ferramenta CRSNR 2525M 09-ID para torneamento. Os ensaios foram realizados às velocidades de 500, 700 e 900 m/min com avanços de 0,1, 0,25 e 0,4 mm/rot e uma profundidade de corte constante de 1 mm.

revestidas com diamante [74].	<p>Deste estudo, foi concluído o seguinte:</p> <ul style="list-style-type: none">• Devido às altas temperaturas geradas, ocorreu o fenómeno de difusão na aresta de corte;• Na aresta de corte verificou-se desgaste abrasivo;• Em diferentes zonas da face de ataque, observou-se difusão, adesão e difusão.
Influência de micro texturas na superfície da ferramenta de corte na resistência a craterizações e ao desgaste de flanco [75].	<p>Neste estudo, os autores geraram microtexturas numa face de ataque de uma ferramenta WC-Co (SEKN42MT) sem revestimento, utilizando um <i>laser</i> de femtossegundos. Foi maquinado um aço de médio carbono para este estudo.</p> <p>As conclusões deste estudo foram as seguintes:</p> <ul style="list-style-type: none">• Verificou-se que a largura da área convexa e côncava das texturas, influencia a resistência ao desgaste na face de ataque;• Utilizando uma faixa na micro textura, conseguiu-se melhorar o desgaste na generalidade e suprimir a craterização, na maquinação sem lubrificação.
Estudo da influência das posições relativas da ferramenta e peça de trabalho no desgaste das ferramentas e qualidade superficial [5].	<p>Os autores, maquinaram aço AISI 1045 e, com inserto de código ISO SEKR 1204AZ-WM P25 e uma fresa de facejamento de código ISO R260 22-125-157. Mediram a rugosidade superficial da peça de trabalho, o desgaste de flanco ao longo dos ensaios e fizeram uma análise por SEM.</p> <p>As conclusões dos autores foram as seguintes:</p> <ul style="list-style-type: none">• As posições relativas da ferramenta e peça de trabalho não têm influência na rugosidade superficial no início do tempo de vida da ferramenta;• A aresta de corte primária não possuía nenhuma relação com a rugosidade da superfície da peça de trabalho;• A rugosidade da superfície aumentou durante a vida útil da ferramenta, devido ao desgaste da aresta de corte secundária.
Correlação da rugosidade da superfície, do desgaste da ferramenta e a vibração da ferramenta na fresagem de aço endurecido [76].	<p>Neste trabalho, maquinou-se aço AISI H13, utilizando ferramentas com insertos e ferramentas integrais a diferentes alturas e com diâmetros distintos. Os autores avaliaram o desgaste das ferramentas, a rugosidade superficial e as forças de corte.</p> <p>Foram utilizadas quatro ferramentas esféricas, duas integrais e outras duas com insertos de carbonetos sinterizados revestidos com TiAlN.</p> <p>As conclusões tiradas deste estudo foram as seguintes:</p>

- Após 400 minutos de maquinagem, o desgaste não foi significativo para as ferramentas, o desgaste de flanco era baixo e a geometria das ferramentas não sofreu alterações significativas. A rugosidade superficial também não aumentou significativamente com o tempo de maquinagem;
- O desgaste provocou um aumento no batimento da ferramenta ao longo do tempo. Mas, o maior valor do batimento radial, não mostrou influenciar a rugosidade da superfície da peça de trabalho;
- O desgaste da ferramenta, apesar de mínimo, influenciou na instabilidade das ferramentas, fazendo com que a rugosidade da peça de trabalho aumentasse ao longo do tempo de corte.

Análise do desgaste de ferramentas de topo esféricas em operações de maquinagem (acabamento) [77].

Nesta investigação, os autores avaliam o desempenho da maquinagem por acabamento de um aço equivalente aos aços W 1.2311 e W 1.2738, utilizando uma ferramenta de topo esférica de dois canais, com insertos de carboneto de tungsténio (94% WC + 6% Co) revestidos com uma camada de TiCN.

É analisado, essencialmente, o desgaste de flanco.

As conclusões desta investigação, foram as seguintes:

- O desgaste abrasivo é o modo de falha mais predominante;
- A perda do revestimento aumenta drasticamente o desgaste de flanco;

O tempo de vida da ferramenta, nas condições de corte utilizadas, pode atingir os 400 m de comprimento de corte, para um desgaste de flanco fixo de 0,2 mm.

Estudo comparativo do desempenho de ferramentas revestidas a CVD e PVD [78].

Neste estudo, os autores fazem uma comparação de dois insertos revestidos a CVD (TiN/TiCN/Al₂O₃) e PVD (AlTiN) na maquinagem de aço inoxidável *duplex* utilizando análise de rugosidade, avaliação do desgaste das ferramentas e a monitorização dos níveis de vibração ao longo dos ensaios.

As conclusões deste estudo são as seguintes:

- Os insertos PVD mostraram um comportamento mais frágil em comparação com os insertos CVD;
- Os insertos de PVD mostraram ser mais eficazes para acabamentos;
- Os resultados para os insertos de CVD mostraram baixo desgaste, porém, uma baixa qualidade superficial;

Os insertos com o mesmo revestimento, mostram baixa sensibilidade à variação do comprimento de corte.

2.3.2 Metodologias de caracterização

O desgaste das ferramentas é algo que, quando analisado nas condições específicas de trabalho, permite obter um melhor conhecimento do processo, e, deste modo, conseguir saber quais os parâmetros mais adequados para a maquinagem. Estudar quais as ferramentas mais eficazes para executar os diferentes projetos, conseguir prever o tempo de vida das ferramentas e atingir um compromisso entre uma boa qualidade superficial, dimensional e tempo de vida das ferramentas é a chave para ganhar competitividade no mercado.

Para ser possível realizar este tipo de estudos, é necessária a utilização de técnicas que sejam eficazes e capazes de quantificar o desgaste das ferramentas e o impacto do desgaste da ferramenta na superfície da peça de trabalho.

Variados métodos poderão ser utilizados, sendo o mais simples de todos, a análise visual, por exemplo, no fim da maquinagem, verificar se a ferramenta se encontra danificada, com o revestimento lascado, se apresenta descoloração provocada por gradientes de temperaturas, etc., tal como a qualidade visual da peça de trabalho [79].

A medição de rugosidade da superfície da peça de trabalho, também é um processo que permite avaliar se os parâmetros de corte estão a garantir uma qualidade superficial desejada. Em paralelo a esta análise, um processo de caracterização do desgaste da ferramenta, poderá auxiliar na obtenção de dados concretos para permitir uma atuação no processo de maquinagem, como por exemplo, a utilização da microscopia eletrónica de varrimento (SEM) ou a espetroscopia de raios X por dispersão de energia (EDS) [80-82].

Após todos os temas abordados nesta revisão bibliográfica, espera-se que estes permitam introduzir o leitor ao desenvolvimento do trabalho prático, que será apresentado no próximo capítulo.

DESENVOLVIMENTO

3.1 Materiais e métodos

3.2 Resultados

3 DESENVOLVIMENTO

No que concerne a parte experimental deste trabalho, um bloco de aço W 1.2711 foi maquinado, utilizando quatro tipos de ferramentas, fresas de topo e esféricas com revestimentos PVD de TiAlN e TiAlSiN.

A maquinação foi realizada num centro de maquinação Haas VF2, capaz de atingir 10 000 rpm e um máximo de 20 kW de potência. O centro de maquinação possuía um dinamómetro rotativo acoplado no *spindle* da máquina e um sistema de aquisição de sinais, permitindo a medição das forças nos três eixos (X, Y e Z), tal como a medição do momento. Na Figura 6, pode verificar-se o *setup* experimental.

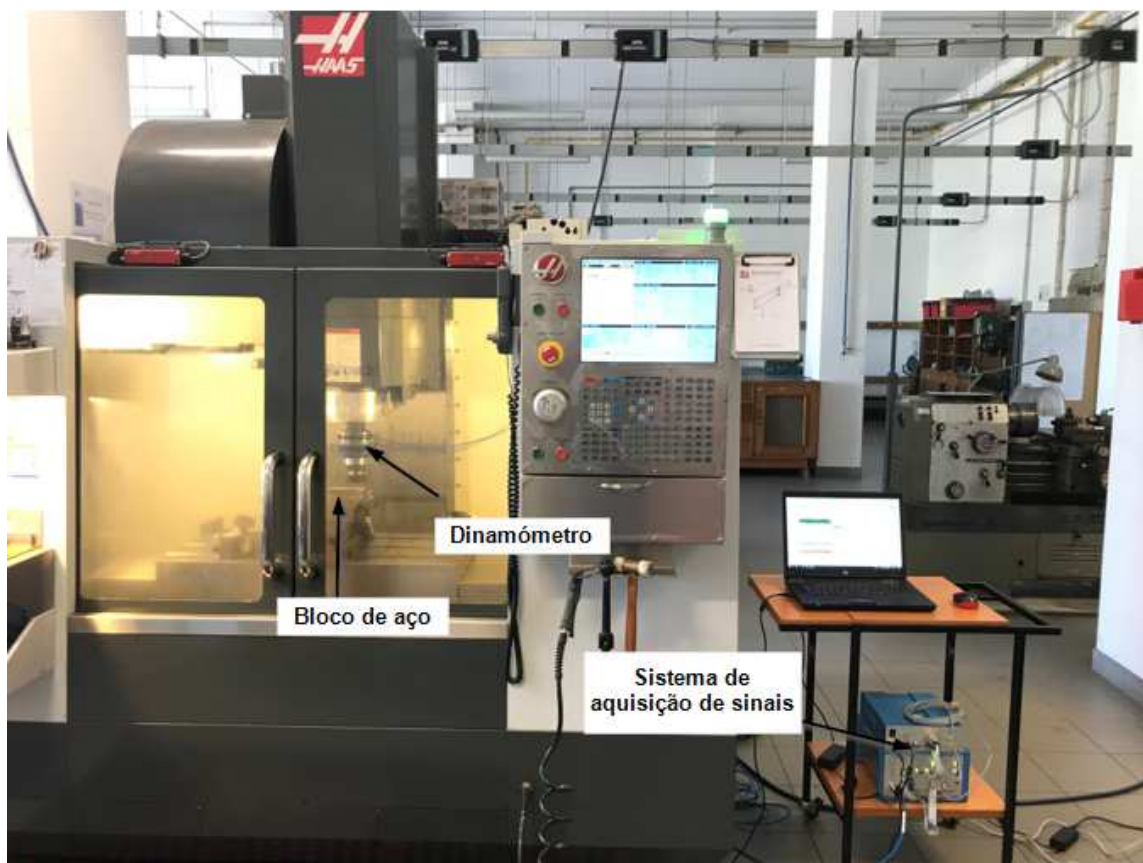


Figura 6 - *Setup* experimental.

O bloco de aço, possuía um comprimento de 155 mm e uma largura de 44 mm. Inicialmente, foi efetuado um facejamento na face superior do bloco, garantindo que a superfície estaria uniforme para serem iniciados os ensaios e, no *setup* desta etapa, foi colocado um calço na base do centro de maquinação para ser possível replicar as

condições de posicionamento ao longo dos restantes ensaios. Na Figura 7, pode observar-se o bloco na máquina após o facejamento.



Figura 7 - Bloco de aço após facejamento.

Após a preparação do bloco, definiu-se uma estratégia de maquinagem para ser utilizada em todos os ensaios. Depois disto, definiram-se uns parâmetros iniciais para avaliar o resultado do desgaste nas ferramentas e ajustar novamente os parâmetros consoante os resultados obtidos.

3.1 Materiais e métodos

3.1.1 Materiais

Ferramentas

As ferramentas utilizadas, tinham como substrato um carboneto sinterizado WC-Co com cerca de 0,3 μm de grão com 6% Co como ligante. As ferramentas possuem 4 mm de diâmetro, com um comprimento total de 68 mm e quatro arestas de corte. Na Figura 8, pode visualizar-se um exemplo das ferramentas utilizadas.



Figura 8 - Exemplo de fresas utilizadas nos ensaios.

O revestimento das ferramentas (TiAlN e TiAlSiN), foi efetuado pelo processo PVD num equipamento CemeCom CC800 / 9ML PVD *Unbalanced Magnetron Sputtering*. Na Tabela 11, podem ser verificados os parâmetros de deposição.

Tabela 11 - Parâmetros utilizados na deposição dos revestimentos.

Parâmetros	Revestimento TiAlN	Revestimento TiAlSiN
Tempo de deposição [minutos]	240	240
Gases do reator	Ar ⁺ + Kr + N ₂	Ar ⁺ + Kr + N ₂
Material do alvo	TiAl 40/60	TiAlSi 38/57/5
Pressão [mPa]	580	580
Temperatura [°C]	450	450
Tensão [V]	-110	-110
Densidade de corrente do alvo [A/cm ²]	18,2	18,2
Velocidade de rotação do suporte [rpm]	1	1

Após os ensaios, as ferramentas foram recolhidas e manuseadas cuidadosamente para evitar contaminações. Depois disso, foram sujeitas a um processo de limpeza por ultrassons para remover as contaminações e preparar a superfície das ferramentas para a análise por SEM.

O procedimento utilizado para a limpeza das ferramentas foi simples: estas foram colocadas num gobelé com acetona e foram submetidas a uma limpeza ultrassónica durante 15 minutos. No fim deste tempo, foi efetuada uma troca de acetona no gobelé, para remover as contaminações da primeira lavagem, e sujeitaram-se as ferramentas a mais um banho ultrassónico durante 5 minutos. Foi tido o cuidado de manter as ferramentas afastadas entre si, para evitar o contacto e possíveis contaminações.

Bloco de aço

O material maquinado, é um aço ferramenta do tipo W 1.2711 (54NiCrMoV6) com dureza média 420 ± 40 HV5. Este foi fornecido no estado pré endurecido e, segundo o fabricante (ArcelorMittal), possui uma dureza de 390 HV5. É um aço utilizado principalmente no fabrico de moldes e de ferramentas de corte. A informação relativa à informação química do aço, pode encontrar-se na Tabela 12.

Tabela 12 - Composição química (% em massa) do aço W 1.2711.

C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	S _{max}	P _{max}
0,55	0,30	0,70	1,7	0,70	0,30	0,070	0,0070	0,0020

3.1.2 Métodos

3.1.2.1 *Preparação das amostras*

As ferramentas, de modo a poderem ter os revestimentos analisados, foram cortadas utilizando uma serra de disco STUERS MINITOM com um disco fino revestido com partículas de diamante eletrodepositadas. Após o corte, as amostras foram embebidas em resina termoendurecível e prensadas a quente, num equipamento STRUERS PEDOPRESS. Depois disto, as amostras foram lixadas utilizando lixas diferentes, num processo em que o grão das lixas foi diminuindo pela seguinte ordem: 220, 500, 800 e 1200 [grãos/cm²]. No término de cada operação de lixamento, antes da troca de lixa, as amostras foram rodadas 90°, de modo a remover imperfeições que existissem na superfície. Para aprimorar e finalizar esta preparação, foram efetuados dois polimentos utilizando pastas de diamante de 3 µm e 1 µm, nesta ordem com uso de um lubrificante (Aka-Lube Green) para minimizar a utilização do abrasivo de diamante e cada polimento teve a duração de 5 minutos.

3.1.2.2 *Análise da espessura dos revestimentos*

A medição da espessura dos revestimentos foi realizada num microscópio eletrónico de varrimento, FEI QUANTA 400 FEG, com um sistema de microanálise de espectroscopia de raios X por dispersão de energia. Foi utilizado um feixe de energia de 15 kV, porém, foi reduzido para 10 kV de modo a reduzir o ruído no espetro.

A composição química dos revestimentos, também foi efetuada utilizando a espectroscopia de raios X por dispersão de energia.

3.1.2.3 Ensaios de maquinagem

Os ensaios de maquinagem, foram realizados de modo a entender quais as diferenças de comportamento ao desgaste e qualidade da superfície maquinada entre os dois tipos de revestimentos utilizados e, qual revestimento que terá o melhor desempenho nesses mesmos ensaios. Todos os ensaios foram realizados a seco, pois os revestimentos utilizados neste trabalho foram especialmente projetados para condições de maquinagem a seco.

Para tal, foram realizados 3 ensaios para cada conjunto de parâmetros da Tabela 13, para calcular valores médios e melhorar a consistência dos resultados. A estratégia de maquinagem utilizada, pode ser visualizada na Figura 9.

Tabela 13 - Parâmetros utilizados para os ensaios.

Ferramenta/ Amostra	Revesti- mento	Ferrame nta	Velocidade de corte	Avanço /dente	Número de dentes	Profundidad e de corte	Comprimento de corte
Identificação	Tipo	Fresa de topo	m/min	mm/ dente		mm	m
T01FTS404_1	TiAlN	Fresa de topo	40	0,0147	4	3	4
T01FTS404_2	TiAlN	Fresa de topo	40	0,0147	4	3	4
T01EFS404_1	TiAlN	Esférica	40	0,0147	2	3	4
T02EFS404_1	TiAlSiN	Esférica	40	0,0147	2	3	4
T02FTS404_1	TiAlSiN	Fresa de topo	40	0,0147	4	3	4

A seleção destes parâmetros foi efetuada de acordo com as informações fornecidas pelo fabricante.

Após os ensaios, todas as ferramentas foram armazenadas e cuidadosamente acondicionadas, tendo sido evitado qualquer fonte possível de contaminação com as zonas das faces das ferramentas a analisar.

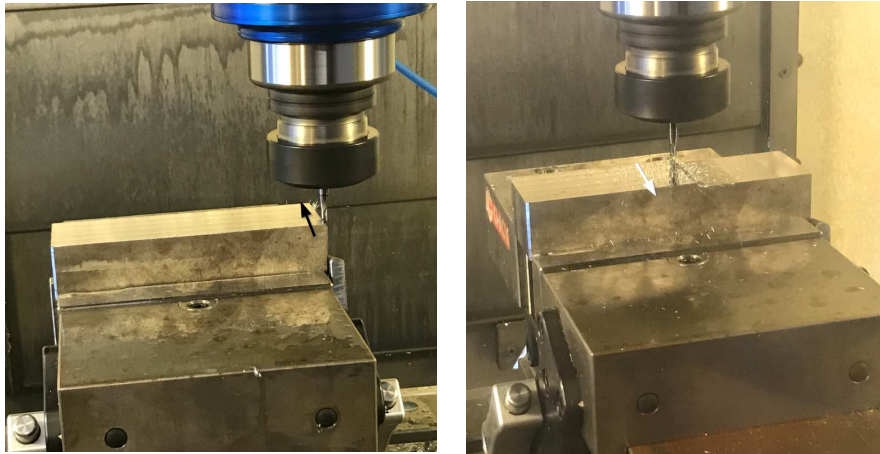


Figura 9 - Representação da estratégia de maquinagem, à esquerda, ponto de entrada da ferramenta e direção inicial, à direita, ponto de saída da ferramenta e direção após reentrada na peça de trabalho.

3.1.2.4 *Análise das forças de corte*

Foi utilizado um dinamómetro KISTLER 9171A acoplado a um dispositivo de aquisição de sinal KISTLER 5697A1, permitindo a obtenção das forças nos três eixos, X, Y e Z e do momento (M_z).

Tendo em conta a possibilidade de ocorrerem harmónicos, devido à frequência de aquisição do sistema e à frequência de rotação do spindle, que poderiam comprometer a qualidade da informação adquirida, foi selecionada uma frequência de aquisição que permitisse obter a informação necessária para a análise desejada e, ao mesmo tempo, evitar frequências próximas à de rotação.

A Figura 10, permite observar mais detalhadamente, a composição do sistema de aquisição de dados utilizado nos ensaios.

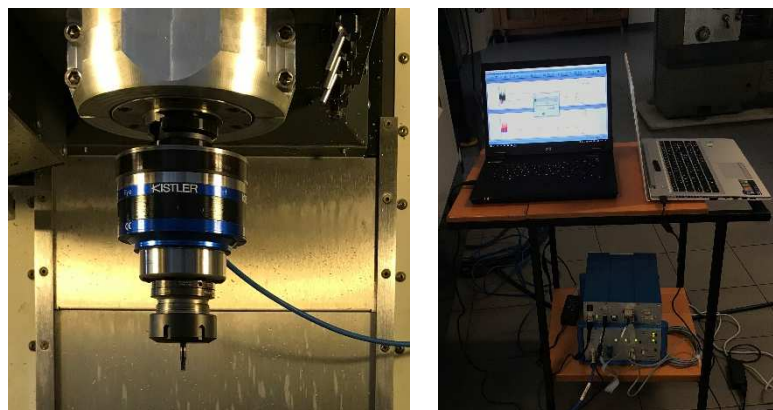


Figura 10 - Sistema de aquisição de dados. à esquerda, o dinamómetro KISTLER 9171A, à direita, o sistema de aquisição de dados KISTLER 5697A1 e o computador adquirindo a informação.

3.1.2.5 *Análise das rugosidades*

A análise das rugosidades foi fundamental ao longo deste trabalho, pois, após os ensaios, foi possível ter uma informação quase imediata sobre a qualidade superficial

do bloco. Deste modo, permitiu ajudar a entender quais os parâmetros e condições que melhor qualidade superficial era gerada para cada ferramenta.

Cada ensaio de rugosidade foi efetuado com um rugosímetro MAHR PERTHOMETER M2 e apalpador NHT6-100, de acordo com a norma DIN EN ISO 4288, com um cut-off de 0,8 mm.

Previamente a cada medição, a agulha do rugosímetro e a superfície a ser medida foram limpas com um pano para evitar contaminações entre ensaios. Teve-se também o cuidado de procurar manter a perpendicularidade entre a agulha e a superfície do bloco, de modo a controlar a repetibilidade entre medições e ensaios.

As medições, foram realizadas no sentido longitudinal e transversal, como se pode observar na Figura 11.



Figura 11 – Montagem utilizada para a medição da rugosidade. À esquerda, medição no sentido transversal, à direita, medição no sentido longitudinal.

No total foram efetuadas 10 medições: cinco medições no sentido transversal e cinco no sentido longitudinal (em zonas diferentes da superfície maquinada do bloco de aço).

3.1.2.6 Análise do desgaste das ferramentas

A análise das ferramentas foi efetuada com o auxílio da microscopia eletrónica de varrimento.

Foi possível analisar o desgaste de flanco de cada ferramenta nas faces de entrada e de ataque e, para manter consistência nas análises, foi seguida a referência indicada na Figura 12.

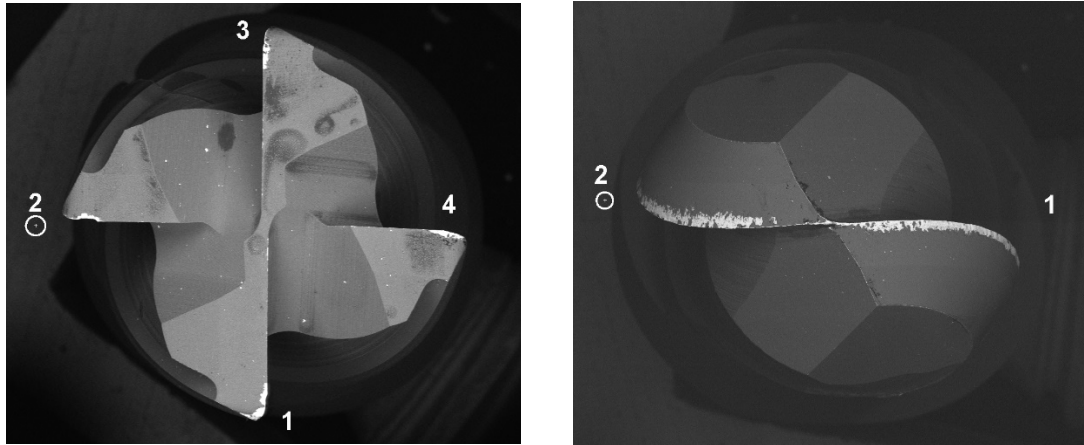


Figura 12 - À esquerda, referência utilizada para a análise das arestas das fresas de topo, à direita, referência utilizada para a análise das arestas das fresas esféricas.

A numeração utilizada na Figura 12, tem como propósito identificar as faces de ataque e de saída.

A medição do desgaste das ferramentas, foi efetuada de acordo com a norma ISO 8688-2:1986.

3.1.3 Equipamento de caracterização do desgaste

Nos ensaios realizados para a medição da rugosidade, utilizou-se um rugosímetro Perthometer M2 fabricado pela Mahr. Este equipamento está preparado para apresentar parâmetros e curvas de características segundo as normas DIN/ISO/JIS. Na Figura 13, pode observar-se o rugosímetro utilizado.



Figura 13 – Rugosímetro Mahr - Perthometer M2.

Características [83]:

- Resolução de medição de 150 μm ;
- Normas: DIN/ISO/JIS e CNOMO como opções a utilizar;
- Distâncias transversais conforme a norma DIN EN ISO 4288/ASME B46: 1,75 mm, 5,6 mm, 17,5 mm; conforme a norma EN ISO 12085: 1 mm, 2 mm, 4 mm, 8 mm, 12 mm, 16 mm;
- Número de comprimentos de amostragem selecionáveis entre 1 e 5;
- Seleção automática de filtro e distâncias transversais conforme a norma;
- Filtro de correção de fase conforme DIN EN ISO 11562;
- *Cut-off* 0,25 mm / 0,80 mm / 2,50 mm;
- Controlo de tolerâncias no monitor e registo de medições;
- Controlo de escala automático ou ajustável;
- Impressão de perfil R, perfil P, curva de Abbot-Firestone, registo de medição.

Na análise microscópica das ferramentas, foi utilizado um microscópio eletrónico de varrimento, FEI QUANTA 400 FEG, como se pode observar na Figura 14.



Figura 14 - FEI QUANTA 400 FEG do CEMUP [84].

Este microscópio possui uma resolução de 1,2 nm e os modos de imagem podem ser obtidos por sensores de elétrons secundários ou elétrons retrodifundidos [84].

3.2 Resultados

3.2.1 Espessura do revestimento

A medição da espessura dos revestimentos, foi realizada através do SEM. Esta espessura, foi calculada através do valor médio medido durante as análises do SEM (Figura 15).

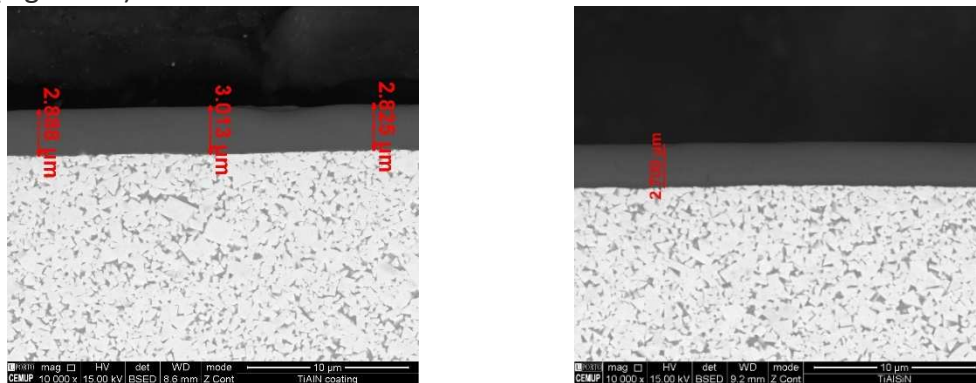


Figura 15 - Medição dos revestimentos. À esquerda, TiAlN, à direita, TiAlSiN.

O valor médio da espessura dos revestimentos, foi de 2,736 μm para o TiAlN e 2,895 μm para o TiAlSiN. Os valores são muito semelhantes, reflexo dos parâmetros de deposição serem semelhantes para ambos.

3.2.2 Forças de corte

Durante os ensaios, a informação das forças e momento foi adquirida em tempo real e, no término da maquinagem, estes dados foram guardados pelo *software*.

No caso das ferramentas, T01EFS404_1 e T02EFS404_1, ocorreu um erro do *software* na fase final dos ensaios, e não foi possível guardar os dados obtidos.

Então, na Tabela 14, estão representados os dados das forças e momentos medidos para as diferentes ferramentas.

Tabela 14 - Forças máximas e momentos máximos obtidos para os ensaios das ferramentas.

Ferramenta/ Amostra	F_x Máxima	F_y Máxima	F_z Máxima	M_z Máximo
Identificação	N	N		Nm
T01FTS404_1	$4,005 \pm 0,287$	$3,680 \pm 0,256$	$4,335 \pm 0,324$	$0,140 \pm 0,010$
T01FTS404_2	$4,323 \pm 0,319$	$4,061 \pm 0,284$	$4,593 \pm 0,367$	$0,150 \pm 0,012$
T02FTS404_1	$7,566 \pm 0,518$	$5,012 \pm 0,401$	$3,300 \pm 0,264$	$0,088 \pm 0,007$

Pela observação da Tabela 14, pode-se verificar que na generalidade, as forças obtidas são muito baixas, resultado dos parâmetros utilizados, do aço maquinado não ser muito duro e da apara ser diminuta.

Ao comparar todos os resultados, pode observar-se que as forças e momento são muito semelhantes para as ferramentas revestidas a TiAlN.

No entanto, para a ferramenta T02FTS404_1 revestida com TiAlSiN, as suas forças em F_x e F_y foram superiores a todas as ferramentas do revestimento TiAlN, ensaiadas.

A partir dos 2 metros de corte, foi possível observar um aumento nas forças, podendo ser possivelmente devido ao desgaste mais acentuado das ferramentas. Neste sentido, vão ser apresentados exemplos de gráficos da evolução das forças (em X, Tabela 15, em Y, Tabela 16, em Z, Tabela 17) e momento (Tabela 18).

Tabela 15 - Representação das forças em X.

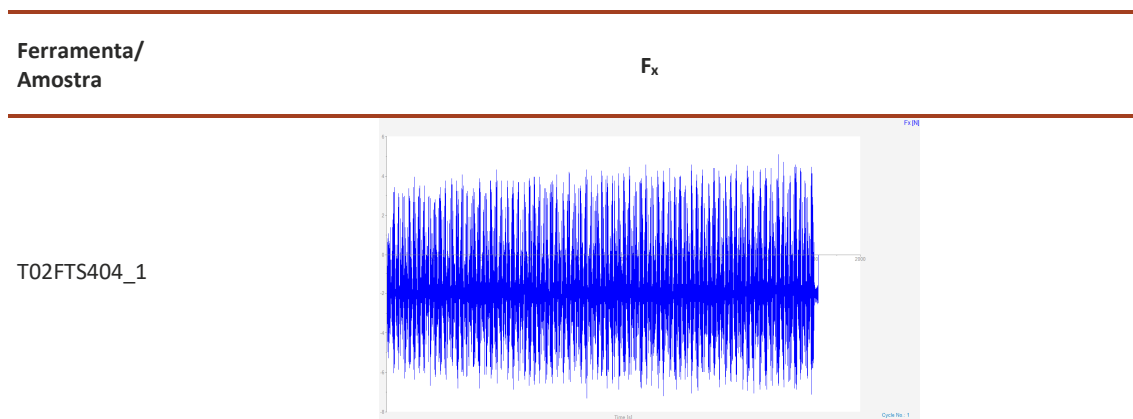


Tabela 16 - Representação das forças em Y.

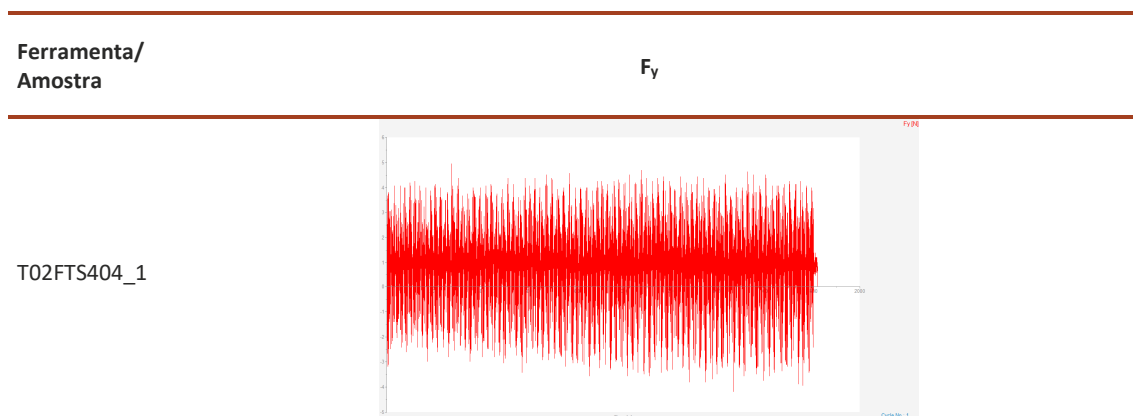


Tabela 17 - Representação das forças em Z.

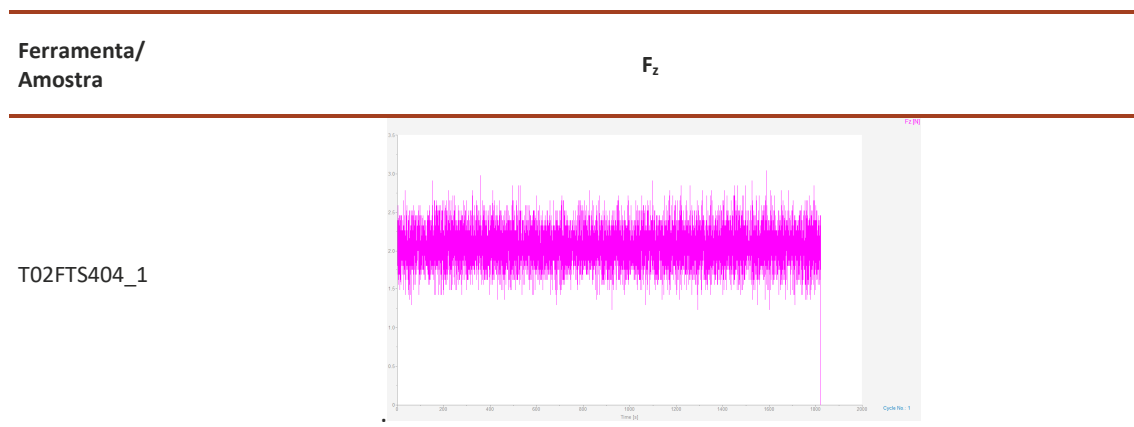
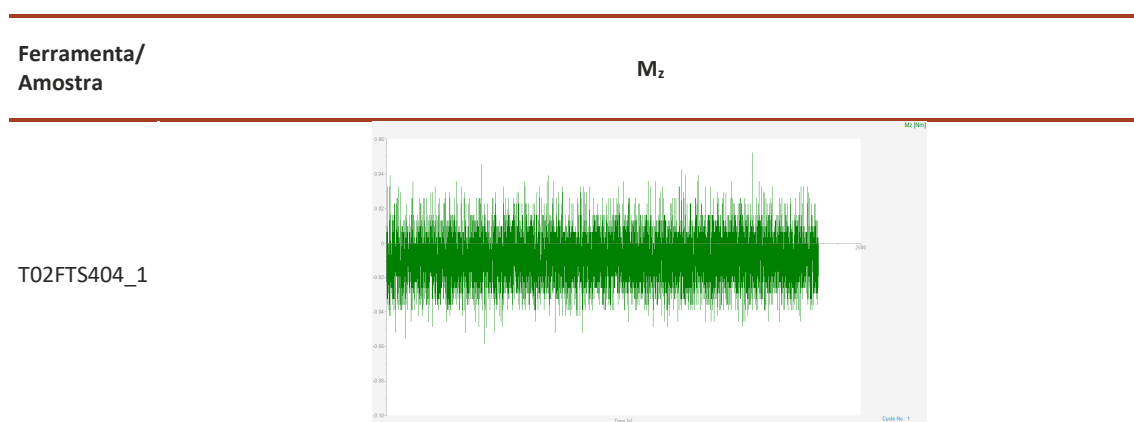


Tabela 18 - Representação do momento.



Como se pode observar pelas tabelas representadas, a partir dos 2 metros de corte algumas forças começam a subir, o que poderá ser um indicativo de que esteja a ocorrer a falha da ferramenta e o substrato a começar a efetuar grande parte do corte.

3.2.3 Rugosidade Superficial

A rugosidade superficial foi medida nas direções transversal e longitudinal do bloco, como se pode visualizar na Figura 11.

A média das medições obtidas para o valor de R_a para os ensaios realizados, encontra-se na Tabela 19.

Tabela 19 - Resultados das medições de rugosidade.

Ferramenta/ Amostra	Rugosidade média transversal	Rugosidade média longitudinal
Identificação	μm	μm
T01FTS404_1	$0,699 \pm 0,167$	$0,663 \pm 0,336$
T01FTS404_2	$0,323 \pm 0,015$	$0,356 \pm 0,036$
T01EFS404_1	$0,203 \pm 0,052$	$0,637 \pm 0,081$
T02EFS404_1	$0,218 \pm 0,053$	$1,185 \pm 0,071$
T02FTS404_1	$0,308 \pm 0,071$	$0,235 \pm 0,031$

Na Figura 16, pode observar-se uma comparação entre as fresas de topo.

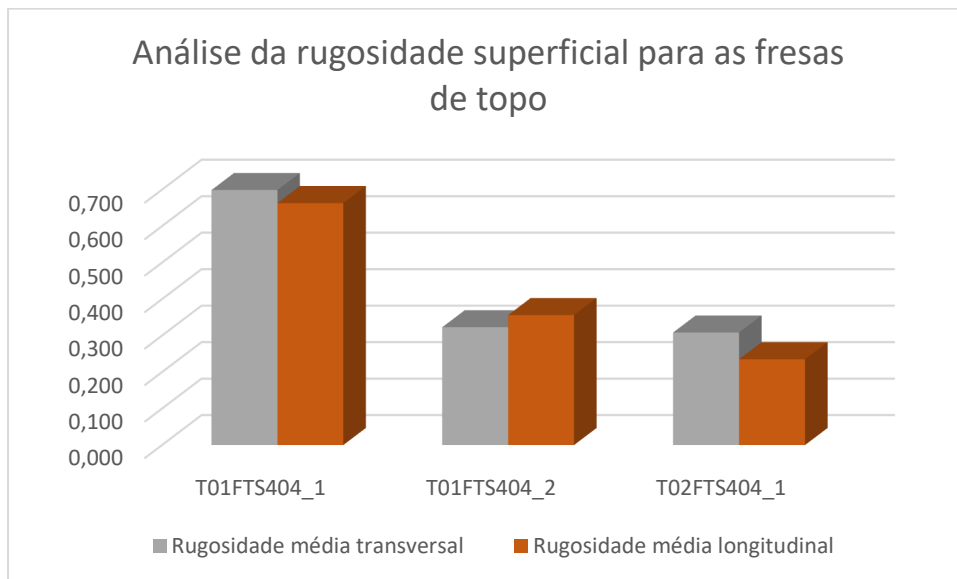


Figura 16 - Comparação entre as rugosidades para as diferentes fresas de topo.

É possível verificar, pela análise da Figura 16 que, no ensaio T01FTS404_1 verificaram-se valores muito elevados para as rugosidades médias, acima de $0,650 \mu\text{m}$ para a rugosidade longitudinal e transversal. Apesar de as forças para este ensaio não terem sido muito diferentes das outras ferramentas semelhantes, isto poderá ter ocorrido devido ao desgaste prematuro da ferramenta.

No entanto, a fresa de topo com o revestimento TiAlSiN (T02FTS404_1), apresentou rugosidades semelhantes à obtida para o ensaio com revestimento TiAlN (T01FTS404_2).

A Figura 17, mostra uma comparação entre as fresas esféricas.

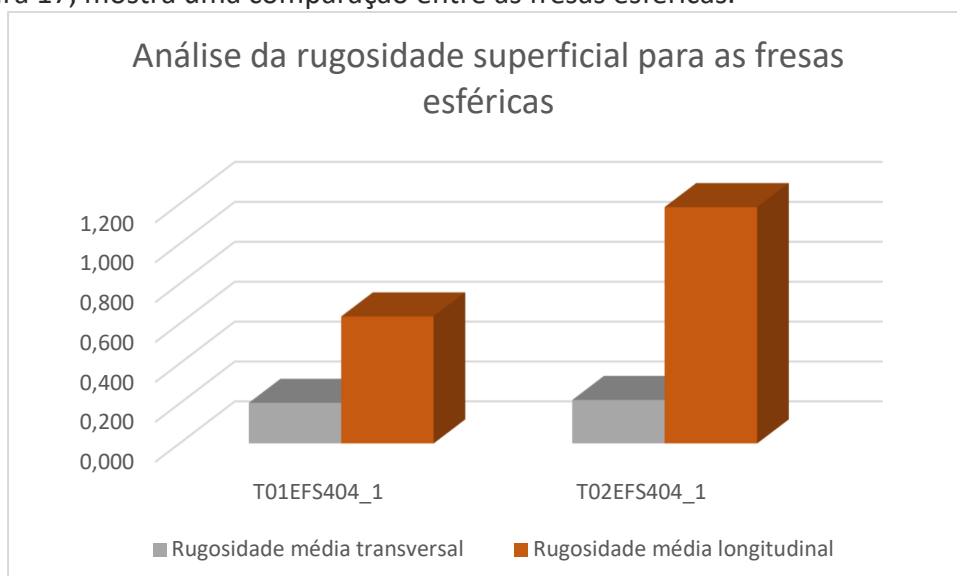


Figura 17 - Comparação entre as rugosidades para as diferentes fresas esféricas.

Analisando a Figura 17, é possível observar um padrão que é a rugosidade média transversal ser menor que a rugosidade longitudinal nos ensaios realizados.

A grande disparidade entre estas duas rugosidades, poderá indicar que ocorre maior esforço a ser realizado num dos eixos durante a maquinagem, refletindo-se, deste modo, na qualidade superficial do material.

3.2.4 Análise do desgaste

Medição do desgaste

A análise do desgaste de flanco, será apresentada para cada um dos diferentes conjuntos de ensaios. Irá, também, ser apresentada uma representação gráfica comparando o nível de desgaste de flanco com o revestimento das ferramentas.

As medições foram efetuadas de acordo com a norma ISO 8688-2: 1989, como se pode verificar no exemplo dado na Figura 18.

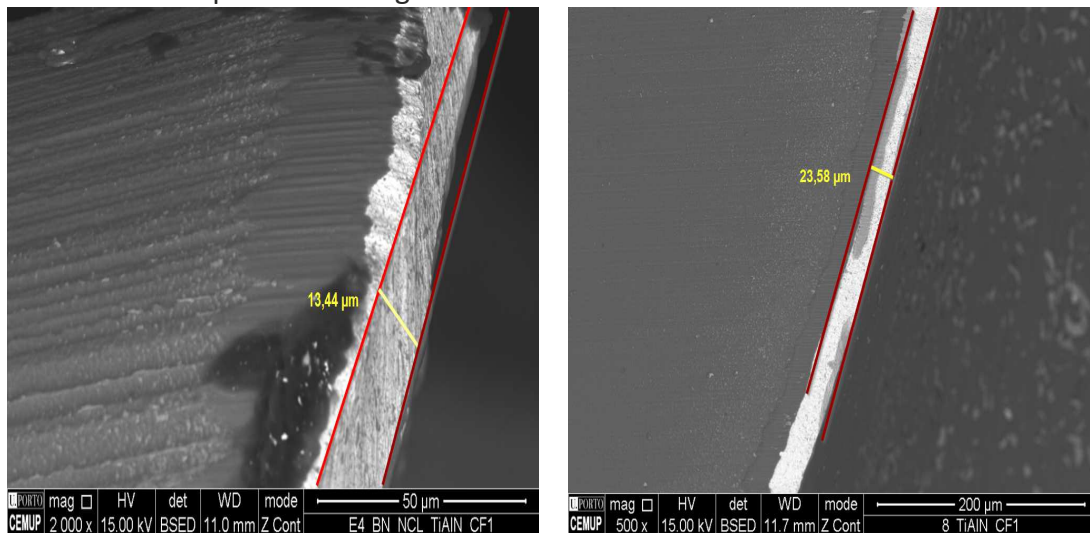


Figura 18 - Medição do desgaste de flanco. À esquerda, numa fresa de topo, à direita, numa fresa esférica.

A medição média do desgaste obtido para os diferentes ensaios, pode observar-se na Tabela 20. Para uma análise complementar, estes dados foram organizados em dois gráficos, onde é efetuada uma comparação do desgaste de flanco para os diferentes revestimentos, nas Figuras 19 e 20.

Tabela 20 - Média dos valores obtidos para o desgaste de flanco nos diferentes ensaios.

Ensaio	Desgaste de flanco (μm)
T01FTS404_1	$13,04 \pm 1,04$
T01FTS404_2	$8,05 \pm 0,66$
T01EFS404_1	$23,83 \pm 1,97$
T02EFS404_1	$23,51 \pm 1,78$
T02FTS404_1	$4,77 \pm 0,38$

Pela observação da Tabela 20, pode verificar-se que o desgaste é muito baixo em todas as ferramentas. As ferramentas revestidas a TiAlSiN sofrem a menor quantidade de desgaste de flanco em comparação com as ferramentas revestidas com TiAlN. No que diz respeito a este tipo de desgaste entre as ferramentas diferentes, pode verificar-se

que as ferramentas esféricas são as que sofrem maior desgaste enquanto que as de topo são as que menor desgaste sofrem.

Em suma, verifica-se que para estas operações, as ferramentas revestidas a TiAlSiN são as mais indicadas. Além disso, as ferramentas de topo, são também as que mostram melhor comportamento.

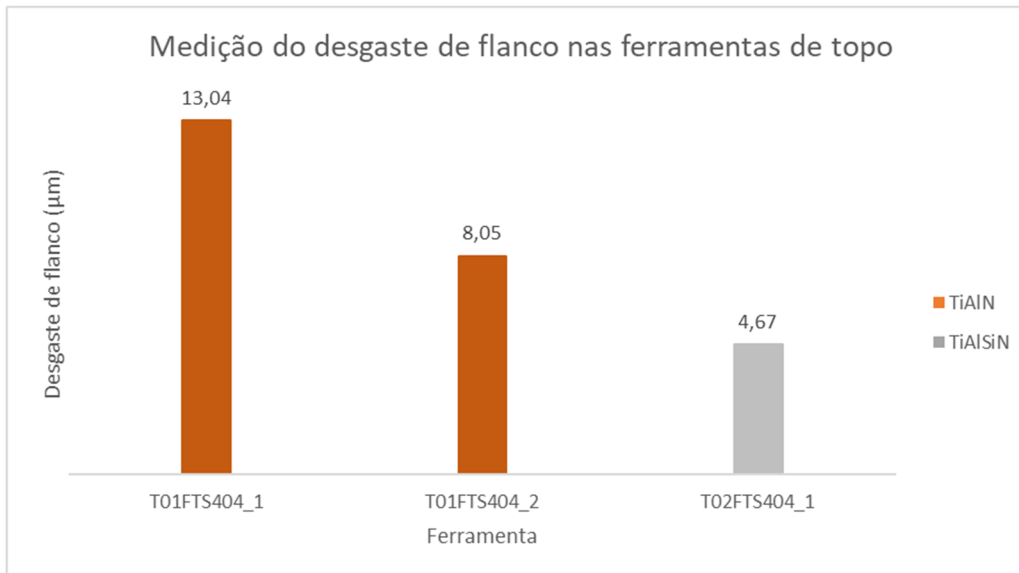


Figura 19 - Medição do desgaste de flanco nas ferramentas de topo.

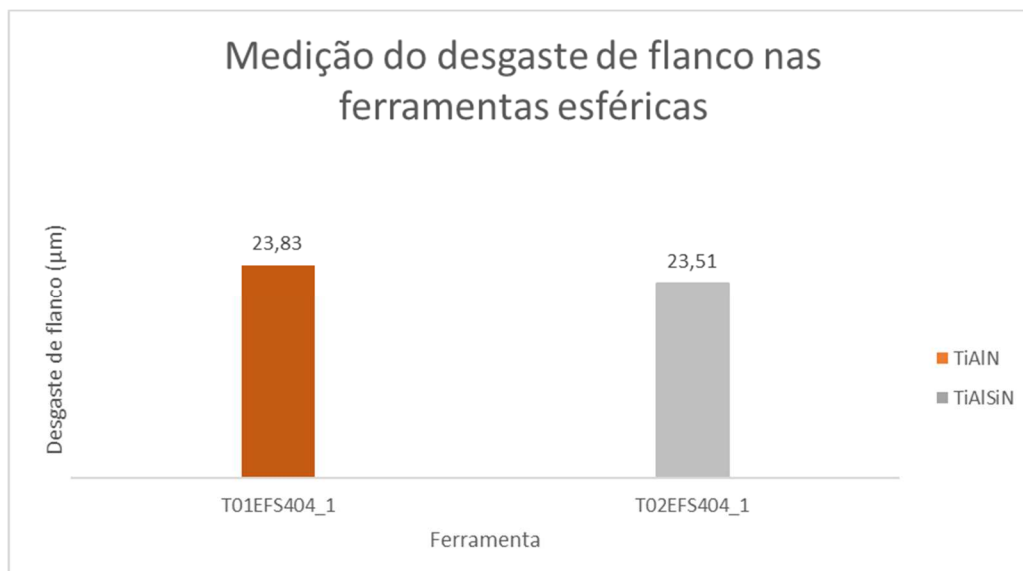


Figura 20 - Medição do desgaste de flanco nas ferramentas esféricas.

Para análise do desgaste, será efetuada uma observação e identificação dos tipos de desgaste das faces de ataque e de saída obtidas pelo SEM ao conjunto de ensaios de

fresas de topo, ao conjunto de ensaios de fresas esféricas e aos dois diferentes revestimentos utilizados.

Análise às fresas de topo

Na Figura 21, estão representadas faces de saída das fresas de topo, pode-se verificar maioritariamente a presença de desgaste de flanco e marcas de adesão.

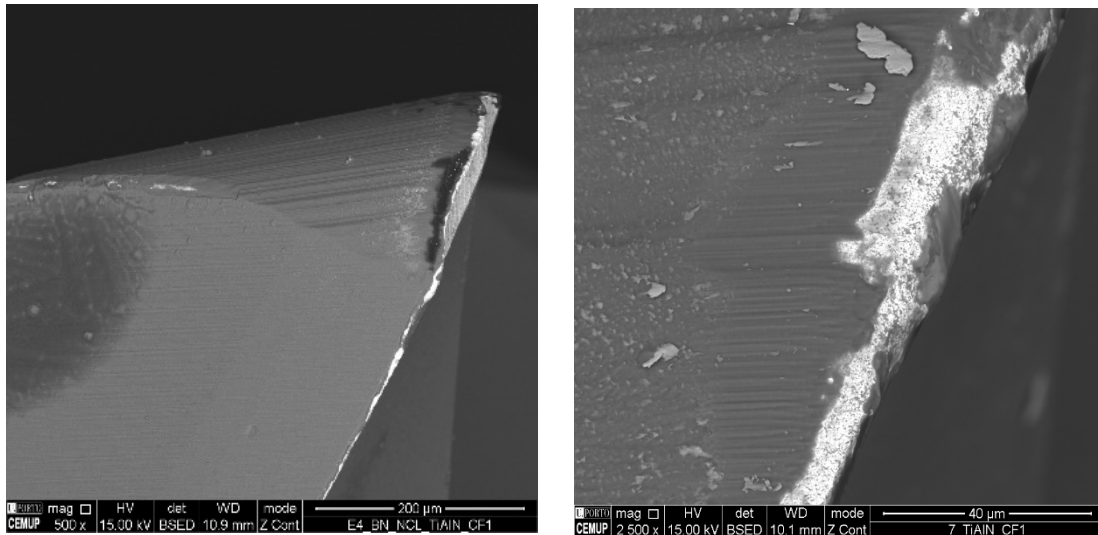


Figura 21 - Desgaste nas faces de saída das fresas de topo. À esquerda, face de saída de uma fresa de topo (500x), à direita, face de saída de uma fresa de topo (2500x).

Na Figura 22, podem ser observadas imagens de faces de ataque, onde o tipo de desgaste predominante é o desgaste de flanco.

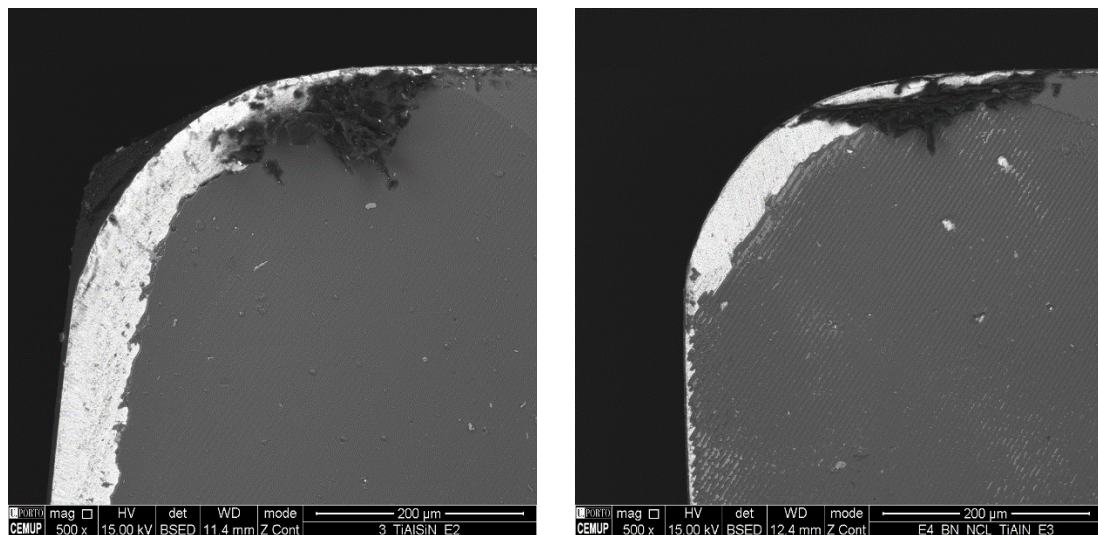


Figura 22 - Desgaste nas faces de ataque das fresas de topo. À esquerda, face de ataque de uma fresa de topo (500x), à direita, face de ataque de uma fresa de topo (500x).

Na Figura 23, pode-se verificar a medição da extensão do desgaste numa face de ataque nº3 de uma ferramenta de topo.

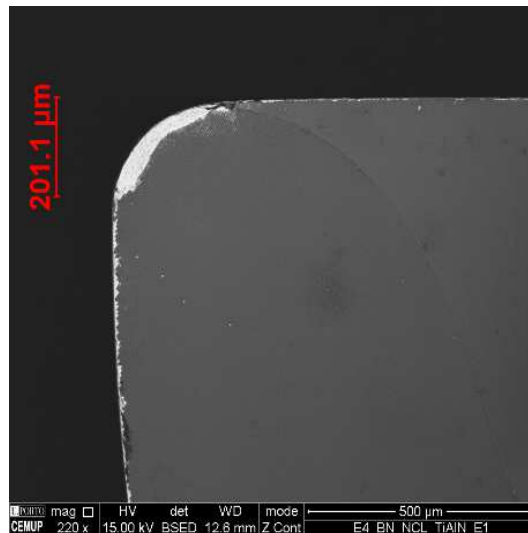


Figura 23 – Extensão do desgaste de flanco na face de ataque nº3 da ferramenta T01FTS404_1 (220x).

Análise às fresas esféricas

Na Figura 24, são representadas as faces de saída das fresas de topo, pode-se verificar que o tipo de desgaste mais pronunciado é o desgaste de flanco.

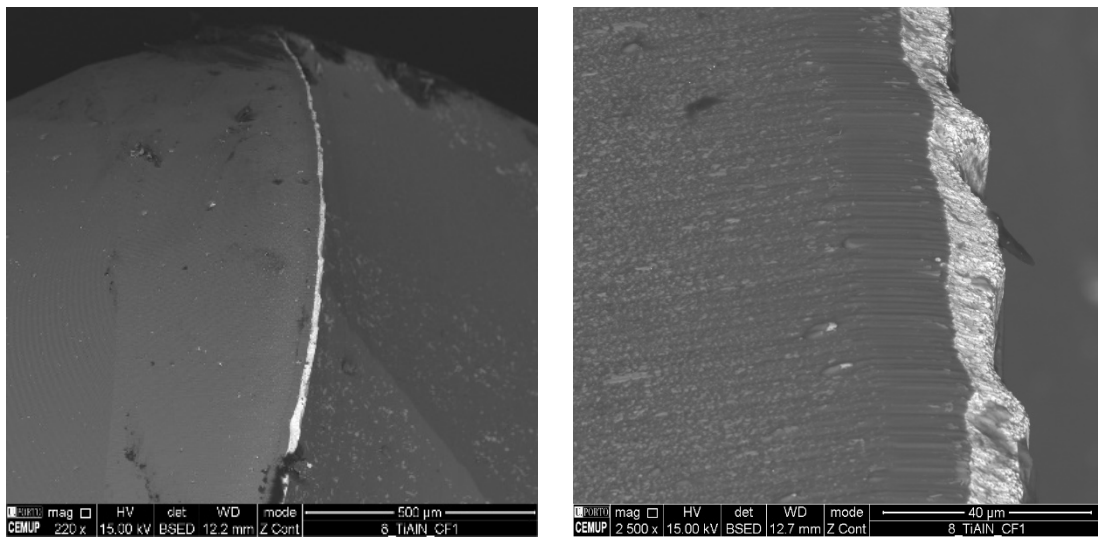


Figura 24 - Desgaste nas faces de saída das fresas esféricas. À esquerda, face de saída de uma fresa esférica (500x), à direita, face de saída de uma fresa esférica (2500x).

Na Figura 25, observam-se imagens de faces de ataque, o tipo de desgaste predominante é o desgaste de flanco e podem-se observar marcas de adesão.

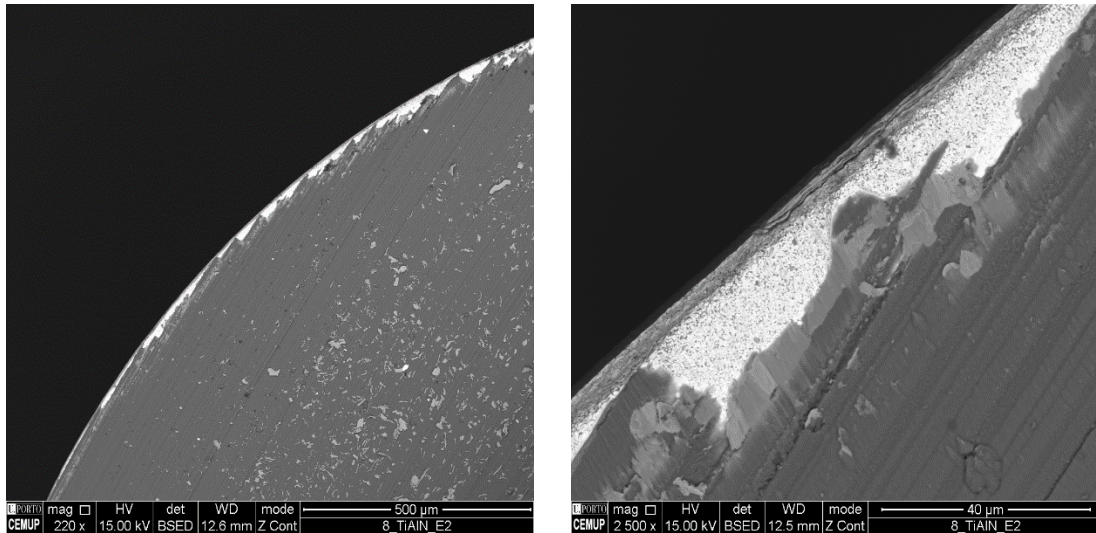


Figura 25 - Desgaste nas faces de ataque das fresas esféricas. À esquerda, face de ataque de uma fresa esféricas (220x), à direita, face de ataque de uma fresa esféricas (2500x).

Análise às ferramentas com revestimento TiAlN

Como se pôde observar na Tabela 20, as ferramentas com o revestimento de TiAlN, foram as que apresentaram maiores valores de desgaste de flanco. Na Figura 26, estão representadas faces de saída onde se verificam altos níveis de desgaste de flanco e também marcas de adesão.

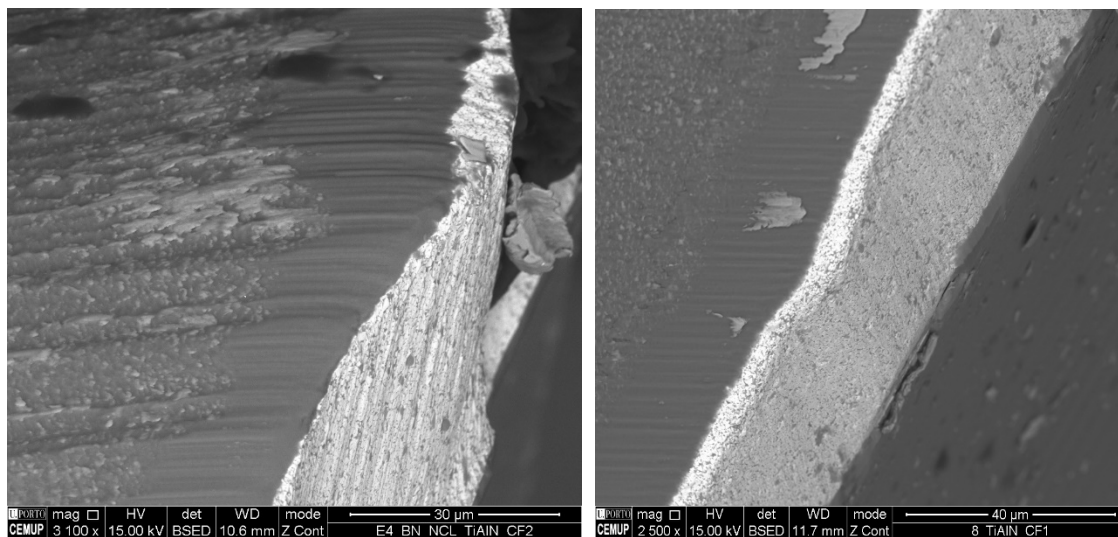


Figura 26 - Desgaste nas faces de saída de uma fresa de topo e esférica revestidas com TiAlN. À esquerda, face de saída de uma fresa de topo (3100x), à direita, face de saída de uma fresa esférica (2500x).

No que diz respeito às faces de ataque, na Figura 27, estão representadas imagens em que é visível um desgaste de flanco muito evidenciado.

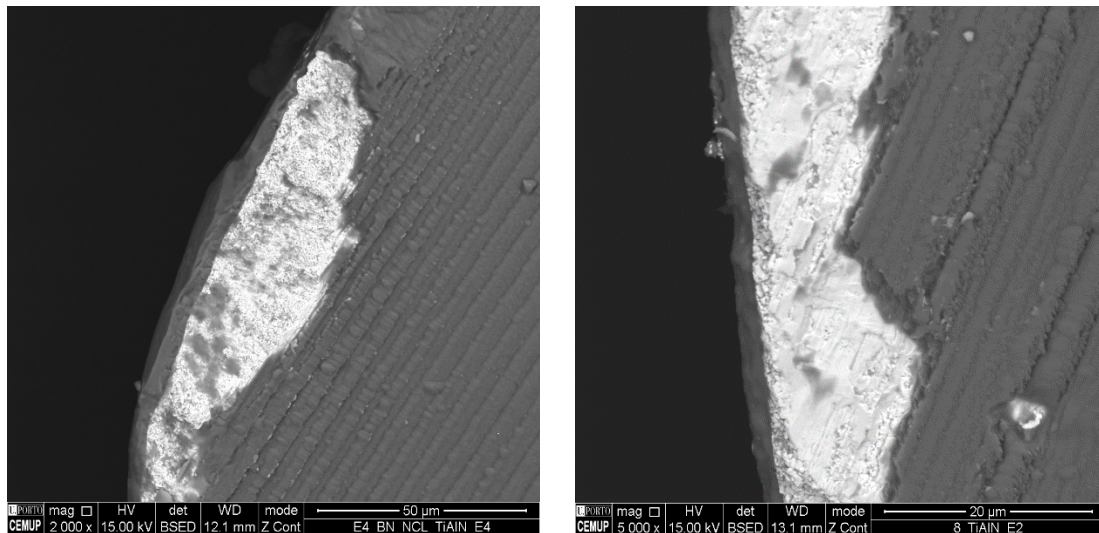


Figura 27 - Desgaste nas faces de ataque de uma fresa de topo e esférica revestidas com TiAlN. À esquerda, face de ataque de uma fresa de topo (2000x), à direita, face de ataque de uma fresa esférica (5000x).

Análise às ferramentas com revestimento TiAlSiN

Na Tabela 20, concluiu-se que as ferramentas com o revestimento de TiAlSiN apresentaram os menores valores de desgaste de flanco. Na Figura 28, podem observar-se faces de saída onde se verifica desgaste de flanco e também marcas de adesão.

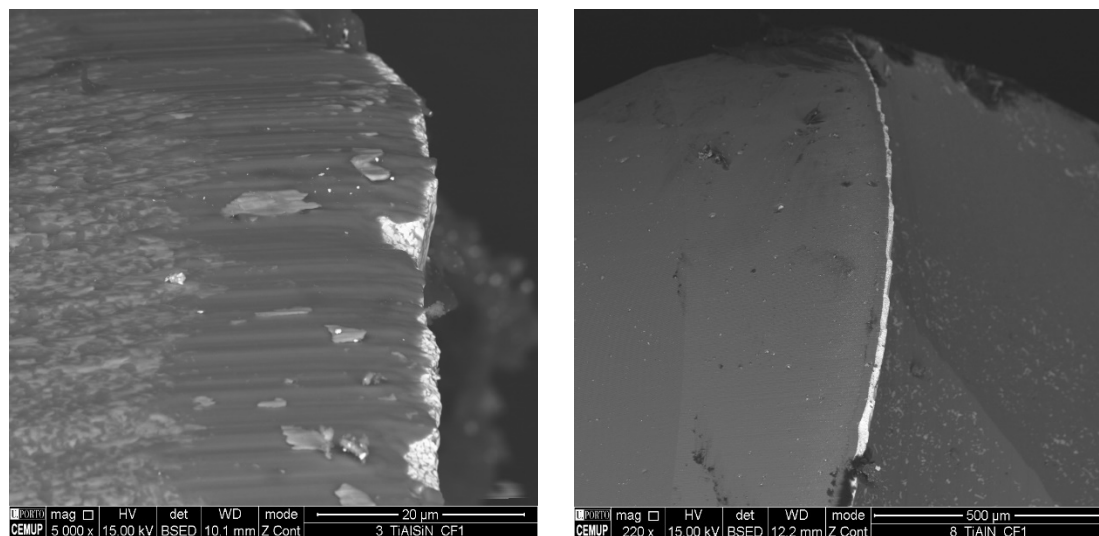


Figura 28 - Desgaste nas faces de saída de uma fresa de topo e esférica revestidas com TiAlSiN. À esquerda, face de saída de uma fresa de topo (5000x), à direita, face de saída de uma fresa esférica (220x).

Relativamente às faces de ataque, na Figura 29, estão representadas imagens onde se observa o desgaste de flanco e evidências de adesão.

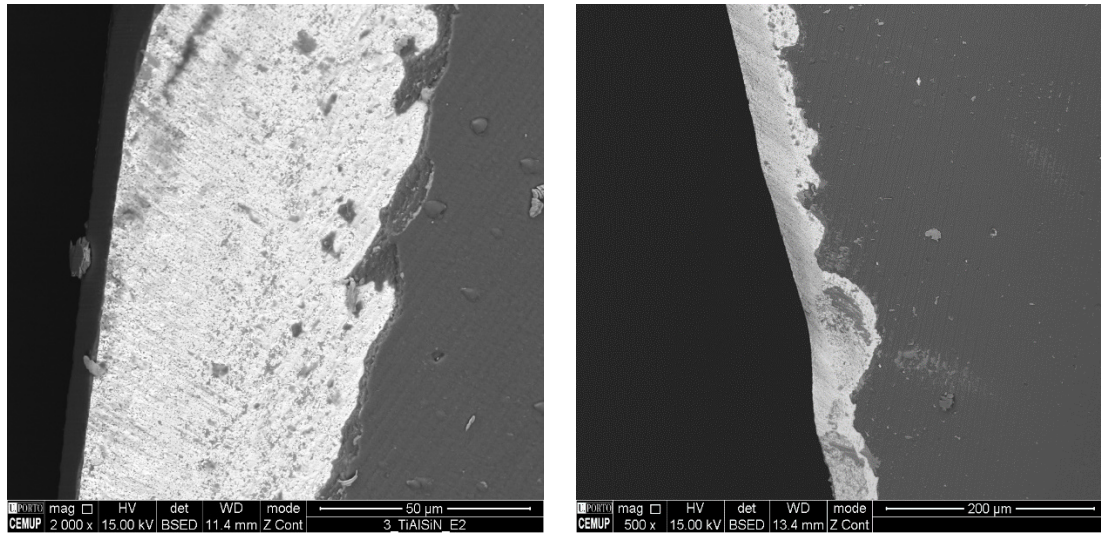


Figura 29 - Desgaste nas faces de ataque de uma fresa de topo e esférica revestidas com TiAlSiN. À esquerda, face de ataque de uma fresa de topo (2000x), à direita, face de ataque de uma fresa esférica (500x).

3.2.5 Mecanismo de desgaste

Com a análise SEM efetuada, foi possível verificar que ocorreram os mesmos tipos de desgaste nas ferramentas, tal como pelas observações efetuadas nas análises do subcapítulo anterior.

As identificações do revestimento, substrato e material aderido que será analisada neste subcapítulo, foram realizadas durante a análise SEM, por EDS.

Na Figura 30, pode observar-se a identificação de três zonas distintas numa ferramenta de topo revestida com TiAlN.

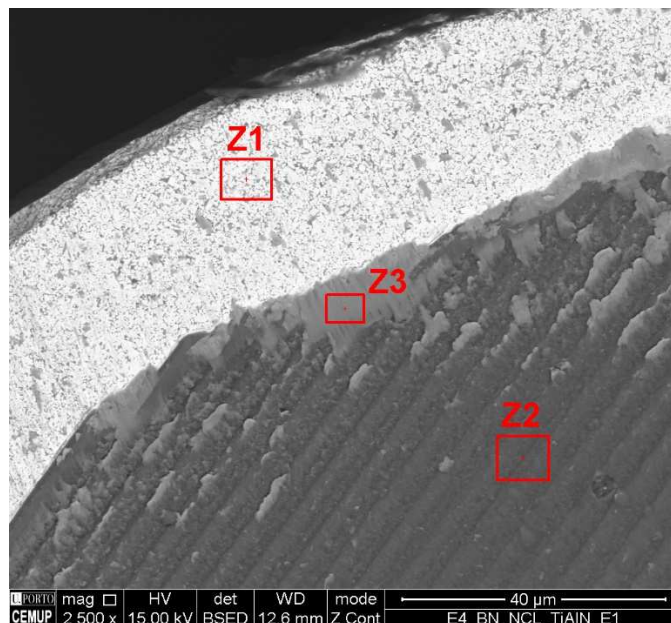


Figura 30 - Face de ataque de uma ferramenta de topo revestida com TiAlN (Z1 – substrato; Z2 – revestimento; Z3 – material aderido).

Na Figura 31, é possível verificar a composição destas zonas.

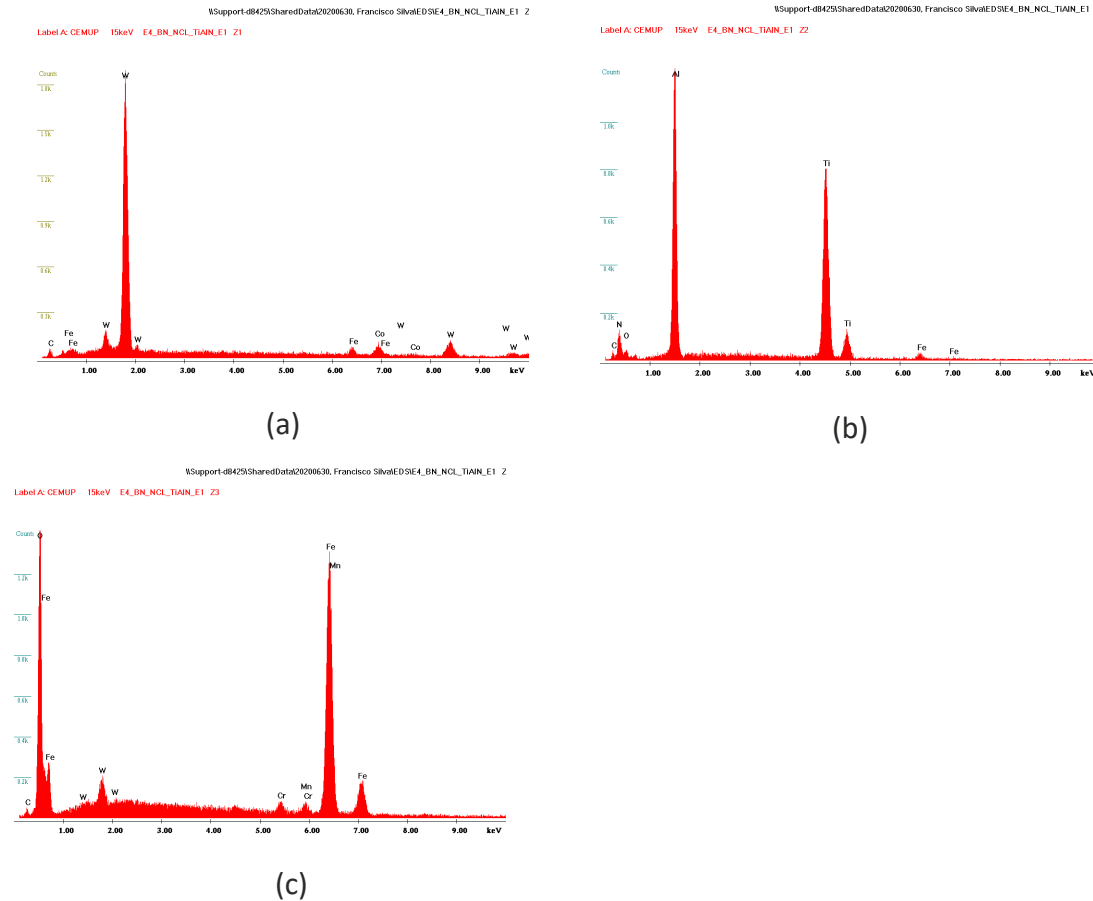


Figura 31 - Análise da composição das zonas identificadas na Figura 30 ((a) - Z1; (b) - Z2; (c) – Z3).

Na Figura 30, pode-se verificar que na Zona 2 observam-se pequenas marcas de abrasão tal como o material aderido, indicando que primeiro ocorre compressão na superfície de metal duro, que cede ligeiramente, fazendo com que o revestimento acabe por ceder. Após isto, ocorrerá a remoção do substrato.

As pequenas marcas a cinzento claro verificadas na Zona 2, são partículas de aço que são transportadas pela Zona 3.

Pode-se então verificar que, o primeiro mecanismo de desgaste a ocorrer, é a adesão do aço maquinado e, posteriormente, dá-se a abrasão e delaminação do revestimento. Numa outra ferramenta de topo (Figura 32), é possível visualizar diferentes tipos de desgaste numa face de saída.

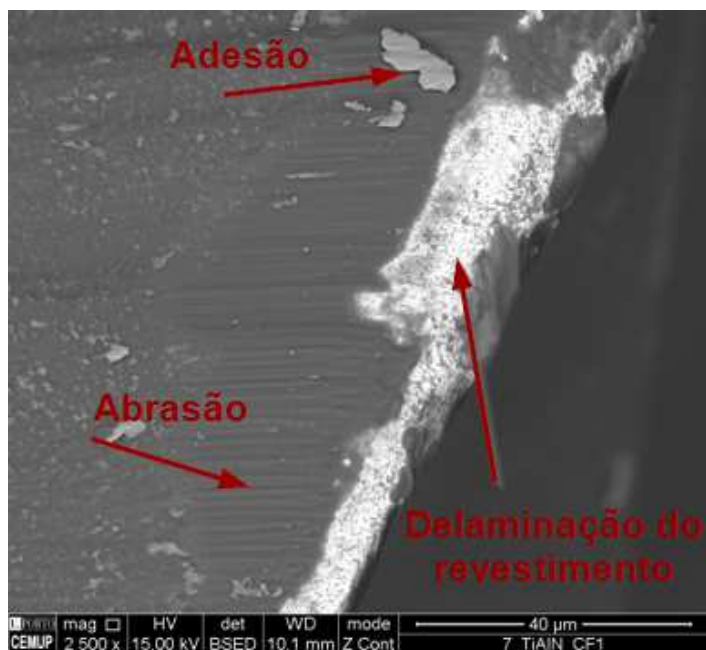


Figura 32 - Mecanismos de desgaste na face de saída numa ferramenta de topo.

O tipo de desgaste que se verifica nesta ferramenta (Figura 32), é comum a todas as ferramentas, como se pode ver, na Figura 33, o exemplo de uma ferramenta esférica.

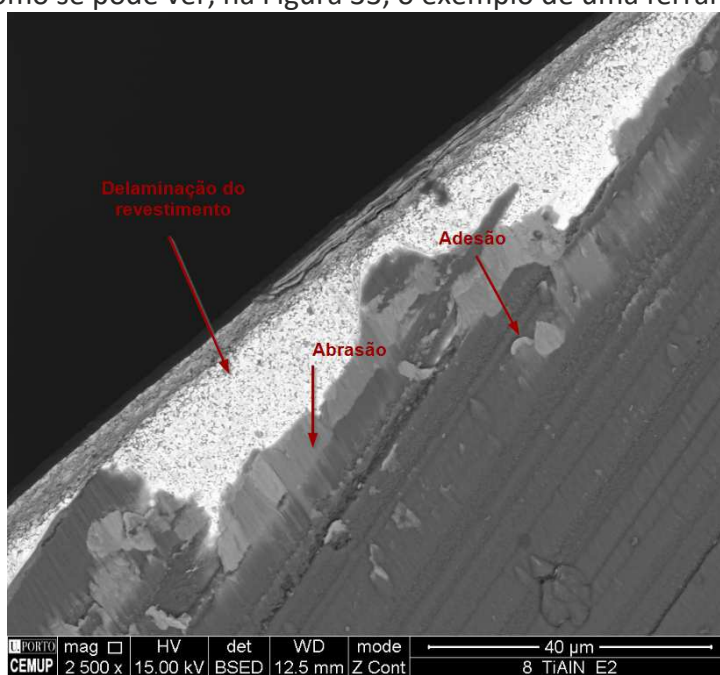


Figura 33 - Mecanismos de desgaste na face de saída de uma ferramenta esférica.

Esta adesão no bordo das ferramentas, vai promover a abrasão nessa zona, e, com o esforço proveniente do processo de maquinagem, esta abrasão, irá fazer com que ocorra a delaminação do revestimento.

3.2.6 Influência do substrato no desgaste

Uma característica fundamental do substrato, é possuir uma boa homogeneidade, para garantir uma deposição uniforme do revestimento.

Como se pode ver pela Figura 33, a existência de ranhuras no substrato, irá afetar o desgaste da ferramenta, permitindo que ocorra adesão nos vales mais profundos do substrato, delaminação do revestimento e desgaste adesivo.

Nas ferramentas esféricas, é mais perceptível, pois existem zonas da aresta de corte que permanecem com revestimento, sem ocorrer delaminação do mesmo (Figura 34).

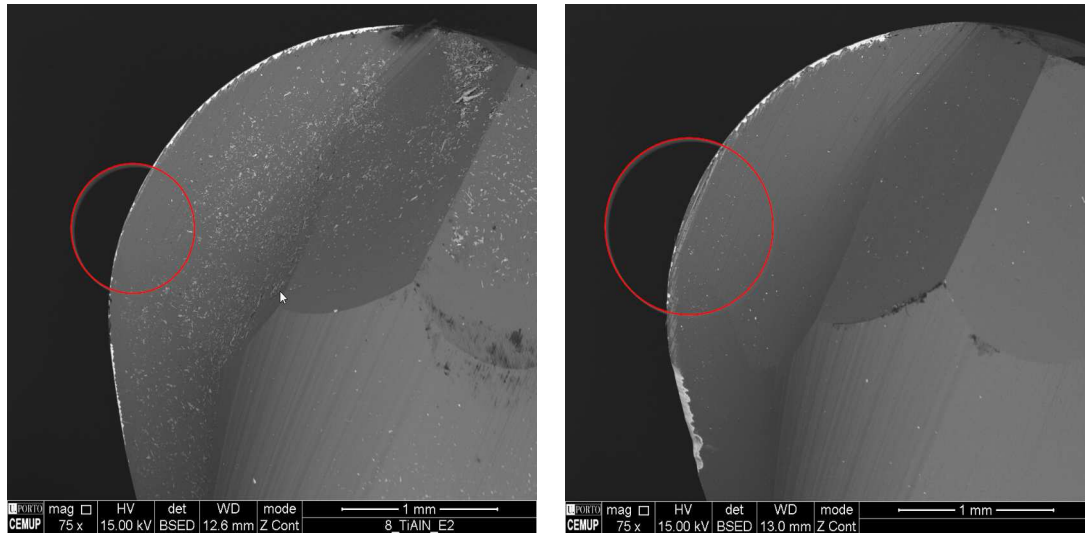


Figura 34 - Face de ataque de duas ferramentas de corte, com indicação a vermelho da zona de desgaste reduzido

CONCLUSÕES

4.1 CONCLUSÕES

4.2 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

4.1 CONCLUSÕES

Este projeto teve como objetivo estudar e analisar o desempenho de ferramentas esféricas e de topo revestidas com TiAlN e TiAlSiN.

Dos ensaios realizados tiram-se as seguintes conclusões:

- O revestimento TiAlSiN mostrou melhor comportamento para maquinagem por acabamento do que o revestimento TiAlN, com valores de desgaste de flanco inferiores;
- O desgaste de flanco, a abrasão, adesão e delaminação do revestimento foram fenómenos verificados em todas as ferramentas e, foi possível concluir que o primeiro mecanismo de desgaste a ocorrer foi a adesão, seguido da abrasão e posterior delaminação do revestimento;
- Para o desgaste das ferramentas, não foi estabelecido um critério de vida útil para as ferramentas, pois o principal objetivo foi entender os mecanismos de falha ao desgaste do revestimento, e não explorar as potencialidades totais da ferramenta.
- A nível de rugosidades, as ferramentas de topo mostraram valores semelhantes nas direções transversal e longitudinal, enquanto que para as ferramentas esféricas houve grande disparidade entre as direções mensuradas com ênfase na direção longitudinal que foi muito superior a transversal. No entanto, esta diferença foi menos acentuada nas ferramentas esféricas revestidas a TiAlN;
- No que diz respeito às forças de corte, a partir dos 2 metros de corte, verificou-se que algumas forças começavam a subir, podendo ser um indicativo de falha da ferramenta;
- Verificou-se que a heterogeneidade do substrato, foi um fator que influenciou o comportamento do desgaste. As ranhuras provenientes do processo de fabrico destas ferramentas, influenciaram o desgaste das ferramentas.

4.2 PROPOSTA DE TRABALHOS FUTUROS

Para projetos futuros, seria interessante avaliar os seguintes pontos:

- Uma amostra maior de ferramentas com o revestimento TiAlSiN;
- Analisar mais ensaios com ferramentas esféricas;
- Verificar a influência da velocidade de corte;
- Ensaiar as ferramentas a comprimentos de corte mais baixos.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

- [1] V. F. C. Sousa *et al.*, “Cutting forces assessment in cnc machining processes: A criticalreview review,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 16, pp. 1–26, 2020, doi: 10.3390/s20164536.
- [2] C. Costa, F. J. G. Silva, R. M. Gouveia, and R. P. Martinho, “Development of hydraulic clamping tools for the machining of complex shape mechanical components,” *Procedia Manuf.*, vol. 17, pp. 563–570, 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.10.097.
- [3] M. Corporation, “HCR-5000S.” <https://www.mazakusa.com/machines/hcr-5000s/> (accessed Dec. 28, 2019).
- [4] S. Coromant, “Faceamento.” <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/pages/face-milling.aspx> (accessed Dec. 28, 2019).
- [5] A. E. Diniz and J. C. Filho, “Influence of the relative positions of tool and workpiece on tool life, tool wear and surface finish in the face milling process,” *Wear*, vol. 232, no. 1, pp. 67–75, 1999, doi: 10.1016/S0043-1648(99)00159-3.
- [6] S. Coromant, “Fresamento de cantos a 90 graus.” <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/pages/shoulder-milling.aspx> (accessed Dec. 28, 2019).
- [7] S. Coromant, “O que é fresamento de perfis?” <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/pages/profile-milling.aspx> (accessed Dec. 28, 2019).
- [8] J. C. Lin and C. C. Tai, “Accuracy optimisation for mould surface profile milling,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 15, no. 1, pp. 15–25, 1999, doi: 10.1007/s001700050034.
- [9] S. Coromant, “Canais ou fresamento de canais.” <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/pages/groove-or-slot-milling.aspx> (accessed Dec. 28, 2019).
- [10] Dormer, “Fresamento.”
- [11] ARRAY, “FRESAGEM CONCORDANTE E DISCORDANTE.” http://formacao.training.pt/?page_id=2751 (accessed Dec. 28, 2019).
- [12] S. Coromant, “Fórmulas e definições de fresamento.” <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/machining-formulas-definitions/pages/milling.aspx> (accessed Feb. 03, 2020).
- [13] X. Tian, J. Zhao, J. Zhao, Z. Gong, and Y. Dong, “Effect of cutting speed on cutting

- forces and wear mechanisms in high-speed face milling of Inconel 718 with Sialon ceramic tools," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 69, no. 9–12, pp. 2669–2678, 2013, doi: 10.1007/s00170-013-5206-4.
- [14] X. Cui, J. Zhao, and X. Tian, "Cutting forces, chip formation, and tool wear in high-speed face milling of AISI H13 steel with CBN tools," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 64, no. 9–12, pp. 1737–1749, 2013, doi: 10.1007/s00170-012-4137-9.
- [15] H. Namazi, A. Akhavan Farid, and C. T. Seng, "Complexity-based analysis of the influence of tool geometry on cutting forces in rough end milling," *Fractals*, vol. 26, no. 5, pp. 1–7, 2018, doi: 10.1142/S0218348X18500780.
- [16] ISO, "ISO 3002-1:1982 'Basic quantities in cutting and grinding — Part 1: Geometry of the active part of cutting tools — General terms, reference systems, tool and working angles, chip breakers.'" ISO.
- [17] ANSI, "ANSI/ASME B94.50-1975 'Basic Nomenclature and Definitions for Single-Point Cutting Tools,'" *ANSI Stand*, 1975.
- [18] Sandvik Coromant, "Fresamento Introdução."
- [19] P. H. J.-Y. Dépincé, "Active integration of tool deflection effects in end milling . Part 1 . Prediction of milled surfaces," vol. 46, pp. 937–944, 2006, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2005.08.005.
- [20] WORDPRESS, "SELECÇÃO DA FERRAMENTA DE CORTE." http://formacao.training.pt/?page_id=2764 (accessed Apr. 29, 2020).
- [21] J. P. Davim, *Machining - Fundamentals and Recent Advances*, 1st ed. Springer, 2008.
- [22] Dasarathi GV, "End mill helix angle selection." <https://www.cnctimes.com/editorial/end-mill-helix-angle-selection> (accessed Apr. 28, 2020).
- [23] M. MATERIALS, "Helix Angle." <http://carbide.mmc.co.jp/permanent/courses/70/helix-angle.html> (accessed Apr. 29, 2020).
- [24] S. Coromant, "Fresamento de cantos internos." <https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/knowledge/milling/pages/milling-inside-corners.aspx> (accessed Jun. 14, 2020).
- [25] S. Hinduja, A. Roaydi, P. Philimis, and G. Barrow, "Determination of optimum cutter diameter for machining 2 . - O pockets," vol. 41, pp. 687–702, 2001.
- [26] Demaquinasyherramientas, "Fresas de discos clasificadas de acuerdo al tipo de trabajo a ejecutar." <https://www.demaquinasyherramientas.com/mecanizado/fresa-disco-como-elegir> (accessed Jun. 14, 2020).
- [27] W. Ferramentas, "Fresas de Topo Esférico." http://www.wtferramentas.com.br/index.php?route=product/product&product_id=56 (accessed Jun. 14, 2020).

- [28] L. Chian Seng Machinery Tool Co., "FRESA COM PONTA DE CARBONETO DE ÂNGULO ÚNICO," [Online]. Available: https://www.chian-seng.com/pt/product/Single-Angle-Side-Milling-Cutter-Welding_AHTC.html.
- [29] S. Coromant, "CoroMill Plura - fresas de topo inteiriças." https://www.sandvik.coromant.com/pt-pt/products/coromill_plura/Pages/versatile.aspx (accessed Jun. 14, 2020).
- [30] WALTER, "Walter Prototyp TMD thread milling cutter." https://www.walter-tools.com/en-gb/tools/standard_products/threading/overview/threading_milling_cutter/tmd/Pages/default.aspx (accessed Jun. 14, 2020).
- [31] F. Klocke, *Manufacturing processes 1*, no. 7858. 2011.
- [32] G. T. Smith, *Cutting Tool Technology*, Springer-V. Springer-Verlag London, 2008.
- [33] H. McCauley, C.; Oberg, E.; Jones, F.; Horton, H. and Ryffel, *Machinery's Handbook*, 30th ed. INDUSTRIAL PRESS, 2016.
- [34] M. P. Groover, *Fundamental of Modern Manufacturing Materials, Processes, and Systems*. 2012.
- [35] J. P. Davim, *Princípios da Maquinagem*, 2nd ed. Publindústria, 2008.
- [36] S. Coromant, "Knowledge Database: Materials," 2015, [Online]. Available: <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/materials/>.
- [37] T. Childs, "Metal Machining," *Met. Mach.*, 2000, doi: 10.1016/c2009-0-23990-0.
- [38] K. Holmberg, A. Matthews, and H. Ronkainen, "Coatings tribology - Contact mechanisms and surface design," in *Tribology International*, 1998, vol. 31, no. 1–3, doi: 10.1016/S0301-679X(98)00013-9.
- [39] G. Chryssolouris, *Manufacturing Systems: Theory and Practice*. 2006.
- [40] B. Fotovvati, N. Namdari, and A. Dehghanghadikolaei, "On coating techniques for surface protection: A review," *J. Manuf. Mater. Process.*, vol. 3, no. 1, 2019, doi: 10.3390/jmmp3010028.
- [41] S.-M. J. and S.-Y. B. Kyoung-Ho Kim, Minh-Tan Ha, Yong-Jin Kwon, Heesoo Lee, "Growth of 2-Inch α -Ga₂O₃ Epilayers via Rear-Flow-Controlled Mist Chemical Vapor Deposition," 2019, doi: 10.1149/2.0301907jss.
- [42] M. Ohring, *Materials Science of Thin Films*, 2nd ed. Academic Press, 2002.
- [43] D. M. Mattox, *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing*, 2nd ed. Elsevier Inc., 2010.
- [44] A. Baptista, F. Silva, J. Porteiro, J. Míguez, and G. Pinto, "Sputtering physical vapour deposition (PVD) coatings: A critical review on process improvement and market trend demands," *Coatings*, vol. 8, no. 11, 2018, doi: 10.3390/COATINGS8110402.
- [45] G. Pinto, F. Silva, J. Porteiro, J. Míguez, and A. Baptista, "Numerical simulation

- applied to PVD reactors: An overview,” *Coatings*, vol. 8, no. 11, pp. 1–20, 2018, doi: 10.3390/COATINGS8110410.
- [46] Q. M. Mehran, M. A. Fazal, A. R. Bushroa, and S. Rubaiee, “A Critical Review on Physical Vapor Deposition Coatings Applied on Different Engine Components,” *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.*, vol. 43, no. 2, pp. 158–175, 2018, doi: 10.1080/10408436.2017.1320648.
- [47] G. Pinto, F. J. G. Silva, J. Porteiro, J. L. Míguez, A. Baptista, and L. Fernandes, “A critical review on the numerical simulation related to Physical Vapour Deposition,” *Procedia Manuf.*, vol. 17, pp. 860–869, 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.10.138.
- [48] R. J. M.-P. Akhlesh Lakhtakia, *Engineered Biomimicry*, 1st ed. Elsevier, 2013.
- [49] G. Kaur, *Biomedical, Therapeutic and Clinical Applications of Bioactive Glasses*, 1st ed. Woodhead Publishing, 2019.
- [50] a Mubarak, E. Hamzah, and M. R. M. Toff, “Review of physical vapour deposition (PVD) techniques for hard coating,” *J. Mek.*, vol. 20, no. 20, pp. 42–51, 2005.
- [51] A. Moarrefzadeh, “Simulation and modeling of physical vapor deposition (PVD) process,” *WSEAS Trans. Appl. Theor. Mech.*, vol. 7, no. 2, pp. 106–111, 2012.
- [52] A. Baptista, F. J. G. Silva, J. Porteiro, J. L. Míguez, G. Pinto, and L. Fernandes, “On the Physical Vapour Deposition (PVD): Evolution of Magnetron Sputtering Processes for Industrial Applications,” *Procedia Manuf.*, vol. 17, pp. 746–757, 2018, doi: 10.1016/j.promfg.2018.10.125.
- [53] R. K. Upadhyay and L. A. Kumaraswamidhas, “Investigation of monolayer-multilayer PVD nitride coating,” *Surf. Eng.*, vol. 31, no. 2, pp. 123–133, 2015, doi: 10.1179/1743294414Y.0000000344.
- [54] M. Khadem, O. V. Penkov, H. K. Yang, and D. E. Kim, “Tribology of multilayer coatings for wear reduction: A review,” *Friction*, vol. 5, no. 3, pp. 248–262, 2017, doi: 10.1007/s40544-017-0181-7.
- [55] V. F. C. Sousa and F. J. G. Silva, “Recent advances on coated milling tool technology—a comprehensive review,” *Coatings*, vol. 10, no. 3, 2020, doi: 10.3390/coatings10030235.
- [56] H. Holleck and V. Schier, “Multilayer PVD coatings for wear protection,” *Surf. Coatings Technol.*, vol. 76–77, no. 1995, pp. 328–336, 1995, doi: 10.1016/0257-8972(95)02555-3.
- [57] F. Czerwinski, “Corrosion of Materials in Liquid Magnesium Alloys and Its Prevention,” *Magnes. Alloy. - Prop. Solid Liq. States*, 2014, doi: 10.5772/59181.
- [58] M. Stueber, H. Holleck, H. Leiste, K. Seemann, S. Ulrich, and C. Ziebert, “Concepts for the design of advanced nanoscale PVD multilayer protective thin films,” *J. Alloys Compd.*, vol. 483, no. 1–2, pp. 321–333, 2009, doi: 10.1016/j.jallcom.2008.08.133.
- [59] F. Silva, R. Martinho, M. Andrade, A. Baptista, and R. Alexandre, “Improving the

- wear resistance of moulds for the injection of glass fibre-reinforced plastics using PVD coatings: A comparative study,” *Coatings*, vol. 7, no. 2, 2017, doi: 10.3390/coatings7020028.
- [60] F. J. G. Silva, R. P. Martinho, R. J. D. Alexandre, and A. P. M. Baptista, “Increasing the wear resistance of molds for injection of glass fiber reinforced plastics,” *Wear*, vol. 271, no. 9–10, pp. 2494–2499, 2011, doi: 10.1016/j.wear.2011.01.074.
- [61] F. J. G. Silva, R. P. Martinho, C. Martins, H. Lopes, and R. M. Gouveia, “Machining GX2CrNiMoN26-7-4 DSS alloy: Wear analysis of TiAlN and TiCN/Al₂O₃/TiN coated carbide tools behavior in rough end milling operations,” *Coatings*, vol. 9, no. 6, pp. 1–21, 2019, doi: 10.3390/COATINGS9060392.
- [62] R. P. Martinho, M. F. C. Andrade, F. J. G. Silva, R. J. D. Alexandre, and A. P. M. Baptista, “Micro-abrasion wear behaviour of TiAlCrSiN nanostructured coatings,” *Wear*, vol. 267, no. 5–8, pp. 1160–1165, 2009, doi: 10.1016/j.wear.2008.12.063.
- [63] F. J. G. Silva, R. P. Martinho, R. J. D. Alexandre, and A. P. M. Baptista, “Wear resistance of TiAlSiN thin coatings,” *J. Nanosci. Nanotechnol.*, vol. 12, no. 12, pp. 9094–9101, 2012, doi: 10.1166/jnn.2012.6760.
- [64] H. El-Hofy, *Fundamentals of machining processes: conventional and nonconventional processes*, 3rd ed. CRC Press, 2019.
- [65] S. Dolinšek and J. Kopač, “Mechanism and types of tool wear ; particularities in advanced cutting materials,” vol. 19, no. 1, pp. 11–18, 2006.
- [66] T. C. T. W.F. Gale, *Smithells Metals Reference Book*, 8th ed. Butterworth-Heinemann.
- [67] O. Haiko, P. Kaikkonen, M. Somani, K. Valtonen, and J. Kömi, “Characteristics of carbide-free medium-carbon bainitic steels in high-stress abrasive wear conditions,” *Wear*, vol. 456–457, 2020, doi: 10.1016/j.wear.2020.203386.
- [68] P. K. Katiyar, “A comprehensive review on synergy effect between corrosion and wear of cemented tungsten carbide tool bits: A mechanistic approach,” *Int. J. Refract. Met. Hard Mater.*, vol. 92, p. 105315, 2020, doi: 10.1016/j.ijrmhm.2020.105315.
- [69] S. Coromant, “Materials - Wear on cutting edges.” <https://www.sandvik.coromant.com/en-gb/knowledge/materials/pages/wear-on-cutting-edges.aspx> (accessed Sep. 23, 2020).
- [70] V. P. Astakhov and J. P. Davim, “Tools (geometry and material) and tool wear,” *Mach. Fundam. Recent Adv.*, pp. 29–57, 2008, doi: 10.1007/978-1-84800-213-5_2.
- [71] J. P. Davim, *Modern Machining Technology - A practical guide*, 1st ed. Woodhead Publishing Limited, 2011.
- [72] F. Bleicher, C. M. Ramsauer, R. Oswald, N. Leder, and P. Schoerghofer, “Method for determining edge chipping in milling based on tool holder vibration measurements,” *CIRP Ann.*, vol. 69, no. 1, pp. 101–104, 2020, doi:

- 10.1016/j.cirp.2020.04.100.
- [73] X. Cui, J. Zhao, and Y. Dong, "The effects of cutting parameters on tool life and wear mechanisms of CBN tool in high-speed face milling of hardened steel," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 66, no. 5–8, pp. 955–964, 2013, doi: 10.1007/s00170-012-4380-0.
- [74] R. P. Martinho, F. J. G. Silva, and A. P. M. Baptista, "Cutting forces and wear analysis of Si3N4 diamond coated tools in high speed machining," *Vacuum*, vol. 82, no. 12, pp. 1415–1420, 2008, doi: 10.1016/j.vacuum.2008.03.065.
- [75] T. Sugihara and T. Enomoto, "Crater and flank wear resistance of cutting tools having micro textured surfaces," *Precis. Eng.*, vol. 37, no. 4, pp. 888–896, 2013, doi: 10.1016/j.precisioneng.2013.05.007.
- [76] M. M. De Aguiar, A. E. Diniz, and R. Pederiva, "Correlating surface roughness, tool wear and tool vibration in the milling process of hardened steel using long slender tools," *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 68, pp. 1–10, 2013, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2013.01.002.
- [77] M. Boujelbene, M. B. Mhamdi, B. Ayadi, and H. P. Singh, "Tool wear analysis of ball nose end mill in the finish machining of free form surfaces," *Mater. Today Proc.*, vol. 26, no. xxxx, pp. 1289–1292, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2020.02.257.
- [78] R. P. Martinho, F. J. G. Silva, C. Martins, and H. Lopes, "Comparative study of PVD and CVD cutting tools performance in milling of duplex stainless steel," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 102, no. 5–8, pp. 2423–2439, 2019, doi: 10.1007/s00170-019-03351-8.
- [79] M. F. M. Suhaimi and N. A. M. Salleh, "A case study on the improvement of productivity and efficiency of a quality control line for a cutting tool manufacturer," *J. Mech. Eng.*, vol. 5, no. Specialissue1, pp. 222–239, 2018.
- [80] I. Durazo-Cardenas, P. Shore, X. Luo, T. Jacklin, S. A. Impey, and A. Cox, "3D characterisation of tool wear whilst diamond turning silicon," *Wear*, vol. 262, no. 3–4, pp. 340–349, 2007, doi: 10.1016/j.wear.2006.05.022.
- [81] M. Álvarez, J. Salguero, J. A. Sánchez, M. Huerta, and M. Marcos, "SEM and EDS characterisation of layering TiOx growth onto the cutting tool surface in hard drilling processes of Ti-Al-V alloys," *Adv. Mater. Sci. Eng.*, vol. 2011, 2011, doi: 10.1155/2011/414868.
- [82] F. J. G. Silva, R. B. Casais, R. P. Martinho, and A. P. M. Baptista, "Role of abrasive material on micro-abrasion wear tests," *Wear*, vol. 271, no. 9–10, pp. 2632–2639, 2011, doi: 10.1016/j.wear.2010.11.050. [83] Mahr, "Production-Related Roughness Measuring . Mobile With Marsurf," *MarSurf. Surf. Meas. Instruments*, p. 20, 2005.
- [84] U.Porto, "CENTRO DE MATERIAIS DA UNIVERSIDADE DO PORTO - Laboratório de Microscopia Eletrónica de Varrimento e Microanálise por Raios X." <https://cemup.up.pt/> (accessed Sep. 26, 2020).

ANEXOS

6.1 ANEXO 1

6 ANEXOS

6.1 ANEXO 1

Tabela 21 - Informação do dinamómetro KISTLER 9171a.

Informação do dinamómetro KISTLER 9171a			
Modelo	9171A		
Caraterística		Unidade	Valor
Velocidade máxima		min ⁻¹	12000
Alcance de medição, nominal	F _x , F _y	N	-20000 ...20000
	F _z	N	-30000 ...30000
	M _z	Nm	-1000 ...1000
Temperatura de operação		°C	0 ... 60
Linearidade		%FSO	≤± 1,0
Histerese		%FSO	≤1,0
Taxa de amostragem por canal		kHz	22,200